

**Technische Arbeitshilfe**

**In-Situ Verfahren zur Sicherung und Sanierung von  
Altablagerungen**

erstellt im Forschungsprojekt  
INTERLAND

Überarbeitet im Rahmen des Projektes NUTZRAUM

November 2011

# In-Situ Verfahren zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen

Autoren: Roman Prantl<sup>1</sup>, Maria Tesar<sup>1</sup>, Marion Huber-Humer<sup>1</sup>, Carolin Heiss-Ziegler<sup>1</sup>

Überarbeitung 2011: Marion Huber-Humer<sup>1</sup>, Roman Prantl<sup>2</sup>, Oliver Gamperling<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Institut für Abfallwirtschaft; Universität für Bodenkultur, 1190 Wien, Österreich



<sup>2</sup> blp GeoServices gmbh, Schottenfeldgasse 63/2 | A-1070 Wien, Österreich

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



lebensministerium.at



## Vorwort

Die vorliegende Arbeitshilfe beruht einerseits auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes NUTZRAUM (Innovative in-situ Methoden zur Sanierung von Altablagerungen und kontaminierten Standorten) und andererseits auf dem Papier das im Zuge des vorangegangenen Projektes INTERLAND (INnovative TEchnologies for Remediation of LANDfills and Contaminated Soils; <http://interland.arcs.ac.at>) erarbeitet worden war. Im Rahmen des Projektes NUTZRAUM wurden ausgewählte „INTERLAND-Leitfäden“ auf Basis der neu erarbeiteten Daten und vorhandenen internationalen Erfahrungen aktualisiert. Zugleich wurde die bisher als „Leitfäden“ bezeichneten Schriften der Nomenklatur des ÖVA (Österreichischer Verein für Altlastenmanagement, [www.altlastenmanagement.at](http://www.altlastenmanagement.at)) angepasst bei der zwischen den folgenden Bezeichnungen unterschieden wird:

- Wissenschaftlich-technische Grundlagen
- Arbeitshilfe
- Technischer Leitfaden

Diese Bezeichnungen spiegeln den Entwicklungsgrad der beschriebenen Methode und die Detailtiefe des Regelwerkes wider und geben somit einen Hinweis, was der/die LeserIn von der jeweiligen Schrift erwarten kann. Unverändert geblieben ist der Anspruch der jeweiligen Autoren mit diesen Arbeiten eine Hilfestellung für die praktische Anwendung von in-situ Methoden zu geben, die auf dem derzeitigen internationalen Erkenntnisstand inklusive den im Projekt NUTZRAUM gewonnen Erkenntnissen beruht.

Damit soll ein weiterer Beitrag zur Etablierung der dargestellten Methoden als „Stand der Technik“ geleistet werden. Die vorliegende Arbeitshilfe soll daher vor allem Amtssachverständigen und Zivilingenieuren als Entscheidungshilfe dienen, ob eine bestimmte Methode für einen aktuellen Sanierungsfall prinzipiell geeignet ist. Diese Information wird vor allem in den Kapiteln „Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen (ERB)“ sowie „Vorversuche“ gegeben. Darüber hinaus gibt die Arbeitshilfe 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.

Thomas G. Reichenauer

Tulln, im Dezember 2011

## Inhaltsverzeichnis

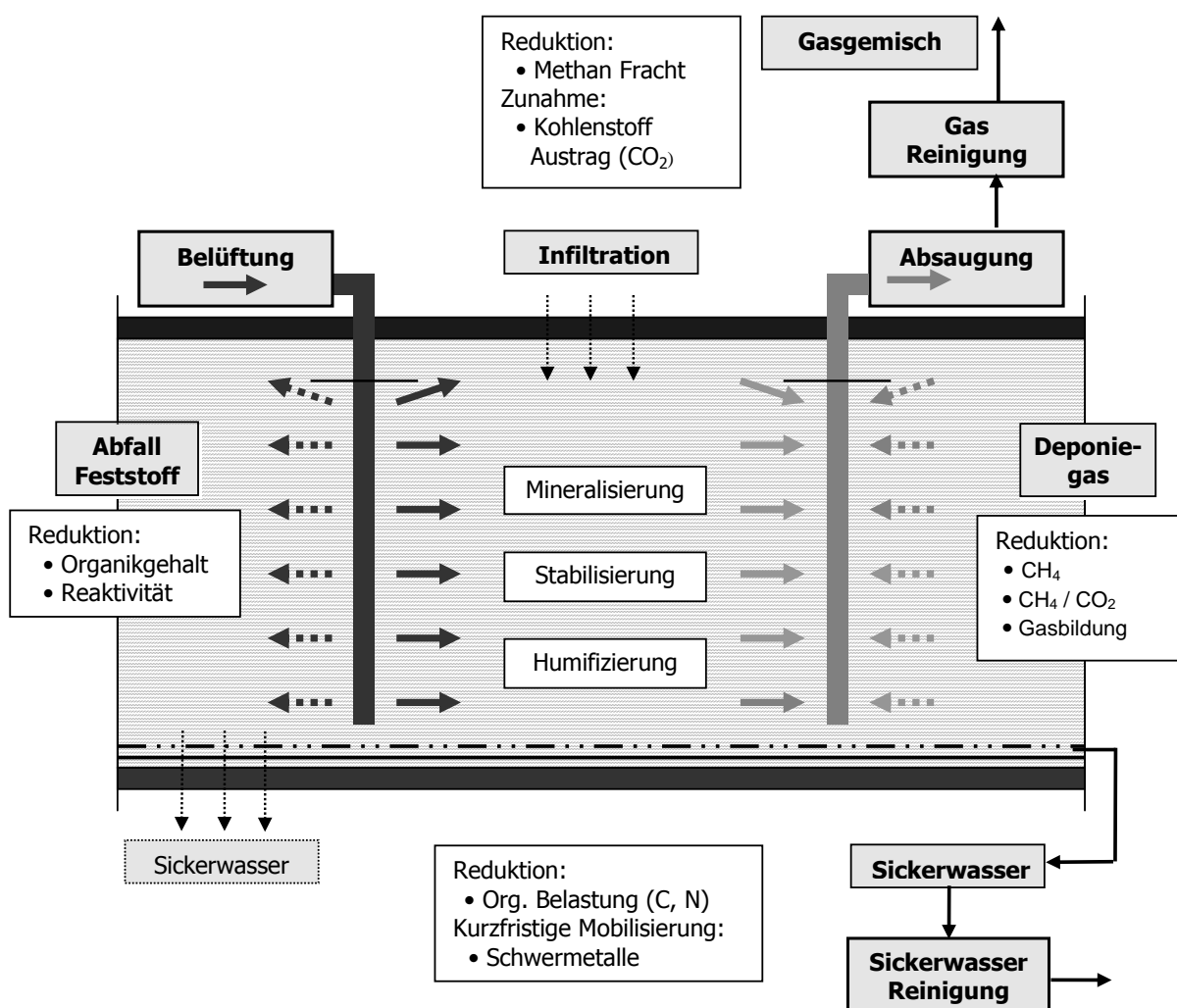
1	In-Situ Aerobisierung von Altablagerungen .....	5
1.1	Grundlagen .....	5
1.1.1	Wirkungsweise und Zielsetzung .....	5
1.1.2	Gesetzliche Grundlagen und Normen .....	6
1.2	Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen .....	6
1.2.1	Abfalleigenschaften.....	8
1.2.2	Emissionsbild .....	8
1.2.3	Standort und Infrastruktur .....	8
1.2.4	Technische Barrieren.....	9
1.3	Erforderliche Vorkenntnisse und empfohlene Vorversuche .....	9
1.3.1	Belüftungs- und Absaugversuch (Vorversuch 1) .....	10
1.3.2	Gefäßversuch (Vorversuch 2) .....	11
1.4	Erreichbare Emissionsminderung (Restgefahrenpotential).....	11
1.5	Qualitätssicherung des Verfahrens und Monitoring .....	14
1.6	Zeitrahmen.....	16
1.7	Kosten.....	16
1.8	Vor- und Nachteile.....	16
1.9	Praktische Umsetzung.....	16
1.9.1	Technische Einrichtungen .....	17
1.9.2	Dimensionierung .....	18
1.9.3	Betrieb.....	19
1.10	Entwicklungsstand, Beispiele für erfolgreichen Einsatz .....	20
1.10.1	Altdeponie Kuhstedt (D) .....	20
1.10.2	Altdeponie Lorenkamp (D) .....	20
1.10.3	Laufende Sanierung Deponie Dörentrup (D, Stand 2011) .....	20
1.10.4	Österreichische Altablagerungen .....	21
2	Anhang .....	22
	Vorversuch 1: Belüftungs- und Absaugversuch.....	22
	Vorversuch 2: Säulenversuch.....	22
	Empfehlungen / Maßnahmenkatalog zu Voruntersuchungen bzw. begleitenden Untersuchungen im Labor	25
3	Abkürzungsverzeichnis .....	27
4	Literatur.....	28

# 1 IN-SITU AEROBISIERUNG VON ALTABLAGERUNGEN

## 1.1 Grundlagen

### 1.1.1 Wirkungsweise und Zielsetzung

Emissionen, die aus Altablagern 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 im Deponiekörper vorherrschenden Milieubedingungen bestimmt. Eine Möglichkeit zur Minimierung dieser Emissionen und zur Stabilisierung der am Standort verbleibenden Restorganik stellt die In-Situ Aerobisierung dar. Dabei wird mittels aktiver 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 der In-situ Aerobisierung und die dabei ablaufenden Prozesse:



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

Durch den Sauerstoff der Umgebungsluft kommt der anaerobe biologische Abbau großteils 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 werden soll. Nach Abschluss der Sanierung verbleiben nur noch schwer- bzw. nicht abbaubare organische 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<sub>4</sub>) 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.

