

Décharges suisses - Gestion après fermeture

**Résumé du rapport Friedli Partner AG (2015) :
Nachsorgewirksame Massnahmen bei Deponien
(Mesures efficaces pour la gestion des décharges)**

Berne, le 02.08.23

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Impressum

Mentions légales

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), division déchets et manières premières, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: Kellerhals + Haefeli SA

Auteurs: Clémentine Schürmann, Julien Gobat, Dieter Böhi

Accompagnement OFEV: Clara-Marine Pellet

Remarque: Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
0. Avant-propos	1
1. Introduction	1
2. Etat des lieux des décharges en Suisse	2
3. Potentiel de pollution, émissions caractéristiques des décharges	3
3.1. Décharge pour déchets inertes	3
3.2. Décharge contrôlée pour résidus stabilisés	3
3.3. Décharges contrôlées bioactives	4
3.4. Conclusion	8
4. Mesures visant à minéraliser les décharges contenant des déchets bioactifs	9
4.1. Généralités	9
4.2. Captage des gaz en l'absence d'oxygène	9
4.3. Aérobisation par injection d'air / d'oxygène	9
4.4. Humidification par infiltration	10
4.5. Procédés combinés	10
5. Exemples	10
6. Mesure visant à réduire la durée de gestion d'une décharge	11
7. Aide à la décision pour la mise en œuvre de mesures efficaces	11
8. Documents utilisés	12

Décharges suisses – Gestion après fermeture

Résumé du rapport Friedli Partner AG (2015) : Nachsorgewirksame Massnahmen bei Deponien (Mesures efficaces pour la gestion des décharges)

0. Avant-propos

Ce résumé en français du rapport « Nachsorgewirksame Massnahmen bei Deponien » de Friedli Partner AG (voir annexe 2) a été commandé par l'Office fédéral de l'Environnement (OFEV), division déchets et matières premières, dans le but de mettre à disposition des cantons romands les informations pertinentes s'y trouvant.

Le rapport de Friedli Partner AG a été rédigé, en 2015 alors que l'ODT [1] était encore en vigueur. Les informations et termes repris dans le présent résumé sont ainsi ceux du document original et se réfèrent à l'état des connaissances et au cadre légal en vigueur lors de sa rédaction. Les termes utilisés dans le présent rapport sont ceux du document original. Quand cela est pertinent, les termes actuels de l'OLED [2] ont été rajoutés, avec mention dans le texte.

En cas de doute sur la traduction ou l'interprétation du contenu, le document original (en allemand) fait foi. Toute responsabilité concernant le document original sera déclinée.

1. Introduction

A la fin de la phase d'exploitation d'une décharge commence la phase de gestion après fermeture. Il s'agit d'une période de surveillance durant laquelle les émissions de la décharge sont mesurées et surveillées dans le but de réduire son potentiel de pollution. La durée de la phase de surveillance dépend du type de décharge et des mesures prises pour réduire les émissions pendant la phase d'exploitation. Ces concepts sont réglementés par l'Ordonnance sur les déchets (OLED, art. 42 et 43), voir [2].

Le but du rapport Friedli Partner AG, en annexe, est de faire un inventaire des mesures possibles pour réduire le potentiel de pollution des décharges et de ce fait, de réduire la durée de la phase de gestion après fermeture.

2. Etat des lieux des décharges en Suisse

Les concepts de base de la gestion des déchets en Suisse ont été élaborés dans les années 1980 et ont donné lieu à la première ordonnance sur la gestion des déchets, l'ODT [1], entrée en vigueur en 1991. La gestion des déchets se base sur la séparation en deux catégories de déchets : les matériaux valorisables et les matériaux à stocker définitivement. Pour la deuxième catégorie, trois types de décharges ont été définis : décharge pour matériaux inertes (actuellement [2] : décharge de type B), décharge contrôlée pour résidus stabilisés (actuellement [2] : décharge de type C), décharges contrôlées bioactives (actuellement [2] : décharge de type D ou E). Les déchets typiques stockés dans ces trois types de décharges selon l'OTD sont présentés dans la table 1.

En Suisse, la majorité des décharges que l'on ferme actuellement ont été ouvertes après 1991, sous le régime de l'OTD

Table 1: types de décharges en Suisse, dénomination avant 2016

Type de décharge	Description des déchets	Déchets types
Décharge pour déchets inertes	Déchets minéraux avec une faible teneur en polluants	<ul style="list-style-type: none"> Déchets de chantiers minéraux Matériaux d'excavation faiblement pollués Matériaux d'excavation non pollués mais non recyclables
Décharge contrôlée pour résidus stabilisés	Déchets à forte teneur en métaux lourds, peu de matière organique, peu soluble	<ul style="list-style-type: none"> Cendres volantes issues du traitement thermique des déchets Boues d'hydroxydes peu solubles, anorganiques, teneur en métaux élevée Matériaux issus d'installation de traitement des déchets, haute teneur en métaux lourds
Décharges contrôlées bioactives	Substances actives chimiquement/biologiquement, teneur élevée en matière organique	<ul style="list-style-type: none"> Mâchefers d'incinération, résidus vitrifiés Autres déchets à haute teneur en polluants organiques Matériaux d'excavation fortement pollués Déchets ménagers (non incinérés)

Actuellement, trois catégories de décharges font l'objet de suivis en Suisse: (1) les décharges ouvertes avant 1991 et encore en exploitation, (2) les décharges OTD ouvertes après 1996¹ et en exploitation, (3) les décharges fermées à partir du 01.02.1996, actuellement sous surveillance.

Une décharge peut sortir de la phase de surveillance après fermeture lorsque :

- les exigences sur la qualité de l'eau selon l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) sont atteintes dans le milieu récepteur (cours d'eau) et
- les exigences de l'Ordonnance sur les sites contaminés (OSites) sont atteintes pour l'eau s'infiltrant dans le sous-sol.

3. Potentiel de pollution, émissions caractéristiques des décharges

3.1. Décharge pour déchets inertes

Ce type de décharge comprend des déchets inertes (sans matière organique) ayant un potentiel d'émission de polluants limité. De ce fait, il n'y a pas de nécessité de planifier des mesures de suivi spécifiques pour la phase de gestion après fermeture.

3.2. Décharge contrôlée pour résidus stabilisés

Dans ce type de décharge, la teneur en matière organique est faible, de même que le potentiel de réaction des matériaux entreposés. Des résidus métalliques et des métaux lourds sont présents, toutefois dans une forme peu mobile. La teneur en carbone organique dissout (COD) et en sels solubles tels que Cl^- ou SO_4^{2-} peut être problématique. Ces émissions sont présentées schématiquement à la figure 1.

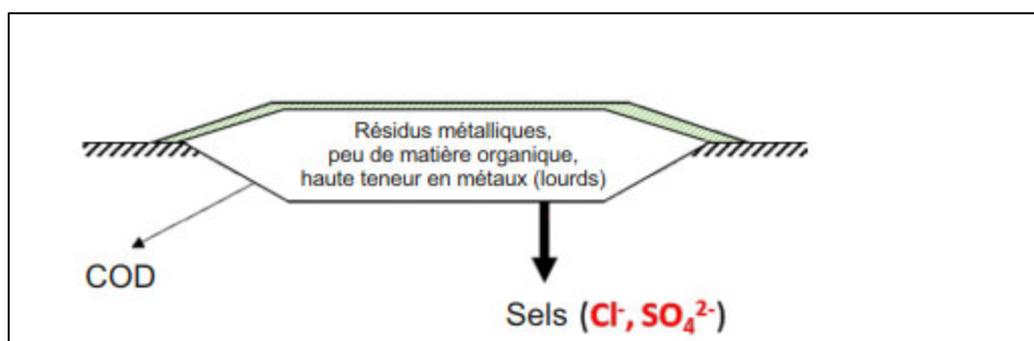


Figure 1: Schéma des émissions des décharges contrôlées pour résidus stabilisés. Flèche épaisse : émissions importante, flèche fine : émissions faibles, paramètre en rouge entre () : pas de valeur limite selon l'OEaux ou l'OSites

¹ Art. 51 OTD Nouvelles décharges contrôlées

Une fois établi le plan de gestion des déchets, mais au plus tard à partir du 1er février 1996, les cantons ne peuvent plus autoriser l'aménagement de nouvelles décharges contrôlées qu'à la condition que celles-ci y figurent déjà.

Dans la plupart des cas, le potentiel d'émission est faible et il n'y a pas de nécessité de planifier des mesures de suivi après fermeture. Toutefois, dans certains cas, les émissions de sels solubles sont importantes et des mesures visant à réduire leurs concentrations sont nécessaires, en particulier pour éviter le risque de corrosion des installations en béton.

3.3. Décharges contrôlées bioactives

Les décharges contrôlées bioactives contiennent des matériaux qui interagissent avec leur environnement. Des éléments solides et gazeux sont mobilisés, induisant un potentiel élevé de pollution. Pour ces décharges, il est possible de mettre en œuvre des mesures visant à réduire les émissions par stabilisation².

En fonction du type de matériaux déposés, les réactions se déroulant dans le corps de la décharge sont différentes. Trois situations distinctes peuvent se présenter :

- Décharges de déchets ménagers non incinérés fermées avant l'an 2000
Les déchets particulièrement problématiques sont les éléments chimiquement et biologiquement actifs ainsi que les matériaux d'excavation fortement pollués. Les émissions résultant de l'altération de ces matériaux dans le corps de la décharge sont présentées dans les figures 2 et Figure 3 et résumées schématiquement à la Figure 4.

² Stabilisation: mesures mises en œuvre pour amener une décharge dans un état de réactivité minimal

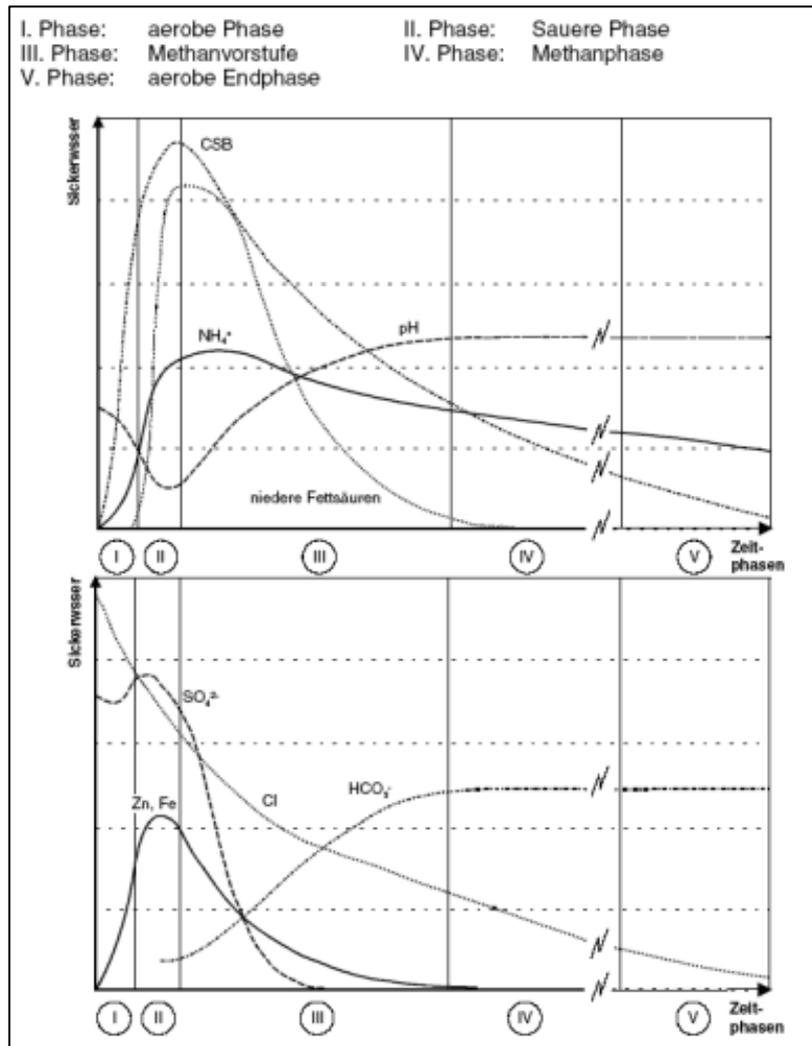


Figure 2: Evolution qualitative des paramètres principaux des eaux de percolation des décharges de déchets ménagers

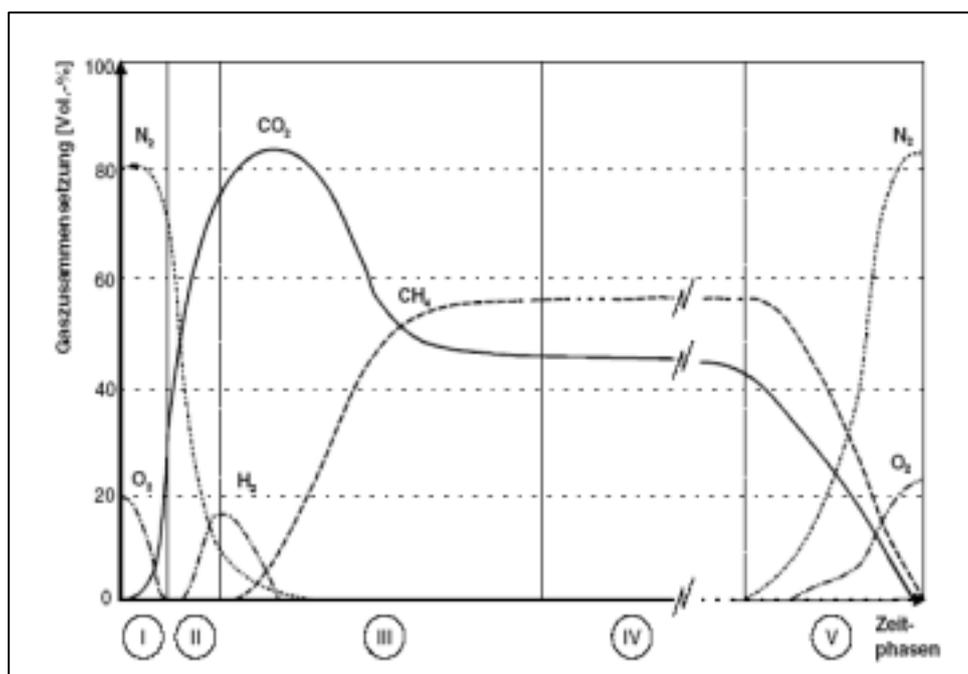


Figure 3 : Evolution qualitative des principaux gaz des décharges de déchets ménagers

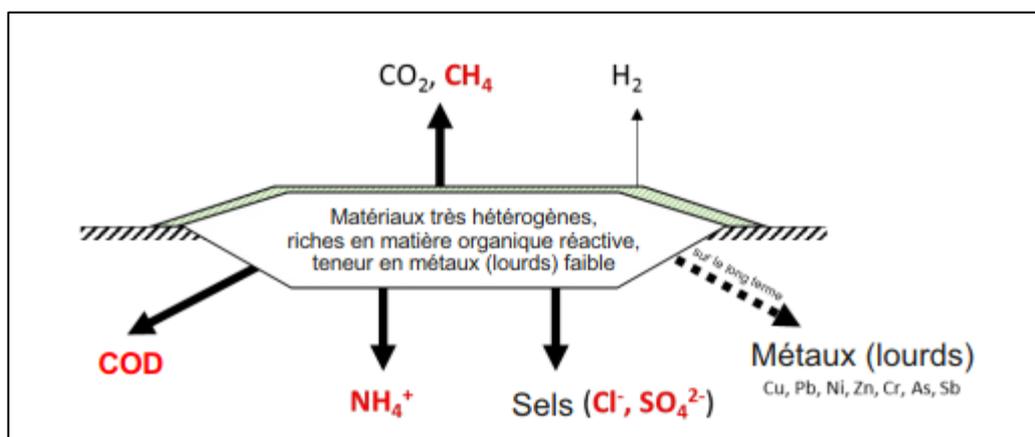


Figure 4 : Schéma des émissions des décharges de déchets ménagers non incinérés. Flèche épaisse : émissions importante, flèche fine : émissions faibles, flèche pointillée : émission tardive, paramètre en rouge : polluant problématique, paramètre en rouge entre () : pas de valeur limite selon l'OEaux ou l'OSites

L'eau joue un rôle important dans les processus de dégradation des matériaux de la décharge et il est possible de mettre en œuvre des mesures pendant la phase d'exploitation de la décharge et après sa fermeture pour réduire les émissions.

- Compartiments à mâchefers d'incinération

Ces compartiments comprennent généralement les matériaux suivants : des scories issues d'usine d'incinération des déchets, des résidus vitrifiés et des boues d'hydroxydes riches en calcium et en aluminium. Les émissions résultant de l'altération de ces matériaux sont présentées schématiquement à la Figure 5

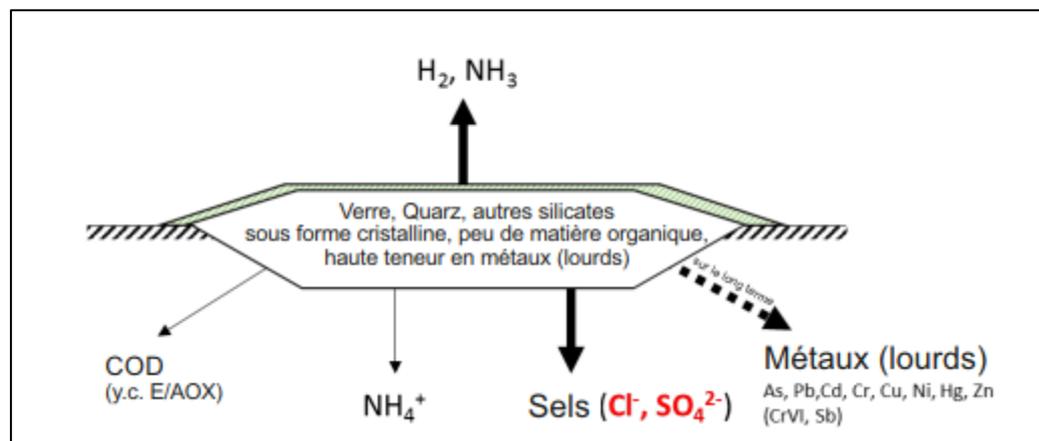


Figure 5: Schéma des émissions des compartiments pour mâchefers d'incinération. Flèche épaisse : émissions importantes, flèche fine: émissions faibles, flèche pointillée: émission tardive, paramètre en rouge entre () : pas de valeur limite selon l'OEaux ou l'OSites

Pour les compartiments à mâchefers des décharges fermées, il n'existe pas de mesures efficaces pouvant réduire les émissions et le potentiel de pollution demeure. Pour les compartiments à mâchefers des décharges en activité, il est possible de réduire le potentiel d'émission de plusieurs manières : (1) traitement des mâchefers avant de les amener à la décharge, (2) accélération des processus d'altération à l'intérieur du corps du compartiment par infiltration d'eau, (3) retardement du confinement de surface de la décharge, ce qui laisse plus de temps aux mâchefers pour la dégradation.

- Décharges bioactives pour autres déchets bioactifs (2000 – 2010, parfois depuis 1991)
Depuis 2010, seuls des déchets non incinérables tels que des matériaux d'excavation pollués, des résidus de désableurs de nettoyage des routes et canalisations, ainsi que des déchets issus de crues ou d'incendies peuvent être stockés dans ce type de décharge. Ces décharges se caractérisent par des teneurs en métaux plus élevées et une teneur en matière organique plus réduite en comparaison avec les décharges fermées avant 2000. Des composants organiques volatiles (VOC) peuvent être présents. Les émissions résultant de l'altération de ces matériaux sont présentées schématiquement à la Figure 6.

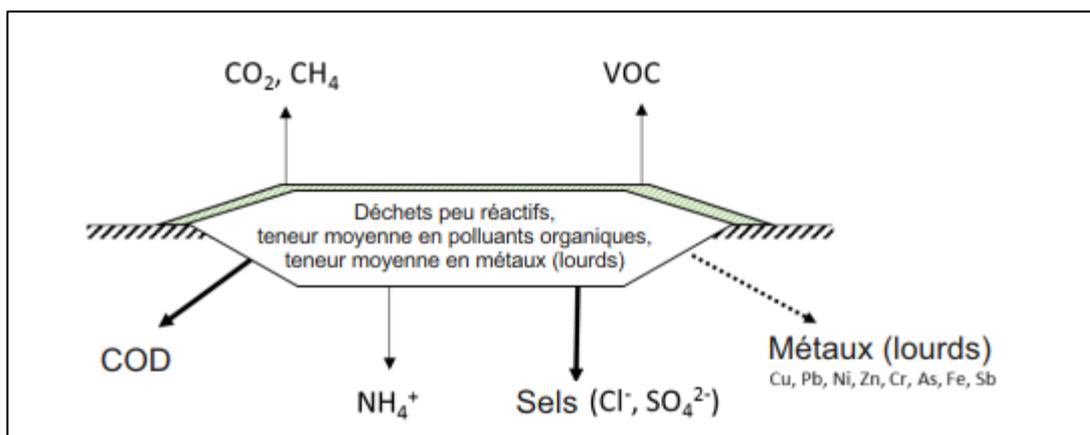


Figure 6: Schéma des émissions des décharges bioactives pour les déchets bioactifs restants (dès 2000). Flèche moyennement épaisse : émissions moyennes, flèche fine : émissions faibles, flèche pointillée : émission tardive.

