

Technischer Leitfaden

In-situ Aerobisierung von Altablagerungen

erstellt im Forschungsprojekt
INTERLAND

März 2006

Technischer Leitfaden

In-situ Aerobisierung von Altablagerungen

Autoren: Roman Prantl¹, Maria Tesar¹, Marion Huber-Humer¹, Carolin Heiss-Ziegler¹



¹Institut für Abfallwirtschaft; Universität für Bodenkultur, 1190 Wien, Österreich

Gefördert aus Mitteln des
Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Förderungsmanagement by Kommunalkredit Public Consulting GmbH



lebensministerium.at



Vorwort

Der hier vorliegende Leitfaden wurde neben weiteren Leitfäden im Zuge des Projektes INTERLAND (INnovative TEchnologies for Remediation of LANDfills and Contaminated Soils; <http://interland.arcs.ac.at>) erstellt. Ziel dieses Projektes war es, in situ Methoden für die Sanierung von Altlasten und kontaminierten Standorten weiterzuentwickeln und die wissenschaftlichen Grundlagen zu erarbeiten, die eine fundierte Anwendung der Methoden in der Praxis ermöglichen. Die nach derzeitigem Kenntnisstand mögliche praktische Anwendung der Ergebnisse des Forschungsprojektes wird in den vorliegenden Leitfäden dargestellt. Damit soll ein Beitrag zur Etablierung der Methoden als „Stand der Technik“ geleistet werden. Die Leitfäden richten sich daher vor allem als Entscheidungshilfe an Amtssachverständige und Planer, ob eine bestimmte Methode für einen aktuellen Sanierungsfall prinzipiell geeignet ist und inwieweit sie dem Stand der Technik entspricht. Diese Information wird vor allem in den Kapiteln „Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen (ERB)“ sowie „Vorversuche“ gegeben. Darüber hinaus gibt der Leitfaden Informationen zu den Qualitätsanforderungen an die jeweilige Methode in den Kapiteln „Qualitätssicherung des Verfahrens“ und „Monitoring“. Schlussendlich werden als Entscheidungshilfe Informationen zur „Erreichbaren Restkontamination“, zu den „Kosten“ und zu „Nutzung/Nachnutzung“ gegeben.

Der Inhalt gibt ausschließlich die fachliche Meinung der Autoren wieder. Eine allgemeine technische oder rechtliche Gültigkeit oder ein diesbezüglicher Meinungsstand des Förderungsgebers kann daraus nicht abgeleitet werden.

Inhaltsverzeichnis

1	GRUNDLAGEN	5
1.1	Wirkungsweise und Zielsetzung.....	5
1.2	Gesetzliche Grundlagen und Normen.....	6
2	EINSATZBEREICHE UND EINSATZRANDBEDINGUNGEN	6
2.1	Abfalleigenschaften	8
2.2	Emissionsbild	8
2.3	Standort und Infrastruktur	8
2.4	Technische Barrieren	9
3	ERFORDERLICHE VORKENNTNISSE UND EMPFOHLENE VORVERSUCHE	9
3.1	Belüftungs- und Absaugversuch (Vorversuch 1)	10
3.2	Gefäßversuch (Vorversuch 2).....	11
4	ERREICHBARE EMISSIONSMINDERUNG (RESTGEFAHRENPOTENTIAL)	11
5	QUALITÄTSSICHERUNG DES VERFAHRENS UND MONITORING	13
6	ZEITRAHMEN	15
7	KOSTEN	15
8	VOR- UND NACHTEILE	15
9	PRAKTISCHE UMSETZUNG	15
9.1	Technische Einrichtungen.....	15
9.2	Dimensionierung	16
9.3	Betrieb	17
10	ENTWICKLUNGSSTAND, BEISPIELE FÜR ERFOLGREICHEN EINSATZ	18
10.1	Altdeponie Kuhstedt (D)	18
10.2	Altdeponie Lorenkamp (D)	18
10.3	Österreichische Altablagerung	18
11	ANHANG	18
11.1	Vorversuch 1: Belüftungs- und Absaugversuch.....	18
11.2	Vorversuch 2: Säulenversuch	19
12	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	22
13	LITERATUR	23

1 GRUNDLAGEN

1.1 Wirkungsweise und Zielsetzung

Emissionen, die aus Altdeponierungen über Sickerwasser und Gasphase in die Umwelt gelangen, werden maßgeblich durch den Gehalt und die Stabilität der organischen Substanz des abgelagerten Abfalls und durch die Milieubedingungen im Deponiekörper bestimmt. Eine Möglichkeit zur Minimierung dieser Emissionen und zur Stabilisierung der am Standort verbleibenden Restorganik stellt die In-Situ Aerobisierung dar. Dabei wird mit einer aktiven Belüftung Umgebungsluft in den Deponiekörper eingebracht und parallel dazu das entstehende Gasgemisch abgesaugt und gereinigt. Durch Belüftung über mehrere Jahre mit geringen Drücken und geringen Luftmengen wird eine Umstellung auf aerobe Verhältnisse erreicht. Abb. 1-1 zeigt schematisch das Prinzip und die ablaufenden Prozesse:

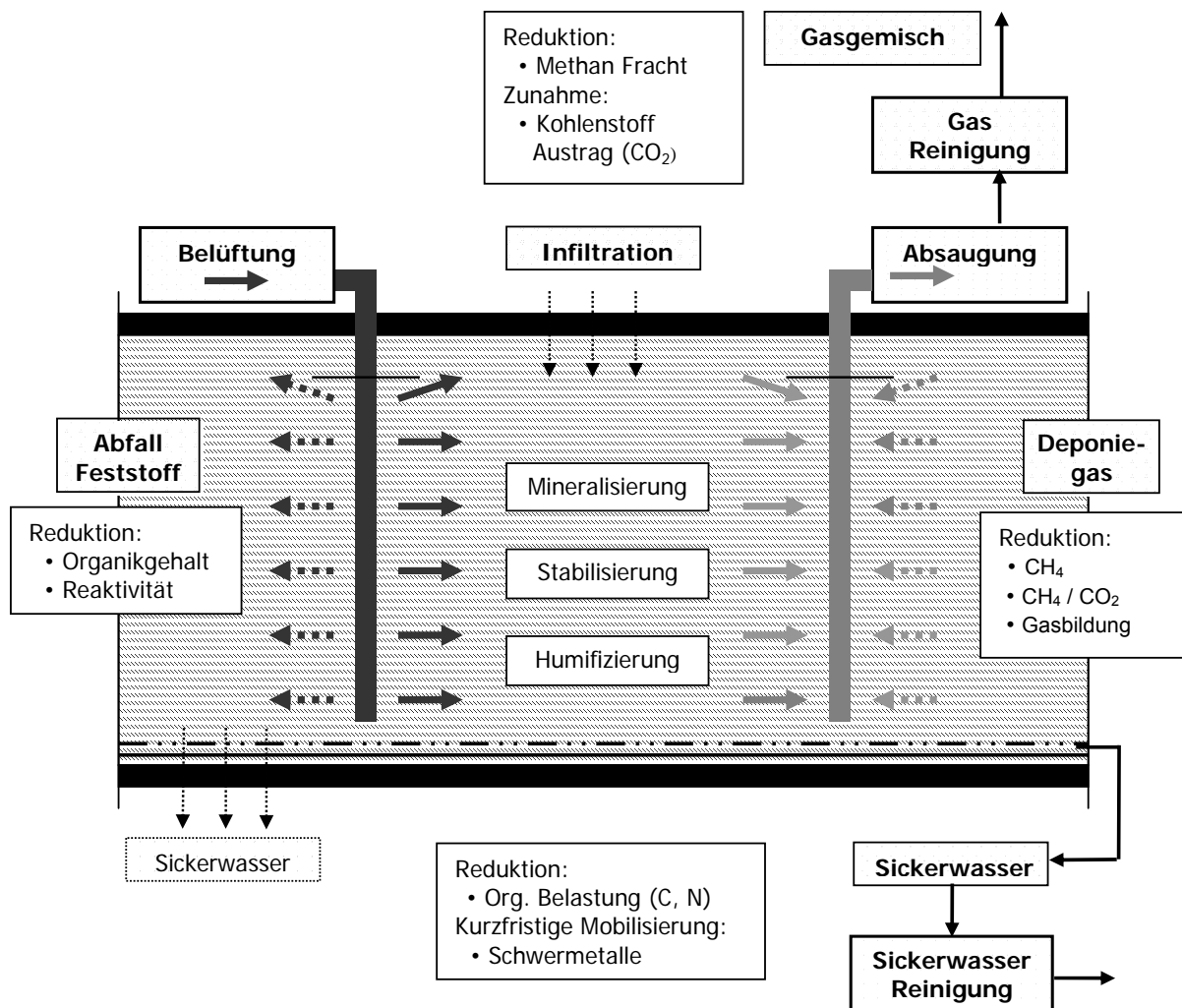


Abb. 1-1: Im Zuge der In-Situ Aerobisierung ablaufenden Prozesse

Durch den Sauerstoff der Umgebungsluft kommt der anaerobe biologische Abbau zum Erliegen und aerobe Mineralisierung wird in Gang gesetzt. Dies bewirkt einen beschleunigten und weitergehenden Abbau der organischen Substanz, wodurch ein biologisch stabiler Zustand erreicht wird. Nach Abschluss der Sanierung verbleiben nur noch schwer- bzw. nicht abbaubaren organischen Verbindungen. Darüber hinaus werden durch Syntheseprozesse stabile huminstoffähnliche Substanzen gebildet. Durch den erhöhten Kohlenstoffaustrag, hauptsächlich in Form von Kohlendioxid werden Gehalt und Reaktivität der Organik reduziert. Gelingt die

vollständige Umstellung auf aerobe Verhältnisse kommt die Methanproduktion zum Erliegen und das Gasbildungspotential erreicht sehr geringe Werte. Die organische Belastung im Sickerwasser wird stark reduziert, wodurch die, für die Nachsorgezeiträume entscheidenden Parameter, wie Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) und Ammonium (NH_4) umweltverträgliche Konzentrationen erreichen (Grenzwerte lt. ON S 2088-1 und AEV Deponiesickerwasser). In der Anfangsphase der Belüftung kann es durch Mobilisierungseffekte kurzfristig zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser kommen, wobei jedoch insgesamt die ausgetragenen Gesamtfrachten in der Regel sehr gering sind.