### 1.1.2 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 in Altablagerungen 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 idF BGBl. I 9/2011.
- AEV Deponiesickerwasser (2003): Verordnung über die Begrenzung von Sickerwasseremissionen aus Abfalldeponien, BGBl. I Nr. 263/2003 idF BGBl. II Nr. 103/2005.
- Altlastensanierungsgesetz (1989): Bundesgesetz zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung, BGB. I Nr. 299/1989 idF BGBl. I Nr. 15/2011.
- Deponieverordnung (2008): Verordnung über die obertägige Ablagerung von Abfällen, BGBl. Nr. 164/1996 idF BGBl. II Nr. 39/2008.
- ON VORNORM 2027 Teil 1 und 2 (2002): Stabilitätsparameter zur Beurteilung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen.
- ON S 2088 Teil 1 bis 3 (1997-2004): Normenserie, Altlasten. Gefährdungsabschätzung für die Schutzgüter Grundwasser, Boden und Luft.
- ON S 2090 (2005): Bodenluft-Untersuchungen.
- Wasserrechtsgesetz – WRG (1957): Bundesgesetz zuletzt geändert mit BGBl. I Nr. 123/2006.

## 1.2 Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen

Die In-Situ Aerobisierung ist ein Sanierungsverfahren für Altablagerungen, dessen Gefahrenpotential maßgeblich von organischen Abfällen ausgeht. Sind die Emissionen durch organische oder anorganische Schadstoffe, wie z.B. Kohlenwasserstoffe oder 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. 1.2.1 bis 1.2.4 beschrieben werden. Folgendes Flussdiagramm (Abb. 1-2) gibt eine Entscheidungshilfe, über die prinzipielle technische Anwendbarkeit der In-Situ Aerobisierung.

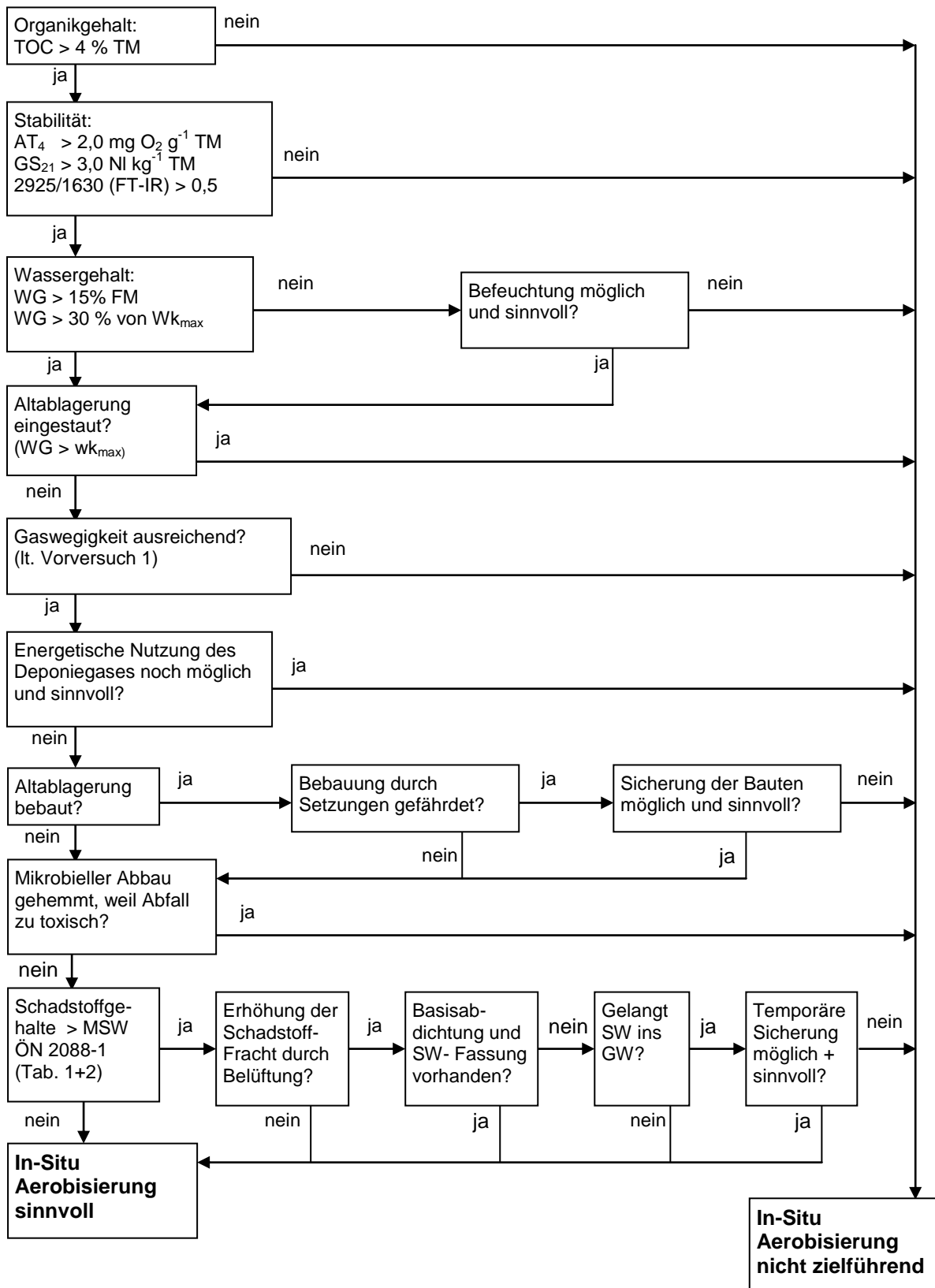


Abb. 1-2: Flussdiagramm als Entscheidungshilfe zum Einsatz der In-Situ Aerobisierung (Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis Seite 27)

### 1.2.1 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 ( $\text{AT}_4$ ) und das Gasbildungspotential ( $\text{GS}_{21}$ ) 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 Arbeitshilfe „Monitoring“). Dabei ist das Verhältnis der relativen Absorptionen bei den Wellenlängen  $2925$  und  $1630 \text{ cm}^{-1}$  ein aussagekräftiger Parameter. Ist dieses Verhältnis  $> 0,5$ , ist noch eine effiziente 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 ( $\text{Wk}_{\text{max}}$ ) beeinflusst und liegt zwischen 25 und 40 % der Feuchtmasse (FM) bzw. 60 und 90 % von  $\text{Wk}_{\text{max}}$ . Die Untergrenze des WG liegt bei ca. 15 % FM (30 bis 35 % von  $\text{Wk}_{\text{max}}$ ) und die Obergrenze stellt die maximale Wasserhaltekapazität dar (100 %  $\text{Wk}_{\text{max}}$ ), 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. Die Durchlässigkeit und Gaswegigkeit muss für eine effiziente Belüftung im Vorfeld unbedingt untersucht werden. Mit dem in Kapitel 1.3.1 beschriebenen Belüftungsversuch (Vorversuch 1) kann diese Fragestellungen abgeklärt werden.

### 1.2.2 Emissionsbild

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

- Eine Gasproduktion deren Erfassung und Behandlung aus Klimaschutzgründen und/oder Sicherheitsgründen noch erforderlich ist, aber deren energetische Nutzung technisch nicht mehr möglich oder wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll ist.
- Eine organische Sickerwasserbelastung bzw. Stickstoffbelastung in und nach der stabilen Methanphase, die langfristig noch eine erhebliche Gefährdung für das Grundwasser darstellt.