Les émissions problématiques liées à ce type de décharge sont essentiellement dues aux lixiviats. Il est possible de contrôler ces émissions en procédant au rinçage du corps de la décharge, avec récupération et élimination des eaux à la sortie des drainages. Ce procédé permet d'optimiser le lessivage des polluants et d'en diminuer la concentration.

- Décharges bioactives pour les déchets bioactifs (depuis 2010)
En 2010, une limite pour le carbone organique total (COT) a été définie par l'OTD [1], ce qui réduit considérablement le potentiel d'émission des décharges ouvertes après 2010.

3.4. Conclusion

En conclusions, les décharges contenant des déchets bioactifs, en particulier les anciennes décharges de déchets ménagers non incinérés, ont un potentiel de réduction d'émissions par mesures de stabilisation. Dans ces cas, la mise en œuvre de mesures peut réduire la durée de la phase de gestion après fermeture.

4. Mesures visant à minéraliser³ les décharges contenant des déchets bioactifs

4.1. Généralités

Pour diminuer la réactivité des matériaux stockés en décharge, il est nécessaire d'en faire diminuer la teneur en matière organique, par exemple en la minéralisant. Lorsqu'elle est dégradée, la matière organique produit différents composés solides et gazeux qui peuvent être captés, puis traités ou valorisés. Le but des mesures proposées ci-dessous est de maintenir ou d'améliorer l'efficacité des processus de minéralisation dans le corps de la décharge.

4.2. Captage des gaz en l'absence d'oxygène

Certains corps de décharge se trouvent dans des conditions anaérobies (absence d'oxygène). Dans ces cas, la dégradation de la matière organique produit, entre autres, du méthane (CH_4), qui s'échappe de manière diffuse dans l'atmosphère. Le méthane est un polluant atmosphérique et un important gaz à effet de serre. S'il est capté, son dégazage diffus est minimisé et il peut être valorisé pour la production de chaleur, par exemple. Un système de captage de gaz vise deux buts : (1) entretenir les conditions anaérobies dans le corps de la décharge pour continuer à produire du méthane et (2) valoriser le méthane capté. La conséquence de ce système est une diminution de l'émission de méthane dans l'atmosphère et de ce fait une réduction de la période de surveillance de la décharge.

Un système de captage de gaz est composé de pompes aspirantes qui maintiennent ou réactivent la circulation des gaz au travers du corps de la décharge, ce qui favorise le processus de méthanisation. Un réseau de drains achemine ensuite les gaz captés vers une installation de valorisation.

Pour la mise en place d'un système de captage de gaz efficient, les conditions suivantes doivent être remplies : $\text{TOC}^4 > 4 \%$, peu de déchets industriels contenant des substances toxiques, contrôle de la statique de la décharge (risque de tassements).

4.3. Aérobisation par injection d'air / d'oxygène

Le principe d'aérobisation d'une décharge consiste en l'injection d'air ou d'oxygène dans le corps de la décharge pour passer de conditions anaérobies à des conditions aérobies. De cette manière, les émissions de gaz de conditions anaérobies sont minimisées pendant que la minéralisation de la matière organique en conditions aérobies est accélérée. Il existe plusieurs procédés d'aérobisation d'une décharge où l'injection d'air ou d'oxygène se fait soit de manière ponctuelle soit de façon continue.

³ Minéralisation : décomposition de la matière organique par des bactéries ou autres microorganismes en dioxyde de carbone (CO_2), eau (H_2O), ammonium (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}), Nitrite (NO_2^-), Nitrate (NO_3^-) et autres liaisons inorganiques.

⁴ TOC : Total Organic Carbon

Pour que l'aérobisation d'une décharge soit efficace, les conditions suivantes doivent être remplies : TOC > 4 %, peu de déchets industriels contenant des substances toxiques, teneur en eau > 15 %, bonne circulation des gaz dans la décharge, contrôle de la statique de la décharge (risque de tassements). L'épaisseur de la décharge est un paramètre important pour le dimensionnement du système. La décharge doit aussi être accessible et bénéficier d'une alimentation électrique.

4.4. Humidification par infiltration

Si le corps d'une décharge n'est pas en contact avec de l'eau, les réactions de dégradation de la matière organique sont réduites voire stoppées. L'humidification par infiltration vise à éviter un manque d'eau voire un assèchement de la décharge. De cette manière, la minéralisation se fait de manière continue, ce qui réduit la durée de la phase de gestion après fermeture. Le but premier n'est pas de lessiver les produits de décomposition dans la décharge, mais de maintenir des conditions optimales à l'intérieur pour une minéralisation de la décharge.

Il existe plusieurs principes d'humidification d'une décharge : infiltration de l'eau de pluie, infiltration par un système de drains horizontaux, infiltration verticale. Le choix du type de système dépend des caractéristiques de la décharge.

Pour pouvoir mettre en œuvre un système d'humidification par infiltration, les conditions suivantes sont nécessaires : présence d'une couche d'étanchéité de fond (conductivité hydraulique < 10^{-8} m/s, épaisseur > 60 cm), captage des lixiviats, captage des gaz, contrôle de la statique de la décharge (risque de tassements), teneur en matière organique suffisante. Pendant la phase d'humidification, il est nécessaire d'effectuer un suivi de la quantité de l'eau injectée, des gaz émis, de la qualité des lixiviats et de la stabilité de la décharge.

4.5. Procédés combinés

Selon les caractéristiques d'une décharge et de son potentiel d'émission, les différents procédés présentés ci-dessus peuvent être combinés pour optimiser sa minéralisation.

5. Exemples

Plusieurs exemples en Suisse et à l'étranger illustrent les procédés présentés ci-dessus, voir annexe 2.

6. Mesure visant à réduire la durée de gestion d'une décharge

Les expériences faites à ce jour montrent que les émissions de gaz et de polluants dans l'eau en provenance d'une décharge diminuent plus rapidement en cas d'aérobisation. Les tassements sont également plus rapidement stabilisés.

L'humidification d'une décharge peut également être suivie par une diminution des pollutions dans les lixiviats. Ceci demande cependant l'apport d'une grande quantité d'eau sur une longue période.

Ces deux procédés diminuent la période de gestion après fermeture de la décharge.

Dans son programme de recherche national sur l'environnement, l'Allemagne a produit des modèles d'évolution de la teneur en carbone (TOC) pour une décharge type. Ces modèles montrent que la réduction est beaucoup plus efficace pour les scénarii avec la mise en œuvre de mesures de stabilisation (humidification et/ou aérobisation), comparé à la situation avec seulement un confinement en surface. Dans les cas avec stabilisation, il est probable que la phase de gestion après fermeture ne prenne que dans les 30 ans suivant la fermeture. Sans stabilisation, cette période est probablement plus longue.

7. Aide à la décision pour la mise en œuvre de mesures efficaces

La fin de la phase de gestion après fermeture d'une décharge est uniquement définie de manière qualitative dans l'ODT [1]. Les éléments ou les états suivants devraient être évalués pour décider de la fin de la surveillance : processus et réactions de dégradation, formation de gaz, processus de tassement, fonctionnalité du confinement de surface, stabilité, présence de constructions ou d'installations techniques, traitement et/ou infiltration des lixiviats, présence de déchets toxiques (p. ex. amiante).

La pertinence de la mise en œuvre des mesures ainsi que leur choix peuvent se faire à l'aide des arbres de décision figurant en annexes :

Annexe 1.1: Schéma de décision sur la nécessité de stabiliser une décharge

Annexe 1.2 : Marche à suivre pour déterminer l'état actuel d'une décharge

Annexe 1.3 : Marche à suivre pour collecter les données nécessaires sur le site à stabiliser

Annexe 1.4 : Critères de détermination pour le choix du type de stabilisation à mettre en œuvre

8. Documents utilisés

- [1] ODT (=TVA) Ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets, révisée le 1^{er} juillet 2011 (RS 814.600), plus en vigueur
- [2] OLED (=VVEA) : Ordonnance du 4 décembre 2015 sur la limitation et l'élimination des déchets, révisée le 1^{er} janvier 2023 (814.600)
- [3] Office fédéral de l'environnement, l'environnement pratique, sites contaminés, confinement d'anciennes décharges à assainir, état de la technique, possibilités et limites, aide à l'exécution, 2007
- [4] Office fédéral de l'environnement, l'environnement pratique, déchets et matières premières, décharges, un module de l'aide à l'exécution relative à l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (ordonnance sur les déchets, OLED), 2019

KELLERHALS + HAEFELI SA



C. Schürmann



D. Böhi

Traduction : Clémentine Schürmann, MSc en géologie
Julien Gobat, MSc en hydrogéologie

Contrôle Dr. Dieter Böhi, Dr. es. Sciences en géologie

Berne, 02.08.2023
CS/jk 13462

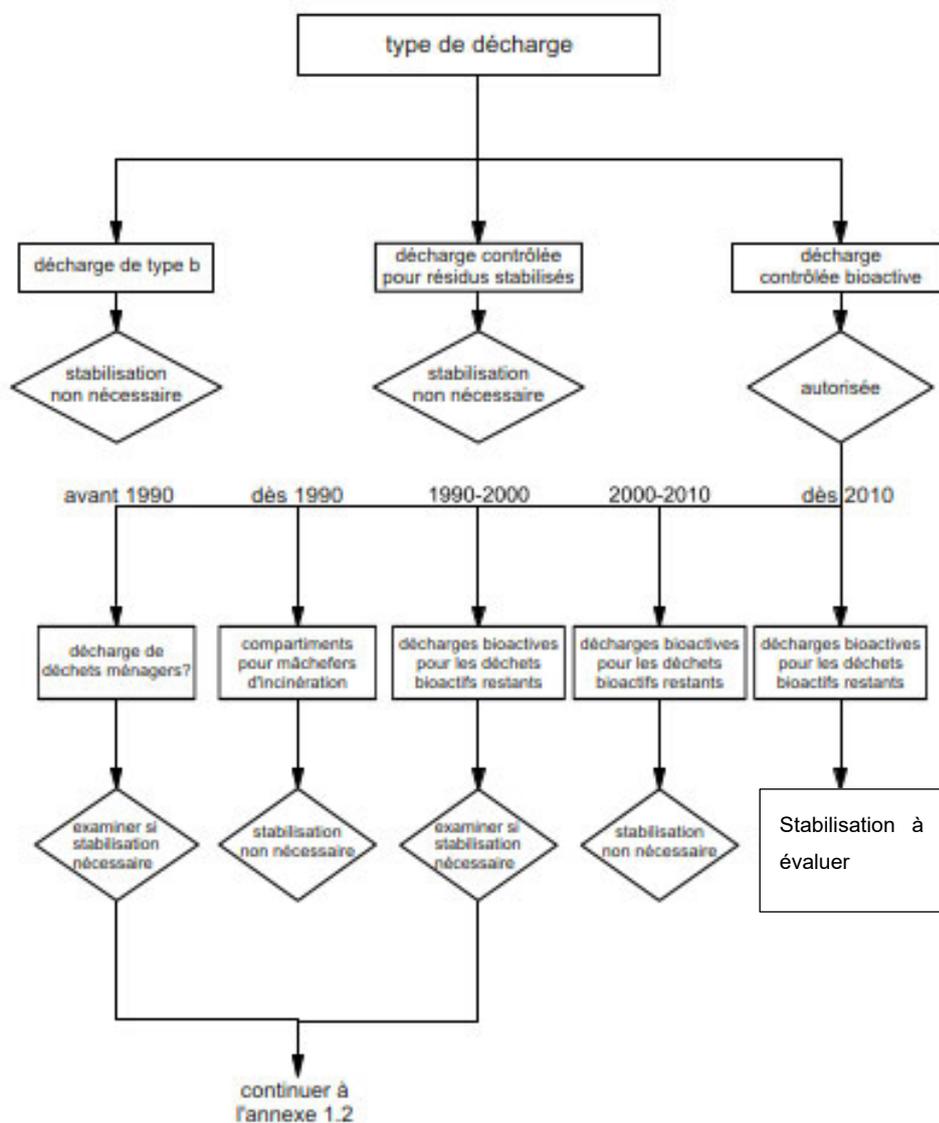
ANNEXES

- Annexe 1.1: Schéma de décision concernant la nécessité de stabiliser une décharge
- Annexe 1.2 : Marche à suivre pour la détermination de l'état actuel d'une décharge
- Annexe 1.3 : Marche à suivre pour la collecte des données nécessaires sur le site à stabiliser
- Annexe 1.4 : Critères de détermination pour le choix du type de stabilisation à mettre en œuvre
- Annexe 2 : Rapport Friedli Partner AG: BAFU : Nachsorgewirksame Massnahmen bei Deponien, Grundlagen zur Reduzierung der Nachsorgedauer du 26.06.2015 (rapport original en allemand)

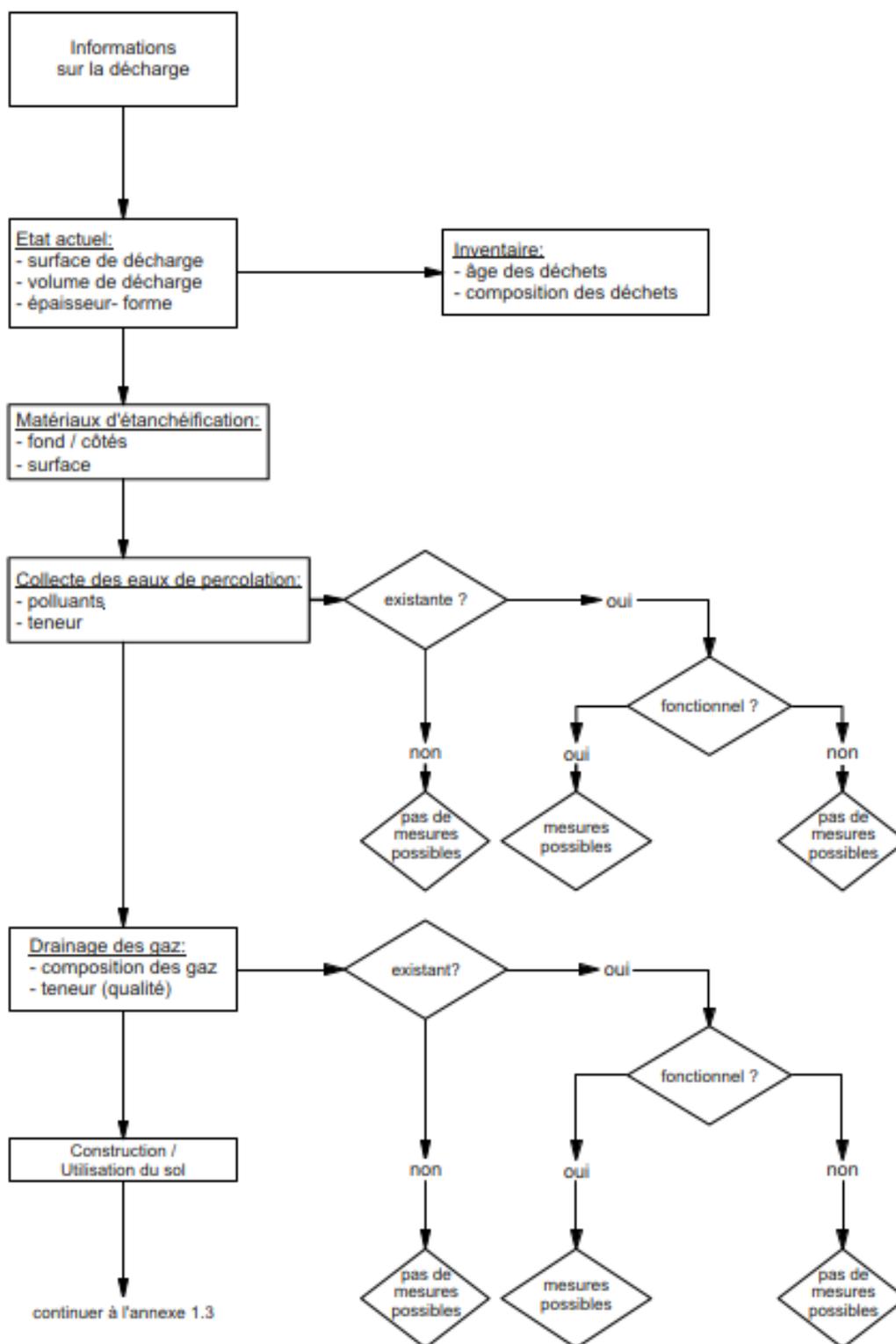
Annexe 1

Aides à la décision pour la stabilisation d'une décharge

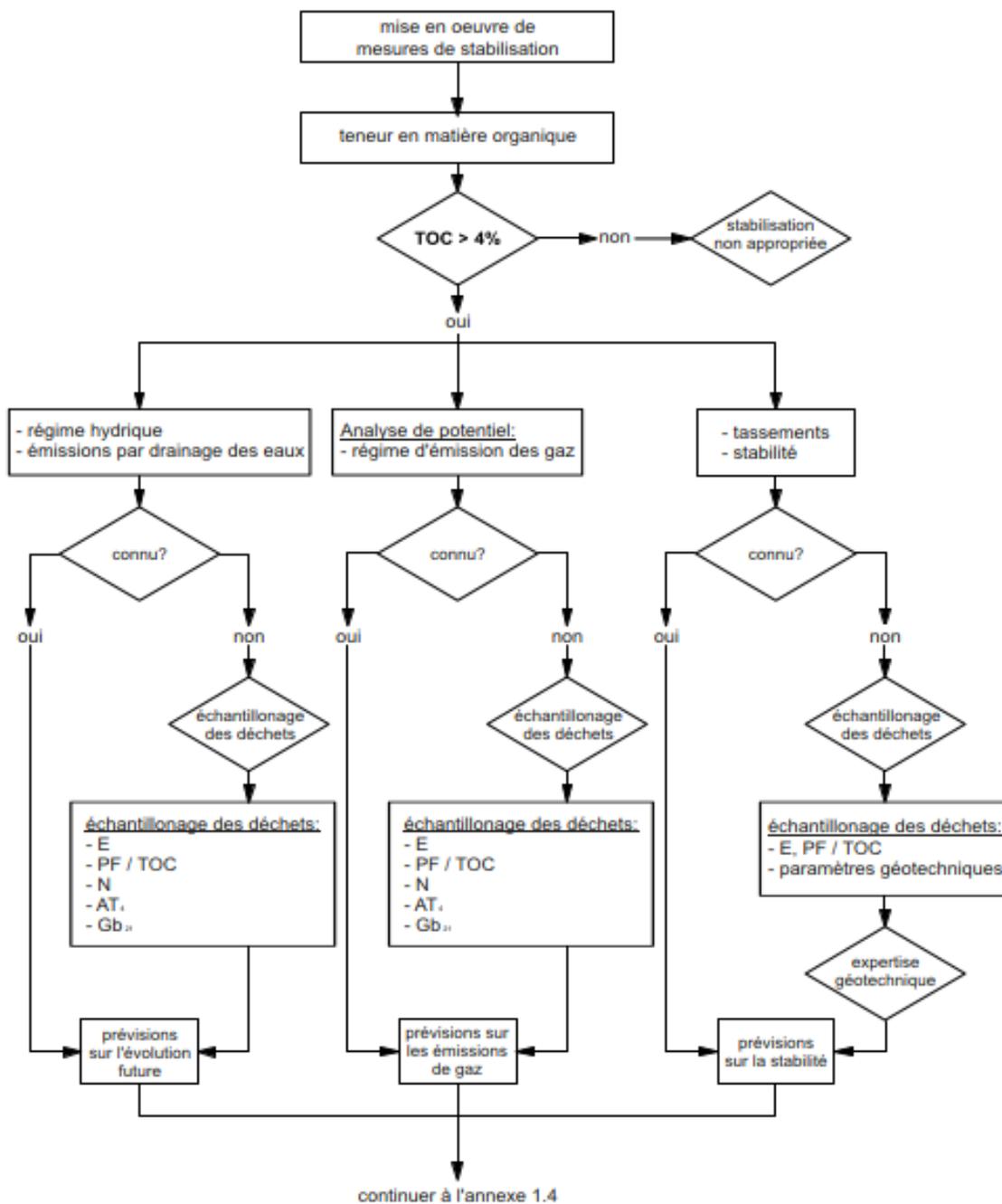
ANNEXE 1.1: Schéma de décision concernant la nécessité de stabiliser une décharge



ANNEXE 1.2 : Marche à suivre pour la détermination de l'état actuel d'une décharge