1.2 Gesetzliche Grundlagen und Normen

Bisher existieren weder in Österreich, noch im EU-Raum Gesetze, Verordnungen, Normen oder Regelwerke, die sich speziell mit der In-Situ Aerobisierung befassen, jedoch bestehen eine Reihe von Normen und Gesetzen die im Zusammenhang mit diesem Verfahren zu berücksichtigen sind:

- Abfallwirtschaftsgesetz – AWG (2002): Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft, BGBl. I Nr. 102/2002.
- AEV Deponiesickerwasser (2003): Verordnung über die Begrenzung von Sickerwasseremissionen aus Abfalldeponien, BGBl. I Nr. 263/2003.
- Altlastensanierungsgesetz (1989): Bundesgesetz zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung, BGB. I Nr. 299/1989.
- Deponieverordnung (2004): Verordnung über die obertägige Ablagerung von Abfällen, BGBl. Nr. 164/1996 idF BGBl. II Nr. 49/2004.
- ON 2027 Teil 1 und 2 (2002): Stabilitätsparameter zur Beurteilung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen.
- ON S 2088 Teil 1 bis 3 (1997-2004): Altlasten. Gefährdungsabschätzung für die Schutzgüter Grundwasser, Boden und Luft.
- ON S 2090 (2005): Bodenluft-Untersuchungen.
- Wasserrechtsgesetz – WRG (1957): Bundesgesetz zuletzt geändert mit dem Bundesgesetzblatt Nr. 65/2002.

2 EINSATZBEREICHE UND EINSATZRANDBEDINGUNGEN

Die In-Situ Aerobisierung ist ein Sanierungsverfahren für Altablagerungen, dessen Gefahrenpotential maßgeblich von organischen Abfällen ausgeht. Sind die Emissionen durch anorganische Schadstoffe, wie z.B. Schwermetalle geprägt, ist die In-Situ Aerobisierung nur bedingt geeignet. Darüber hinaus hängt die Entscheidung ob dieses Verfahren an einem bestimmten Standort eingesetzt werden kann, von verschiedenen Faktoren ab (Einsatzrandbedingungen), die in Kap. 2.1 bis 2.4 beschrieben werden. Folgendes Flussdiagramm (Abb. 2-1) gibt eine Entscheidungshilfe, über die prinzipielle technische Anwendbarkeit der In-Situ Aerobisierung.

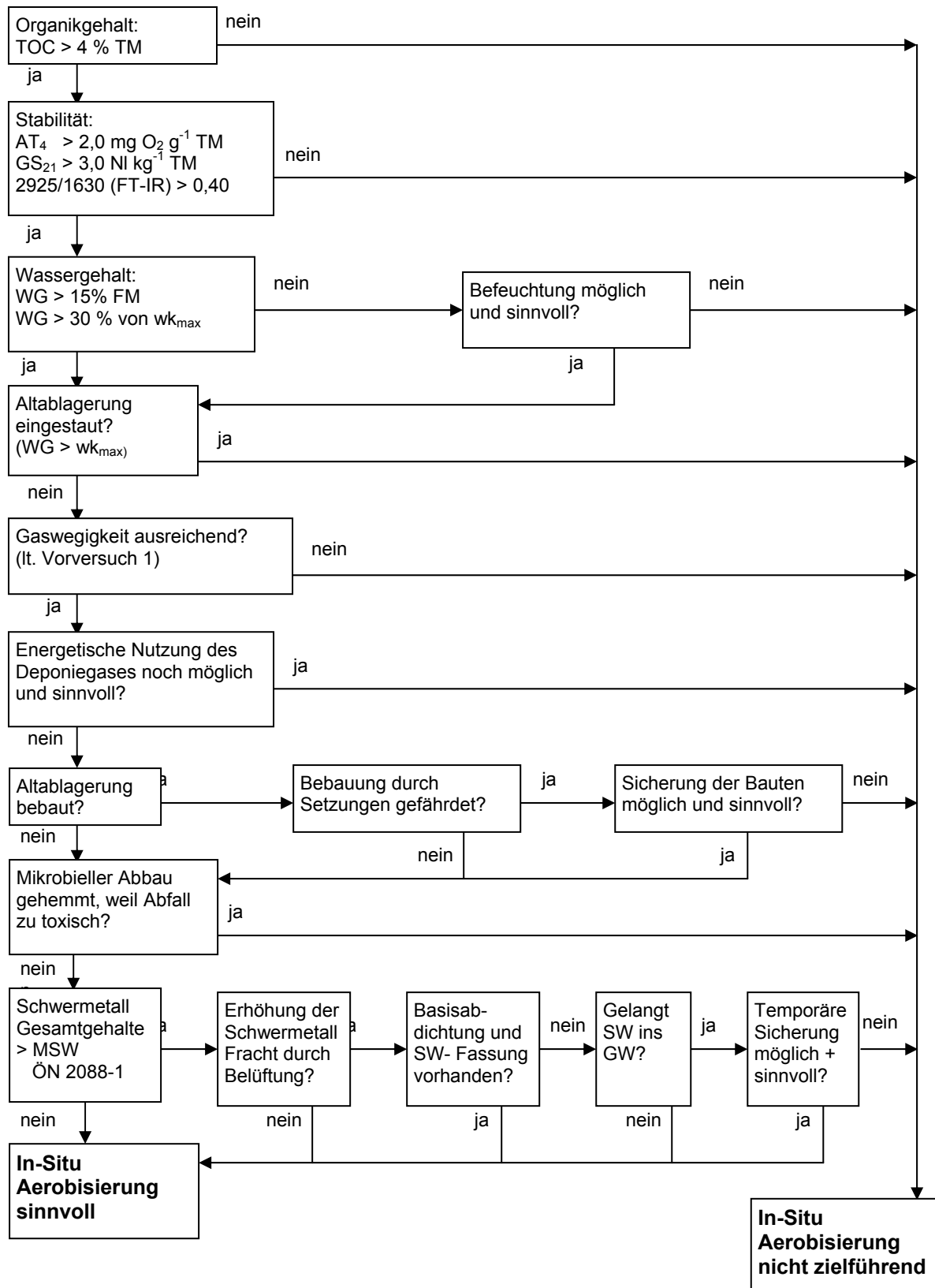


Abb. 2-1: Flussdiagramm als Entscheidungshilfe zum Einsatz der In-Situ Aerobisierung (Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis Seite 22)

2.1 Abfalleigenschaften

Der Einsatz der In-Situ Aerobisierung ist bei Altablagerungen sinnvoll, die mit Hausmüll und hausmüllähnlichem Gewerbemüll verfüllt worden sind. Ist der Gewerbemüllanteil zu hoch, können toxische Substanzen zu einer Hemmung des mikrobiellen Abbaus führen und dadurch den Sanierungserfolg beeinträchtigen.

Gehalt und Stabilität der Organik:

Gehalt und biologische Stabilität der organischen Substanz des Abfalls sind entscheidende Faktoren. Bei Abfällen mit geringem oder sehr stabilem Organikanteil ist dieses Verfahren nicht zielführend, da keine wesentliche Stabilisierung des Abfalls mehr möglich ist. Der Gehalt wird durch den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) oder den Glühverlust (GV) ausgedrückt (Analysen lt. ON S 2023), wobei der Abfall Gehalte von $\text{TOC} > 4 \% \text{ TM}$ bzw. $\text{GV} > 8 \% \text{ TM}$ aufweisen soll. Die Stabilität wird durch die Atmungsaktivität (AT_4) und das Gasbildungspotential (GS_{21}) ausgedrückt (Analysen lt. ON S 2027, Teil 1 & 2), wobei Mindestwerte von $\text{AT}_4 > 2,0 \text{ mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$ und $\text{GS}_{21} > 3,0 \text{ NI kg}^{-1} \text{ TM}$ Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz sind. Ein weiteres Stabilitätskriterium wird mithilfe der Infrarot-Spektroskopie (FT-IR) ermittelt (siehe Leitfaden „Monitoring“). Dabei ist das Verhältnis der relativen Absorptionen bei den Wellenlängen 2925 und 1630 cm^{-1} ein aussagekräftiger Parameter. Ist dieses Verhältnis $> 0,40$, ist noch eine deutliche Stabilisierung möglich.