### 1.2.3 Standort und Infrastruktur

#### Geometrie und Ausstattung:

Bei tiefen Altablagerungen ( $> 20 \text{ m}$ ) ist die Bohrung der Gasbrunnen technisch anspruchsvoller und auch die Lufteinbringung in den unteren Deponieabschnitten kann bei durchgehenden Brunnen unzureichend sein. Tiefengestaffelte Belüftungsbrunnen/-lanzen können hier Abhilfe schaffen. Bei sehr seichten Altablagerungen ( $< 3 \text{ m}$ ) ist die Einbringung der Luft aufwändig, da sich bei herkömmlichen Belüftungsbrunnen der Einflussradius drastisch verringert. Hier können evt. horizontale Belüftungsrohre, oder ein Verfahren wie das Beispiel



„Rotteballendeponie Pill“ (siehe 10.4(3)) zur Anwendung kommen. Die Größe der Altablagerung spielt keine besondere Rolle, da die Anlagenteile im Modulsystem erweitert werden können. (Es gibt Anwendungsbeispiele aus Deutschland mit mehreren Mio. m<sup>3</sup> Deponievolumen): 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; Praxiseinsatz NUTZRAUM: innerhalb von 2,5 Jahren bis zu 3 %). 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 Lärmbelästigungen 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. Vorsicht ist bei Anlagenkonzepten mit oberirdisch, nicht isoliert verlegten Belüftungsleitungen gegeben, da es hier im Winter durch die Abkühlung der zugeführten Luft zu einer deutlichen Kühlung im Deponiekörper kommen kann (siehe Kapitel 1.9.3). Niederschlag ist (in gemäßigten Klimazonen) meist kein limitierender Faktor. Lediglich in sehr trockenen oder sehr feuchten Gebieten kann es zu negativen Effekten kommen (siehe Kap. 1.2.1 Wassergehalt).

### **1.2.4 Technische Barrieren**

Prinzipiell kann die Aerobisierung bei Altablagerung ohne Basisabdichtung und Sickerwasserfassung eingesetzt werden. Es ist jedoch eine mögliche Mobilisierung von Schadstoffen (organisch und anorganisch) in der ersten Phase der Belüftung und deren Gefahrenpotential zu überprüfen. Zeigen die Schadstoffgehalte im Feststoff und im Eluat deutliche Überschreitungen der Massnahmenswellenwerte lt. ON 2088-1 (Tabelle 1 + 2) ist durch Laborversuche (siehe Kap. 1.3.2 Vorversuch 2) zu untersuchen, ob es bei dem spezifischen Abfallmaterial durch die Belüftung zu einer wesentlichen Erhöhung der Schadstofffracht im Sickerwasser kommt. Auch eine Erhöhung des CSB im Sickerwasser ist in der Anfangsphase einer Belüftung möglich. Ist eine massive Mobilisierung nicht auszuschließen und ist kein Sickerwasserfassungssystem vorhanden, muss überprüft werden, ob das Sickerwasser (SW) ins Grundwasser (GW) gelangt (z.B. Tritium-Methode; siehe Arbeitshilfe „Monitoring“) und welche Auswirkung diese Schadstofffracht und CSB-Erhöhung im Grundwasserkörper haben kann. Zeigen diese Untersuchungen ein erhöhtes Risiko besteht die Möglichkeit, mit einer temporären Sicherung (z.B. mit Sperrbrunnen) den Schadstofftransport ins Grundwasser zu unterbinden.

### **1.3 Erforderliche Vorkenntnisse und empfohlene Vorversuche**

Ist die zu sanierende Altablagerung bereits im Altlastenatlas verzeichnet, so liegen in der Regel bereits etliche 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. 1.2 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. 1-3) für die erforderlichen Vorkenntnisse und Voruntersuchungen.

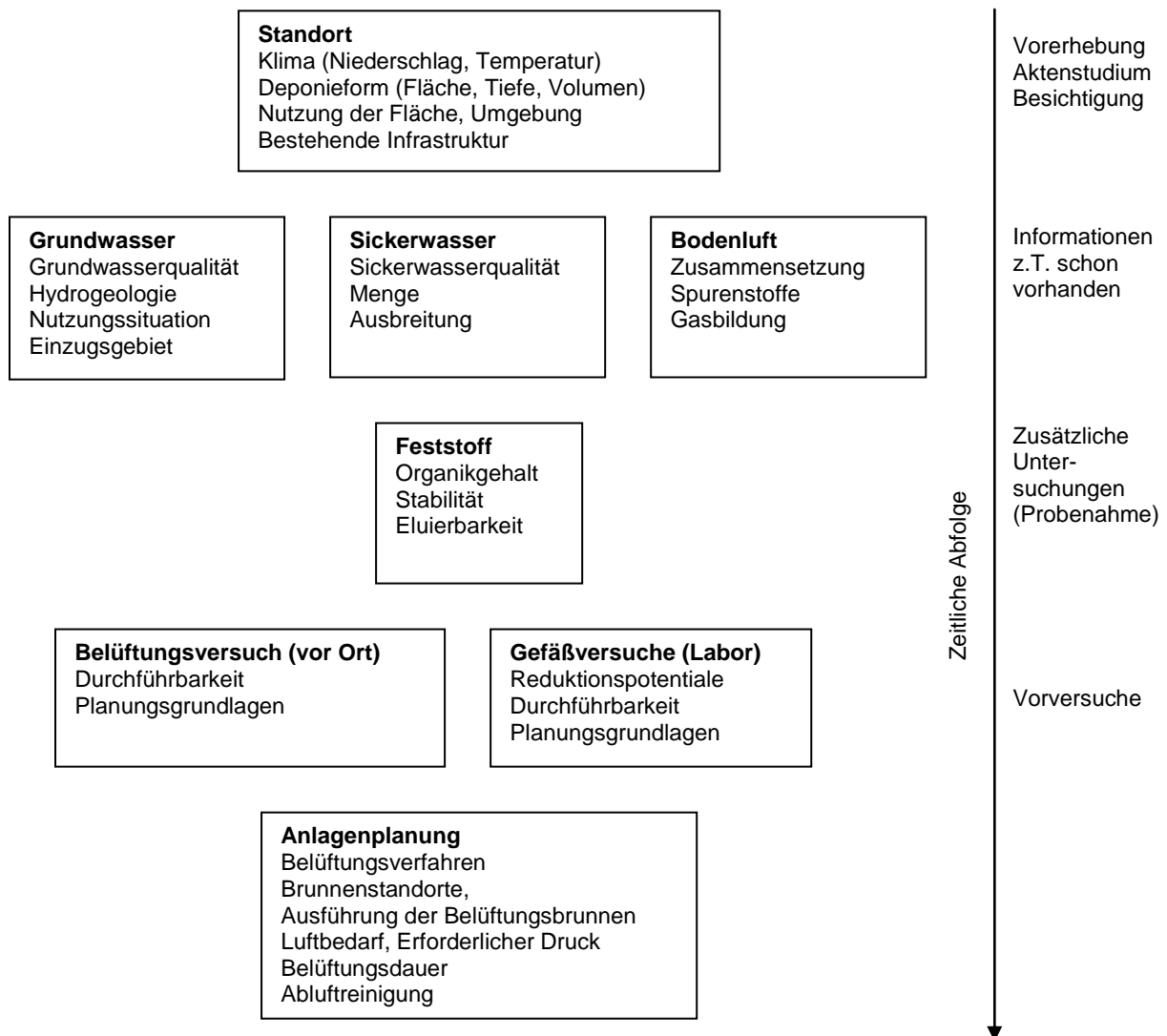


Abb. 1-3: Erforderliche Vorkenntnisse und Vorversuche

### 1.3.1 Belüftungs- und Absaugversuch (Vorversuch 1)

Dieser Vorversuch soll klären, ob es aufgrund der spezifischen Situation der Altablagerung mit dem vorgesehenen Belüftungsverfahren 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 und Ausführung der Belüftungsbrunnen
- Festlegung des Belüftungsverfahrens

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 m<sup>2</sup> Deponiefläche ein Belüftungsversuch durchzuführen ist. Im Anhang wird dieser Versuch mit den Entscheidungskriterien detailliert beschrieben.

### 1.3.2 Gefäßversuch (Vorversuch 2)

Zur Untersuchung der Emissionsreduzierungspotentiale und zur Bestimmung von Betriebsparametern ist ein Versuch durchzuführen, 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 die 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 m<sup>3</sup> Deponievolumen angegeben werden. Bei Auswertungen und Ableitungen für den Praxiseinsatz ist besonders zu berücksichtigen, dass durch die Aufbereitung und Homogenisierung des Materials im Labor ein „optimiert abbaubares Abfallmaterial“ generiert wird. Oft wird durch die Aufbereitung des Materials vor Ort (Aus-sortieren grobstückiger Abfallmaterialien (z.B. sperrige Metallteile, Steine, Kunststofffolien) und das Absieben <20 mm vermehrt die biologisch abbaubare Abfallfraktion für die Labor-Vorversuche herangezogen. Die verfügbare Organik bezogen auf kg TM wird dabei sozusagen „aufkonzentriert“. Weiters wird oft durch das Absieben und Aufbrechen größerer Stücke, eine für die Mikroorganismen besser angreifbare Oberfläche geschaffen. Dies bedingt nicht nur einen forcierten mikrobiellen Ab- und Umbau sondern auch eine wesentlich bessere Auslaugbarkeit im Laborversuch. Dieser Umstand ist bei derartigen Voruntersuchungen bzw. begleitenden Laborversuchen und deren Umlegung auf Freilandbedingungen zwingend zu berücksichtigen. Im Anhang ist beispielhaft die Durchführung eines Säulenversuches beschrieben.