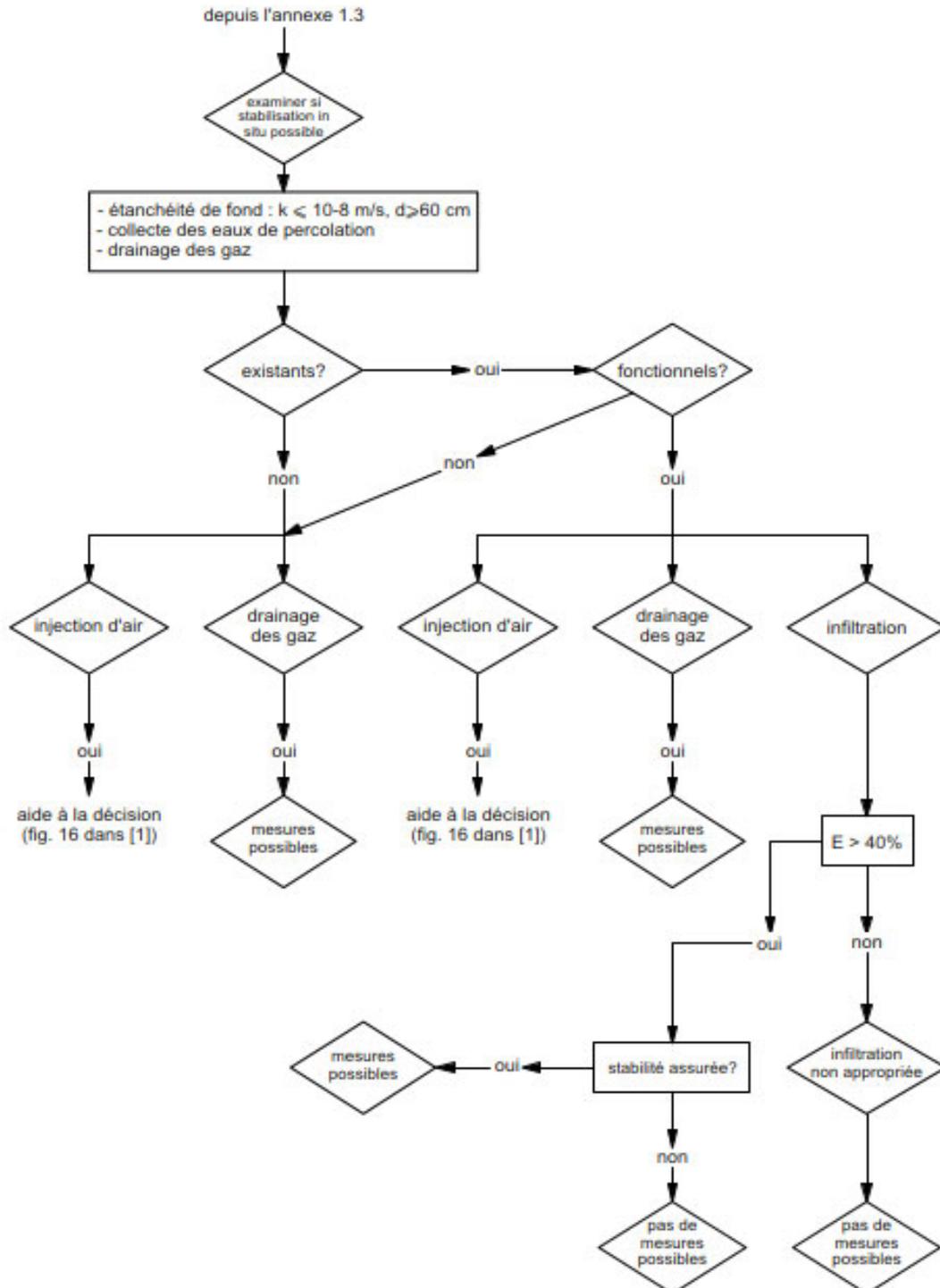
ANNEXE 1.3 : Marche à suivre pour la collecte des données nécessaires sur le site à stabiliser



Légende

TOC : Total organic carbon
 E : Teneur en eau
 PF : Perte au feu
 AT4 : vitesse de formation de gaz
 GB21 : activité respiratoire

ANNEXE 1.4 : Critères de détermination pour le choix du type de stabilisation à mettre en œuvre



Annexe 2

**Rapport Friedli Partner AG: BAFU : Nachsorgewirksame Massnahmen
bei Deponien, Grundlagen zur Reduzierung der Nachsorgedauer
du 26.06.2015 (rapport original en allemand)**

Nansenstrasse 5

CH-8050 Zürich

Tel +41 44 315 10 10

Fax +41 44 315 10 11

www.friedlipartner.ch

info@friedlipartner.ch

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

NACHSORGEWIRKSAME MASSNAHMEN BEI DEPONIEEN

Grundlagen zur Reduzierung der Nachsorgedauer

Projektleitung: Dr. Rita Hermanns Stengele

Mitarbeit: Matthias Zimmermann, Evelyne Kieser

Korreferat: Dr. Bruno Schmid

Projekt-Nr.: 14.097.1

Zürich, 26. Juni 2015

IMPRESSUM

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abfall und Rohstoffe, CH-3003 Bern Auftraggeber

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

FRIEDLIPARTNER AG, Nansenstrasse 5, CH-8050 Zürich Auftragnehmer

Dr. Rita Hermanns Stengele, Dr. Bruno Schmid, Evelyne Kieser,
Matthias Zimmermann Autoren

BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe, André Laube Begleitung BAFU

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

INHALTSVERZEICHNIS

GLOSSAR	4
1 EINLEITUNG	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Auftrag und Vorgehen	6
2 DEPONIELANDSCHAFT SCHWEIZ	7
3 SCHADSTOFFPOTENTIAL, EMISSIONSVERHALTEN	9
3.1 Inertstoffdeponien	9
3.2 Reststoffdeponien	9
3.3 Reaktordeponien	10
3.4 Fazit	20
4 MASSNAHMEN ZUR MINERALISIERUNG DER ABFÄLLE IN REAKTORDEPONIE	21
4.1 Allgemeines	21
4.2 Gasfassung (anaerobe In situ-Stabilisierung)	21
4.3 Aerobisierung (aerobe In situ-Stabilisierung)	23
4.4 Befeuchtung durch Infiltration (In situ-Stabilisierung)	28
4.5 Kombinierte Verfahren (In situ-Stabilisierung)	32
5 BEISPIELE	33
5.1 Beispiele Schweiz	33
5.2 Beispiele Ausland	34
5.3 Weitere Beispiele	36
5.4 Zusammenfassung Erfahrung	36
6 MASSNAHMEN ZUR REDUZIERUNG DER NACHSORGEDAUER	38
6.1 Bisherige Erkenntnisse	38
6.2 Vergleich unterschiedlicher nachsorgewirksamer Massnahmen	39
7 ENTSCHEIDUNGSHILFE NACHSORGE-WIRKSAME MASSNAHMEN	41
7.1 Beendigung der Nachsorgedauer	41
7.2 Prüfkriterien	41
7.3 Entscheidungshilfe	42
8 VERWENDETE UNTERLAGEN	45

GLOSSAR

Aerober Abbau	Abbau von Stoffen oder Abfällen durch Bakterien und andere Kleinstlebewesen unter Verbrauch von Luftsauerstoff.
Aerobisierung	Durch kontrolliertes Einbringen von Luftsauerstoff in den Deponiekörper wird dieser in einen sauerstoffreichen Zustand gebracht.
Anaerober Abbau	Abbau von Stoffen oder Abfällen durch Bakterien und andere Kleinstlebewesen ohne Luftsauerstoff.
Auswaschung	Austrag von Schadstoffen aus einem Deponiekörper durch kontrolliertes Einbringen von Wasser
Bewässerung	Durch die kontrollierte Wasserzufuhr kann die Feuchtigkeit im Deponiekörper reguliert und für die Stabilisierung der Deponie optimiert werden.
Diffusion	Unter Diffusion versteht man das Vermischen von Stoffen durch ihre zufällige Eigenbewegung. Sie führt mit der Zeit zur vollständigen Durchmischung zweier oder mehrerer Stoffe durch die gleichmäßige Verteilung der beteiligten Teilchen.
Konvektion	Konvektion ist das Mitführen von gelösten Stoffen oder physikalischen Grössen (thermische Energie, Impuls, ...) durch ein strömendes Fluid.
Mineralisierung	Der Abbau von organischem Material durch Bakterien und andere Kleinstlebewesen zu Kohlenstoffdioxid (CO ₂), Wasser (H ₂ O), sowie Ammonium (NH ₄ ⁺), Phosphat (PO ₄ ³⁻), Nitrit (NO ₂ ⁻), Nitrat (NO ₃ ⁻) und weitere anorganische Verbindungen.
Nachsorge	Nach Abschluss des Deponiebetriebs und dem Aufbringen einer Oberflächenabdichtung/-abdeckung sowie Rekultivierung unterstehen Deponien der Nachsorge gemäss TVA. Noch entstehendes Sickerwasser und/oder Deponiegas müssen gefasst und ggf. behandelt werden. Technische Einrichtungen, Bauteile und Emissionen sind zu überwachen.
Stabilisierung	Durch geeignete Massnahmen kann eine Deponie stabilisiert, d.h. in einen möglichst reaktionsarmen Zustand gebracht werden.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AltIV	Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten vom 26. August 1998, (Altlasten-Verordnung), SR 814.680
AOX	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen [mg O ₂ /L bzw. [mg O ₂ /kg TM]
CKW	Chlorkohlenwasserstoffe
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
GSchG	Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer vom 24. Januar 1991 (Gewässerschutzgesetz), SR 814.20
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
OKT	Oberkante Terrain
TOC	Total Organic Carbon (gesamter organisch gebundener Kohlenstoff)
TVA	Technische Verordnung über Abfälle vom 10. Dezember 1990, SR 814.600
VOC	Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Verbindungen)

ANHANG

Anhang	Entscheidungsbaum Nachsorgemassnahmen bei Deponie (4 Teile)
--------	---

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage

Am Ende der Abfallablagerung geht eine Deponie in die Nachsorgephase über. Um diese Überwachungsphase auf eine möglichst überschaubare Dauer zu beschränken, sind insbesondere bei Reaktordeponien während des Betriebes, jedoch sicher noch vor dem Oberflächenabschluss, Massnahmen zu evaluieren und nötigenfalls umzusetzen, um das Schadstoffpotential zu reduzieren. Dies gilt schon heute und explizit mit der revidierten Technischen Verordnung über Abfälle (TVA, [2]).

Problematik

Ziel des Auftrages ist es, eine fundierte Übersicht von möglichen Massnahmen zur Reduktion des Schadstoffpotentials mit Fokus auf die schweizerische Deponielandschaft zusammenzustellen.

Zielsetzung

1.2 Auftrag und Vorgehen

Mit Vertrag vom 19. August 2014 des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe wurde die FRIEDLIPARTNER AG mit der Erarbeitung von Grundlagen zur Reduzierung des Schadstoffpotentials und damit auch der Nachsorgekosten für Deponien beauftragt. Grundlage stellte unsere Offerte vom 11. August 2014 dar.

Auftrag

Die Arbeit gliederte sich in zwei Phasen:

Vorgehen

- a) Erarbeiten und Dokumentation der Grundlagen zu Schadstoffpotential vermindern den Effekten (Wasser-, Gaspfad, etc.)
- b) Charakterisierung der Deponielandschaft Schweiz hinsichtlich Anwendung dieser Massnahmen
- c) Festhalten möglicher Massnahmen und Voraussetzungen dazu auf Basis von Literaturrecherchen sowie Fakten von Fallbeispielen (Deponien, Altlastenbearbeitung)
- d) Zusammenstellung eines Massnahmenkataloges (Art, Voraussetzung / Kriterien (qualitativ, quantitativ), Kosten / Nutzenaspekte, Erfolgchancen, Referenzierung)

Phase 1

Phase 2

2 DEPONIELANDSCHAFT SCHWEIZ

Mit dem Leitbild der schweizerischen Abfallwirtschaft von 1986 [1] wurden Ziele und Grundsätze für die schweizerische Abfallpolitik grundlegend überarbeitet. In der Folge wurde schliesslich 1991 die TVA [2] in Kraft gesetzt. Abfallleitbild Schweiz

Ein Leitgedanke war die Erzeugung von nur zwei Kategorien von Abfällen: verwertbare und endlagerfähige Stoffe und nur letztere zur Ablagerung zuzulassen. Gemäss Abfallleitbild ist ein Reststoff dann endlagerfähig, ...*wenn er in einer geeigneten Hülle (...) langfristig (über Hunderte von Jahren) nur jene Stoffe an die Umweltkompartimente (Luft, Wasser, Boden) abgibt, welche diese in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt.....*[1].

In der TVA wurden für die endlagerfähigen Stoffe die Deponietypen **Inertstoffdeponie** und **Reststoffdeponie** festgelegt. Der Deponietyp **Reaktordeponie** wurde für Abfälle geschaffen, die noch reaktiv sind. Deponietypen gemäss TVA 1991

In Tabelle 1 sind die gemäss TVA (bis heute) gültigen Deponietypen, deren Charakterisierung und typische Abfallarten zusammengestellt (in Anlehnung an [37]).

Tabelle 1: Deponietypen und typische Abfallarten

Deponietyp	Charakterisierung Abfälle	Typische Abfallarten
Inertstoffdeponie	Gesteinsähnliche, schadstoffarme Materialien	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralische Bauabfälle • Schwach belastetes Aushubmaterial • Nicht verwertbares, sauberes Aushubmaterial
Reststoffdeponie	Schwermetallhaltige Materialien, nur geringer organischer Anteil, schwer löslich	<ul style="list-style-type: none"> • Filterasche aus thermischer Behandlung von Abfällen • Metallhaltige, anorganische, schwerlösliche Hydroxidschlämme • Stark schwermetallhaltiges Material aus Behandlungsanlagen
Reaktordeponie	Chemisch/biologisch reaktive Stoffe, hoher organischer Anteil	<ul style="list-style-type: none"> • Schlacke, verglaste Rückstände <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • Übrige Abfälle mit hohem Gehalt an organischen Schadstoffen • Stark belastetes Aushubmaterial • Kehricht

Grundsätzlich können in der Schweiz folgende drei Kategorien von Deponien unterschieden werden, für die nachsorgewirksame Massnahmen angewendet werden können: Kategorien

1. Ordentliche Deponien, welche bereits vor 1. Februar 1991 eröffnet wurden und noch in Betrieb sind¹
2. TVA-Deponien, welche ab 1. Februar 1996 eröffnet wurden und in Betrieb sind
3. Ab 1. Februar 1996 oder später² abgeschlossene, also in Überwachung stehende Deponien

Auf Inhaltsstoffe und Schadstoffpotential wird in Kapitel 3 eingegangen.

Die Entlassung aus der Nachsorge ist gegeben, sobald die Einleitbedingungen in den Vorfluter (Oberflächengewässer) gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) für gefasstes Deponiesickerwasser erfüllt sind [3] und das Sickerwasser zu keinen schädlichen oder lästigen Einwirkungen mehr führt (AltIV, [4]). Entlassung aus der Nachsorge

Hinsichtlich der Beurteilung von schädlichen oder lästigen Einwirkungen auf die Umwelt wird in Analogie zu den Ablagerungsstandorten die Altlasten-Verordnung (AltIV, [4]) herangezogen, da auch alle in Betrieb stehenden Deponien als mit Abfällen belastete Standorte gelten [37].

¹ Ablagerungsstandorte, die nicht als geordnete Deponien betrieben wurden, sind hier nicht berücksichtigt

² Gemäss TVA von 1991 galt eine Übergangsfrist für das Inkrafttreten von 5 Jahren

3 SCHADSTOFFPOTENTIAL, EMISSIONSVERHALTEN

3.1 Inertstoffdeponien

Inertstoffdeponien enthalten inerte Abfälle, die kaum Schadstoffe ins Wasser oder an die Luft abgeben, z.B. Geschiebe aus Gewässern, Strassensplitt, Asche aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz, mineralische Bauabfälle, unverschmutztes und schwach belastetes Aushubmaterial.

Abfallarten

Die Emissionen sind dementsprechend gering und beschränken sich in den meisten Fällen auf erhöhte Sulfat-, Chlorid- und DOC-Konzentrationen im Sickerwasser.

Emissionspotential

Für Sulfat und Chlorid enthält die GSchV keine Anforderungen an die Einleitung in Gewässer. Die Anforderung bezüglich DOC (10 mg/L) kann oft nicht oder nur mit unverhältnismässigem Aufwand eingehalten werden [5]. Für Chromat besteht gemäss [5] ein hohes Risiko bei mineralischen Bauabfällen wie Beton- und Mischabbruch. Wegen der geringen Gehalte an organischem Material sind keine Gasemissionen feststellbar.

Risiko relevanter Immissionen

Aufgrund des sehr niedrigen Reaktionspotentials besteht bei Inertstoffdeponien kein Bedarf für spezifische Nachsorgemassnahmen.

Nachsorge

3.2 Reststoffdeponien

Auf den Reststoffdeponien sind reaktionsarme, aber schwermetallreiche Abfälle mit geringem organischen Anteil abgelagert, wie z.B. Filterasche aus der Rauchgasreinigung (hydraulisch gebunden) sowie Hydroxidschlämme aus der Vorbehandlung von Abwasser.

Abfallarten

Die Schadstoffe liegen jedoch in einer wenig mobilen Form vor. In Abbildung 1 sind die Emissionen von Reststoffdeponien schematisch dargestellt.

Emissionspotential

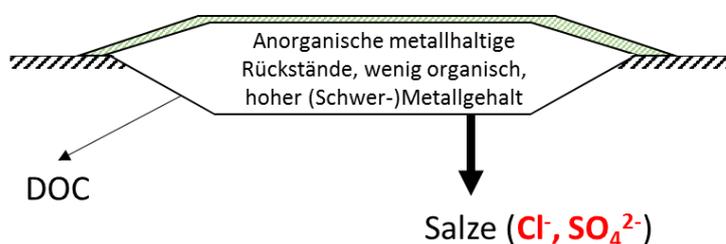


Abbildung 1: Emissionen von Reststoffdeponien³, schematisch

³ Fetter Pfeil = hohe Emissionen, dünner Pfeil = geringe Emissionen, roter Parameter in () = keine Grenzwerte in GSchV oder AltV

Als kritisch bezüglich der Relevanz von Immissionen bei der Einleitung von Sickerwasser aus Reststoffdeponien in ein Gewässer wurden in [5] pH-Wert, DOC, Chrom(IV) und AOX eingestuft (unterschiedlich stark je nach Reststoff mit oder ohne Zementverfestigung).

Risiko relevanter Immissionen

Ebenfalls stellen Salze (Chlorid, Sulfat) ein hohes Emissionspotential dar. Allerdings sind weder in der GSchV noch in der AltIV diesbezügliche Grenzwerte enthalten.

Aufgrund des sehr niedrigen Reaktionspotentials besteht bei Reststoffdeponien in den meisten Fällen kein Bedarf für spezifische Nachsorgemaßnahmen.

Nachsorge

Allenfalls sind Massnahmen bezüglich löslichen Salzen zu treffen, da hier ein erhöhtes Risiko bezüglich der Korrosionsbeständigkeit z.B. von Betonbauwerken zu beachten ist [5].

3.3 Reaktordeponien

3.3.1 Abgeschlossene Kehrrechtdeponien (bis 2000)

Auf Reaktordeponien, die vor 2000 betrieben wurden (vgl. Abschnitt 3.3.3), wurde insbesondere chemisch und biologisch reaktive Abfälle mit einem hohen organischen Anteil abgelagert. Dies beinhaltete u.a. Kehrrecht, siedlungsabfallähnliche unbehandelte organische Abfälle und/oder stark belastetes Aushubmaterial.

Abfallarten

Ohne eine spezielle Vorbehandlung unterliegen solche Abfälle, vor allem Kehrrecht, aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften einer Vielzahl von ablaufenden Zersetzungsprozessen. Die Hauptmasse des Abfalls wird biologisch abgebaut. In welchem Zustand sich die Deponie befindet, kann dabei anhand der Sickerwasserqualität und der Gasproduktion sowie –zusammensetzung beschrieben werden.

Umsetzungsvorgänge allgemein

Wasser spielt für die Förderung der biochemischen Vorgänge und als Transportmedium für die Umsetzungsprodukte im Deponiekörper einer Reaktordeponie eine wesentliche Rolle. In Abbildung 2 werden die wichtigsten Prozesse im Deponiekörper grafisch dargestellt [29]. Allgemein können die Prozesse in Deponien entsprechend Tabelle 2 eingeteilt werden [7].