Wassergehalt:

Ein weiterer Faktor ist der Wassergehalt (WG) des Abfalls. Bei zu trockenen Abfällen wird der mikrobielle Abbau gehemmt. Ist das Material zu nass, kann die Zufuhr und die Verteilung des Sauerstoffs behindert werden. Der optimale Wassergehalt wird von der maximalen Wasserhaltekapazität (wk_{max}) beeinflusst und liegt zwischen 25 und 40 % der Feuchtmasse (FM) bzw. 60 und 90 % von wk_{max} . Die Untergrenze des WG liegt bei ca. 15 % FM (30 bis 35 % von wk_{max}) und die Obergrenze stellt die maximale Wasserhaltekapazität dar (100 % wk_{max}), welche bei älteren Abfallfeststoffen Werte zwischen 40 und 50 % FM erreicht. Die Analysen für Wassergehalt und maximalen Wasserhaltekapazität sind lt. ON S 2023 durchzuführen.

Gaswegigkeit:

Lagerungsdichte und -homogenität, Luftporenanteil und Wassergehalt bestimmen die Gaswegigkeit der Altablagerung. Ist es aufgrund der spezifischen Situation der Altablagerung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll mit relativ geringem Überdruck den Deponiekörper ausreichend zu belüften, kann dieses Verfahren nicht oder nur begrenzt eingesetzt werden. Mit dem in Kap 3.1 beschriebenen Belüftungsversuch (Vorversuch 1) können diese Fragestellungen im Vorfeld geklärt werden.

2.2 Emissionsbild

Für eine In-Situ Aerobisierung kommen Altablagerungen mit folgendem Emissionsbild in Frage:

Eine Gasproduktion deren Erfassung und Behandlung aus Klimaschutzgründen noch erforderlich ist, aber deren energetische Nutzung technisch nicht mehr möglich oder wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll ist.

Eine organische Sickerwasserbelastung in der stabilen Methanphase, die langfristig noch eine erhebliche Gefährdung für das Grundwasser darstellt.

2.3 Standort und Infrastruktur

Geometrie und Ausstattung:

Bei sehr tiefen Altablagerungen ($> 20 \text{ m}$) kann die Bohrung der Gasbrunnen aufwändig sein, bei sehr seichten Altablagerungen ($< 3 \text{ m}$) kann die Einbringung der Luft problematische sein. Darüber hinaus spielen Größe und

Form der Altablagerung keine besondere Rolle, da die Anlagenteile im Modulsystem beliebig erweitert werden können. Eine ausreichend befestigte Zufahrtsmöglichkeit und eine Stromversorgung (Starkstrom) müssen gewährleistet werden. Die restlichen Infrastruktureinrichtungen können in mobilen Containern errichtet werden.

Bebauung und Umfeld:

Aufgrund des mikrobiellen Abbaus kann es zu beträchtlichen Setzungen kommen (Feldversuch INTERLAND: bis zu 5 % der gesamten Deponiehöhe). Besteht auf der Altablagerung eine Bebauung muss überprüft werden, ob diese Setzungen zu Beschädigungen der Bauteile führen können. Im Zuge der Errichtung der Anlage und der Probenahmen kann es zu geringfügigen Lärmbelastigungen kommen und während des Betriebes können evt. Geruchsprobleme auftreten. Dies ist zu berücksichtigen, wenn sich die Altablagerung im besiedelten Raum befindet.

Klima:

Der Einfluss des Klimas ist von untergeordneter Bedeutung. Aufgrund der Temperaturentwicklung durch den biologischen Abbau, ist die Temperatur im Deponiekörper trotz äußerer Schwankungen (Saisonal, Tag-Nacht) relativ konstant. Auch der Niederschlag ist (in gemäßigten Klimazonen) kein limitierender Faktor. Lediglich in sehr trockenen oder sehr feuchten Gebieten kann es zu negativen Effekten kommen (siehe Kap. 2.1 Wassergehalt).

2.4 Technische Barrieren

Prinzipiell kann die Aerobisierung bei Altablagerung ohne Basisabdichtung und Sickerwasserfassung eingesetzt werden. Es ist jedoch eine mögliche Mobilisierung von Schwermetallen in der ersten Phase der Belüftung und deren Gefahrenpotential zu überprüfen. Zeigen die Gesamtgehalte an Schwermetallen im Feststoff deutliche Überschreitungen der Massnahmenschwellenwerte lt. ON 2088-1 ist durch Laborversuche (siehe Kap. 3.2 Vorversuch 2) zu untersuchen, ob es bei dem spezifischen Abfallmaterial durch die Belüftung zu einer wesentlichen Erhöhung des Schwermetallfracht im Sickerwasser kommt. Ist dies der Fall und ist kein Sickerwasserfassungssystem vorhanden, muss überprüft werden, ob das Sickerwasser (SW) ins Grundwasser (GW) gelangt (z.B. Tritium-Methode; siehe Leitfaden „Monitoring“) und welche Auswirkung diese Schwermetallfracht im Grundwasserkörper hat. Zeigen diese Untersuchungen ein erhöhtes Risiko besteht die Möglichkeit, mit einer temporären Sicherung (z.B. mit Sperrbrunnen) den Schadstofftransport ins Grundwasser zu unterbinden.

3 ERFORDERLICHE VORKENNTNISSE UND EMPFOHLENE VORVERSUCHE

Ist die zu sanierende Altablagerung bereits im Altlastenatlas verzeichnet, so liegen in der Regel bereits Informationen vor. Im Zuge der Gefährdungsabschätzung im Rahmen der Altlastenbewertung nach ON S 2088 erfolgen Beschreibung und Bewertung des Schadstoffpotentials der Altablagerung und der Ausbreitung der Schadstoffe (mögliche Gefährdung des Grundwassers). Damit sind Aussagen über die Sickerwasserbelastungen, die mögliche Ausbreitung ins Grundwasser und über das Deponiegas möglich. Sprechen diese Ergebnisse lt. Kap. 2 für eine In-Situ Aerobisierung sind Feststoffproben der Altablagerung zu entnehmen. Diese Proben sind auf Organikgehalt, Stabilität und Eluierbarkeit zu überprüfen. Zeigen auch diese Untersuchungen, dass eine Belüftung zielführend ist, sind 2 Vorversuche durchzuführen. Daraus ergibt sich folgender zeitlicher Ablauf (Abb. 3-1) für die erforderlichen Vorkenntnisse und Voruntersuchungen.