### 1.4 Erreichbare Emissionsminderung (Restgefahrenpotential)

Erkenntnisse und Erfahrungen aus Labor- und Feldversuchen im Rahmen der Projekte INTERLAND und NUTZRAUM, 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<sup>-1</sup>; NH<sub>4</sub>-N: 200 mg l<sup>-1</sup>) innerhalb relativ kurzer Zeit erreicht. Feldversuche zeigen dieselben Entwicklungen, jedoch deutlich langsamer und in Abhängigkeit der Randbedingungen und der eingesetzten Technologie (siehe Tab. 1-1).

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

	Anfangs-konzentration	Rest-konzentration	Erreicht nach [Monaten]	Reduktion	Versuchs-art	Quelle
<b>CSB</b> [mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup> ]	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
	1.000 – 1.300	<100	24	>90%	Labor	NUTZRAUM
	3.600	270	9 - 10	>90 %	Labor	NUTZRAUM
	1.500	170	7 - 8	90 %	Labor	NUTZRAUM
	900 – 1.100	480 – 1.100	30 -36	0 - 40%	Feld	NUTZRAUM
<b>NH<sub>4</sub>-N</b> [mg l <sup>-1</sup> ]	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
	600 - 700	<1	24	>99 %	Labor	NUTZRAUM
	2.200	<1	9 - 10	>99 %	Labor	NUTZRAUM
	310	< 1	7 - 8	> 99 %	Labor	NUTZRAUM
	520 - 550	260 - 280	30 - 36	ca. 50%	Feld	NUTZRAUM

Durch den beschleunigten Abbau erhöht sich der Kohlenstoffaustrag deutlich, hauptsächlich in Form von CO<sub>2</sub> und die Methanfracht wird stark reduziert. Das Gasbildungspotential ist nach der Belüftung sehr gering und auch das verbleibende Restgas weist ein geringes Verhältnis von CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> auf.

Abb. 1-4 zeigt die ökologischen Auswirkungen (Klimarelevanz und Eutrophierung) einer Altablagerung mit und ohne In-Situ Aerobisierung, bilanziert über 30 Jahre. In der Gasphase wurden die CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen, im Sickerwasser die Parameter CSB und NH<sub>4</sub>-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 CO<sub>2</sub> erhöht. Wird das CO<sub>2</sub> als klimaneutral betrachtet, da es aus biogenen Quellen stammt, ergibt sich durch die Aerobisierung eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Äquivalente um 75 %. Bei Bilanzierung der Sickerwasseremissionen (Eutrophierung) zeigt sich, dass eine Verringerung der PO<sub>4</sub>-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.

In Abhängigkeit der Eingangsfaktoren und der Rahmenbedingungen können diese Bilanzierungen an anderen Standorten ein deutlich anderes Ergebnis liefern – an dieser Stelle soll damit nur beispielhaft gezeigt werden, dass mit In-Situ Aerobisierung eine wesentliche Verbesserung der ökologischen Gesamtsituation erreicht werden kann.

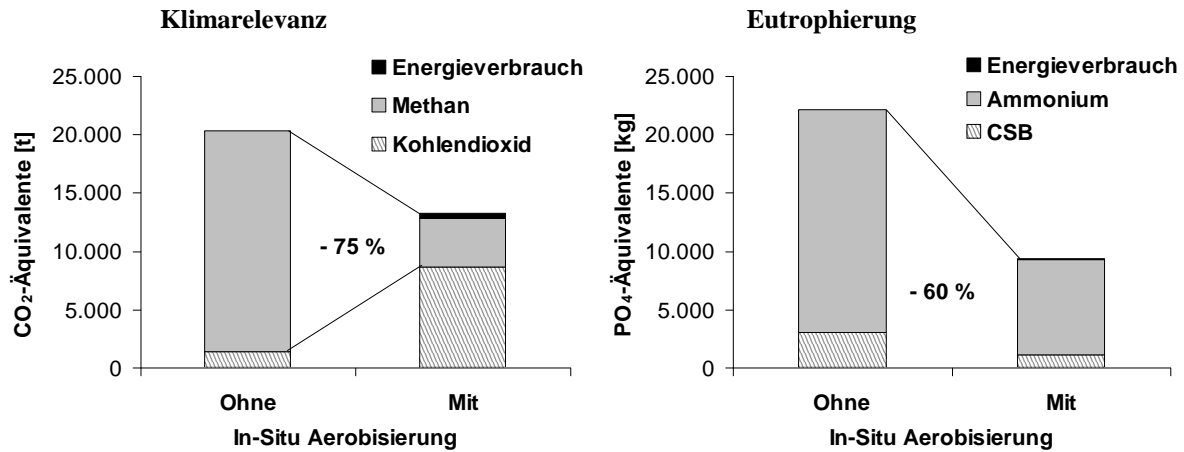


Abb. 1-4: Umweltauswirkungen (Klimarelevanz und Eutrophierung) einer Altablagerung mit und ohne In-Situ Aerobisierung

Durch die Belüftung werden nicht nur die aktuellen Emissionen reduziert, sondern auch der Abfallfeststoff selbst wird stabilisiert. Die Reaktivität (AT<sub>4</sub>, GS<sub>21</sub>, FT-IR) und die eluierbaren Anteile organischer bzw. Stickstoffverbindungen (CSB, BSB<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>-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. 1-2: In Labor- und Feldversuchen erreichte Feststoffqualität

	Anfangs-wert	Rest-konzentration	Erreicht nach [Monate]	Reduktion	Versuchs-art	Quelle
<b>AT<sub>4</sub></b> [mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> TM]	3,1-3,7	0,2-0,7	2-9	80-95 %	Labor	INTERLAND
	3,5	2,2	18	35 %	Feld	INTERLAND
	1,9	0,2	24	90 %	Labor	NUTZRAUM
	5,3	2,1	9 - 10	60 %	Labor	NUTZRAUM
	1,0	0,4	7 - 8	60 %	Labor	NUTZRAUM
	2,0	2,0	30	--	Feld	NUTZRAUM
<b>GS<sub>21</sub></b> [NI kg <sup>-1</sup> TM]	5,6	0,1	9	98 %	Labor	INTERLAND
	6,0	1,3	18	78 %	Feld	INTERLAND
	0,6	0,1	24	80 %	Labor	NUTZRAUM
	3,0	0,4	9 - 10	85 %	Labor	NUTZRAUM
	3,7	0,1	7 - 8	> 95 %	Labor	NUTZRAUM
	0,7	1,0	30	--	Feld	NUTZRAUM
<b>FT-IR</b> 2925/1630	0,47	0,28	9	40 %	Labor	INTERLAND
	0,56	0,46	18	20 %	Feld	INTERLAND
	0,60	0,50	9 -10	20 %	Labor	NUTZRAUM
	0,70	0,40	7 - 8	40 %	Labor	NUTZRAUM
<b>BSB<sub>5</sub> (Eluat)</b> [mg O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> TM]	200-1000	<30	2-6	> 97 %	Labor	INTERLAND
	3000	700	18	80 %	Feld	INTERLAND
	55	30	24	45 %	Labor	NUTZRAUM
	720	30	9 - 10	95 %	Labor	NUTZRAUM
	50	35	7 - 8	30 %	Labor	NUTZRAUM
	500 - 580	510	30	5 %	Feld	NUTZRAUM

<b>NH<sub>4</sub>-N (Eluat) [mg kg<sup>-1</sup> TM]</b>	500-2.000	<4	2-4	> 99 %	Labor	INTERLAND
	1000	700	18	30 %	Feld	INTERLAND
	490 - 500	< 5	24	> 99 %	Labor	NUTZRAUM
	1.300	10	9 - 10	> 99 %	Labor	NUTZRAUM
	150	30	7 - 8	80 %	Labor	NUTZRAUM
	590	550	30	< 10 %	Feld	NUTZRAUM

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 Anhang und Kap. 1.3.2) 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: AT<sub>4</sub>, FT-IR, Eluierbarkeit (BSB<sub>5</sub>, CSB, NH<sub>4</sub>-N)
- Sickerwasser: CSB, BSB<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>-N
- Gasphase: Kohlenstoffaustrag, Restgasproduktion

Bei allen Parametern ist die jeweilige Ausgangssituation sehr genau zu betrachten und bei der Umlegung der Daten aus den Laborversuchen die Verzerrung der Übertragbarkeit durch die Probenaufbereitung (beschrieben unter Punkt 1.3.2) zu berücksichtigen, um realistisch erreichbare und ökonomisch vertretbare Zielwerte festlegen zu können.