Tabelle 2: Allgemeine Prozesse in Deponien [7]

Prozess	Beispiel
<i>Kurzfristig</i>	
<ul style="list-style-type: none"> physikalische Prozesse biochemische Prozesse geotechnische Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Auswaschung von Salzen; Adsorption Aerober und anaerober Abbau; Huminstoffbildung Gasbildung Setzungen durch Abbau und Konsolidation
<i>Mittelfristig</i>	
<ul style="list-style-type: none"> chemische Prozesse geochemische Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Redox-/Säure-Basenreaktion; Ausfällung etc. Phasenumwandlungen etc.
<i>Langfristig</i>	
<ul style="list-style-type: none"> geochemische Prozesse geologische Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Verwitterungsreaktionen an Mineralen Erosion

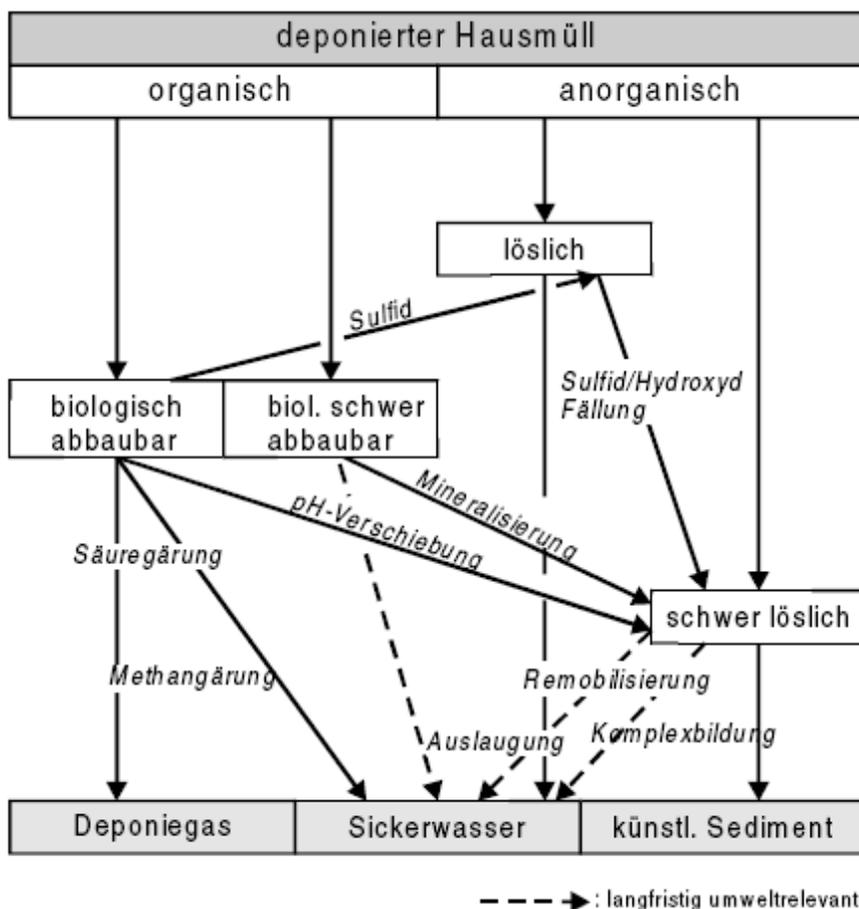


Abbildung 2: Umsetzungsprozesse in einer Deponie für Kehricht [29]

Das Emissionsverhalten von Deponien mit unbehandelten Abfällen kann in fünf Phasen unterteilt werden (vgl. auch [6], [8], [9], [28], [29], [30] sowie Abbildung 3 und Abbildung 4). Biochemische
Umsetzung

I. Phase: Aerobe Phase

Beim vollständigen aeroben Abbau wird organische Substanz durch Mikroorganismen unter Einbezug von Sauerstoff zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser oxidiert. Diese Phase dauert nur wenige Wochen und findet innerhalb der oberen Abfallschicht, d.h. während des Einbaus und vor dem Aufbringen der Abdichtung, statt.

II. Phase: Saure Phase (anaerobe Phase)

In der sauren Phase werden bei einem pH-Wert ≤ 7 die biologisch abbaubaren Substanzen zu Kohlendioxid (CO₂), Wasser und niederen Fettsäuren abgebaut. Das aus dem Deponiekörper austretende Sickerwasser weist in dieser Phase hohe organische Belastungen auf. Diese Phase dauert Monate bis Jahre.

III. Phase: Methanvorstufe (anaerob)

Die sich anschliessend langsam entwickelnden Methanbakterien führen über die anaerobe Methanvorstufe schliesslich zur Methanphase.

IV. Phase: Methanphase

In den Phasen III und IV wird der Anteil organischer Säuren mikrobiell umgesetzt, so dass der pH-Wert im Sickerwasser auf ≥ 7 ansteigt. Die organischen Belastungen im Sickerwasser sind gegenüber der sauren Phase deutlich reduziert, da die organischen Säuren zu Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) umgesetzt werden.

Die Phasen III und IV dauern mehrere Jahrzehnte bis 100 Jahre.

V. Phase: aerobe Endphase

Die aerobe Endphase V tritt erst nach Jahrhunderten ein.

Die Entwicklung des Deponiegases ist auch vom Fortschritt der biologischen Prozesse im Deponiekörper abhängig [8]. Der in der aeroben Phase (I. Phase) vorhandene Sauerstoff wird in der sauren Phase (II. Phase) abgebaut unter der Bildung von CO₂ und Wasserstoff. Während der Methanvorphase (III. Phase) steigt die CO₂-Produktion auf ein Maximum, gleichzeitig beginnt die Bildung von Methan. In der stabilen Methanphase (IV. Phase) führt die Umsetzung der organischen Bestandteile zu den Hauptkomponenten CH₄ (50 – 60 %) und CO₂ (40 – 50 %) [9]. Auch weitere Stoffwechselprodukte können im Gas enthalten sein (z.B. Wasserstoff, Ammoniak), jedoch in untergeordneten Anteilen. Deponiegas

Das auf Kehrrechtdeponien abgelagerte Material weist grundsätzlich das in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellte Schadstoffpotential auf. In Abbildung 5 ist das Emissionsverhalten von Kehrrechtdeponien über den Gas- und den Sickerwasserpfad schematisch dargestellt. Emissionspotential

- | | | | |
|-------------|-----------------|------------|--------------|
| I. Phase: | aerobe Phase | II. Phase: | Sauere Phase |
| III. Phase: | Methanvorstufe | IV. Phase: | Methanphase |
| V. Phase: | aerobe Endphase | | |

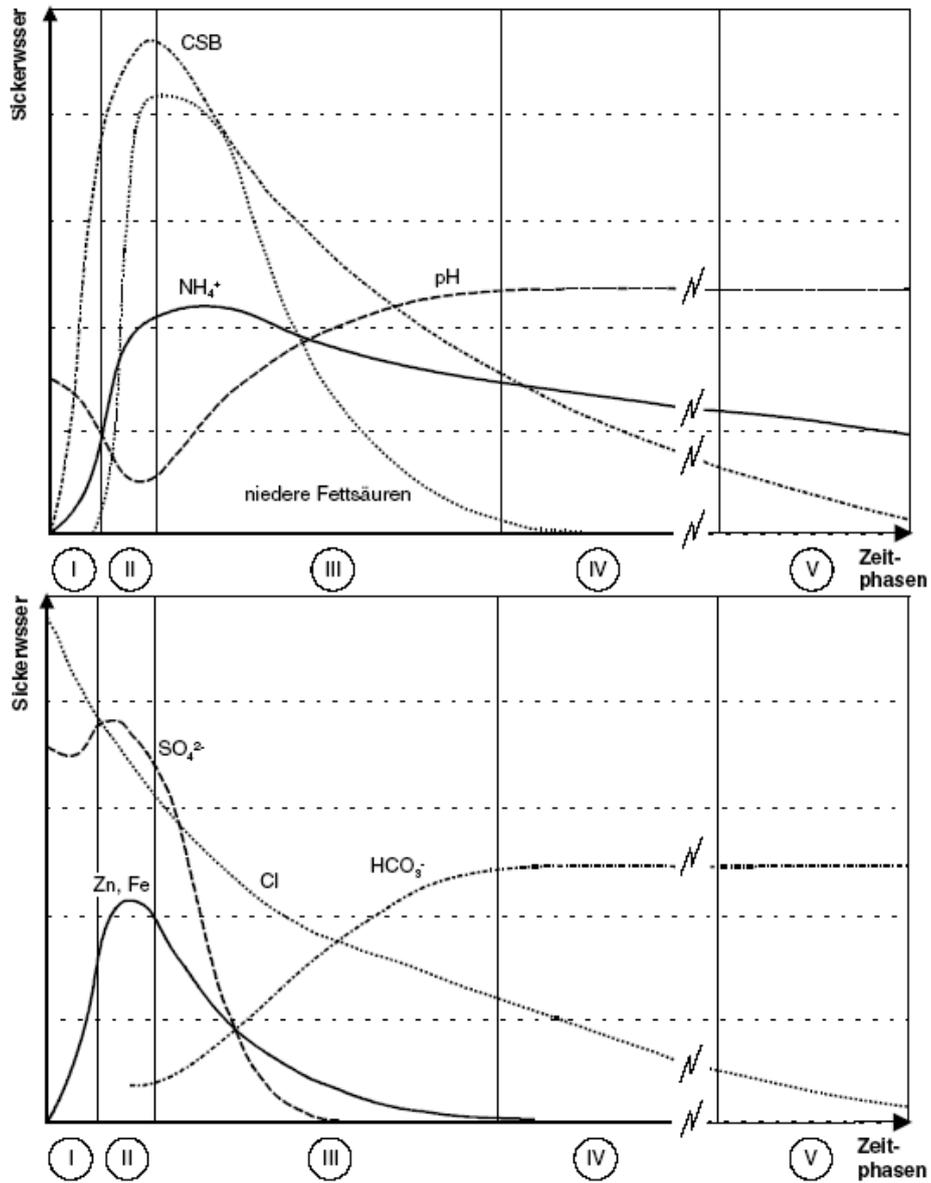


Abbildung 3: Qualitative Entwicklung der wichtigsten Sickerwasserparameter in Kehrichtdeponien [6]

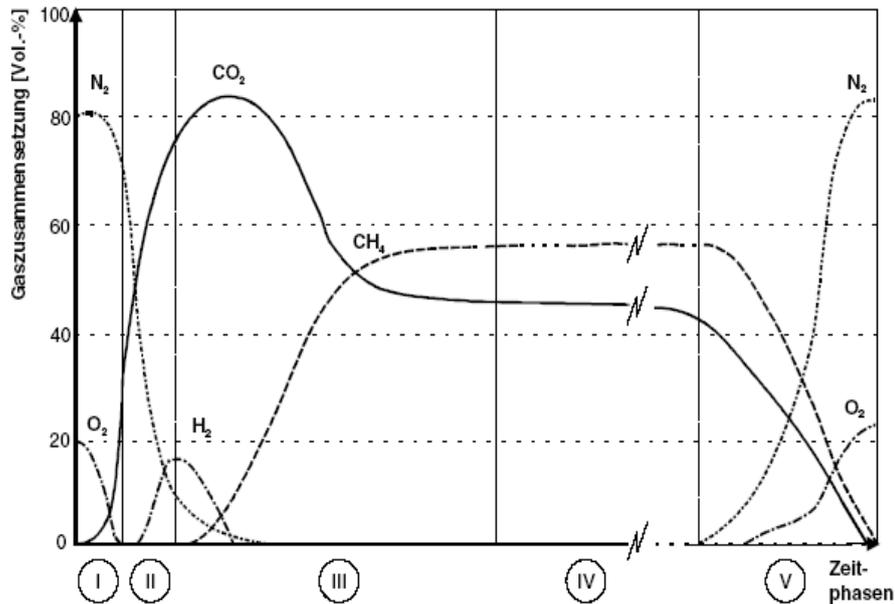


Abbildung 4: Qualitative Entwicklung der Hauptkomponenten im Deponiegas von Kehrichtdeponien [8]

Als kritisch bezüglich der Relevanz von Immissionen bei der Einleitung von Sickerwasser aus Reaktordeponien in ein Gewässer wurden in [5] pH-Wert, BSB₅, DOC, AOX und Ammonium eingestuft (nur Kehrichtdeponien).

Risiko relevanter Immissionen

Die auf Kehrichtdeponien abgelagerten Abfälle haben ein hohes Reaktionspotential. Dies sollte, soweit möglich, reduziert werden (siehe Kapitel 4).

Nachsorge

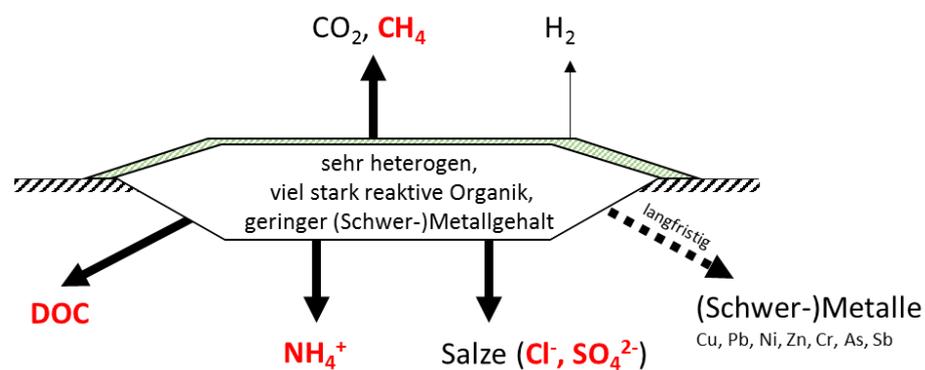


Abbildung 5: Emissionsverhalten von Kehrichtdeponien, schematisch⁴

⁴ Fetter Pfeil = hohe Emissionen, dünner Pfeil = geringe Emissionen, gestrichelter Pfeil = spät einsetzende Emissionen, roter Parameter = problematischer Schadstoff, roter Parameter in () = keine Grenzwerte in GSchV oder AltIV

3.3.2 Schlackekompartimente

Auf Reaktordeponien können gemäss Anhang 1 der TVA [2] auf getrennten Kompartimenten vor allem Schlacke aus der Kehrichtverbrennung, verglaste Rückstände sowie Ca- und Al-Hydroxidschlämme abgelagert werden.

Allgemeines

Schlackekompartimente zeigen grundsätzlich die gleiche Problematik wie Kehrichtdeponien auf. Die Gasemissionen sind allerdings weniger ausgeprägt, abgesehen von Wasserstoffemissionen aus der Reaktion von Wasser mit elementarem Aluminium sowie anfänglich aus der Reaktion von Aluminiumnitrid mit Wasser [10].

Bei bestehenden Schlackekompartimenten besteht keine Möglichkeit, das vorhandene Schadstoffpotential zu reduzieren.

Bei Kompartimenten, auf welchen aktuell Schlacke abgelagert wird, gibt es durch die Schlackeaufbereitung die Möglichkeit, das Schadstoffpotential bereits vor dem Einbau zu reduzieren (z.B. durch Trockenaustrag, vgl. [16]).

Schlackeaufbereitung

Derzeit laufen umfangreiche Forschungsarbeiten und technische Entwicklungen zur Optimierung der zur Ablagerung gelangenden Schlacken. Hierbei werden einerseits die Schlacken von Eisen und Nichteisenmetallen entfrachtet. Andererseits werden Schlacken im Trockenaustrag sowie optimale Ablagerungsbedingungen zur Verringerung der Durchlässigkeit des Deponiekörpers beim Trockenaustrag geprüft ([14], [15], [16]).

Trockenaustrag

Schlacken weisen hohe Anteile an (Schwer-)Metallen auf, die anfänglich häufig auch in elementarer Form vorliegen. Der ebenfalls hohe Anteil an löslichen (Chloride, Sulfate) und unlöslichen Salzen (Phosphate, Schwermetallhydroxide) beherbergt weiteres Immissionspotential (vor allem Korrosion von Betonbauwerken [5]). Der hohe pH-Wert kontrolliert die Bindungsform und die Mobilität der (Schwer-)Metalle.

Immissionspotential

Im Gegensatz zu den Kehrichtdeponien ist der Gehalt an organischem Material mit < 3% gering.

Der Emissionsanteil aus Schlackedeponien über das Sickerwasser beträgt über 90 %, ein geringer Anteil (bis max. 10%) wird über die Gasphase ausgetragen. Abschätzungen der Emissionen über das Sickerwasser gehen von zwei Kategorien aus [11] (siehe auch Abbildung 6):

Emissionsverhalten

- Kurzzeit-Emissionen: 0 bis 100 Jahre nach Ablagerung
- Langzeit-Emissionen: über 100 Jahre nach Ablagerung

Das Model kalkuliert die Emissionen bis zur nächsten, das Mittelland bedeckenden Eiszeit in möglicherweise 60'000 Jahren.

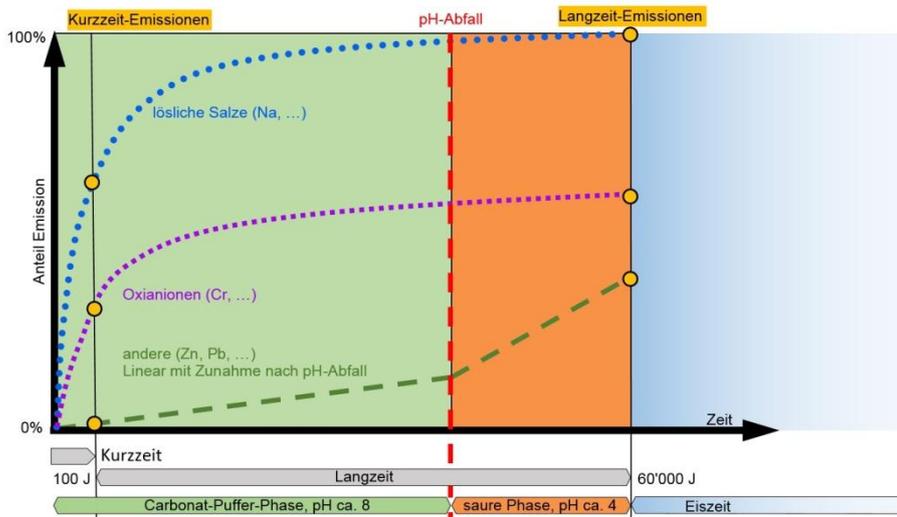


Abbildung 6: Generelle Arten der Transportprozesse (übersetzt aus [12])

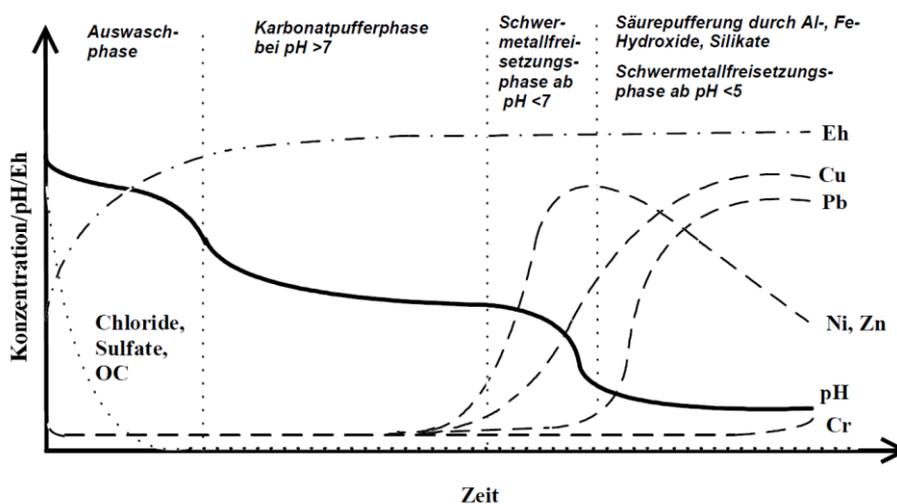


Abbildung 7: Langzeitverhalten von Schlackedeponien [22]

Das Emissionsverhalten und die Alterung der Schlacke kann somit in vier Phasen gegliedert werden [22] (Abbildung 7):

Durch eindringendes Niederschlagswasser erfolgt in den ersten Jahren bis Jahrzehnten die Auswaschung von leichtlöslichen Inhaltsstoffen. Durch die hohen pH-Werte sind die meisten (Schwer-)Metalle nicht mobil und es ist nur geringfügig mit Cu, Al, Pb oder Zn im Sickerwasser zu rechnen. Diese Aussagen werden in [41] unterstützt.

In dieser ersten Phase reagieren die Metalloxide mit Wasser zu Hydroxiden, was aufgrund des exothermen Charakters der Reaktion zu wesentlichen Temperaturerhöhungen im Deponiekörper führt. Durch die Reaktion der Metallhydroxide mit Kohlendioxid zu Carbonaten (Carbonatisierung) kommt es danach zu einer Absenkung des pH-Wertes.

In Abhängigkeit des pH-Wertes sind die in den Schlacken enthaltenen Schwermetalle bis über Jahrtausende im mg/L-Bereich mobilisierbar [13].

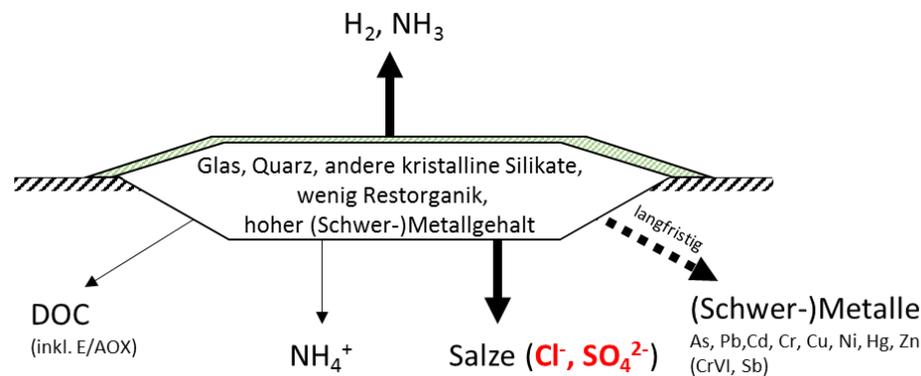


Abbildung 8: Emissionsverhalten von Schlackekompartimenten⁵

Aufgrund von Feldversuchen an der Schlackedeponie Grossmehring in Bayern Nachsorge konnten folgende Erfahrungen gesammelt werden [23], [27]:

- Im ersten Jahr der Deponierung der Schlacken wird die Hauptmasse an mobilisierbaren Ionen über das Sickerwasser aus der Deponie ausgetragen.
- Nach 2 Jahren sind die exothermen Reaktionen weitgehend abgeschlossen.
- Durch Reinfiltration von Sickerwasser kann die Auslaugung der Schlacke beschleunigt und somit deren Endlagerqualität verbessert werden.
- Zur nachhaltigen Verbesserung der Schlackequalität sollte, auch wenn sich damit die Dauer der Nachsorgephase verlängert, die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung möglichst lange hinausgezögert werden.
- Auch nach Aufbringen einer Oberflächenabdichtung muss mit weiteren Reaktionen gerechnet werden (hohes Wasserbindungsvermögen der Schlacke verhindert völlige Entwässerung der Deponie).