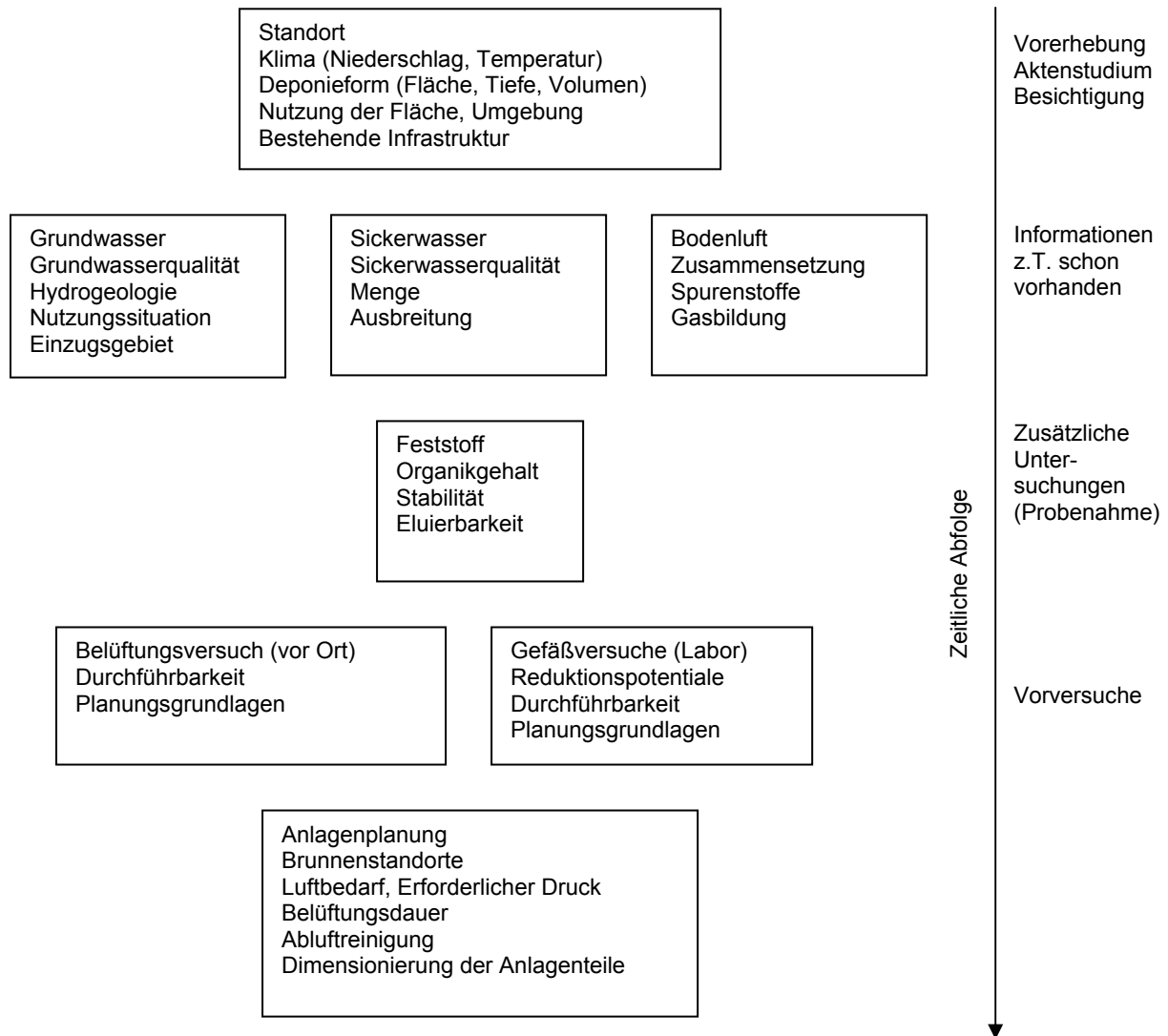


Abb. 3-1: Erforderliche Vorkenntnisse und Vorversuche

3.1 Belüftungs- und Absaugversuch (Vorversuch 1)

Dieser Vorversuch soll klären, ob es aufgrund der spezifischen Situation der Altablagerung technisch möglich ist, ausreichende Luftmengen in den Deponiekörper einzubringen und mit relativ geringem Überdruck eine möglichst gleichmäßige und vollständige Belüftung zu erreichen. Über einen Gasbrunnen (bzw. Gaslanze) wird mit variierenden Mengen und Drücken, Luft in den Deponiekörper eingebracht bzw. abgesaugt. In unterschiedlichen Abständen und Richtungen zu diesem Brunnen werden Gassonden gesetzt. Am Brunnen und an allen Sonden werden jeweils Über- bzw. Unterdruck, Luftmenge und die Gaszusammensetzung erfasst. Über die Druckverhältnisse und die Veränderung der Gaszusammensetzung an den Sonden können Aussagen über die Gaswegigkeit im Deponiekörper getroffen werden. Folgende Fragen und Parameter werden damit geklärt:

- Ausbreitung der Luft im Deponiekörper
- Homogenität des Deponiekörpers
- Einflussradius
- Erforderliche Drücke
- Festlegung der Brunnenstandorte

Die Gasbrunnen können bei der anschließenden Planung der In-Situ Aerobisierung bei entsprechender Ausführung in das Brunnensystem integriert werden und die Gassonden für Monitoringzwecke verwendet werden.

Die Anzahl der Belüftungsversuche, die bei einer Altablagerung durchzuführen sind, hängt von verschiedenen Einflussparametern ab (Geometrie der Altablagerung, zu erwartende Gaswegigkeit,...). Als Mindestanzahl wird empfohlen, dass pro 5000 m² Deponiefläche ein Belüftungsversuch durchzuführen ist. Im Anhang wird dieser Versuch mit den Entscheidungskriterien detailliert beschrieben.

3.2 Gefäßversuch (Vorversuch 2)

Zur Untersuchung der Emissionsreduzierungs-potentiale und zur Bestimmung von Betriebsparametern ist ein Versuch vorgesehen, der das Verhalten des Abfalls aus der Altablagerung im Labor unter idealisierten Bedingungen darstellt. Dabei wird das Material aus der Altablagerung entnommen und in Versuchsgefäße eingebaut. Mittels Belüftung und Bewässerung können reale Bedingungen der In-Situ Sanierung (beschleunigt) simuliert werden. Die Versuchsgröße reicht von Deponiesimulationsreaktoren mit 100 l Volumen bis zu Versuchssäulen mit 10 l Volumen. Kleinere Gefäße sind nicht empfehlenswert, da dadurch die Inhomogenität des Abfalls unzureichend berücksichtigt wird. Durch diesen Versuch werden folgende Fragen geklärt:

- Welche Reduktionen und welche Restkonzentrationen von Sickerwasserinhaltsstoffen sind erreichbar?
- Wie stark können die Methan-Emissionen (Konzentration und Fracht) reduziert werden?
- Wie groß ist die Sauerstoffnutzungsrate (zeitlicher Verlauf)?
- Wie groß ist der tatsächliche Luftbedarf (zeitlicher Verlauf)?
- Wie stark kann der Kohlenstoff-Austrag gesteigert werden?
- Wie groß ist der mikrobiell abbaubare Anteil des TOC? (Abschätzung anhand des Kohlenstoff-Austrages)
- Welche Reduktion und welche Restkonzentration des Organikanteils im Feststoff sind erreichbar?
- Welche Zunahme der Stabilität des Feststoffs ist erreichbar?
- Welcher Belüftungszeitraum ist notwendig um die vorgegebenen Ziele zu erreichen?
- Kommt es durch die Aerobisierung zur Mobilisierung von organischen oder anorganischen Schadstoffen, die über das Sickerwasser ausgetragen werden?

Das eingebaute Abfallmaterial soll möglichst gut den gesamten Deponiekörper repräsentieren. Im Zuge der Herstellung der Brunnen werden Proben entnommen um den Ausgangszustand des Abfalls vor Belüftung zu bestimmen. Von diesen Proben ist eine homogenisierte Mischprobe zu erstellen, welche für den Gefäßversuch verwendet wird. Die statistisch erforderliche Probenanzahl wird im Endbericht INTERLAND ausführlich diskutiert, als Richtwert kann eine Probe pro 2.500 m³ Deponievolumen angegeben werden. Im Anhang ist beispielhaft die Durchführung eines Säulenversuches beschrieben.

4 ERREICHBARE EMISSIONSMINDERUNG (RESTGEFAHRENPOTENTIAL)

Erkenntnisse und Erfahrungen aus Labor- und Feldversuchen im Rahmen des Projektes INTERLAND, sowie aus der Literatur zeigen ein großes Potential der In-Situ Aerobisierung zur Emissionsminderung. Im Sickerwasser werden die, für Nachsorgezeiträume wichtigen Parameter, CSB und Ammonium stark reduziert. In Laborversuchen werden die Grenzwerte für Indirekteinleitung lt. AEV Deponiesickerwasser (CSB: 300 mg l⁻¹; NH₄-N: 200 mg l⁻¹) innerhalb relativ kurzer Zeit erreicht. Feldversuche zeigen dieselben Entwicklungen, jedoch deutlich langsamer (siehe Tab. 4-1).

Tab. 4-1: In Labor- und Feldversuchen erreichte Sickerwasserqualität

	Anfangs-konzentration	Rest-konzentration	Erreicht nach [Monaten]	Reduktion	Versuchs-art	Quelle
CSB [mg O ₂ l ⁻¹]	7.000-12.000	100-150	12-18	97-99 %	Labor	INTERLAND
	1.000-10.000	100-200	12-24	90-98 %	Labor	Heyer, 2003
	1.500-2.000	700	18	60 %	Feld	INTERLAND
NH ₄ -N [mg l ⁻¹]	1.400-1.800	<10	2-6	>99 %	Labor	INTERLAND
	1.000-3.000	<10	2-6	>99 %	Labor	Heyer, 2003
	1.000	400	12	60 %	Feld	INTERLAND

Durch den beschleunigten Abbau erhöht sich der Kohlenstoffaustrag deutlich, hauptsächlich in Form von CO₂ und die Methanfracht wird stark reduziert. Das Gasbildungspotential ist nach der Belüftung sehr gering und auch das verbleibende Restgas weist ein geringes Verhältnis von CH₄/CO₂ auf.

Abb. 4-1 zeigt die ökologischen Auswirkungen (Klimarelevanz und Eutrophierung) einer Altablagerung mit und ohne In-Situ Aerobisierung, bilanziert über 30 Jahre. In der Gasphase wurden die CO₂- und CH₄-Emissionen, im Sickerwasser die Parameter CSB und NH₄-N berücksichtigt, da dies die entscheidenden Einflussgrößen von Hausmülldeponien auf die beiden genannten Wirkungskategorien darstellen. Es wird deutlich, dass die Belüftung die ausgetragene Methanfracht erheblich reduziert, jedoch jene an CO₂ erhöht. Wird das CO₂ als klimaneutral betrachtet, da es aus biogenen Quellen stammt, ergibt sich durch die Aerobisierung eine Reduktion der CO₂-Äquivalente um 75 %. Bei Bilanzierung der Sickerwasseremissionen (Eutrophierung) zeigt sich, dass eine Verringerung der PO₄-Äquivalente um 60 % erreicht wird, wobei dafür die Reduktion von Ammonium entscheidend ist. Darüber hinaus wurden die Sekundäremissionen aus dem Energieverbrauch der Aerobisierungsanlage berechnet, welche in diesem Zusammenhang sehr gering sind.