## 1.5 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. 1-3: Qualitätssicherung und Monitoring einer In-Situ Aerobisierung

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

### Feststoff:

Der Abfallfeststoff sollte vor und nach der Sanierung untersucht werden, sowie weiters bei Halbzeit, der zu erwartenden erforderlichen Sanierungsdauer. Organikgehalt, Stabilität sowie Eluatparameter sind zu ermitteln. Detaillierte Beschreibungen zu den Feststoffuntersuchungen (Probenahme und Analytik) finden sich in der Arbeitshilfe „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 sollte zumindest halbjährlich, das Sickerwasser 6-mal jährlich analysiert werden.

### Gasphase:

Über In-Situ Sonden kann die Zusammensetzung der Bodenluft im Deponiekörper gemessen werden.. Dabei soll der Methangehalt möglichst gering sein und ausreichend 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 Gasmischtes 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 kann die Temperatur im Deponiekörper auf bis zu  $50$  °C ansteigen 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. Bei oberirdisch verlegten und nicht isolierten Belüftungsleitungen kann auch ein umgekehrter Temperatureffekt im Winter eintreten. Die zugeführte kalte Umgebungsluft kann den Deponiekörper auch deutlich abkühlen und die Abbauprozesse verlangsamen bzw. stoppen.

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
  - Bevorzugten Wegigkeiten
  - (Partieller) Wassereinstau
  - Falsche Betriebsweise (zu geringer Druck, zu geringe Luftmengen, zu geringe Temperaturen im Winter bei nicht isolierten Zuluftsträngen)

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.

## 1.6 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), von der Deponiegeometrie und von den, zu erreichenden Zielvorgaben ab. Der heutige Wissenstand lässt erwarten, dass - in Abhängigkeit dieser Faktoren – nach etwa 3 bis 8 Jahren Belüftung ein ausreichend stabiler Zustand erreicht werden kann.

## 1.7 Kosten

Aufgrund verschiedener Einflussgrößen, wie z.B. Größe der Ablagerung, Art der Abfälle oder vorhandene Infrastruktur können die Kosten erheblich variieren. Erfahrungen aus Deutschland zeigen spezifische Kosten von 1 bis 3 Euro pro m<sup>3</sup> Deponievolumen für alle baulichen Bestandteile und Betriebskosten (Heyer et. al. 2002, 2011). Der österreichische Pilotversuch (INTERLAND) wies 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 m<sup>3</sup> hinzu zu rechnen, womit sich Gesamtkosten von 2 bis 5 Euro pro m<sup>3</sup> ergeben. Die Kosten im Projekt NUTZRAUM für Errichtung und Betrieb (3 Jahre) der Anlage lagen bei etwa 5 - 6 Euro/m<sup>3</sup>. Bei ungünstiger Geometrie (z.B. zu geringmächtige Ablagerung) können sich Gesamtkosten von ca. 10 Euro/m<sup>3</sup> ergeben.

Hinsichtlich Deponienachsorge ist nach Schätzungen von Heyer (2011) auf vielen Deponien durch eine In-situ Stabilisierung mit Kosteneinsparungen von ca. 10 – 25 % der Gesamtkosten zur Stilllegung und Nachsorge zu rechnen, indem sich der Aufwand für die In-situ Aerobisierung durch verringerte Kosten für z.B. die Sickerwasserbehandlung- und -entsorgung rechnet.

## 1.8 Vor- und Nachteile

Beim Einsatz dieses Verfahrens im Zuge einer Altlastensanierung ergeben sich etliche Vorteile: Dieses Verfahren stellt eine 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, BSB<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>) 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 Ablagerungen mit überwiegend Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbemüll geeignet. Bei bebauten Ablagerungen ist dieses Verfahren aufgrund der Setzungen nur bedingt geeignet, oder aufwändiger. Es kann in der Anfangsphase zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen (Schwermetalle, organische Schadstoffe, erhöhter CSB) 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 ausgleichen sollte.

## 1.9 Praktische Umsetzung

Derzeit sind bereits unterschiedliche Verfahren und Verfahrenskombinationen zur In-situ Aerobisierung (mit dem Ziel der langfristigen Stabilisierung der organischen Substanz) im Einsatz. Nach Ritzkowski und Stegmann (2011)



kann man die Niederdruck-Belüftungsverfahren (üblich 20 - 80 mbar; jedenfalls < 0,3 bar) wie folgt zusammenfassen:

- **Aktive Belüftung mit Absaugung der Abluft:** z.B. AEROflott® (Heyer et al., 2006), AIRFLOW® (Cossu et al., 2003) oder Smell-Well® (IUT Group, 2011); Unterschiede in den Verfahren sind vor allem durch die Ausführung der Gasbrunnen und die Art der Abluftreinigung gegeben (von Biofilter/Biowäscherverfahren bis zur Regenerativen Thermischen Oxidation (RTO)).
- **Aktive Belüftung ohne Gasabsaugung und Abgasreinigung:** keine aktive Gasfassung, Abluft wird über Oberflächenabdeckung gefiltert, die eventuell als Methanoxidationsschicht ausgeführt oder ertüchtigt sein kann; die Belüftung erfolgt entweder über vertikale Gasbrunnen (Reiser et al., 2011) oder über Lufteinbringung in die ungesättigte Bodenzone unterhalb der Abfallablagerung (Kraiger et al., 2011).
- **Passive Belüftung (Air venting, „über Gasabsaugung“):** Einbringung der Umgebungsluft über die Oberfläche, Gasdrainagegräben, Fenster, etc. bzw. offene Gasbrunnen durch erzeugten Unterdruck im Deponiekörper (z.B. DEPO+®). Die Absaugbrunnen sind oft nur in den tieferen Bereichen verfiltert um Kurzschlüsse zu unterbinden und eine effiziente Belüftung des Deponiekörpers zu bewirken, deutliche Übersaugung des Deponiekörpers notwendig, Abluft wird häufig über Biofilter gereinigt.
- **Energieautarke Langzeit-Belüftung:** für Langzeitbelüftungsmaßnahmen bzw. nach einer aktiven Belüftung, für geringe Belüftungsraten mit windbetriebenen Sauglüftern (Aspiratoren, Windräder), die z.B. auf den bestehenden Gas-/Belüftungsbrunnen aufgesetzt werden (Ritzkowski et al., 2009), angedacht in Kombination mit Methanoxidationsschichten
- **Semi-aerobes Konzept:** eines der ältesten Verfahren, das Sickerwassererfassungssystem ist entsprechend ausgelegt und fungiert gleichzeitig als Belüftungssystem (oft in Kombination mit vertikalen Belüftungsöffnungen/-brunnen, Luftbewegung durch „Kaminzugeffekt“ verstärkt) (Matsufuji and Tachifuji, 2007; Kim et al., 2010).

### 1.9.1 Technische Einrichtungen

Hier wird in Folge die „klassische“ aktive Niederdruck-Belüftung mit Gasfassung näher erläutert. 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. Es kann u.U. jedoch auch sinnvoller sein, jeden Gasbrunnen mit einem einzelnen kleinen Verdichter zu versorgen.

Besteht bereits ein herkömmliches Gasbrunnensystem, können diese Gasbrunnen prinzipiell 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 und dem Wasserhaushalt des Deponiekörpers. Zur Ermittlung des erforderlichen Drucks und der tatsächlichen Reichweite ist ein Belüftungsversuch erforderlich (siehe Kap. 1.3.1).

Bisher wurde häufig mit Brunnenabständen zwischen 30 und 40 m gearbeitet und soweit gute Ergebnisse erzielt. Ist ein Deponiekörper aber wenig gasdurchlässig (z.B. hoher Wassergehalt, Wasseransammlung im Deponiekörper) müssen die Brunnenabstände deutlich verringert werden. Auch ist bei mächtigeren Ablagerungen und geringer Durchlässigkeit ein Konzept empfehlenswert, bei dem die Belüftungsrohre der Gasbrunnen nur im unteren Bereich perforiert sind und die Belüftungsbrunnen tiefengestaffelt versetzt werden. Die Erfahrungen aus NUTZRAUM haben z.B. gezeigt, dass in durchgängig geschlitzten Belüftungsrohren die aufgebrachten Überdrücke bereits in den oberen 2 – 3 m verschwinden und die Luft darunter nur mehr diffusiv und nicht konvektiv in den Abfallkörper eingebracht werden kann, was die Luftausbreitungs- und Belüftungseffizienz deutlich vermindert.