Laborversuche zur künstlichen Alterung von KVA-Schlacke zeigten zudem, dass eine verbesserte Durchlüftung, Alterung und Passivierung der Schlacke zwar fördert, aber aufgrund der bereits erwähnten Abnahme der Carbonatpufferkapazität in der Praxis unerwünscht ist [24].

Die erste Phase ist also mit einem hohen Reaktionspotential verbunden, das nach Möglichkeit vor der Entlassung aus der Nachsorge reduziert werden sollte. Kritisch ist dabei aber, dass es mit der langsamen Umwandlung der Carbonate zu Hydrogencarbonaten längerfristig zu einer Abnahme der Carbonatpuffer-Kapazität kommt (Phase 2) und damit die Mobilität der Schwermetalle zunimmt (Phase 3). Daher ist es sinnvoll, mit Beginn der Phase 2 eine permanente Oberflächen-

⁵ Fetter Pfeil = hohe Emissionen, dünner Pfeil = geringe Emissionen, gestrichelter Pfeil = spät einsetzende Emissionen, roter Parameter in () = keine Grenzwerte in GSchV oder AltIV

abdichtung zu errichten, um die Mobilisierung der Schwermetalle zu verhindern (siehe Abbildung 9).

Die hohen Salzgehalte und der hohe pH-Wert im Sickerwasser während der Nachsorge vor Aufbringen einer Oberflächenabdichtung erfordert vermutlich in den meisten Fällen eine Sickerwasserbehandlung.

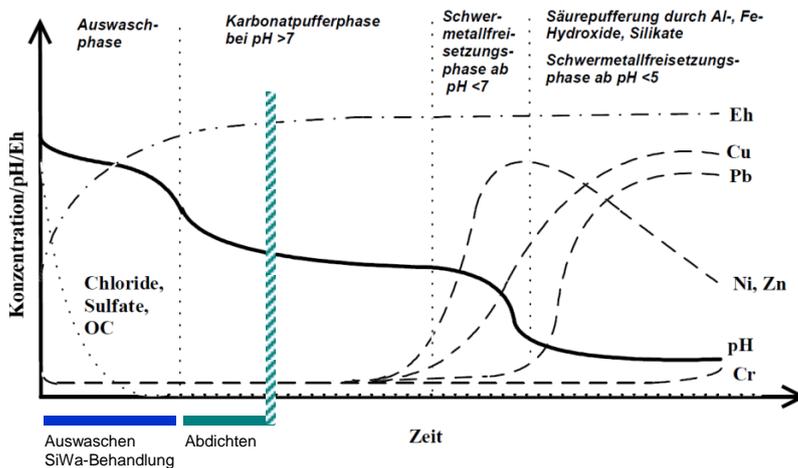


Abbildung 9 Nachsorgemaßnahmen bei Schlackedeponien, ergänzt aus [22]

Es ist davon auszugehen, dass das Schadstoffpotential bzw. das Emissionspotential von neuen Schlackedeponien zukünftig deutlich reduziert werden kann (vgl. Abschn. 3.3.2).

3.3.3 Reaktordeponien für übrige Reaktorstoffe (2000-2010, teilweise ab 1991)

Seit dem Jahr 2010 dürfen auf Reaktordeponien keine brennbaren Materialien mehr deponiert werden [2] und [25]. Zugelassen waren ab dann nur noch nicht brennbare Bauabfälle (z.B. kontaminiertes Aushubmaterial), Rückstände aus der Behandlung von Sandfangmaterial aus der Kanalisationsreinigung und von Strassensammlerschlämmen sowie Abfälle, die bei Hochwasser- oder Brandereignissen anfallen.

Abfallarten

Ein Grossteil der Reaktordeponien war schon vor dem Ablagerungsverbot nicht auf Kehrichtanlieferungen angewiesen und fokussierte sich deshalb auf Schlacken, übrige Reaktorstoffe oder Inertstoffe [37].

Neuere Reaktordeponien zeichnen sich daher gegenüber den Reaktordeponien vor 2000 durch einen höheren Metallgehalt und einen geringeren organischen Gehalt aus. Im Vergleich zu den Kehrichtdeponien entfallen daher insbesondere die Emissionen über den Gaspfad. Im Sickerwasser ist jedoch immer noch mit einer starken Belastung durch Metalle und vor allem, im Gegensatz zu den Kehrichtdeponien, mit organischen Schadstoffen zu rechnen (vgl. Abbildung 10). Flüchtige organische Schadstoffe können hier als gasförmige Emissionen vom Deponiekörper austreten.

Emissionsverhalten

Als kritisch bezüglich der Relevanz von Immissionen bei der Einleitung von Sickerwasser aus Reaktordeponien in ein Gewässer wurden in [5] vor allem pH-Wert,

Risiko relevanter Immissionen

BSB₅, DOC, Arsen, Chrom(VI) und CKW sowie AOX, Ammonium und Antimon eingestuft. Eine Ableitung der Sickerwässer in die öffentliche Kanalisation oder eine Aufbereitung vor Ort ist deshalb in den meisten Fällen zwingend [5].

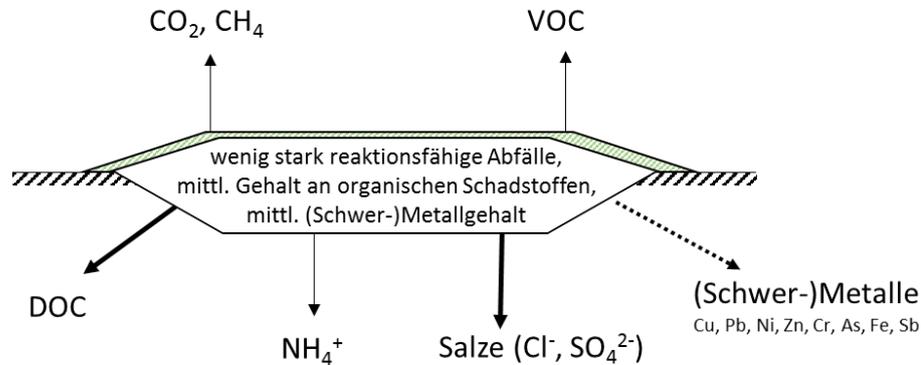


Abbildung 10: Emissionsverhalten von Reaktordeponien für übrige Reaktorstoffe ab 2000⁶

Die Sickerwasserbelastung bei Reaktordeponien für übrige Reaktorstoffe bleibt Nachsorge problematisch. Inwiefern die Mineralisierung der Abfälle auf Reaktordeponien, welche nach 2000 eröffnet wurden, z.B. durch In situ-Aerobisierung (siehe Kapitel 4) oder Auswaschung forciert werden kann, ist im Einzelfall abzuklären.

Mit einer kontrollierten Auswaschung sollen die mobilen Schadstoffe über den Auswaschung Sickerwasserweg aus dem Deponiekörper schneller ausgetragen werden. Durch gezielte Zugabe von Wasser (Infiltration von Sauberwasser oder Rückführung von Deponiesickerwasser) sollen die Schadstofffrachten und / oder –konzentrationen erhöht werden. Durch einen beschleunigten Austrag an Schadstoffen soll das Emissionspotential reduziert und damit die Nachsorgedauer verkürzt werden.

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass die für Deponieemissionen charakteristischen organischen Stoffe (DOC, Kohlenwasserstoffe) sowie Stickstoffverbindungen (NH₄ und NO₂) im Deponiesickerwasser innerhalb von 30 bis 50 Jahre auf nicht mehr umweltrelevante Werte abklingen [29].

Es zeigt sich jedoch auch, dass vor allem die mit dem Sickerwasser ausgetragenen mobilisierten Metalle und gewisse anorganische Salze Jahrhunderte bis Jahrtausende benötigen, bis sie die im Grund- oder Oberflächengewässer natürlich vorhandenen Konzentrationen erreicht haben [29] (siehe hierzu auch Kapitel 6).

⁶ mittelfetter Pfeil = mittlere Emissionen, dünner Pfeil = geringe Emissionen, gestrichelter Pfeil = spät einsetzende Emissionen

3.3.4 Reaktordeponien für übrige Reaktorstoffe (seit 2010)

Der in der TVA seit 2010 festgelegte Grenzwert für den Parameter TOC (gesamter organisch gebundener Kohlenstoff) reduziert die Reaktivität des abgelagerten Materials noch weiter. Deshalb ist in den Reaktorkompartimenten, die seit 2010 eröffnet wurden, nur noch ein geringes Potential zur Förderung der Mineralisierung vorhanden.

3.4 Fazit

Massnahmen zur Reduzierung der Nachsorgedauer durch Stabilisierung sind nur für Reaktordeponien, und hierbei insbesondere für Kehrlichtdeponien, angezeigt.

4 MASSNAHMEN ZUR MINERALISIERUNG DER ABFÄLLE IN REAKTORDEPONIEEN

4.1 Allgemeines

In vielen Deponien mit installierter Gasfassung ist ein Rückgang der gefassten Gasvolumen zu beobachten, obwohl häufig noch ausreichend organische Bestandteile (TOC > 4 % der Trockenmasse) im Deponiekörper vorhanden sind. Über der Oberfläche sind meist nur geringe oder keine Emissionen mehr feststellbar [42].

Gasproduktion

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Massnahmen zur Mineralisierung von Abfällen beschrieben, die heute zu den im Kapitel 3 beschriebenen potentiellen Emissionen führen.

Massnahmen

4.2 Gasfassung (anaerobe In situ-Stabilisierung)

4.2.1 Einleitung

Bei Deponien, welche sich in einem anaeroben Zustand befinden, entsteht beim Abbau der organischen Substanz u.a. Methan, welches über die Deponieoberfläche diffus in die Atmosphäre gelangt oder über Leitungen gefasst und allenfalls genutzt werden kann (Energiegewinnung, Verbrennung). Mit der Zeit nimmt die Methanmenge ab und eine Nutzung des Methans ist nicht mehr wirtschaftlich.

Anaerober Abbau

Mit der Gasfassung soll der anaerobe Abbau gefördert und der diffuse Gasaustritt vermindert werden, so dass die Deponiegase über einen längeren Zeitraum energetisch genutzt werden können. Gleichzeitig soll so die Gasverwertung (insbesondere Methan) länger aufrechterhalten und die Nachsorgedauer verkürzt werden.

Nutzung Methan

4.2.2 Beschreibung System

Mit tiefsaugenden Gasbrunnen sollen die anaeroben Abbauvorgänge gefördert bzw. reaktiviert werden. Vorhandene Gasbrunnen können in tiefsaugende Brunnen umgerüstet oder es können neue Brunnen erstellt werden. Wichtig ist, dass der Filterbereich nur bis 6 – 8 m unter OKT reicht und die obersten Meter abgedichtet werden, um die Gefahr eines Kurzschlusses zur Deponieoberfläche zu verhindern.

Aufbau Gasfassung

An die Gasbrunnen kann anschliessend ein Unterdruck angelegt werden. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt das Strömungsbild im Deponiekörper. Entlang der Oberfläche entsteht durch den Eintritt der Luft ein kleiner aerober Bereich. In den tieferen Schichten wird der anaerobe Abbau gefördert [42].

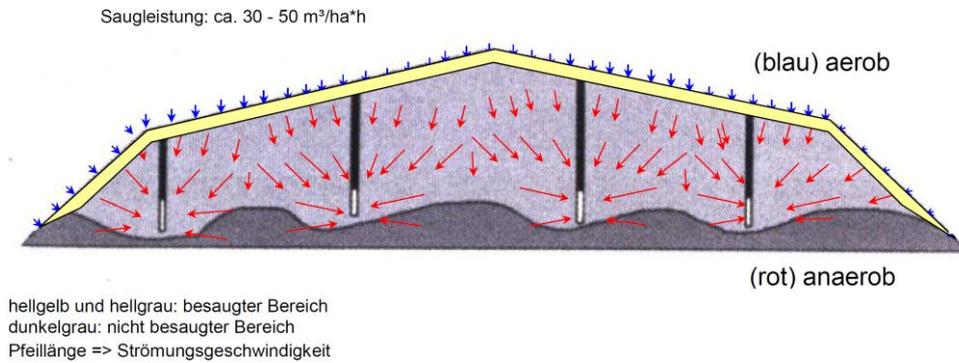


Abbildung 11: Strömungsbild bei Tiefenbesaugung nach DEPO⁺-Verfahren [42]

Mit der Gasfassung können Methan-Emissionen während der Betriebs-, der Stilllegungs- und der Nachsorgephase vermindert werden. Zusätzlich kann die Wirtschaftlichkeit der Methannutzung verbessert werden.

Sinkt die Methankonzentration auf ein Niveau, dass eine Nutzung des Gases nicht mehr wirtschaftlich ist, können die Gasfassungsbrunnen für die Aerobisierung des Deponiekörpers genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.3 zur Aerobisierung). Nachnutzung

4.2.3 Voraussetzungen

Für eine Gasfassung mit einer wirtschaftlichen Nutzung des Deponiegases (Abbildung 12) müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein [43]: Wirtschaftliche Nutzung

- Die Abfälle müssen genügend biologisch verfügbare organische Anteile aufweisen (TOC > 4 %).
- Bei den Abfällen muss es sich um Kehricht oder siedlungsabfall-ähnliche Industrieabfälle handeln. Bei zu hohem Anteil von Industrieabfällen können toxische Substanzen den mikrobiellen Abbau hemmen.
- Durch den Abbau kommt es zu Setzungen im Deponiekörper. Sind die Flächen oder die angrenzenden Areale überbaut, muss vor Beginn der Gasfassung die Statik dieser Gebäude überprüft und während der Gasfassung überwacht werden.

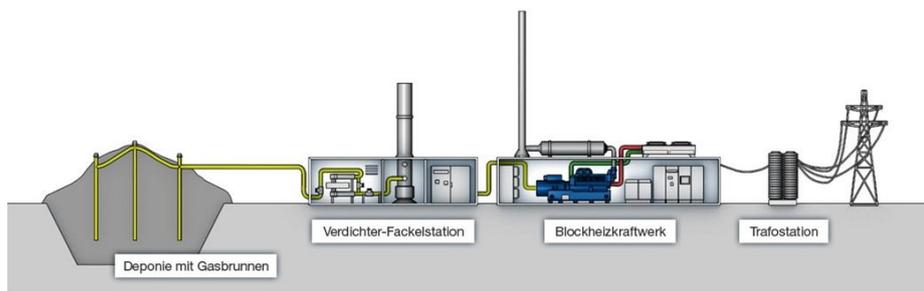


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Gasfassung einer Deponie mit Verwendung des Gases zur Energiegewinnung [44]

4.3 Aerobisierung (aerobe In situ-Stabilisierung)

4.3.1 Einleitung

Bei der Aerobisierung wird das Milieu des Deponiekörpers durch den Eintrag von Luft bzw. Sauerstoff von anaerob auf aerob umgewandelt. Dadurch wird einerseits der anaerobe Abbau der Abfälle und damit die Emissionen geruchsintensiver Gase unterbunden. Andererseits wird durch den initiierten aeroben Abbau die Mineralisierung des Abfalls beschleunigt, was die Reaktivität reduziert. Sowohl die Sickerwasseremissionen als auch die Gasbildung sollten reduziert werden [31].

Einleitung

Die verschiedenen Verfahrensvarianten der Aerobisierung unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Technik des Einbringens der Luft bzw. des Sauerstoffs. Neben Hoch- und Niederdruckbelüftung werden auch Verfahren eingesetzt, bei welchen Luft abgesaugt wird.

Varianten

4.3.2 Beschreibung der Systeme

Die Hochdruckbelüftung funktioniert mit einer Impulsbelüftung mit einem Druck bis zu 6 bar (siehe Abbildung 13). Die Abluft wird erfasst und behandelt. Dieses Verfahren wird oft im Zusammenhang mit Deponierückbauprojekten eingesetzt [18].

Hochdruckbelüftung

Bei einer Belüftung mit Niederdruck (z.B. AEROflott®, AIRFLOW® oder Biopuster®) wird die Luft kontinuierlich mit einem Druck von ca. 20 – 80 mbar in den Deponiekörper eingeblasen [18] (siehe Abbildung 14).

Niederdruckbelüftung

Die Luftverteilung erfolgt infolge von Konvektion und Diffusion. Abhängig von den entstehenden Gasen kann die aktive Belüftung mit Abluft- (z.B. Deponie Kuhstedt, Deutschland [19]) oder ohne Abluffassung (z.B. Deponie Pill, Österreich [18]) ausgeführt werden.

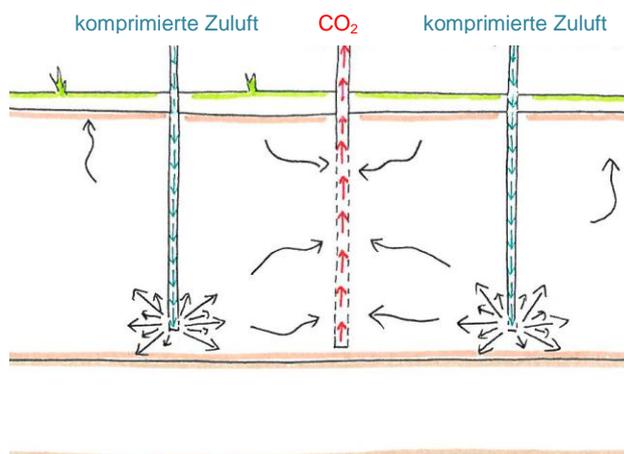


Abbildung 13: Hochdruckbelüftung

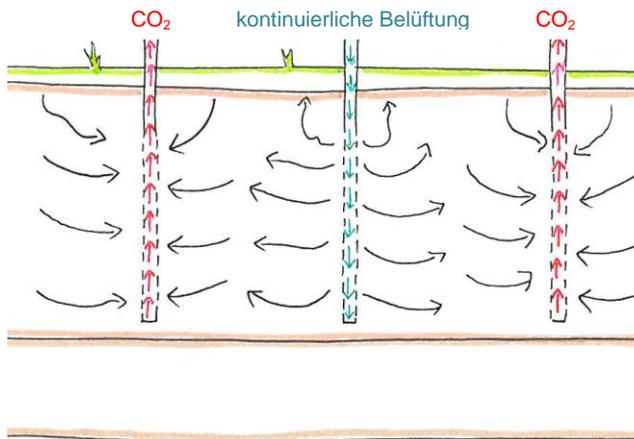


Abbildung 14: Niederdruckbelüftung

Bei der Niederdruckbelüftung durch Übersaugung gelangt die Luft von Saugbrunnen, welche sich in grösserer Tiefe befinden, über die Oberfläche in tiefere Schichten infolge des negativen Druckgradienten [18] (siehe Abbildung 15). Die Abluft wird anschliessend behandelt.

Übersaugung

Dieses Verfahren kann optimal mit der Deponiegasfassung kombiniert werden. Wird nach Abschluss der anaeroben Phase der Unterdruck erhöht, wird der Deponekörper kontinuierlich in einen aeroben Zustand gebracht (z.B. DEPO+Verfahren®, Deponie Sass Grand, Bever, Schweiz [38] oder TUHH-concept).

Mit dem DEPO+Verfahren® kann gemäss [17] eine Steigerung des Gasfassungsgrades von normalerweise 40% auf mehr als 90% erreicht werden. Durch gezieltes Über- und Besaugen des Deponekörpers werden die biologischen Abbauprozesse kontrolliert beschleunigt.