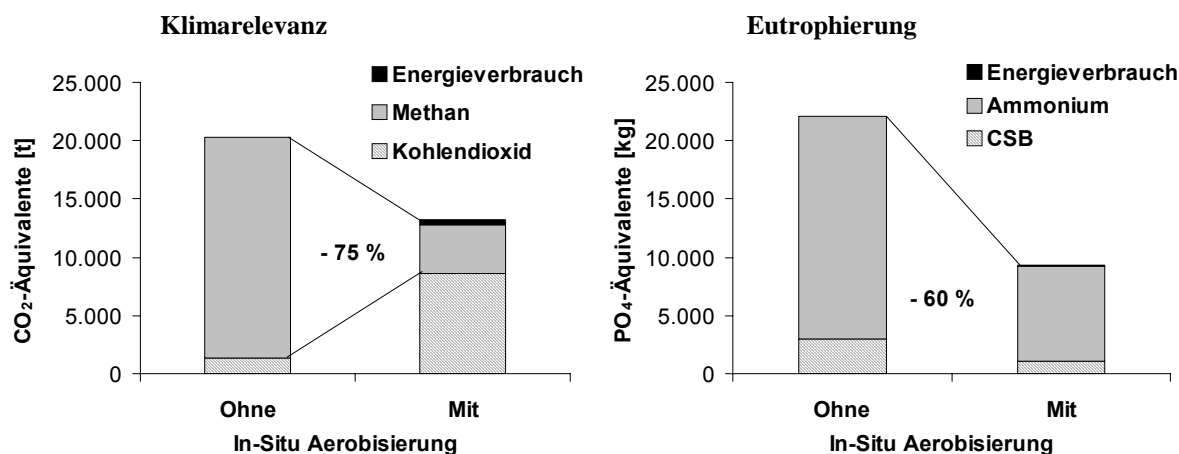


Abb. 4-1: Umweltauswirkungen (Klimarelevanz und Eutrophierung) einer Altablagerung mit und ohne In-Situ Aerobisierung

Durch die Belüftung werden nicht nur die Emissionen reduziert, sondern auch der Abfallfeststoff selbst wird stabilisiert. Die Reaktivität (AT₄, GS₂₁, FT-IR) und die eluierbaren Anteile organischer bzw. Stickstoffverbindungen (CSB, BSB₅, NH₄-N) werden deutlich reduziert. Auch hier zeigen sich große Unterschiede zwischen Feld- und Laborversuchen, jedoch lässt sich abschätzen, dass durch Belüftung über mehrere Jahre ein ausreichende stabiler Zustand erreicht werden kann.

Tab. 4-2: In Labor- und Feldversuchen erreichte Feststoffqualität

	Anfangs- wert	Rest- konzentration	Erreicht nach [Monate]	Reduktion	Versuchs- art	Quelle
AT ₄ [mg O ₂ g ⁻¹ TM]	3,1-3,7	0,2-0,7	2-9	80-95 %	Labor	INTERLAND
	3,5	2,2	18	35 %	Feld	INTERLAND
GS ₂₁ [NI kg ⁻¹ TM]	5,6	0,1	9	98 %	Labor	INTERLAND
	6,0	1,3	18	78 %	Feld	INTERLAND
FT-IR 2925/1630	0,47	0,28	9	40 %	Labor	INTERLAND
	0,56	0,46	18	20 %	Feld	INTERLAND
BSB ₅ (Eluat) [mg O ₂ kg ⁻¹ TM]	200-1000	<30	2-6	> 97 %	Labor	INTERLAND
	3000	700	18	80 %	Feld	INTERLAND
NH ₄ -N (Eluat) [mg kg ⁻¹ TM]	500-2.000	<4	2-4	> 99 %	Labor	INTERLAND
	1000	700	18	30 %	Feld	INTERLAND

Die Definition der zu erreichenden Zielwerte („ausreichend stabiler Zustand“) ist ein wichtiger Punkt und kann auf unterschiedliche Weise betrachtet werden. Als Orientierungswerte können die Grenzwerte für die Ablagerung auf Massenabfalldeponien lt. Deponieverordnung (2004) und die Kriterien für Indirekteinleitung nach AVE Deponiesickerwasser (2003) genannt werden. Zusätzlich dazu kann der Vorversuch 2 (siehe Kap. 3.2) die Reduktionen aufzeigen, welche mit realistisch vertretbarem Aufwand erreichbar sind. Aus diesen Informationen müssen die Zielwerte im Einzelfall festgelegt werden. Es wird empfohlen Zielwerte für folgende Parameter bzw. Untersuchungen zu definieren:

- Feststoff: AT₄, FT-IR, Eluierbarkeit (BSB₅, CSB, NH₄-N)
- Sickerwasser: CSB, BSB₅, NH₄-N
- Gasphase: Kohlenstoffaustrag, Restgasproduktion

5 QUALITÄTSSICHERUNG DES VERFAHRENS UND MONITORING

Qualitätssicherung und Monitoring dienen sowohl der Beobachtung des Sanierungsverlaufs (inkl. Emissionskontrolle) als auch der Erfolgskontrolle nach Abschluss der Sanierung. Dafür werden folgende Parameter bzw. Untersuchungen vorgeschlagen:

Tab. 5-1: Qualitätssicherung und Monitoring einer In-Situ Aerobisierung

Medium	Parameter	Sanierungs- verlauf	Emissions- kontrolle	Erfolgs- kontrolle
Feststoff	TOC, AT, FT-IR Eluat (CSB, BSB ₅ , NH ₄ -N, NO ₃ -N)	√		√
Sickerwasser	CSB, BSB, NH ₄ -N, NO ₃ -N	√	(√)	√
Grundwasser	CSB, NH ₄ -N, NO ₃ -N		√	
Deponiegas	O ₂ , CO ₂ , CH ₄	√		
Abgesaugtes Gasgemisch	O ₂ , CO ₂ , CH ₄	√	√	√
Gasmessungen Deponieoberfläche	CO ₂ , CH ₄		√	√
Bodenluft	O ₂ , CO ₂ , CH ₄		√	
Deponiekörper	Temperatur, Setzung	√		(√)

Feststoff:

Der Abfallfeststoff ist vor und nach der Sanierung zu untersuchen. Weiters ist bei Halbzeit, der zu erwartenden erforderlichen Sanierungsdauer eine Probenahme durchzuführen. Organikgehalt, Stabilität sowie Eluatparameter sind zu untersuchen. Detaillierte Beschreibungen zu den Feststoffuntersuchungen (Probenahme und Analytik) finden sich im Leitfaden „Monitoring“.

Grundwasser und Sickerwasser:

Sind Grundwasserpegel oder eine Sickerwasserfassung vorhanden kann die Veränderung der Wasserqualität beobachtet werden. Die Grundwasserqualität gibt nur bedingt Aufschluss über den Sanierungsverlauf, da sie von vielen anderen Randbedingungen (z.B. geologische und hydrogeologische Faktoren) mit beeinflusst wird. Das Sickerwasser liefert bessere Aussagen über die Sanierung, jedoch sind auch hier Einflussgrößen zu berücksichtigen (z.B. Klima, Oberflächenabdeckung, bevorzugte Wegigkeiten). Das Grundwasser ist halbjährlich, das Sickerwasser 6-mal jährlich zu analysieren.

Gasphase:

Über In-Situ Sonden wird die Zusammensetzung der Bodenluft im Deponiekörper gemessen (monatlich). Dabei soll der Methangehalt möglichst gering sein und Sauerstoff vorhanden sein. Ein wichtiger Indikator für überwiegend aerobe Verhältnisse ist dabei das Verhältnis von Methan zu Kohlendioxid, welches $< 1,0$ sein soll. Die Zusammensetzung des abgesaugten Gasgemisches wird online aufgezeichnet. Sollten Teilbereiche nicht oder nur unzureichend mit Sauerstoff versorgt werden, verbleibt Methan in der abgesaugten Luft. Somit ist der Methangehalt der Abluft ein Indikator für die Umstellung auf aerobe Prozesse. Unter optimalen Bedingungen ist der Methangehalt $< 1,0$ % und der Sauerstoffgehalt zwischen 5 und 15 %. Ist der Sauerstoffgehalt < 5 %, ist keine ausreichende Aerobisierung gewährleistet, ist er > 15 % sind die Zuluftmengen größer als erforderlich. Emissionsmessungen an der Deponieoberfläche und Messungen der Bodenluft in der Umgebung der Deponie dienen hauptsächlich der Emissionskontrolle.

Temperaturanstieg und Setzungsverhalten:

Zusätzlich zu den bisher genannten Untersuchungen ist ein Monitoring der Parameter Temperatur und Setzung sinnvoll. Durch die biologische Aktivität im Zuge des aeroben Abbaus steigt die Temperatur im Deponiekörper auf bis zu 50 °C an und durch den resultierenden Masseverlust treten Setzungen von bis zu 5 % der Deponiehöhe auf. Beide Phänomene können als Indikatoren für erhöhte aerobe mikrobielle Aktivität und ein noch ausreichendes Angebot an abbaubaren organischen Verbindungen interpretiert werden. Für beide Parameter kann eine abnehmende Tendenz im späteren Verlauf der Belüftung als Anzeichen für abklingende mikrobielle Aktivitäten angesehen werden und somit ebenfalls die Endphase der Belüftungsmaßnahme anzeigen.

Weisen Ergebnisse auf eine Verschlechterung des Sanierungsverlaufes hin, sind folgende mögliche Gründe zu überprüfen:

- Rückgang der verfügbaren Organik
- Austrocknungseffekte
- Hemmeffekte durch toxische Substanzen
- Unzureichende Belüftung des Abfalls aufgrund von
 - Inhomogenitäten
 - Bevorzugte Wegigkeiten
 - Falsche Betriebsweise (zu geringer Druck, zu geringe Luftmengen)

Es ist zu erwähnen, dass annähernd alle oben genannten Gründe entweder von Anfang an vorhanden gewesen sein können oder aber durch falschen Betrieb oder Betrieb auf Basis ungenügender Datenlage erst verursacht worden sein können.

6 ZEITRAHMEN

Für Planung und Errichtung der Anlage ist je nach Größe und sonstigen Gegebenheiten mit mehreren Monaten zu rechnen. Die erforderliche Belüftungsdauer hängt maßgeblich vom abgelagerten Abfall selbst (z.B. Emissionspotential, Stabilität, Gaswegigkeit) und von den, zu erreichenden Zielvorgaben ab. Der heutige Wissenstand lässt erwarten, dass nach 4 bis 6 Jahren Belüftung ein ausreichend stabiler Zustand erreicht werden kann.