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 in geringem Umfang auch 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 dieser Arbeitshilfe.

Die Messeinrichtungen zeichnen Gaszusammensetzung der Abluft, Luftmenge und Über- bzw. Unterdrücke automatisch auf. Die Regelung der eingebrachten Luftmenge kann über den kontinuierlich gemessenen O<sub>2</sub>-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.

## 1.9.2 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 O<sub>2</sub>-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 [ $m^3 h^{-1}$ ], die zur Bemessung der Belüftungs- bzw. Absaugaggregate und aller Rohrleitungen herangezogen wird.

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

Tab. 1-4: Bemessung über den Sauerstoffverbrauch

AT <sub>4</sub>	AT <sub>max</sub>	Luftdruck	Temp.	Nutzungs- rate	Abfall- masse	Belüftungs- dauer	Belüftungs- rate
[mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> TM]		[mbar]	[°C]	[%]	[t TM]	[a]	[m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]
4,0	30,0	985	30	30	100.000	5	<b>1.000</b>

Der theoretisch errechnete Luftbedarf und dessen zeitlicher Verlauf (in späteren Phasen der Aerobisierung kann diese Rate verringert werden) kann durch den Gefäßversuch (siehe Kap. 1.3.2) 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. 1-5: Bemessung über den angestrebten Luftwechsel**

Gewünschter Luftwechsel	Abfallmasse [t TM]	Porenanteil (geschätzt) [%]	Belüftungsrate [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]
täglich	100.000	30	<b>1.250</b>

### 1.9.3 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 werden kann. 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. Unsachgemäßer Betrieb kann vor allem unter Winterbedingungen zu Vereisungen der Anlagenteile und Stillständen der Anlage führen. Diese Problematik ist vor allem bei oberirdisch und nicht temperaturisolierten Be- und Entlüftungssträngen gegeben. Zusätzlich kann es bei einer derartigen Anlagenkonzipierung auch zu einem ungewollten Auskühlen des Deponiekörpers kommen, da im Winter die Zuluft in den Belüftungsleitungen stark abkühlen kann und dann kalte Luft in den Deponiekörper eingeblasen wird. Bei abnehmenden Temperaturen im Deponiekörper, vor allem bei Temperaturen kleiner  $10^\circ\text{C}$ , kommt es zu einem deutlichen Rückgang der mikrobiellen Aktivität und somit zu einer Reduktion des Stabilisierungseffekts. Bei derartig ausgeführten Anlagen ist es unter Umständen ratsam während der Wintermonate die Anlage bewusst stillzulegen, und erst bei steigenden Außentemperaturen wieder mit der aktiven Belüftung zu beginnen. Diese Stillstände sind allerdings im Gesamtkonzept der Belüftungsmaßnahme zu berücksichtigen, da es dadurch zu zeitlichen Verzögerungen im Sanierungsfortschritt kommt.

Die anfallende Kondenswassermenge schwankt saisonal und liegt im Mittel bei ca.  $10 \text{ ml m}^{-3}$  Abluft. Die organische Belastung des Kondensats ist in der Regel sehr gering ( $\text{CSB} < 20 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ ), die Ammoniumbelastung kann jedoch aufgrund von Strippungsvorgängen relativ hoch sein (500 bis  $1.000 \text{ mg l}^{-1}$ ). Aufgrund der 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, zurückgeführt werden.

## 1.10 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 kürzlich geschlossene Deponien erfolgreich eingesetzt. Im Folgenden werden einige Sanierungsbeispiele mit unterschiedlichen Sanierungszielen angeführt:

### 1.10.1 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-Hamburg: Verlag Abfall aktuell.
- Ritzkowski M. (2005): Beschleunigte aerobe In-situ Stabilisierung von Altdeponien. Hamburger Berichte 26. TU Hamburg-Hamburg: Verlag Abfall aktuell.
- Ritzkowski M. (2011): Wissenschaftliche Ergebnisse der In-situ-Aerobisierung der Deponie Kuhstedt, Vortrag und schriftlicher Beitrag zum 3. ÖVA-Technologieworkshop „In-situ-Aerobisierung von kommunalen Altablagerungen“, 28. - 29. April 2011, Innsbruck

### 1.10.2 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.

### 1.10.3 Laufende Sanierung Deponie Dörentrup (D, Stand 2011)

Die Deponie Dörentrup in Nordrhein-Westfalen wurde zwischen 1985 und 1999 als Haldendeponie betrieben. Die Deponiefläche ist ca. 8,6 ha und das Gesamtablagerungsvolumen beträgt ungefähr 1,02 Mio m<sup>3</sup>. Die Ablagerungsmächtigkeit liegt in den Hauptverfüllabschnitten bei etwa 25 m, und besteht vor allem aus Gewerbe- und Industriemüll, Reststoffe aus einem Kompostwerk, häuslichem Restmüll, Schlämmen und Kompost. Basisdichtung ist vorhanden, Sickerwässer werden kontrolliert erfasst.

Beginn der In-situ Niederdruckbelüftung im Jahr 2007 mittels 47 Gasbrunnen mit dem Ziel das Emissionspotential zu reduzieren und die Abfallmatrix zu stabilisieren.

Weitere Informationen:

- Heyer K.-U. (2011): Aktuelle Vorhaben und Erfahrungen zur In-situ Aerobisierung in Deutschland, Vortrag und schriftlicher Beitrag zum 3. ÖVA-Technologieworkshop „In-situ-Aerobisierung von kommunalen Altablagerungen“, 28. - 29. April 2011, Innsbruck.

In den Jahren 2009 - 2011 wurden in Deutschland auf einigen weiteren Deponien (Deponie Süpplingen in Niedersachsen, Deponie Schwalbach-Griesborn im Saarland, Deponie Halberbracht in Nordrhein-Westfalen) In-situ Belüftungsmaßnahmen umgesetzt.

## 1.10.4 Österreichische Altablagerungen

1) 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.
- Prantl R. (2007). Entwicklung der organischen Substanz im Zuge der In-Situ Belüftung von Deponien. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Abfallwirtschaft, Wien 2007.

### 2) Projekt NUTZRAUM (Deponie Mannersdorf)

Basierend auf den Erkenntnissen von INTERLAND wurde im Jahr 2007 am Standort Mannersdorf die In-Situ Belüftung (aktive Niederdruckbelüftung mit Gaserfassung und Reinigung mittels Biofilter) auf dem gesamten Deponiekörper (ca. 200.000 m<sup>3</sup>, Schüttmächtigkeiten von 3 bis ca. 15 m) großtechnisch umgesetzt, mit dem Ziel das noch vorhandene Emissionspotential zu reduzieren und die Organik des Abfallkörpers langfristig zu stabilisieren. Ein Zeithorizont für die Belüftungsmaßnahmen von etwa 5 Jahren wurde festgelegt. Die Belüftungsmaßnahme wird durch umfassende Monitoringmaßnahmen (abgesaugtes Gas, Oberflächenemissionen, Sickerwasser, Grundwasser, Gasprofil- und Temperaturmessungen im Deponiekörper, Setzungen, Feststoffbeprobung nach 2,5 und 5 Jahren) begleitet.

Weitere Informationen:

- Projektgruppe NUTZRAUM (2011): Endbericht NUTZRAUM, Wien 2011

### 3) Rotteballendeponie Pill

Auf der Rotteballendeponie Pill wurden zwischen 1973 und 1990 vorgerottete Siedlungsabfälle abgelagert. Sie umfasst rund 31 ha Ablagerungsfläche mit ca. 313.000 m<sup>3</sup> Ablagerungsvolumen, die Mächtigkeit beträgt im Schnitt 3- 4 m. Sanierungsbedarf war vor allem durch die Grundwasserbeeinträchtigung mit Ammonium gegeben. Beginn der Anlageninstallation erfolgte im Herbst 2008, Beginn der vollflächigen Belüftung folgte im Jahr 2009 mit dem Konzept der Lufteinbringung (208 Belüftungsbrunnen) in die (weitgehend) wasserungesättigte Bodenzone (Kies-Sandgemisch) unterhalb der Abfallablagerung. Die eingebrachte Luft durchströmt von unten die geringmächtige Abfallschüttung und entweicht in die Atmosphäre.