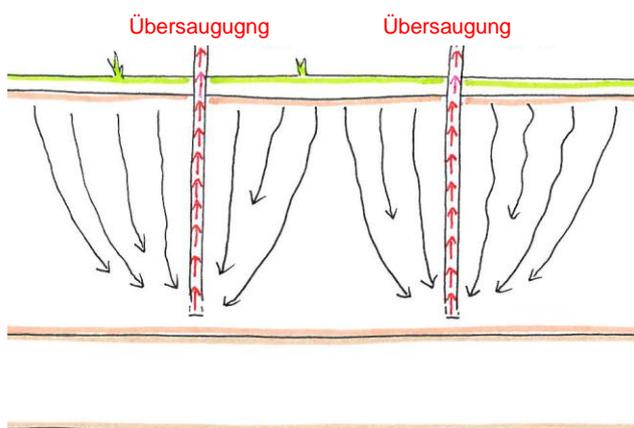
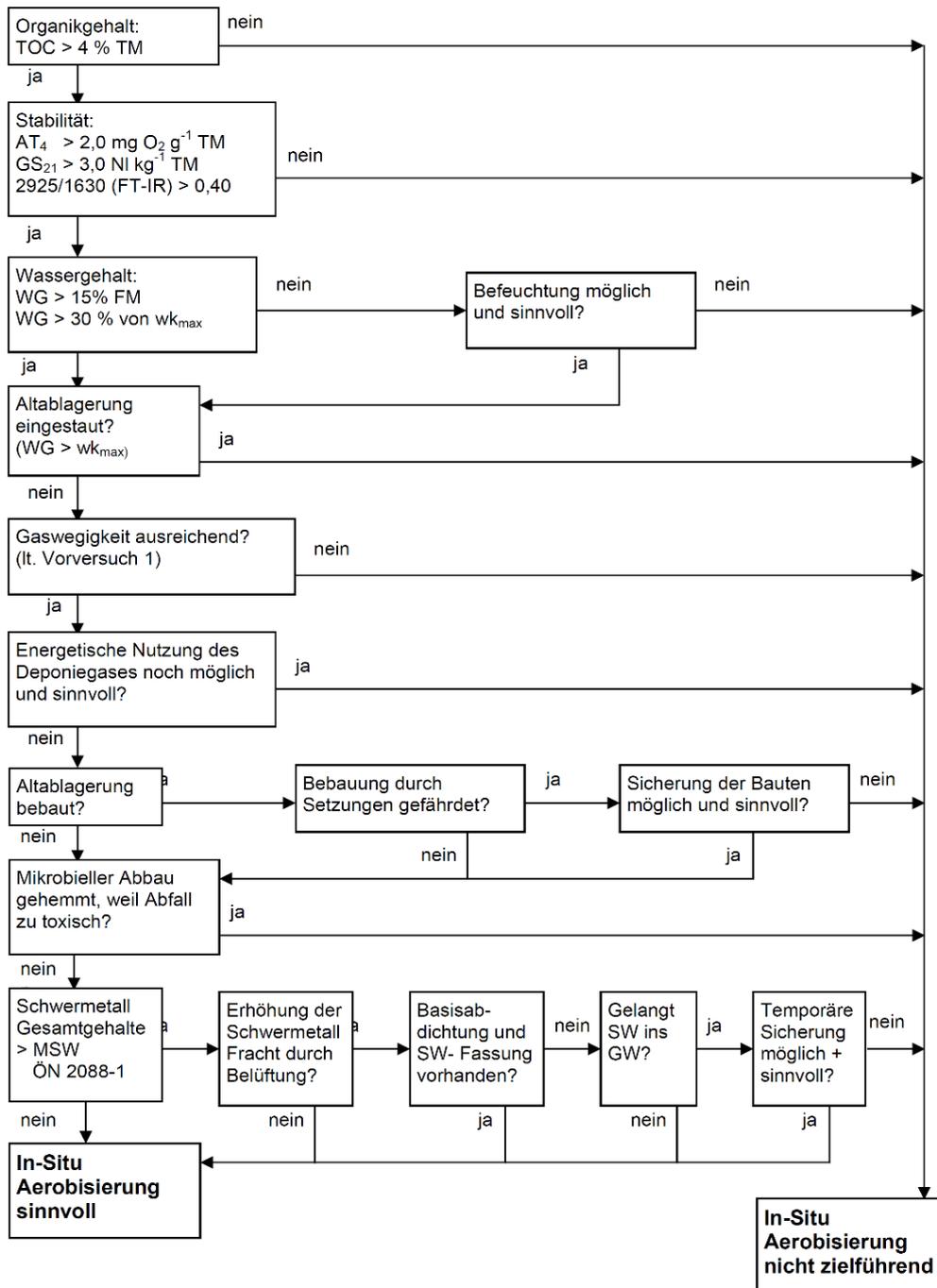


Abbildung 15: Übersaugung

4.3.3 Voraussetzungen

Für eine Aerobisierung des Deponiekörpers müssen folgende Anforderungen erfüllt sein (vgl. auch Abbildung 16), [32], [33]:

- Deponien mit einem sehr geringen oder nicht biologisch abbaubarem organischen Anteil eignen sich nicht für die Aerobisierung. Der TOC der Trockenmasse muss grösser 4 % sein. Abfalleigenschaften
- Bei den Abfällen muss es sich um Kehricht oder siedlungsabfall-ähnlichen Industrieabfälle handeln. Bei zu hohem Anteil von Industrieabfällen können toxische Substanzen den biologischen Abbau hemmen.
- Die Abfälle dürfen nicht zu trocken (Wassergehalt > 15% der Feuchtmasse), aber auch nicht zu nass sein (Deponie darf nicht eingestaut sein). Im trockenen Abfall ist der Abbau gehemmt. Im nassen Abfall wird die Zufuhr und Verteilung des Sauerstoffs behindert.
- In einem Belüftungsversuch muss die Gaswegigkeit des Deponiekörpers bestimmt werden. Die Lagerungsdichte, die Lagerungshomogenität, der Luftporenanteil und der Wassergehalt haben einen Einfluss auf die Gaswegigkeit
- Bei sehr mächtigen Ablagerungen (> 20 m) sind die Bohrungen für die Erstellung der Gasbrunnen sehr aufwändig. Im Gegensatz dazu ist auch das Einbringen der Luft bei sehr geringmächtigen Deponien (< 3 m) problematisch. Standort/Infrastruktur
- Grundsätzlich hat die Form und Grösse der Deponie keinen Einfluss auf die Aerobisierung, da die Anlagenteile im Modulsystem beliebig erweiterbar sind.
- Für den Betrieb der Belüftungsanlage muss die Deponie zugänglich sein sowie eine Stromversorgung aufweisen. Die restlichen Anlagenteile können in mobilen Containern vor Ort gelagert werden.
- Da es während der Aerobisierung zu Setzungen kommt, ist es von Vorteil, wenn die Oberflächenabdichtung noch nicht aufgebracht wurde, da diese andernfalls beschädigt werden könnte.
- Grundsätzlich ist keine Basisabdichtung oder Sickerwasserfassung notwendig. Je nach Schwermetallgehalten in den Abfällen kann es in der ersten Phase der Belüftung zu einer Mobilisierung der Schadstoffe kommen, welche bei einer fehlenden Basisabdichtung oder Sickerwasserfassung ins Grundwasser gelangen können. In diesem Fall muss vor Beginn der Arbeiten eine Gefährdungsabschätzung gemacht werden. Deponie
- Die Deponiegasproduktion muss so gering sein, dass eine Erfassung und Behandlung noch erforderlich ist, die Verwertung des Methans jedoch nicht mehr wirtschaftlich ist. Mit der Aerobisierung kann in diesem Fall eine langfristige, kostenintensive Schwachgasbehandlung vermieden werden.



Legende:

- AT₄ Atmungsaktivität in 4 Tagen [mg O₂ g⁻¹ TM]
- FT-IR Fourier-Transformation Infrarot Spektroskopie
- GS₂₁ Gasspendensumme in 21 Tagen [NI kg⁻¹ TM]
- MSW Massnahmenswellenwerte
- ON 2088-1 ÖNORM S 2088-1, Altlasten - Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Grundwasser
- TM Trockenmasse [kg]
- FM Feuchtmasse [kg]
- WG Wassergehalt [m/m -%]
- wk_{max} Maximale Wasserhaltekapazität [m/m -%]

Abbildung 16: Entscheidungsbaum zum Einsatz der Aerobisierung [32]

4.3.4 Vorkenntnisse und Vorversuche

Für die Überprüfung der Machbarkeit der Aerobisierung und zur Information für die Dimensionierung der Anlage sind diverse Vorkenntnisse notwendig. Dafür sollen die vorhandenen Unterlagen (Jahresberichte der Deponien etc.) ausgewertet werden. Daraus sollen das Schadstoffpotential und die mögliche Ausbreitung der Schadstoffe (Sickerwasser / Deponiegas) abgeschätzt werden.

Vorkenntnisse

Für die Planung der Vorversuche sind zudem Proben zu entnehmen und der Gehalt an organischen Stoffen, deren Abbaubarkeit und die Eluierbarkeit zu bestimmen.

Aus den Vorversuchen (1 x vor Ort, 1 x im Labor) sollen diverse Erkenntnisse (Luftausbreitung, Homogenität Deponiekörper, Einflussradius der Brunnen, erforderliche Drücke, Festlegung der Brunnenstandorte, Zusammensetzung Sickerwasser, Luftbedarf, Emissionen etc.) gewonnen werden.

Vorversuche

4.3.5 Monitoring

Während der Betriebsphase der Aerobisierung müssen diverse Parameter überwacht werden.

Vor und nach der Sanierung sind Proben aus dem Deponiekörper zu entnehmen und der organische Gehalt, die Abbaubarkeit und das Eluat von Deponiematerial-Proben zu untersuchen. Nach Ablauf der halben geplanten Sanierungsdauer sind zusätzliche Proben zu entnehmen und analysieren.

Feststoff

Im Grund- und Sickerwasser sind die relevanten Parameter zu überwachen.

Grund-/Sickerwasser

In der Porenluft soll der Methan- und der Sauerstoffgehalt gemessen werden. Der Methangehalt soll möglichst klein ($< 1\%$) und der Sauerstoffgehalt zwischen $5 - 15\%$ betragen. Falls der Sauerstoffgehalt unter 5% liegt, ist die Aerobisierung zu gering. Bei einem Sauerstoffgehalt über 15% ist die Zuluftmenge zu gross.

Gasphase

Sowohl die Temperatur als auch Setzungen sind während der Aerobisierung zu überwachen. Beide Parameter sind Indikatoren für eine erhöhte aerobe mikrobielle Aktivität und ein ausreichendes Angebot an abbaubaren organischen Verbindungen. Zeigen diese beiden Parameter eine abnehmende Tendenz, ist dies ein Zeichen für eine abklingende mikrobielle Aktivität und somit ein Zeichen für die Endphase der Belüftung.

Temperatur/Setzungen

4.3.6 Vor- und Nachteile

Nachfolgend sind die Vorteile der Aerobisierung aufgeführt:

Vorteile

- Die Aerobisierung ist im Vergleich mit den meisten Sanierungsvarianten eine günstige Alternative.
- Mit der Aerobisierung können die umweltrelevanten Emissionen (Gas, Sickerwasser) reduziert werden und gleichzeitig Deponieraum geschont werden.

- Während der Installations- und Betriebszeit sind nur wenige Transporte notwendig. Weiter sind nur sehr geringe Lärm-, Geruchs- oder Staubbelastungen zu erwarten.
- Durch die Aerobisierung kann das Schadstoffpotential vermindert und dadurch die Nachsorgedauer verkürzt sowie die Fläche früher einer Folgenutzung zugeführt werden.

Nachfolgend sind die Nachteile der Aerobisierung aufgeführt:

Nachteile

- Die Aerobisierung ist nur beim Vorliegen von Abfällen mit grossem organischem Anteil (v.a. Kehricht) geeignet.
- In bebauten Gebieten ist die Umsetzung aufgrund der zu erwartenden Setzungen möglicherweise nicht bewilligungsfähig.
- Zu Beginn der Aerobisierung ist mit einer erhöhten Schadstoffkonzentration (v.a. Schwermetalle) im Sickerwasser zu rechnen. Zudem ist während der gesamten Betriebsdauer ein aufwändiges Monitoring notwendig.

4.4 Befeuchtung durch Infiltration (In situ-Stabilisierung)

4.4.1 Einleitung

Mit der kontrollierten Befeuchtung und Bewässerung eines Deponiekörpers soll die Verzögerung der Abbauprozesse im Deponiekörper aufgrund von Wassermangel und Austrocknungseffekten verhindert werden. Durch die beschleunigte Mineralisierung der abgelagerten Abfälle kann das Emissionspotential nachhaltig reduziert und die Nachsorgedauer verkürzt werden. Ziel

Durch eine Infiltration mit Sickerwasserkreislaufführung können die Milieubedingungen für die Gasbildung optimiert werden. Dadurch werden Umsetzungsprozesse beschleunigt. Ebenfalls werden die Wasserspeicherkapazität und das Milieu des Deponiekörpers genutzt.

Während bei der Befeuchtung nur so viel Wasser in den Deponiekörper eingebracht wird, wie dieser aufnehmen kann, ohne dass es zu einer starken Zunahme der Sickerwassermenge kommt, wird bei einer Bewässerung ein Wasserüberschuss infiltriert und der Deponiekörper als Perkolationsreaktor verwendet. Bei der Befeuchtung muss das Sickerwasser gefasst und behandelt werden [34].

Ziel der Infiltrationsmassnahmen ist nicht das reine Auswaschen der Schadstoffe. Die Effizienz dieser Methode ist zu gering, als dass das Schadstoffpotential in einem angemessenen Zeitraum deutlich reduziert werden kann (z.B. nicht mobile Schadstoffe, zu grosses Potential). Diese Massnahme führt nicht zum Erfolg.

4.4.2 Infiltrationsmedien

Für die Infiltration können folgende Medien zum Einsatz kommen [34]:

- Wasser vom Leitungsnetz

- Oberflächenwasser
- Deponiesickerwasser (vorbehandelt/unbehandelt)

Die Wahl des Infiltrationsmediums ist abhängig von der Wasserqualität. Je nach Wasserzusammensetzung ist mit Ablagerungen in den Leitungen und allenfalls Verstopfungen der Infiltrationsöffnungen zu rechnen, was den Wartungs- und Instandhaltungsaufwand deutlich erhöhen kann.

4.4.3 Infiltrationsverfahren

Kontrollierte Neubildung durch Niederschläge

Mit dieser Variante wird eine kontrollierte Neubildung von Sickerwasser durch den Niederschlag zugelassen. Dabei wird das Niederschlagswasser über eine schwach durchlässige Oberflächenabdeckung gleichmässig in die Deponie versickert.

Kontrollierte
Neubildung

Der technische Aufwand und die Betriebskosten sind sehr gering. Der Nachteil liegt darin, dass die Wasserzugabe nur bedingt kontrollierbar ist und es somit zu einer ungleichmässigen Wasserzugabe und somit auch zu ungleichmässigen Setzungen im Deponiekörper kommt. In den meisten Fällen reicht die jährliche Niederschlagsmenge nicht aus, um den Deponiekörper genügend zu befeuchten.

Vor-/Nachteile

Horizontale Infiltration

Bei der horizontalen Infiltration von Wasser können zwei Verfahren unterschieden werden [34]:

Bei der flächigen Infiltration werden Sickerbecken oder Bewässerungsfelder erstellt. Sickerbecken sind sehr kostengünstig, jedoch lässt sich die Sickerwassermenge nur bedingt kontrollieren und steuern.

Flächiges Verfahren

Bei der linienförmigen Infiltration werden Leitungen in die Gasdrainageschicht unter der Oberflächenabdichtung verlegt (vgl. Abbildung 17). Dieses Verfahren bietet sich an, wenn es sich um eine langfristige Massnahme handelt und zusammen mit der Oberflächenabdichtung geplant und ausgeführt werden kann.

Linienförmiges
Verfahren

Wird ein horizontales Infiltrationsverfahren eingesetzt, gibt es keine unmittelbare Beeinträchtigung der Gasfassung. Durch die definierte Bauausführung und das flächige Einbringen des Wassers ist eine gleichmässige Verteilung möglich. Dies erfordert jedoch eine hohe Anzahl an Drainagesträngen. Weitere Probleme bei der horizontalen Infiltration sind die Anfälligkeit auf Setzungen sowie die grossen Eingriffe in die bestehende Oberflächenabdichtung für den Einbau und ggf. den Rückbau der Leitungen.

Vor- und Nachteile

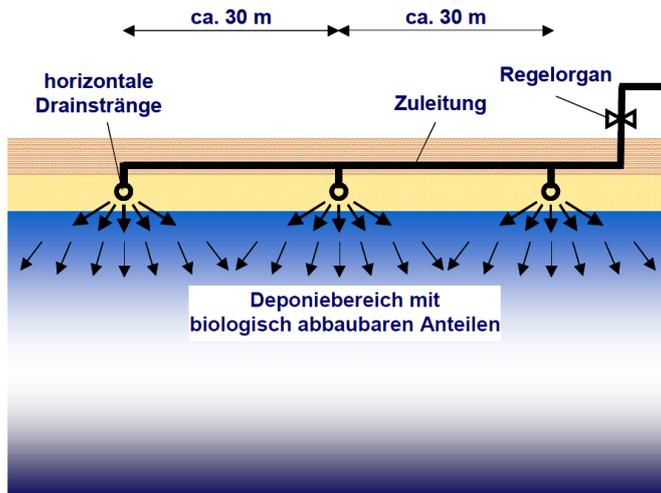


Abbildung 17: Horizontale Infiltration: Linienförmiges Infiltrationsverfahren [34]

Vertikale Infiltrationsverfahren

Bei der vertikalen Infiltration kann das Wasser über Schluckbrunnen oder über Infiltrationslanzen eingebracht werden [34].

Über Schluckbrunnen, welche in einem dem Standort angepassten Raster errichtet werden, kann das Wasser punktuell in einen kegelförmigen Bereich infiltriert werden. Statt Schluckbrunnen kann ein allenfalls vorhandenes Gasfassungssystem zur Infiltration genutzt werden.

Infiltration über Schluckbrunnen

Die Infiltrationslanzen werden in einem Raster von ca. 15 – 20 m (abhängig von der Durchlässigkeit des Deponiekörpers) 1 bis 2 m tief in den Deponiekörper gerammt. Das Wasser gelangt über die im unteren Bereich geschlitzten Rohre gleichmässig in den Deponiekörper (vgl. Abbildung 18).

Infiltration über Lanzen

Nach Abschluss der Infiltration können die Brunnen teilweise zurückgebaut bzw. die Lanzen gezogen, damit die Funktionstüchtigkeit der Oberflächenabdichtung wiederhergestellt werden kann.

Bei der vertikalen Infiltration wird die Oberflächenabdeckung nur in kleinen Bereichen zerstört. Zudem sind diese Verfahren relativ kostengünstig, da nur ein geringer Aufwand für Unterhaltsarbeiten notwendig ist. Nachteilig ist die punktuelle Einleitung des Wassers, welche nur mit einem sehr engen Raster für Infiltrationslanzen wettgemacht werden kann.

Vor- und Nachteile

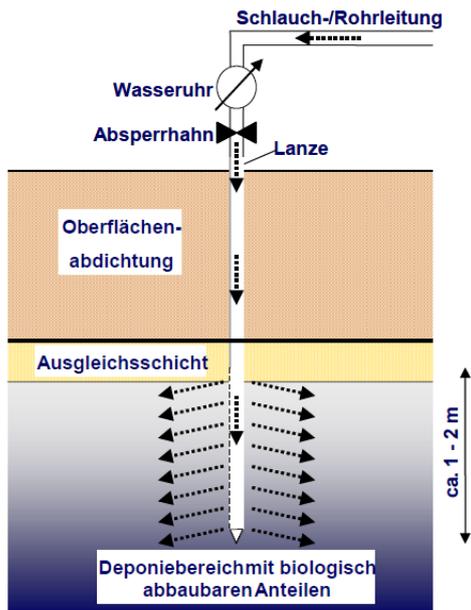


Abbildung 18: Vertikale Infiltration mit einer Infiltrationslanze [34]

4.4.4 Voraussetzungen

Für einen erfolgreichen Einsatz der Befeuchtung oder Bewässerungen müssen Standortbedingungen folgende Standortbedingungen erfüllt werden [34]:

- Basisabdichtung (technische Mindestanforderung⁷ $k_f < 10^{-8}$ m/s, Mächtigkeit > 60 cm)
- Funktionierendes Entwässerungssystem
- Funktionierende Gasfassung
- Standsicherheit des Deponiekörpers
- Genügend biologisch verfügbare organische Anteile im Deponiekörper

Praktische Erfahrungen zeigen, dass der Wassergehalt die anaeroben Abbauprozesse im Deponiekörper folgendermassen beeinflusst [29][32][34]:

- Keine Abbauprozesse bei Wassergehalten < 15 % der Feuchtmasse
- Die Abbauprozesse verlaufen z.T. deutlich gehemmt bei Wassergehalten < 30 % der Feuchtmasse
- Die Abbauprozesse verlaufen eingeschränkt bei Wassergehalten < 40 % der Feuchtmasse (abhängig vom Alter und Abbaugrad der Abfälle)
- Optimale Abbauraten bei Wassergehalten von 40 % bis 50 %⁸

⁷ Entspricht nicht heutigen gesetzlichen Vorgaben gemäss TVA [2]

⁸ 40 – 50 % der Feuchtmasse entsprechen etwa 100 % der maximalen Wasserhaltekapazität w_{kmax} (vgl. Abbildung 16)

4.4.5 Monitoring

Während der Infiltrationsmassnahmen ist ein standortspezifisches Monitoring- Programm zu installieren [34]:

- Erfassung Deponiegasproduktion und Gaszusammensetzung
- Zugeführte Wassermengen
- Sickerwassererfassungsmenge und -qualität
- Auswirkungen der Infiltrationsmassnahmen auf den Deponiekörper selbst

4.5 Kombinierte Verfahren (In situ-Stabilisierung)

Die in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Verfahren (Gasfassung, Aerobisierung und Befeuchtung) können auf unterschiedliche Arten miteinander kombiniert werden.

Wird für eine Deponie eine Massnahme zur Mineralisierung evaluiert, werden in den meisten Fällen einzelne Voraussetzungen nicht erfüllt sein. Mit einer Kombination der Verfahren können die Voraussetzungen verbessert werden. Ist z.B. der Wassergehalt in einer Deponie für eine Aerobisierung zu tief, kann mit einer Befeuchtung der Abfälle der Wassergehalt des Deponiekörpers erhöht und so die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Aerobisierung geschaffen werden (Abbildung 19).