7 KOSTEN

Aufgrund verschiedener Einflussgrößen, wie z.B. Größe der Altablagerung, Art der Abfälle oder vorhandene Infrastruktur können die Kosten erheblich variieren. Erfahrungen aus Deutschland zeigen spezifische Kosten von 1 bis 3 Euro pro m³ Deponievolumen für alle baulichen Bestandteile und Betriebskosten (Heyer et. al. 2002). Der österreichische Pilotversuch (INTERLAND) weist aufgrund der geringen Versuchsgröße höhere spezifische Kosten auf, bestätigt aber die Größenordnung. Zu diesen Angaben sind Planungs- sowie Monitoringkosten in einer Größenordnung von 1 bis 2 Euro pro m³ hinzu zu rechnen, womit sich Gesamtkosten von 2 bis 5 Euro pro m³ ergeben.

8 VOR- UND NACHTEILE

Beim Einsatz dieses Verfahrens im Zuge einer Altlastensanierung ergeben sich etliche Vorteile: Dieses Verfahren stellt eine sehr kostengünstige Alternative dar. Es kommt nicht nur zu einer Beseitigung des umweltrelevanten Emissionspotentials am Standort (vgl. Sicherungsmaßnahme), sondern auch eine Problemverfrachtung an einen anderen Standort wird vermieden (vgl. Räumung). Es sind keine nennenswerten Transportwege und kein zusätzliches Deponievolumen erforderlich. Bei ordnungsgemäßem Betrieb kommt es zu keiner bis geringer Beeinträchtigung des Umfeldes durch Lärm, Geruch oder Staub. Die Sickerwasserbelastungen (CSB, BSB₅, NH₄) und die Methan-Emissionen werden reduziert. Dies ergibt neben den ökologischen Vorteilen auch einen wirtschaftlichen Nutzen: Nachsorgemaßnahmen können verkürzt und extensiver durchgeführt werden. Dies führt zu Verringerungen der Kosten für Sickerwasserentsorgung und Oberflächenabdeckung (Errichtung und Erhaltung) und zu einer früheren hochwertigen Folgenutzung.

Demgegenüber stehen einige Nachteile: Dieses Verfahren ist nur für organische Abfälle und somit hauptsächlich nur für Altablagerungen mit überwiegend Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbemüll geeignet. Bei bebauten Altablagerungen ist dieses Verfahren aufgrund der Setzungen nur bedingt geeignet, oder aufwändiger. Es kann in der Anfangsphase zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen (Schwermetalle) im Sickerwasser kommen, wobei jedoch die ausgetragenen Gesamtfrachten deutlich reduziert werden. Der Aufwand zur Überprüfung des Sanierungserfolges (Monitoring) ist wie bei allen In-Situ Verfahren größer, was sich jedoch durch sehr viel geringere Verfahrenskosten mehr als ausgleicht.

9 PRAKTISCHE UMSETZUNG

9.1 Technische Einrichtungen

Die gesamte Belüftungsanlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Anlageteilen:

- Verdichterstation
- Verteilersystem

- Belüftungsbrunnen
- Absaugbrunnen
- Abluftreinigung
- Messeinrichtungen
- Regelungseinrichtungen

Das Einbringen und das Absaugen der Luft erfolgt mittels Verdichteraggregate (z.B. Seitenkanalverdichter, Drehkolbenverdichter). Diese sind in einer Verdichterstation räumlich voneinander getrennt untergebracht, um eine explosionsfähige Atmosphäre zu verhindern. Ausgehend vom Belüftungsaggregat ist ein Verteilersystem aus Einzelrohrleitungen angeordnet, welches die Gasbrunnen mit der Verdichterstation verbindet.

Besteht bereits ein herkömmliches Gasbrunnensystem, könnten diese Gasbrunnen zur Aerobisierung verwendet werden. Ist dies nicht der Fall, oder sind die Abstände zu groß, müssen Gasbrunnen aus perforierten Rohren hergestellt werden. Zum Schutz gegen kurzschlüssiges Austreten der eingeblasenen Luft sind eine Kunststoffdichtungsbahn, ein Sperrrohr unterhalb des Brunnenkopfes und eine horizontale Dichtschicht (Tonkappe) notwendig. In schwer zugänglichen Bereichen können zusätzlich Gaslanzen gesetzt werden. Die Reichweiten der Gasbrunnen variieren in Abhängigkeit von Druck und Menge der eingebrachten Luft und v.A. von der Gaswegigkeit des Deponiekörpers. Zur Ermittlung des erforderlichen Drucks und der tatsächlichen Reichweite ist ein Belüftungsversuch erforderlich (siehe Kap. 3.1). Mit Brunnenabständen zwischen 30 und 40 m wurden bisher gute Ergebnisse erzielt.

Mit einem weiteren Seitenkanalverdichter in gasdichter Ex-Ausführung wird aus den Absaugbrunnen das Gasgemisch abgesaugt. Zur Reinigung kann ein Biofilter verwendet werden, wodurch geruchsrelevante Inhaltsstoffe und teilweise Methan mikrobiell abgebaut werden. Stärker belastete Abluft kann durch Adsorption an Aktivkohle oder nichtkatalytische, autotherme Verfahren gereinigt werden. Diese Reinigungsschritte sind auf Basis des zu erwartenden Anfalls zu dimensionieren und nicht Bestandteil dieses Leitfadens.

Die Messeinrichtungen zeichnen Gaszusammensetzung der Abluft, Luftmenge und Über- bzw. Unterdrücke automatisch auf. Die Regelung der eingebrachten Luftmenge kann über den kontinuierlich gemessenen O₂-Gehalt der Abluft erfolgen, um die Zuluftmenge dem aktuellen Bedarf ständig anzupassen. Die Zuluftmenge sollte für jeden Brunnen einzeln mess- und regelbar sein, um Druckunterschiede aufgrund der Inhomogenität des Deponiekörpers ausgleichen zu können. Sämtliche Steuerungs- und Aufzeichnungseinrichtungen sollen in einem zentralen Schaltschrank zusammenlaufen und alle eingehenden Werte automatisch aufgezeichnet werden.

9.2 Dimensionierung

Die Dimensionierung der gesamten Anlage hängt maßgeblich vom erforderlichen Luftvolumen ab. Die für die Aerobisierung erforderliche Luftmenge lässt sich aus der Atmungsaktivität des abgelagerten Abfallmaterials abschätzen. Aus der Summenlinie des Sauerstoffverbrauchs kann unter Zuhilfenahme einer Lineweaver-Burk-Linearisierung der theoretische maximale Sauerstoffbedarf AT_{max} errechnet werden (Ritzkowski et. al. 2002). Ist eine Bestimmung der Atmungsaktivität über 42 Tage nicht möglich kann als grobe Abschätzung AT_4 mit dem Faktor 5 bis 10 multipliziert werden um AT_{max} zu erhalten. Aus diesem Wert errechnet sich mit Hilfe der allgemeinen Zustandsgleichung für ideale Gase das erforderliche Sauerstoffvolumen und über den O₂-Gehalt der Umgebungsluft (20,95 Vol%) der Netto-Luftbedarf [$m^3 t^{-1} TM$]. Da eine vollständige Veratmung des Sauerstoffs durch die Mikroorganismen praktisch nicht möglich ist und der eingebrachte Sauerstoff z. T. durch Kurzschlussströmungen wieder ungenutzt abgesaugt wird, ist der tatsächliche Luftbedarf wesentlich größer als dieser theoretische Netto-Luftbedarf. In Laborversuchen unter idealen Bedingungen werden Nutzungsraten von bis zu 75 % erreicht, in Feldversuchen jedoch nur ca. 30 %. D.h. der tatsächliche Luftbedarf ist ca. 3-mal größer

als der Netto-Luftbedarf. Über die zu belüftende Abfallmasse [t TM] und den Belüftungszeitraum [h] erhält man die Belüftungsrate [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$], die zur Bemessung der Belüftungs- bzw. Absaugaggregate und aller Rohrleitungen herangezogen wird.

$$\text{Belüftungsrate} = \frac{\text{BruttoLuftbedarf} * \text{Abfallmasse}}{\text{Belüftungszeitraum}}$$

Tab. 9-1: Bemessung über den Sauerstoffverbrauch

AT ₄	AT _{max}	Luftdruck	Temp.	Nutzungs- rate	Abfall- masse	Belüftungs- dauer	Belüftungs- rate
[mg O ₂ g ⁻¹ TM]		[mbar]	[°C]	[%]	[t TM]	[a]	[m ³ h ⁻¹]
4,0	30,0	985	30	30	100.000	5	1.000

Der theoretisch errechnete Luftbedarf und dessen zeitlicher Verlauf (in späteren Phasen der Aerobisierung kann diese Rate verringert werden) kann durch den Gefäßversuch (siehe Kap. 3.2) überprüft werden.

Ein weiteres mögliches Bemessungskriterium ist der angestrebte Luftwechsel. Bei einem täglichen Luftwechsel wird die gesamte Porenluft einmal pro Tag ausgetauscht, um weitestgehende Methanfreiheit zu erreichen. Unter Annahme des Porenanteils und in Kenntnis des gesamten Ablagerungsvolumens wird der erforderliche Luftbedarf ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) berechnet.