Nähere Informationen:

- Kraiger, H. (2011): Rotteballendeponie Pill – Umsetzung und erste Ergebnisse. In: Dokumentation des 3. ÖVA-Technologie Workshops 04-2011, 28./29. April 2011, Innsbruck
- Passer, H. (2011): Rotteballendeponie Pill – Grundlagen und Sanierungskonzeption. In: Dokumentation des 3. ÖVA-Technologie Workshops 04-2011, 28./29. April 2011, Innsbruck

## 2 ANHANG

### 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 mbar) eingebracht bzw. abgesaugt. An den Brunnen und an den Sonden werden jeweils Über- bzw. Unterdruck, Luftmenge und Gaszusammensetzung erfasst.

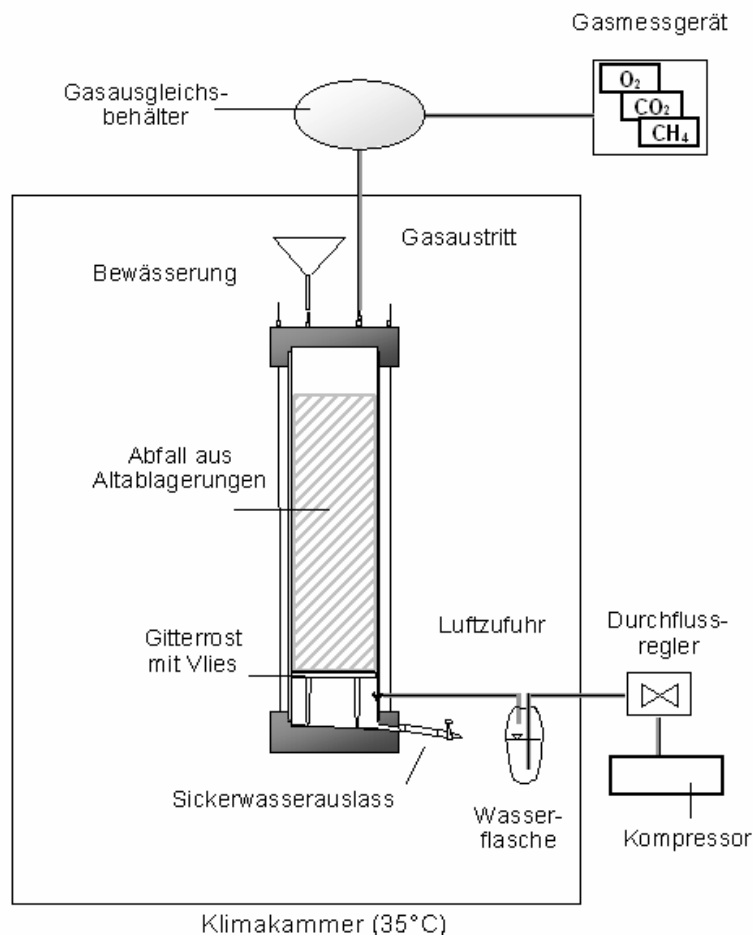
Der erforderliche Druck ist zu bestimmen und sollte max. 100 mbar betragen um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Aufgrund von Gaswegigkeiten im Deponiekörper kommt es zu einer Druckentspannung und dadurch zu einer Druckdifferenz bereits zwischen dem Aggregat und dem belüfteten Brunnen. Dieser Druckverlust 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  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$ -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 ( $\text{CO}_2$ -Produktion) nur geringfügig reduziert. Dadurch verändert sich das  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ -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 m gerechnet werden kann. Zeigen Stellen eine schlechte Gaswegigkeit, kann dies bei der Aerobisierung durch geringere Brunnenabstände, größere Drücke oder geänderte Betriebsweise ausgeglichen werden.

### Vorversuch 2: Säulenversuch

Beispielhaft für Simulationsversuche (Gefäßversuche) 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.  $35^\circ\text{C}$ ) 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.



**Abb. 2-1: Aufbau und Betriebsweise der Säulenversuche**

Die Versuche sind im Doppelansatz durchzuführen (z. B. 2 Säulen anaerob, 2 Säulen belüftet), die empfohlene Betriebsdauer beträgt – in Abhängigkeit des Untersuchungsmaterials - etwa 4 - 6 Monate. Die zugeführte Luftmenge entspricht der lt. Kap. 1.9.2 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. 2-1: Berechnungsbeispiel Belüftung**

	AT <sub>4</sub> [mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> TM]	AT <sub>max</sub>	Masse [t TM]	Belüftungsdauer [a]	Belüftungsrate [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	L/F [m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> TM]
Feld	4,0	30,0	100.000	5	<b>1.000</b>	400
Labor			0,015	0,33	<b>0,002</b>	400

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

	Nieder- schlag [mm]	Infiltration [mm]	Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Masse t TM]	Versuchs- dauer [a]	Bewässerungs- rate [l Monat <sup>-1</sup> ]	W/F [m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> TM]
Feld	600	100	10.000	100.000	5		<b>0,05</b>
Labor			0,03	0,015	0,33	<b>1,0</b>	<b>0,25</b>



Im Sickerwasser sind die Parameter pH, LF, CSB, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N am Beginn etwa 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 (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) ermittelt. Der Feststoff wird bei Versuchsbeginn und nach Versuchsende untersucht. Durchzuführende Analysen sind: WG, TOC, GV, AT<sub>4</sub>, GS<sub>21</sub>, FT-IR, Eluattests (CSB, BSB<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N) und u. U. Schwermetalle im Feststoff und im Eluat.

Folgende Analysen, Parameter und dazugehörige Auswertungen sollen die in Kap. 1.3.2 aufgelisteten Fragestellungen klären.

- Sickerwasser:
  - CSB: Erreichbarer Endwert (CSB<sub>Ende</sub>)  
Erreichbare Reduktion (CSB<sub>Ende</sub> bezogen auf CSB<sub>Anfang</sub>)
  - NH<sub>4</sub>: Erreichbarer Endwert (NH<sub>4</sub>-N<sub>Ende</sub>)  
Erreichbare Reduktion (NH<sub>4</sub>-N<sub>Ende</sub> bezogen auf NH<sub>4</sub>-N<sub>Anfang</sub>)
  - Ausgetragene Schwermetallfrachten (Anfangsphase)
  
- Abluft:
  - O<sub>2</sub>: Berechnung der Sauerstoffnutzungsrate:  
Nutzungsrate =  $(20,95 - \text{O}_2\text{-Konzentration der Abluft}) / 20,95$
  - CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>: Abschätzung des mikrobiell abbaubaren Anteils des TOC mithilfe des gesamten, über die Gasphase ausgetragenen Kohlenstoffs;
  - CH<sub>4</sub>: Erreichbarer Reduktion der CH<sub>4</sub>-Emission (Konzentration und Fracht)
  
- Feststoff: TOC, WG, AT<sub>4</sub>, GS<sub>21</sub>, FT-IR, Toxizität
  - TOC: Ermittlung der TOC-Reduktion
  - AT: Erreichbarer Endwert (AT<sub>Ende</sub>)  
Erreichbare Reduktion (AT<sub>Ende</sub> bezogen auf AT<sub>Anfang</sub>)
  - GS: Erreichbarer Endwert (GS<sub>Ende</sub>)  
Erreichbare Reduktion (GS<sub>Ende</sub> bezogen auf GS<sub>Anfang</sub>)
  - Eluattests (CSB, BSB<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N) Erreichbarer Endwert, Erreichbare Reduktion



## Empfehlungen / Maßnahmenkatalog zu Voruntersuchungen bzw. begleitenden Untersuchungen im Labor

Im Folgenden wird ein zusammenfassender Überblick (in Tabelle 1-8) über die ergänzenden Erfahrungen aus dem Projekt NUTZRAUM zur Durchführung von Vor- bzw. begleitenden Untersuchungen (Gefäßversuchen) im Labor gegeben.