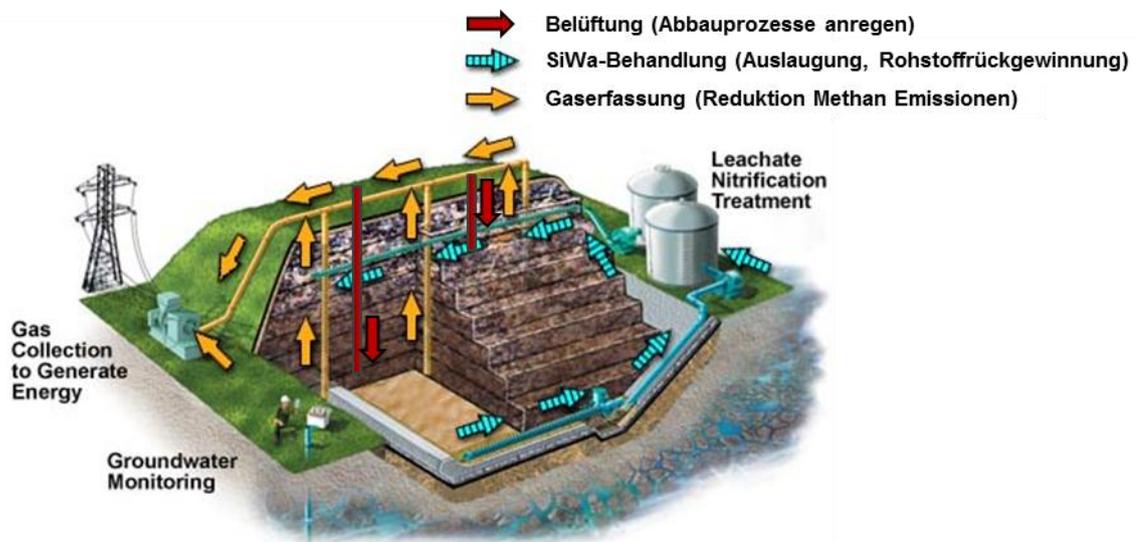


Abbildung 19: Pump and Treat Aerobic Flushing Bioreactor Landfill ([45], angepasst)

5 BEISPIELE

5.1 Beispiele Schweiz

5.1.1 Deponie Bever, Aerobisierung [46], [37]

Allgemeine Angaben: Ehemalige Kehrichtdeponie, Etappe 0 (300'000 m³) errichtet 1967, in Betrieb bis 2000

Geologische / hydrogeologische Standortbedingungen: In ehemaligem Steinbruch

Technische Angaben: ohne Basisabdichtung, keine Sickerwasserfassung

Abfallinventar: hauptsächlich Kehricht (ca. 75 %), Mulden- und Sperrgut (ca. 15 %) sowie Klärschlamm

Emissionen: Deponiegase (insbesondere Methan und Kohlendioxid) und belastetes Sickerwasser

Massnahmen: Aerobisierung mit tiefenverfilterten Saugbrunnen

Erfolg: Die Aktivierung des organischen Abbaus wird als erfolgreich bezeichnet (deutliche Zunahme der Temperatur im Deponiekörper von anfänglich 8°C). Sowohl die abgesaugte Menge an Aerobisierungsgas als auch die ausgetragene Menge an Kohlenstoff konnte kontinuierlich gesteigert werden (siehe Abbildung 20). Eine Verbesserung der Emissionen über das Sickerwasser und Auswirkungen auf das Grundwasser sind noch nicht umfassend beurteilt worden. Sie werden bisher als nicht signifikant beurteilt. Trend jedoch: mehr Salze, mehr Nitrat statt Ammonium.

Im Verlauf der Sanierungsdauer wurden verschiedene Brunnen erneuert sowie Installationen und das Monitoringprogramm angepasst.

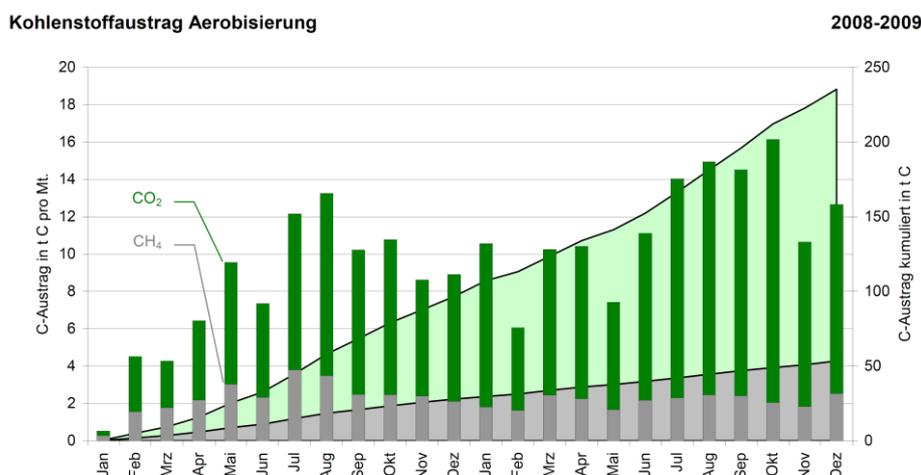


Abbildung 20: Kohlenstoffaustrag durch die Aerobisierung der Deponie Bever [38].

5.2 Beispiele Ausland

5.2.1 Deponie Pill, Tirol (A), Aerobisierung [46]

Allgemeine Angaben: Flachdeponie (Mächtigkeit ca. 3 m, Fläche ca. 31 ha), in Betrieb zwischen 1973 – 1990, 1 Mio m³ (davon ca. 813'000 m³ Kehricht)

Geologische / hydrogeologische Standortbedingungen: Fluviale Lockersedimente, Flurabstand ca. 5 – 11 m, keine Grundwasser-Nutzung im unmittelbaren Umfeld), Abfall z.T. im GW-Schwankungsbereich

Technische Angaben zur Deponie (Abdichtung, Entwässerung etc.) : keine Basisabdichtung

Abfallinventar: vorverrottete Siedlungsabfälle (Rottemieten bzw. Rotteballenverfahren)

Emissionen / Schadstoffpotential: hauptsächlich Ammonium, untergeordnet auch As

Massnahme (Anforderungen / Voraussetzung): Gründliche Untersuchungen für Wissensbeschaffung (2004 – 2007), Belüftungsversuch (2007/2008), Sanierung mittels in situ Aerobisierung (seit 12/2009), 210 Belüftungsbrunnen

Erfolg: Sanierungsziel: NH₄-Konz < 3 mg/L bzw. Reduktion der NH₄-Fracht um 75 %, Sanierungsziel wurde nach 4 Betriebsjahren erreicht (siehe Abbildung 21, erwartet worden war eine Sanierungsdauer von 8 – 10 Jahren)

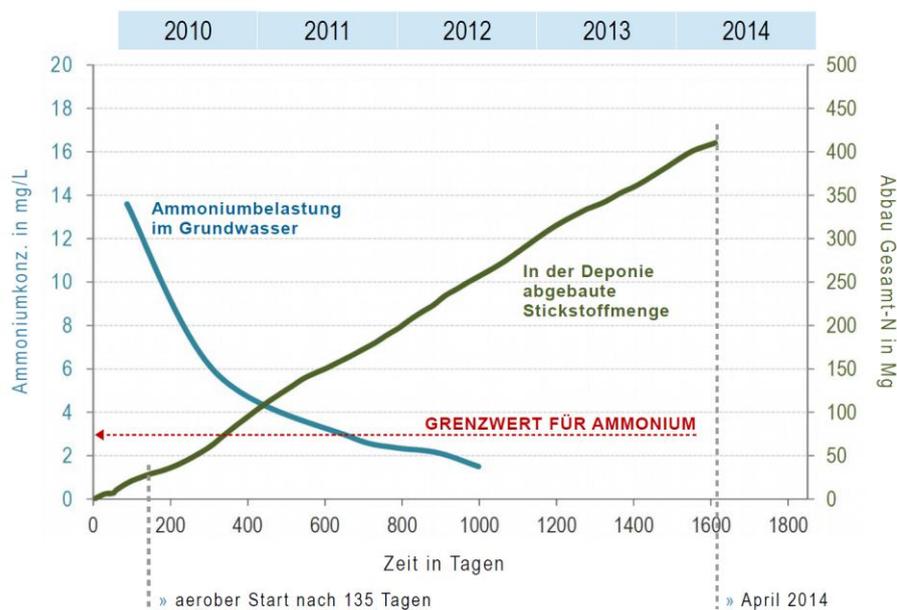


Abbildung 21: Abbau des Ammoniums im Deponiekörper durch gezielte Belüftung [46].

5.2.2 Deponie Bornhausen, Sickerwasserrückführung, Deponiebelüftung [47]

Allgemeine Angaben: Ablagerung von Kehricht in ehemaliger Kiesgrube, betrieben von 1974 bis 2000. Zumeist tonig ausgebildete Lagen keilen aus und bilden daher keinen Grundwasserstauhorizont.

Geologische / hydrogeologische Standortbedingungen: Untergrund durch kiesige, sandige und schluffige eiszeitliche Sedimente mit einer Mächtigkeit von bis zu 40 m geprägt. Grundwasser mit sehr geringer Fließgeschwindigkeit (11 m/a). Jährliche Niederschlagsmenge von 858 mm/a.

Technische Angaben zur Deponie: Die Deponie verfügt über eine Basisabdichtung mit Sickerwasserfassung. Zudem bestand bereits eine Gasfassung und Sickerwasserbehandlung, bevor die In-situ Aerobisierung eingerichtet wurde.

Abfallinventar / Emissionen / Schadstoffpotential: Hauptsächlich Kehricht mit NH₄ und CH₄ Emissionen.

Massnahme (Anforderungen / Voraussetzung): Fortführung und Ertüchtigung der Gas- und Sickerwasserfassung und -behandlung. Flankierend: Sickerwasserrückführung, Deponiebelüftung.

Erfolg: -

5.2.3 Deponie Kuhstedt, Niederdruckbelüftung [49]

Allgemeine Angaben: Mitte der sechziger Jahre in ehemaligen Kiesgrube angelegt und ab 1973 als Kreismülldeponie verfüllt. Gesamtvolumen 220'000 m³, Fläche 3.2 ha.

Geologische / hydrogeologische Standortbedingungen: Lauenburger Tone bzw. deren Äquivalente (Feinsandstufe) der Elster-Kaltzeit mit Mächtigkeit von 4 bis 8 m. Darüber folgen saalezeitliche (Drenthe-Stadium) glazifluviale Sande mit Kiesanteil. Darin verlaufendes Grundwasser hat Kontakt mit dem unteren Teil des Deponiekörpers.

Technische Angaben zur Deponie: Die Deponie verfügt über keine Basisabdichtung.

Abfallinventar / Emissionen / Schadstoffpotential: Hausmüll, Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Bauschutt (ca. 7-8%).

Massnahme (Anforderungen / Voraussetzung): in situ Belüftung mit Niederdruckbelüftung.

Erfolg: Belüftung wurde im März 2001 in Betrieb genommen und konnte nach 6 Jahren bereits beendet werden.

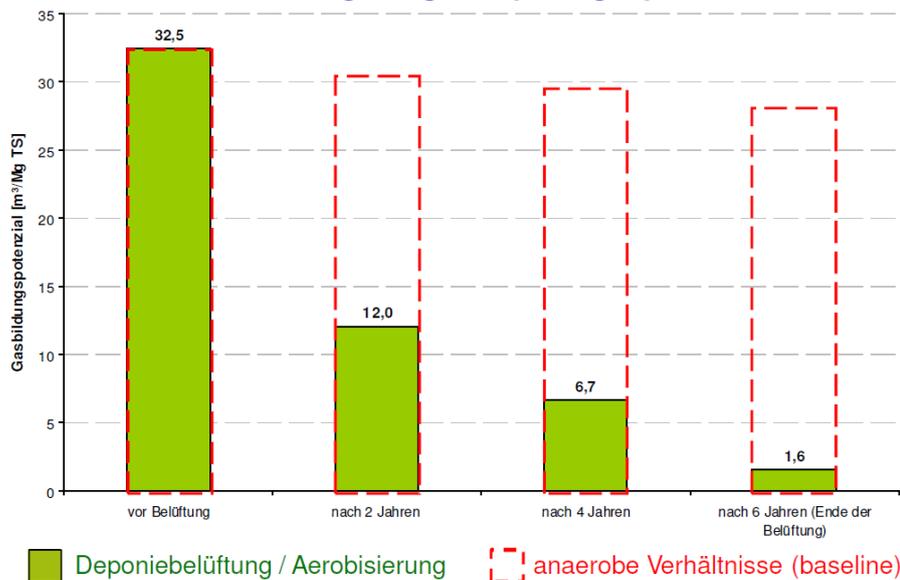


Abbildung 22: Reduktion des Gasbildungspotentials infolge der In situ-Aerobisierung der Deponie Kuhstedt [48]

5.3 Weitere Beispiele

Weitere Beispiele aus Europa und Nordamerika finden sich in [18].

5.4 Zusammenfassung Erfahrung

In den zugänglichen Informationen über erfolgte oder in Betrieb befindliche Stabilisierungsmassnahmen wird selten über Probleme bei der Umsetzung oder bei der Erfolgskontrolle berichtet. Häufig wird über die Erfolge berichtet, soweit sie schon beurteilt werden können.

Zugängliche Informationen

Viele der derzeit durchgeführten Stabilisierungsmassnahmen sind bis heute noch nicht abgeschlossen.

Folgende Beobachtungen wurden bei der Durchführung von Stabilisierungsmassnahmen bei Siedlungsabfalldeponien festgestellt (u.a. [31], [37], [38] und [42]):

Erfolg

- Zunahme der Temperatur im Deponiekörper
- Änderung der Zusammensetzung des Deponiegases: Rasche Abnahme der Methanemissionen und stetige Zunahme der Kohlendioxidemissionen (Erzeugung von aeroben Verhältnissen)
- Änderung der Zusammensetzung des Deponiesickerwassers
- Zunahme der Setzungen im Deponiekörper

Einige Einschränkungen bezüglich des Stabilisierungserfolges sind nachfolgend zusammengestellt (u.a. [31], [35], [40]):

Einschränkungen

- Bereiche mit unzureichender Belüftung
- Bevorzugte Wasserwegsamkeiten

- Reversibler Prozess der Aerobisierung bei Belüftungspausen
- Während die Auswirkungen auf die Gasemissionen kurz nach Belüftungsbeginn sichtbar sind, ist eine Verbesserung der Sickerwasserqualität erst nach einigen Jahren, wenn überhaupt, erkennbar. Dies liegt vermutlich daran, dass einerseits das Angebot des Schadstoffpotentials sehr hoch ist, andererseits die Löslichkeit einiger Schadstoffe und die Zugänglichkeit zu den Schadstoffen eingeschränkt sind.

6 MASSNAHMEN ZUR REDUZIERUNG DER NACHSORGEDAUER

6.1 Bisherige Erkenntnisse

Bisherige Erkenntnisse zur aeroben In situ-Stabilisierung von Deponien weisen auf eine beschleunigte Reduktion sowohl der Emissionen im Gas- und Sickerwasserpfad als auch der Setzungen hin. Grosstechnische Projekte im In- und Ausland mit teilweise umfassender wissenschaftlicher Begleitung belegen die positive Beeinflussung des Emissionsverhaltens und den Beschleunigungseffekt insbesondere der biologischen Umwandlungsprozesse [34].

Aerobisierung

Eine Wasserinfiltration kann eine beschleunigte Abnahme der Sickerwasserbelastungen ausüben und zu einer Reduzierung der Nachsorgedauer beitragen. Hierfür wären allerdings grössere Wassermengen über einen längeren Zeitraum erforderlich. Dies würde nicht nur zu einer Befeuchtung des Deponiekörpers, sondern auch zum Auswaschen der mobilen Verbindungen führen. Infiltrationsmassnahmen mit geringerer Wasserzugabe können im Hinblick auf eine verbesserte Deponiegasproduktion von Bedeutung sein, wenn dadurch die Abfallfeuchte für anaerobe Umsetzungsvorgänge optimiert wird [34].

Befeuchtung

Beide Verfahren können folglich zur Verkürzung und Reduzierung des Aufwands der Deponienachsorge beitragen und die Voraussetzungen zur früheren Entlassung aus der Nachsorge schaffen.

Tabelle 3 zeigt eine Prognose zum Langzeitemissionsverhalten verschiedener Deponietypen über den Sickerwasserpfad auf der Grundlage von Untersuchungen an über 50 Deponien in Deutschland [35].

Prognose
Langzeitemissionen

Gemäss diesen Angaben ist bei einer angenommenen Sickerwasserneubildungsrate von 250 mm/a der Zeitraum bis zum Erreichen der Anforderungswerte C_E bei entsprechenden Ausgangskonzentrationen C_0 von mehreren Jahrzehnten lang.

Hierbei ist noch anzumerken, dass die angenommene Sickerwasserneubildungsrate mit 250 mm/a relativ hoch ist. Mit dem Aufbringen einer Oberflächenabdichtung oder –abdeckung verringert sich die Sickerwasserneubildungsrate noch beträchtlich (bei Abdichtungen Restdurchlässigkeit ca. 2 - 5 % des Jahresniederschlages).

Das bedeutet, dass der Austrag von Schadstoffen ohne zusätzliche Massnahmen über den Sickerwasserpfad erhebliche Zeiträume in Anspruch nehmen wird.

Tabelle 3 Prognose zum Langzeitverhalten verschiedener Deponietypen über den Sickerwasserpfad [35]

Parameter	C _E Anforderungswert [mg/l]	C ₀ Ausgangs- konzentration [mg/l]	Zeitraum bis zum Erreichen von C _E [a]
CSB	200		
Hausmülldeponie		1.200 – 3.800	75 – 120
MBA-Deponie		450 – 2.000	35 – 100
MVA-Asche-Deponie		15 - 600	0 – 50
Bauschutt-Deponie		100 - 250	0 – 10
TKN	70		
Hausmülldeponie		400 – 800	110 – 160
MBA-Deponie		150 - 250	45 – 80
MVA-Asche-Deponie		4 – 200	0 – 65
Bauschutt-Deponie		20 - 200	0 – 65
Cl	(100)		
Hausmülldeponie		1.000 – 2.100	110 – 150
MBA-Deponie		420 - 980	70 - 110
MVA-Asche-Deponie		290 – 12.000	50 – 230
Bauschutt-Deponie		100 - 600	0 – 90
AOX	500 µg/l	[µg/l]	
Hausmülldeponie		1.000 – 2.800	25 – 55
MBA-Deponie		200 – 1.500	0 – 35
MVA-Asche-Deponie		0 – 130	0
Bauschutt-Deponie		0 – 20	0

Ablagerungsmächtigkeit: 20 m; Sickerwasserneubildungsrate: 250 mm/a

Legende:

- C_E gemäss Abwasserverordnung in Deutschland (AbwV)
- CSB Chemischer Sauerstoff Bedarf
- TKN Total Kjeldahl Nitrogen (Summe von organischem Stickstoff und Ammonium)
- Cl Chlorid
- AOX Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
- MBA Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
- MVA = Müllverbrennungsanlage

6.2 Vergleich unterschiedlicher nachsorgewirksamer Massnahmen

Im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens⁹ wurden die Auswirkungen möglicher Massnahmen zur Reduzierung der Kohlenstoffkonzentration, und damit der Reduzierung der Nachsorgedauer, auf das Emissions- und Deponieverhalten für eine Modelldéponie betrachtet (siehe Tabelle 4) [35].

UFOPLAN-Vorhaben

Der abbaubare Kohlenstoff liegt zwischen 40 % (Szenario A und B, nur Oberflächenabdichtung) und mehr als 95 % (Szenario D – F, Stabilisierungsmassnahmen Infiltration und/oder Belüftung) bezogen auf den TOC zu Beginn der Nachsorgephase (Abbildung 23) [35].