Tab. 9-2: Bemessung über den angestrebten Luftwechsel

Gewünschter Luftwechsel	Abfallmasse	Porenanteil (geschätzt)	Belüftungsrate
	[t TM]	[%]	[m ³ h ⁻¹]
täglich	100.000	30	1.250

9.3 Betrieb

Die Belüftung erfolgt mit geringen Drücken (z.B. 0,1 bar) und sollte kontinuierlich an den Sauerstoffbedarf angepasst werden, damit der Energieverbrauch gering ist und fortlaufend optimiert wird. Die abgesaugte Luftmenge wird in Abhängigkeit von der Belüftungsmenge geregelt. Dies geschieht beispielsweise über Drehzahlregelung der Gebläse- oder Absaugvorrichtungen. Gestaltung und Betrieb der Anlage müssen derart erfolgen, dass auf der Abluftseite keine explosionsgefährlichen Atmosphären auftreten.

Ein technisches Problem der Absaugung stellt der temperaturbedingte Kondensatanfall im Abluftstrom dar. Aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen Deponiekörper und Umgebungsluft kondensiert Wasser in der Abluft. Dieses Kondenswasser muss mit einem Kondensatabscheider, der dem Absaugaggregat vorgeschaltet ist, aus dem System ausgeschleust werden, um einen reibungslosen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Die anfallende Menge schwankt saisonal und liegt im Mittel bei ca. 10 ml m⁻³ Abluft. Die organische Belastung des Kondensats ist in der Regel sehr gering (CSB < 20 mg O₂ l⁻¹), die Ammonium Belastung kann jedoch aufgrund von Strippungsvorgängen relativ hoch sein (500 bis 1.000 mg l⁻¹). Aufgrund der relativ geringen Mengen kann das Kondenswasser in den Deponiekörper rückgeführt werden, oder mit dem Sickerwasser, falls dies erfasst wird gemeinsam gereinigt oder entsorgt werden.

Eine Umkehrung des Systems, d.h. dass Belüftungsbrunnen zu Absaugbrunnen werden und umgekehrt, ist bei entsprechender Anlagengestaltung möglich und unter Umständen auch sinnvoll. Zum Beispiel kann durch ein variierendes Strömungsbild die Ausbildung von bevorzugten Wegigkeiten verringert werden. Auch kann durch abwechselnde Be- bzw. Entlüftung bestimmter Deponieabschnitte eine Austrocknung vermieden werden und auch Kondenswasser, das sich im Verteilersystem ansammelt zurückzuführen werden.

10 ENTWICKLUNGSSTAND, BEISPIELE FÜR ERFOLGREICHEN EINSATZ

Speziell in Deutschland, aber auch in anderen Ländern wie z. B. Italien wird die In-Situ Aerobisierung seit einigen Jahren zur Altlastensanierung, aber auch als Nachsorgemaßnahme für jüngere Deponien erfolgreich eingesetzt. Im Folgenden werden Sanierungsbeispiele mit unterschiedlichen Sanierungszielen angeführt:

10.1 Altdeponie Kuhstedt (D)

Auf der Altdeponie Kuhstedt führten organisch belastetes Sickerwasser und fehlende technische Barrieren zu Grundwasserverunreinigungen und zu einem hohen Gefährdungspotential. Daher war eine nachhaltige Reduzierung des Eintrags belasteten Sickerwassers in das Grundwasser eines der Hauptziele der Aerobisierung dieser Deponie. Detaillierte Informationen dazu finden sich unter anderem in:

- Heyer K.-U. (2003): Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Hamburger Berichte 21. TU Hamburg-Haburg: Verlag Abfall aktuell.
- Ritzkowski M. (2005): Beschleunigte aerobe In-situ Stabilisierung von Altdeponien. Hamburger Berichte 26. TU Hamburg-Haburg: Verlag Abfall aktuell.

10.2 Altdeponie Lorenkamp (D)

Die Altablagerung Lorenkamp wurde nach ihrer Schließung bebaut (Gewerbegebiet). Deponiegasbildung führte zu potentieller Brand- und Explosionsgefahr in den Gebäuden. Ziel der Deponiebelüftung war es, möglichst vollständige und dauerhafte Methanfreiheit im Deponiekörper zu erreichen. Detaillierte Informationen dazu finden sich in:

- Rettenberger G. (2001): Stabilisierung einer Altlast durch Einblasen von Luft am Beispiel der Altablagerung Lorenkamp. Fachtagung „Deponiegasnutzung 2001“. FH Trier.

10.3 Österreichische Altablagerung

Im Rahmen des Forschungsprojekts INTERLAND, wurde ein Pilotmaßstab zur In-Situ Aerobisierung durchgeführt. Das Ziel dabei war es, Erkenntnisse über Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der Aerobisierung zu erhalten und durch Feststoffuntersuchungen detaillierte Informationen über den veränderten Zustand des abgelagerten Materials zu gewinnen. Detaillierte Informationen dazu finden sich unter anderem in:

- Projektgruppe INTERLAND (2006): Endbericht INTERLAND – Innovative Technologies for Remediation of Landfills and Contaminated Soils.
- Prantl R., M. Tesar, M. Huber-Humer und P. Lechner (2006): Pilotversuch zur In-Situ Aerobisierung von Deponien in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 1-2/2006, pp. 6-12, Springer Verlag.

11 ANHANG

11.1 Vorversuch 1: Belüftungs- und Absaugversuch

Ist ein bestehendes vertikales Gaserfassungssystem vorhanden, und die Ausführung dieses Systems ausreichend dokumentiert, können diese Gasbrunnen verwendet werden, ansonsten müssen ein oder mehrere Brunnen (Lanzen) abgeteuft werden. Gassonden werden in unterschiedlichen Abständen und Richtungen zu diesem Brunnen gesetzt. Die Anzahl und Anordnung dieser Brunnen und Sonden hängt von der Größe und der

zu erwartenden Inhomogenität der Altablagerung ab. Die Ausbreitung der Luft im Deponiekörper wird überwiegend in horizontaler Richtung angenommen. Mit einer mobilen Anlage mit Radialverdichtern werden über die Brunnen unterschiedliche Luftmengen ($50 - 500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) mit unterschiedlichen Über- bzw. Unterdrücken (z.B. $10 - 100 \text{ mbar}$) eingebracht bzw. abgesaugt. An den Brunnen und an den Sonden werden jeweils Über- bzw. Unterdruck, Luftmenge und Gaszusammensetzung erfasst.

Der erforderliche Druck ist zu bestimmen und sollte max. 100 mbar betragen um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Aufgrund von Gaswegigkeiten im Deponiekörper kommt es zu einer Druckentspannung und dadurch zu einer Druckdifferenz bereits zwischen dem Aggregat und dem belüfteten Brunnen. Dieser Druckverlust ist zu bestimmen. Erfahrungsgemäß sind am Brunnen ca. 10 bis 50 mbar erforderlich um die entsprechende Luftmenge einzubringen. Bei konstanten Belüftungsraten sollten sich nach kurzer Zeit (einige Stunden) konstante Druckverhältnisse einstellen. An den Sonden sind die Überdrücke zu messen, wodurch der Einfluss der Belüftung in Richtung und Reichweite ermittelt wird.

Durch die Belüftung wird zum einen das Deponiegas verdünnt, was zu CH_4 und CO_2 -Abnahmen führt. Zum anderen erfolgt aufgrund aerober Verhältnisse ein schneller Abfall der Methanproduktion. Somit sinkt die Methankonzentration in der Abluft, während sich die Kohlendioxidkonzentrationen aufgrund der Überlagerung von Verdünnungsprozessen und einsetzenden aeroben Abbauprozessen (CO_2 -Produktion) nur geringfügig reduziert. Dadurch verändert sich das CH_4/CO_2 -Verhältnis maßgeblich. Von anfänglich $1,5$ bis 3 sinkt es auf $< 0,5$. Durch Messungen der Gaszusammensetzungen in den Gaspegeln kann der Einfluss der Belüftung in Richtung und Reichweite ermittelt werden.

Aufgrund der Beobachtungen, in welcher Entfernung vom Belüftungsbrunnen noch erhebliche Einflüsse auf Druck und Gaszusammensetzung auftreten, kann die Reichweite abgeschätzt werden. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass mit Reichweiten (Radius) von $15 - 20 \text{ m}$ gerechnet werden kann. Zeigen Stellen eine schlechte Gaswegigkeit, kann dies bei der Aerobisierung durch geringere Brunnenabstände, größere Drücke oder geänderte Betriebsweise ausgeglichen werden. Eine marginale Versorgung dieser Bereiche über Diffusionsprozesse findet jedenfalls statt.

11.2 Vorversuch 2: Säulenversuch

Beispielhaft für Simulationsversuche im Labormaßstab soll an dieser Stelle die Durchführung eines Säulenversuchs beschrieben werden. Es werden Versuchssäulen aus gasdichten Acrylglasrohren (Durchmesser: 20 cm , Höhe: 70 cm) verwendet. Das Abfallmaterial (20 kg FM) wird mittels Schürf oder Bohrung aus der Altablagerung entnommen, auf $< 2 \text{ cm}$ abgesiebt und in Säulen auf einem Rost mit Abstand zum Säulenboden leicht verdichtet eingebaut. Die Säulen verfügen über einen Sickerwasserauslass im Boden sowie Öffnungen in der oberen Abdeckung für Bewässerung und Gasaustritt. Die Säulen werden bewässert und belüftet und bei konstanter Temperatur (z. B. 35°C) betrieben. Als Referenz werden weitere Säulen anaerob betrieben. Luft- und Wasserzufuhr entsprechen den realen Verhältnissen, werden jedoch zur beschleunigten Abbildung der Prozesse mit Zeitfaktoren multipliziert.