**Tabelle 1-8: Zusammenfassung der Erfahrungen aus NUTZRAUM hinsichtlich Vor- bzw. begleitender Untersuchungen im Labor**

	Spezifische Erfahrungen/ Erkenntnisse aus NUTZRAUM
Materialgewinnung und Aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialentnahme erfolgt aus Kostengründen meist im Zuge des „Brunnen-/Lanzensetzens“ =&gt; Anzahl der Schürfe oder Bohrlöcher aber nicht (nur) vom Anlagenkonzept abhängig machen, sondern Repräsentativität der Materialentnahme und die dafür statistisch notwendige Mindestprobenanzahl berücksichtigen!</li> <li>• Entnommenes Material wird mehrfach manipuliert (grobstückige Teile werden aussortiert, ev. zerkleinert, gesiebt), =&gt; in dem für die Laborversuche gewonnenen Material reichert sich der biologisch abbaubare, organische Abfallanteil an (wird „aufkonzentriert“, d.h. Emissionsreduktionspotential von einem kg aufbereiteter TM entspricht nicht dem Potential von einem kg TM in der Ablagerung!); =&gt; Notwendig ist bei der Materialaufbereitung das Masseverhältnis des Siebdurchganges und –überlaufes zu dokumentieren und die jeweils enthaltenen Abfallfraktionen abzuschätzen und zu beschreiben; weiters sollte vor Ort so gut wie möglich die Art und der Anteil an „sperrigem Abfall“ im Ablagerungskörper, welcher nicht einer weiteren Materialaufbereitung und Siebung zugeführt werden konnte, abgeschätzt und dokumentiert (z.B. Fotos) werden. Diese Informationen sind unbedingt notwendig, um von den Laborversuchen auf die Praxisanwendung schließen zu können.</li> <li>• Für Versuchsreaktorgößen von ca. 20 -100 l hat sich ein Siebschnitt des Materials von &lt; 20 mm bisher recht gut bewährt, bei Versuchsgrößen ab 50 l können auch gröbere Siebschnitte zielführend sein.</li> </ul>
Versuchsgefäße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Wahl der Versuchsgefäßgröße sollte in erster Linie von den spezifischen Fragestellungen (z.B. sind mehrere, zeitlich gestaffelte Feststoffentnahmen geplant) und der Materialcharakteristika (Heterogenität, Siebschnitt) abhängen: Gefäße mit größerem Volumen (&gt; 50 l): NT: schwerer zu hantieren und manipulieren; aus Kostengründen meist nur eine geringere Anzahl an Parallelansätzen möglich; Regelungen und Systemeingriffe sind schlechter möglich; VT: Heterogenität des Materials wird besser berücksichtigt; Simulation realer Bedingungen oft besser gegeben;</li> <li>Gefäße mit kleinerem Volumen (&lt; 50 l) NT: weniger Materialinput =&gt; Heterogenität wird schlechter abgebildet; je kleiner, desto weniger Realitätsnähe ist gegeben; oft zu geringe Sickerwassermenge für umfassende Analytik bei „realen“ Bewässerungsraten =&gt; enorm gesteigertes L/S-Verhältnis notwendig; VT: leichter hantierbares und regelbares System;</li> </ul>

---

Möglichkeit mehrerer Parallelansätze => ermöglicht mehrere „Feststoffprobenahmeterminale“ (zeitlich gestaffelter Ausbau der Parallelansätze) ohne das Versuchssystem zu stören;

- Die optische Beobachtung möglicher Materialveränderungen im Versuchsaufbau (z.B. Sackungen, farbliche Veränderungen durch anaerobe Bereiche, Ausbildung von Wegigkeiten, Wasseransammlungen) hat sich als sehr hilfreich erwiesen; d.h. durchsichtige Versuchsreaktoren bzw. Sichtfenster sind ratsam

---

#### Versuchseinbau

- Standardisierte Einbaubedingungen (gleichmäßige Verdichtung, definierte Menge auf definiertes Volumen verdichten, etc.) sind – vor allem bei Parallelansätzen - unbedingt notwendig;
- Verdichtung ist auf Siebschnitt des Materials abstimmen, Einbaudichte sollte  $< 1 \text{ t/m}^3$  sein um homogene Luftausbreitung bei Belüftung zu gewährleisten;
- Genaue Bestimmung (auf 0,01 kg) der Input- und Endmasse ist für eine verlässliche Massenbilanz (C-/N-Bilanz) notwendig

---

#### Versuchsdurchführung

- Regelbare Temperaturbedingungen (maximales Abbaupotential bei idealen, konstanten Temperaturen versus Anpassung an reale Temperaturverläufe im Feld)
- Keine Feststoffentnahmen aus laufendem Versuchssystem; kleinere Systeme in mehreren Ansätzen und zeitlich gestaffelter Ausbau (=> Feststoffentnahme)
- Bei Wahl der Bewässerungsmengen zu beachten: Anpassung an reale Bedingungen, Simulation eines „Zeitraffereffektes“; notwendig Sickerwassermengen für umfassende und kontinuierliche Analytik;
- Belüftungsrate Luftzufuhr: homogene Lufteinbringung bei hohem L/S-Verhältnis oft problematisch, hohe Belüftungsmengen zugeführt im unteren Bereich des Versuchsgefäßes => kann zu Rückstau des Sickerwassers führen

---

#### Auswertung/ Interpretation

- Ergebnisse unter optimierten Belüftungs- und Abbaubedingungen im Labor sind nicht direkt übertragbar auf Feldbedingungen => maximaler C-Austrag und Emissionsreduktionspotential werden ermittelt!
  - Aufbereitung und Homogenisierung generieren ein „optimal stabilisierbares Abfallmaterial“ (Anreicherung der biologisch abbaubaren Abfallfraktion bezogen auf kg TM (siehe oben), größere angreifbare Oberflächen => forcierter mikrobieller Ab- und Umbau, bessere Auslaugbarkeit)
-

### 3 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

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

## 4 LITERATUR

- AEV Deponiesickerwasser (2003): Verordnung über die Begrenzung von Sickerwasseremissionen aus Abfalldeponien, BGBl. I Nr. 263/2003.
- Cossu, R., Raga, R., Rosetti, D., Cestaro, S. (2003): Full scale application of in situ aerobic stabilisation of old landfills. In: Proceedings of SARDINIA 2003 - Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. Christensen/Cossu/Stegmann (Eds.). Session B13, pp.180-181; CISA publisher.
- 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 Milmersdorf. 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.
- Heyer, K.-U., Hupe, K., Ritzkowski, M., Stegmann, R. (2006): Pollutant release and pollutant reduction - Impact of the aeration of landfills. In: Waste Management 25 (4 SPEC. ISS.), pp. 353-359.
- Heyer K.-U., Hupe K., Stegmann R., Ritzkowski, M. (2010): Nachweismöglichkeiten zur erfolgreichen Verbesserung des Langzeitverhaltens von Deponien durch die aerobe in situ Stabilisierung, Müll und Abfall 42. Jahrgang, Erich Schmidt Verlag, Januar 2010, S. 16-24.
- Heyer K.-U. (2011): Aktuelle Vorhaben und erfahrungen zur In-situ Aerobisierung in Deutschland, Vortrag und schriftlicher Beitrag zum 3. ÖVA-Technologieworkshop „In-situ-Aerobisierung von kommunalen Ablagerungen“, 28. - 29. April 2011, Innsbruck.
- IUT Group (2011): Landfill Remediation. In: [www.theiutgroup.com](http://www.theiutgroup.com).
- Kim, H.-J., Yoshida, H., Matsuto, T., Tojo, Y., Matsuto, T. (2010): Air and landfill gas movement through passive gas vents installed in closed landfills. In: Waste Management 30 (2010), pp. 465-472.
- Kraiger, H. (2011): Rotteballendeponie Pill – Umsetzung und erste Ergebnisse. In: Dokumentation des 3. ÖVA-Technologie Workshops 04-2011, 28./29. April 2011, Innsbruck
- Matsufuji, Y., Tachifuji, A. (2007): The history and status of semi-aerobic landfills in Japan and Malaysia. In: Landfill aeration. IWWG Monograph, Stegmann/Ritzkowski (Eds.), ISBN 978-88-6265-002-1, CISA publisher.
- 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.
- Prantl R. (2007). Entwicklung der organischen Substanz im Zuge der In-Situ Belüftung von Deponien. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Abfallwirtschaft, Wien 2007.
- Projektgruppe INTERLAND (2006): Endbericht INTERLAND – Innovative Technologies for Remediation of Landfills and Contaminated Soils.
- Projektgruppe NUTZRAUM (2011): Endbericht NUTZRAUM, Wien 2011

- Reiser, M., Laux, D., Lhotzky, K., Kranert, M. (2011): Pilotprojekt zur Deponiebelüftung und Methanoxidation an der Deponie Konstanz-Dorfweiher, Ergebnisse nach 1 Jahr Betriebszeit, In: Stilllegung und Nachsorge von Deponien – Schwerpunkt Deponiegas 2011, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Bd. 20. Rettenberger/Stegmann (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, ISBN 978-3-9812867-5-5, pp.63-74.
- 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-Harburg: Verlag Abfall aktuell.
- Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Hupe, K., Stegmann, R. (2009): Long term landfill aeration by means of a wind driven air venting and aeration system. In: Proceedings SARDINIA 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, Cossu/Diaz/Stegmann (Eds.), Session G15, pp. 879-880; CISA publisher.
- Ritzkowski M. (2011): Wissenschaftliche Ergebnisse der In-situ-Aerobisierung der Deponie Kuhstedt, Vortrag und schriftlicher Beitrag zum 3. ÖVA-Technologieworkshop „In-situ-Aerobisierung von kommunalen Altablagerungen“, 28. - 29. April 2011, Innsbruck.
- Ritzkowski M. und Stegmann R. (2011): Landfill aeration worldwide: concepts, indications and findings, in: Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October 2011, CISA Publisher, Italy.