In-situ Aerobisierung von Altablagerungen

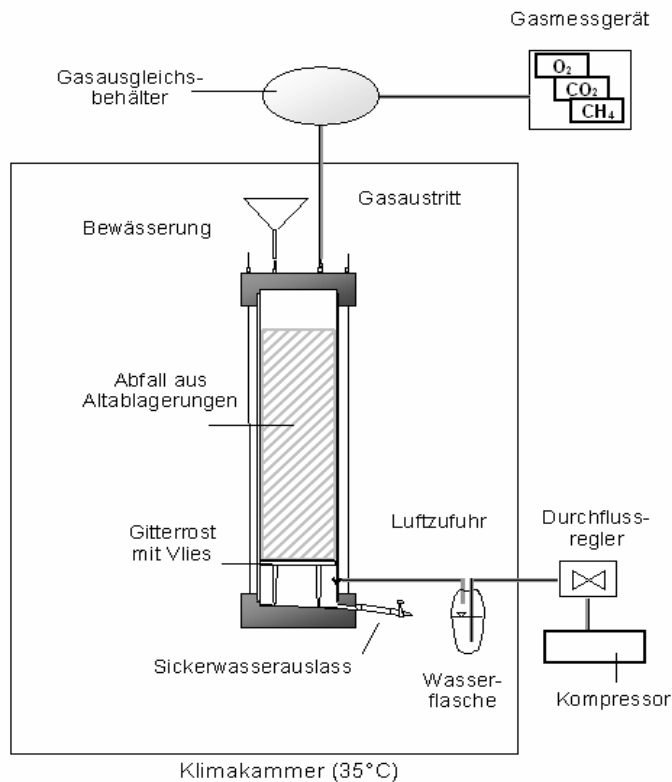


Abb. 11-1: Aufbau und Betriebsweise der Säulenversuche

Die Versuche sind im Doppelansatz durchzuführen (z. B. 2 Säulen anaerob, 2 Säulen belüftet), die empfohlene Betriebsdauer beträgt 4 - 6 Monate. Die zugeführte Luftmenge entspricht der lt. Kap. 9.2 abgeschätzten Menge, bezogen auf die eingebaute Abfallmenge und den Belüftungszeitraum von 6 Monaten. L/F und W/F geben die zugeführten Luft- bzw. Wassermengen bezogen auf den Feststoff bei Versuchsende an. Die aufgegebene Wassermenge ist entsprechend der Infiltration der Altablagerung zu berechnen. Als Richtwerte für die Infiltration können Werte aus der Literatur (z.B. Krümpelbeck, 2000) herangezogen werden.

Tab. 11-1: Berechnungsbeispiel Belüftung

	AT ₄ [mg O ₂ g ⁻¹ TM]	AT _{max} [mg O ₂ g ⁻¹ TM]	Masse [t TM]	Belüftungsdauer [a]	Belüftungsrate [m ³ h ⁻¹]	L/F [m ³ t ⁻¹ TM]
Feld	4,0	30,0	100.000	5	1.000	400
Labor			0,015	0,33	0,002	400

Tab. 11-2: Tab. 3-7: Berechnungsbeispiel Bewässerung

	Niederschlag [mm]	Infiltration [mm]	Oberfläche [m ²]	Masse t TM]	Versuchsdauer [a]	Bewässerungsrate [l Monat ⁻¹]	W/F [m ³ t ⁻¹ TM]
Feld	600	100	10.000	100.000	5		0,05
Labor			0,03	0,015	0,33	1,0	0,25

Im Sickerwasser sind die Parameter pH, LF, CSB, NH₄-N, NO₃-N am Beginn zwei Mal pro Monat, später 1 Mal pro Monat zu bestimmen. Bei erhöhten Gesamtgehalten von Schwermetallen im Feststoff sind die jeweiligen Elemente, speziell in der Anfangsphase auch im Sickerwasser zu analysieren. In der Abluft wird wöchentlich die Zusammensetzung (O₂, CO₂, CH₄) ermittelt. Der Feststoff wird bei Versuchsbeginn und nach Versuchsende

untersucht. Durchzuführende Analysen sind: WG, TOC, GV, AT₄, GS₂₁, FT-IR, Eluattests (CSB, BSB₅, NH₄-N, NO₃-N) und u. U. Schwermetalle im Feststoff und im Eluat.

Folgende Analysen, Parameter und dazugehörige Auswertungen sollen die, in Kap. 3.2 aufgelistet Fragestellungen klären.

- Sickerwasser:
 - CSB: Erreichbarer Endwert (CSB_{Ende})
Erreichbare Reduktion (CSB_{Ende} bezogen auf CSB_{Anfang})
 - NH₄: Erreichbarer Endwert (NH₄-N_{Ende})
Erreichbare Reduktion (NH₄-N_{Ende} bezogen auf NH₄-N_{Anfang})
 - Ausgetragene Schwermetallfrachten (Anfangsphase)
- Abluft:
 - O₂: Berechnung der Sauerstoffnutzungsrate:
Nutzungsrate = (20,95 - O₂-Konzentration der Abluft) / 20,95
 - CO₂, CH₄: Abschätzung des mikrobiell abbaubaren Anteils des TOC mithilfe des gesamten, über die Gasphase ausgetragenen Kohlenstoffs;
 - CH₄: Erreichbarer Reduktion der CH₄-Emission (Konzentration und Fracht)
- Feststoff: TOC, WG, AT, GS, FT-IR, Toxizität
 - TOC: Ermittlung der TOC-Reduktion
 - AT: Erreichbarer Endwert (AT_{Ende})
Erreichbare Reduktion (AT_{Ende} bezogen auf AT_{Anfang})
 - GS: Erreichbarer Endwert (GS_{Ende})
Erreichbare Reduktion (GS_{Ende} bezogen auf GS_{Anfang})
 - Eluattests (CSB, BSB₅, NH₄-N, NO₃-N) Erreichbarer Endwert, Erreichbare Reduktion

12 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AT ₄	Atmungsaktivität in 4 Tagen [mg O ₂ g ⁻¹ TM]
AT _{max}	theoretische maximale Atmungsaktivität [mg O ₂ g ⁻¹ TM]
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen [mg O ₂ l ⁻¹] bzw. [mg O ₂ kg ⁻¹ TM]
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf [mg O ₂ l ⁻¹] bzw. [mg O ₂ kg ⁻¹ TM]
FM	Feuchtmasse [kg]
FT-IR	Fourier-Transformation Infrarot Spektroskopie
GS ₂₁	Gasspendensumme in 21 Tagen [NI kg ⁻¹ TM]
GV	Glühverlust [% TM]
GW	Grundwasser
L/F	Luft zu Feststoff Verhältnis [m ³ t ⁻¹ TM]
LF	Leitfähigkeit [μS]
N	Stickstoff
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff [mg l ⁻¹] bzw. [mg kg ⁻¹ TM]
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff [mg l ⁻¹] bzw. [mg kg ⁻¹ TM]
O ₂	Sauerstoff
SW	Sickerwasser
T	Temperatur [°C]
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff [% TM]
TM	Trockenmasse [kg]
W/F	Wasser zu Feststoff Verhältnis [m ³ t ⁻¹ TM]
WG	Wassergehalt [m/m -%]
wk _{max}	Maximale Wasserhaltekapazität [m/m -%]

13 LITERATUR

- AEV Deponiesickerwasser (2003): Verordnung über die Begrenzung von Sickerwasseremissionen aus Abfalldeponien, BGBl. I Nr. 263/2003.
- Heyer K.-U., Hupe K., Stegmann R. (2002): Technische Umsetzung und Kosten der in situ Stabilisierung mit dem Aeroflott-Verfahren: Erfahrungen auf den Altdeponien Kuhstedt, Amberg und Milmlersdorf. in: Deponietechnik 2000. Verlag Abfall aktuell, Hamburg.
- Heyer K.-U. (2003): Technische Umsetzung der in situ Belüftungsmassnahmen. in: Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Verlag Abfall aktuell, Hamburg.
- ÖNORM S 2088 Teil 1 (1997): Altlasten. Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Grundwasser.
- ÖNORM S 2023 (1986): Untersuchungsmethoden und Güteüberwachung von Komposten.
- Prantl R., M. Tesar, M. Huber-Humer und P. Lechner (2006): Pilotversuch zur In-Situ Aerobisierung von Deponien in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 1-2/2006, pp. 6-12, Springer Verlag.
- Projektgruppe INTERLAND (2006): Endbericht INTERLAND – Innovative Technologies for Remediation of Landfills and Contaminated Soils.
- Rettenberger G. (2001): Stabilisierung einer Altlast durch Einblasen von Luft am Beispiel der Altablagerung Lorenkamp. in: Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft – Deponiegas. (Hrsg.: Rettenberger, Stegmann), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.
- Ritzkowski M., Heyer K.-U., Stegmann R. (2002): Praxiserfahrungen mit der in situ-Belüftung von Altdeponien. Konferenzbericht: 6. DepoTech Fachtagung, 2002, Leoben, Österreich.
- Ritzkowski M. (2005): Beschleunigte aerobe In-situ Stabilisierung von Altdeponien. Hamburger Berichte 26. TU Hamburg-Haburg: Verlag Abfall aktuell.