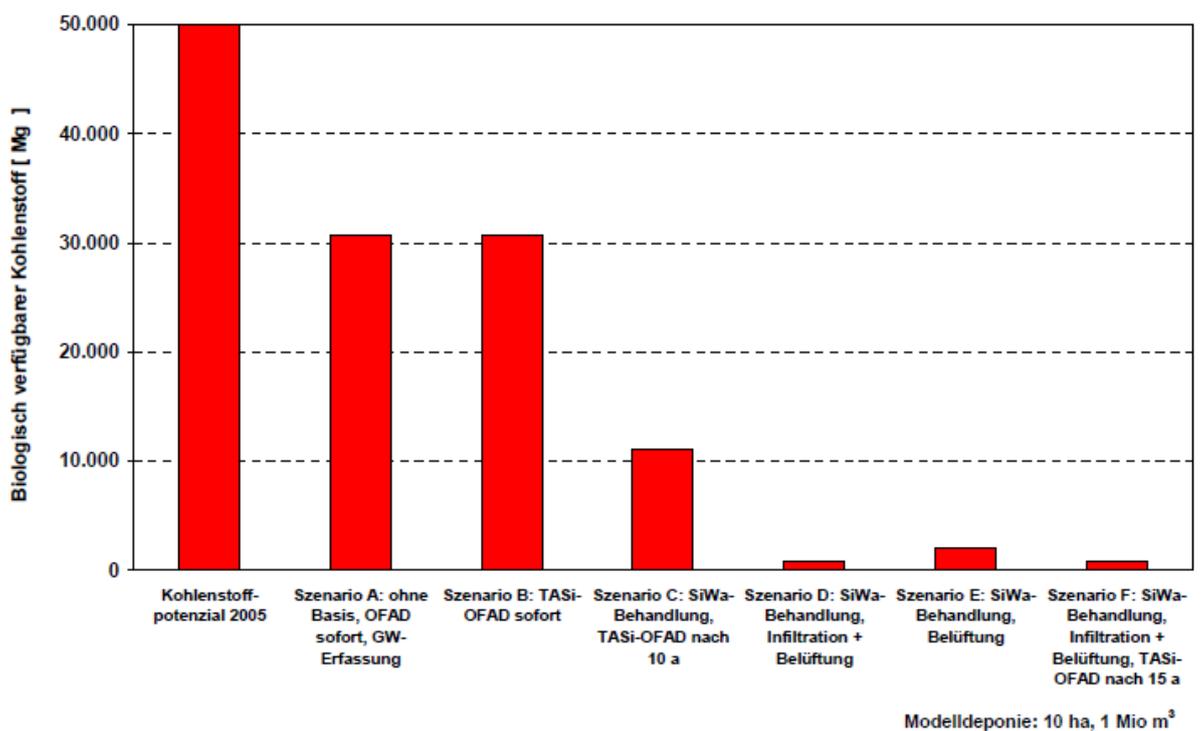
⁹ UFOPLAN Der Umweltforschungsplan (UFOPLAN) ist Teil der Ressortforschung der Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 4 Szenarien A – F für Kombinationen unterschiedlicher Stilllegungs- und Nachsorgemassnahmen [35]

Maßnahme	Szenario A	Szenario B	Szenario C	Szenario D	Szenario E	Szenario F
Basisabdichtung	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Grundwassersanierung	bis 2012	nein	nein	nein	nein	nein
Temporäre Abdeckung	nein	nein	ab 2006	ab 2006	ab 2006	ab 2006
Oberflächenabdichtung	ab 2006	ab 2006	ab 2015	ab 2020	ab 2020	ab 2020
Deponiegaserfassung	bis 2012	bis 2012	bis 2020	bis 2012	bis 2012	bis 2012
Sickerwasserfassung	nein	bis 2012	bis 2020	bis 2030	bis 2030	bis 2025
Infiltration	nein	nein	nein	2006 - 2010	nein	2006 - 2010
Belüftung	nein	nein	nein	2013 - 2019	2013 - 2019	2013 - 2019

Für die Szenarien A – C ist der Zeitpunkt der Beendigung der Deponienachsorge fraglich und kann hier 30, 100 oder mehr Jahre betragen

Das Ende der Nachsorgedauer nach 30 Jahren sind bei den Szenarien D – F viel wahrscheinlicher [35].



Rückstellungen nach der Barwertmethode [Mio. €]:	36,9	20,6	19,4	18,7	18,6	19,4
--	------	------	------	------	------	------

Abbildung 23 Kohlenstoffpotential im Jahr 2005 und Kohlenstoffreduzierung bis 2020 in Abhängigkeit unterschiedlicher Stilllegungsmassnahmen, Szenarien- und Kostenvergleich anhand einer Modelldeponie [35]

7 ENTSCHEIDUNGSHILFE NACHSORGE- WIRKSAME MASSNAHMEN

7.1 Beendigung der Nachsorgedauer

Die Beendigung der Nachsorgedauer ist in der TVA lediglich qualitativ geregelt¹⁰: Keine quantitativen Vorgaben in CH

Nach Abschluss der Deponien sorgt die Behörde dafür, dass die vorgeschriebenen Anlagen und das Grundwasser, das Abwasser und die Deponiegase so lange kontrolliert werden, bis schädliche oder lästige Einwirkungen auf die Umwelt unwahrscheinlich erscheinen, ...

Quantitative Kriterien (Einleitbedingungen etc.) zur Entlassung aus der Nachsorge liegen derzeit für die Schweiz nicht vor. Allenfalls können Einleitgrenzwerte aus der GschV [3], der Vollzugshilfe für die Einleitung von Deponiesickerwasser [5] oder der AltIV [4] zur Beurteilung herangezogen werden.

In Deutschland kann die Aufsichtsbehörde die Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen aufheben und den Abschluss der Nachsorge feststellen, wenn sie nach Prüfung aller vorliegenden Ergebnisse zu dem Schluss kommt, dass aus dem Verhalten der Deponie künftig keine schädlichen oder lästigen Einwirkungen zu erwarten sind [35]. Deutschland

Konkrete quantitative Kriterien, die mess- und nachweisbar sein müssen, sollen heute in Deutschland dazu beitragen, den Zeitpunkt für den Abschluss der erforderlichen bzw. geeigneten Massnahmen zur Deponienachsorge besser einzugrenzen zu können [35]. Hierzu hat z.B. das Hessische Ministerium für Umwelt ein Verfahrenshandbuch mit entsprechenden Prüfkriterien erarbeitet [36] (siehe Abschnitt 7.2). Quantitative Prüfkriterien

Es ist jedoch unerlässlich, jede Deponie gesondert zu betrachten [41].

7.2 Prüfkriterien

Im Verfahrenshandbuch zum Vollzug des Abfallrechts im Land Hessen werden folgende **Prüfkriterien** festgehalten [36]:

- Umsetzungs- und Reaktionsvorgänge
- Gasbildung
- Setzungen
- Oberflächenabdichtungssystem
- Standsicherheit
- Bauliche und technische Einrichtungen

¹⁰ Art. 28 Absatz 2 TVA [2]

- Sickerwassereinleitung
- Sickerwasserversickerung
- Gefährliche faserhaltige Abfälle (z.B. Asbest)

Für einige dieser Prüfkriterien gibt es qualitative, für einige quantitative Vorgaben.

7.3 Entscheidungshilfe

In Tabelle 5 sind die im vorliegenden Bericht beschriebenen nachsorgewirksamen Massnahmen bei Deponien zusammenfassend dargestellt.	Zusammenfassende Tabelle
Im Anhang sind verschiedene Entscheidungsbäume dargestellt, anhand deren man in Abhängigkeit der vorhandenen Deponie eine erste grobe Beurteilung durchführen kann, ob eine nachsorgewirksame Massnahme überhaupt in Frage kommt oder nicht.	Entscheidungsbäume
Im Teil 1 (Anhang 1.1) kann grundsätzlich anhand des Deponietyps überprüft werden, ob überhaupt eine Stabilisierung nötig ist oder zu prüfen ist.	Anhang 1.1
Teil 2 (Anhang 1.2) dient als Ablaufschema zur Erfassung des Ist-Zustandes der Deponie inklusive der technischen Einrichtungen. Je nach Ergebnis sind Nachsorgemassnahmen zu prüfen oder nicht zielführend.	Anhang 1.2
Teil 3 (Anhang 1.3) zeigt bei entsprechendem Vorhandensein des organischen Gehaltes (TOC) auf, welche Daten für die weitere Prüfung einer Stabilisierungsmassnahme nötig sind und allenfalls erhoben werden müssen.	Anhang 1.3
Teil 4 (Anhang 1.4) schliesslich führt zur Entscheidung, welche Art von Stabilisierungsmassnahme zielführend sein kann.	

Tabelle 5 Übersicht nachsorgewirksame Massnahmen bei Deponien

Massnahmen	Kriterien / Anforderungen	Ziele	Beispiele / Literatur	Prüfung des Erfolgs
Gasfassung	<ul style="list-style-type: none"> • biologisch verfügbare Abfälle (TOC > 4 %) • Kehricht oder siedlungsabfallähnliche Industrieabfälle • Setzungsunempfindliche Oberflächen-nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbau des organischen Materials 		<ul style="list-style-type: none"> • Gasmenge und –zusammen- setzung
Aerobisierung	<ul style="list-style-type: none"> • biologisch verfügbare Abfälle (TOC > 4 %) • Feuchtigkeit (Wassergehalt > 15 % vom Feuchtgewicht) und Temperatur im Deponiekörper • Mächtigkeit Deponiekörper • Gaswegigkeit Deponiekörper • Setzungsunempfindliche Oberflächen-nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbau des organischen Materials 	<ul style="list-style-type: none"> • Deponie Bever (CH) • Deponie Pill (A) • Deponie Kuhstedt (D) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasmenge und –zusammen- setzung
Infiltration	<ul style="list-style-type: none"> • biologisch verfügbare Abfälle (TOC > 4 %) • Intakte Basisabdichtung und intaktes Entwässerungssystem (techn. Mindestanforderung $k_f < 10^{-8}$ m/s, Mächtigkeit > 60 cm) • Standsicherheit des Deponiekörpers • Funktionierendes Entwässerungssystem • Funktionierende Gasfassung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbau des organischen Materials 	<ul style="list-style-type: none"> • Deponie Bornhausen (D) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasmenge und -zusammen- setzung • Wassermenge und -zusammen- setzung

Geltungsbereich

Alle Arbeiten der FRIEDLIPARTNER AG wurden unter Einhaltung der Sorgfaltpflicht ausgeführt. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen im vorliegenden Bericht beruhen auf dem derzeitigen Kenntnisstand.

Der vorliegende Bericht ist für den Auftraggeber und zu dessen ausschliesslicher Nutzung bestimmt. Er ist vertraulich und darf ohne Zustimmung des Auftraggebers weder kopiert noch an Dritte weitergegeben werden. Eine allfällige Haftung gegenüber Dritten, welche sich auf den vorliegenden Bericht berufen, wird ausdrücklich abgelehnt.

Zürich, 26. Juni 2015



Rita Hermanns Stengele
Dr.sc.techn. ETH / Dipl.-Ing. / SIA

Projektleitung



Bruno Schmid
Dr.sc.nat. ETH / Chemiker

Koreferat

P:\2014\14.097 Bern_BAFU_Nachsorge\04 Berichte\Bericht_BAFU_Nachsorge_2015_06_26.docx

8 VERWENDETE UNTERLAGEN

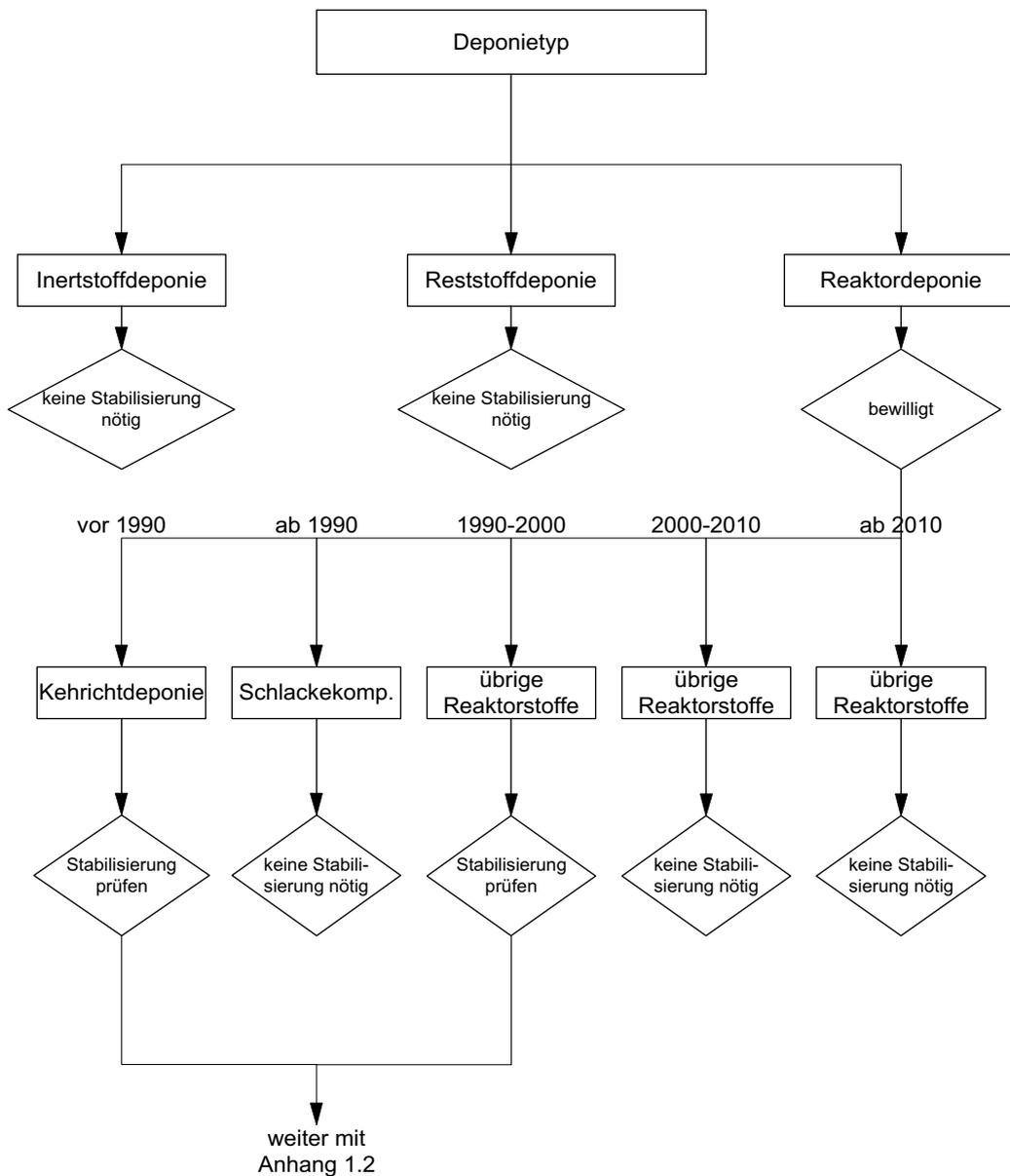
- [1] Leitbild für die schweizerische Abfallwirtschaft, BUWAL (1986). Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 51, Bern.
- [2] Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990, SR 814.600.
- [3] Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998, SR 814.201.
- [4] Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998, SR 814.680.
- [5] Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser (2012). Empfehlungen für die Beurteilung, Behandlung und Einleitung von Deponiesickerwasser. Umwelt Vollzug, Gewässerschutz, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- [6] Christensen, Th. H. (1989). Basic Biochemical Processes in Landfills. In: Sanitary Landfilling, Processes, Technology and Environmental Impact, Hrsg.: Christensen, Cossu, Stegmann, Academic Press.
- [7] Döberl, G. (2003): Deponietechnik – Zielvorstellungen Deponiekonzepte, Regelwerke, Technische Universität Wien.
- [8] Farquhar, G. J. (1982). Aktuelle Deponietechnik – Deutsch-amerikanischer Erfahrungsaustausch. Hrsg.: Jäger, B.; Wiemer, K. In: Abfallwirtschaft an der Technischen Universität Berlin, Band 5.
- [9] Stegmann, R. (1990). Die Deponie als Reaktor. In: Entsorgungspraxis 10/1990, S. 567 – 571.
- [10] Hunziker, G. und Winkler, Y. (2014). Ammoniakbildung von Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA)-Schlacke. Diplomarbeit am Institut für Umwelt und Verfahrenstechnik UMTEC, Rapperswil.
- [11] Doka, G. (2003): Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Special LCA Forum, EPFL Lausanne.
- [12] Doka, G. (2004): Modelling of long-term emissions in LCIs of landfills. 22. LCA discussion forum, ETH Zurich.
- [13] Johnson, A. (1993): Chemische Eigenschaften und Langzeitverhalten von Müllschlacken. In: Baccini & Gamper (Hrsg.) Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft, vdf-Verlag, 35-53.
- [14] ZAR Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (2012). Abfall und Ressourcenmanagement: konkret, wirtschaftlich, innovativ, Geschäftsbericht 2012.
- [15] Adam, F. (2012). Entwicklungsschritte mineralischer Schlacke; ZAR Stiftungsratssitzung vom 21. März 2012.
- [16] Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcenschonung ZAR, Hinwil (2013). KVA-Schlacke aus Trockenausstrag – Optimierung der Ablagerungsbedingungen. Zwischenbericht, FRIEDLIPARTNER AG, Zürich.

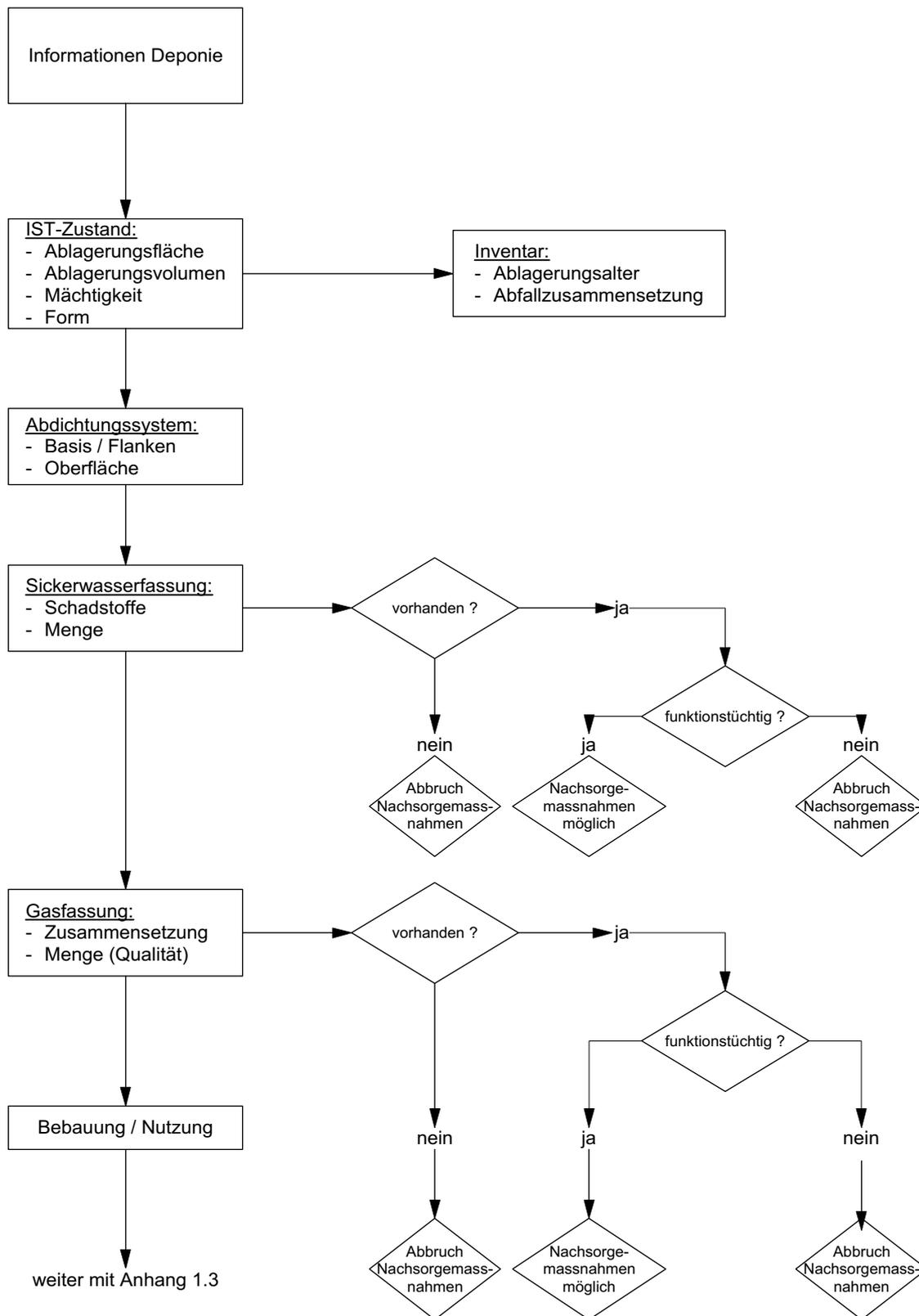
- [17] Klos, U. und Forsting, J. (2014). Optimierung von Deponiegasfassungssystemen beim Einsatz des DEPO+Verfahrens® im Rahmen der Klimaschutzinitiative. In: 10. Leipziger Deponiefachtagung – Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. Kilchert, M. (Hrsg.), Leipzig.
- [18] Ritzkowski, M. (2012). Methoden und Projekte zur Deponiebelüftung im internationalen Vergleich. In: DepoTech 2012, Leoben.
- [19] Hupe, K.-U. et al. (2014). Deponiebelüftung als Klimaschutzmassnahme und zur Verkürzung der Nachsorge. In: 10. Leipziger Deponiefachtagung – Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. Kilchert, M. (Hrsg.), Leipzig.
- [20] Rettenberger, G. (2002). Untersuchungen zur Charakterisierung der Gasphase in Abfallablagerungen und Konsequenzen für die Nachsorge, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft.
- [21] Rettenberger, G. (2010). Sickerwasserkreislaufführung - Voraussetzungen, Technik, Praxiserfahrungen. Müll und Abfall Nr. 10, S. 9 – 15.
- [22] Hirschmann, G. und Förstner, U. (2000): Langzeitverhalten von Schlackedeponien. In: Deponietechnik 2000, Dokumentation der 2. Hamburger Abfallwirtschaftstage "Deponietechnik 2000", Stegmann/Rettenberger/Bidlingmaier/Ehrig (Hrsg.), Hamburger Berichte Band 16, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.
- [23] Klein, R. (2002): Wasser-, Stoff- und Energiebilanz von Deponien aus Müllverbrennungsschlacken. Dissertation, Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Technische Universität München.
- [24] Huber, H., Jaros, M. und Lechner, P. (1996): Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach künstlicher Alterung.
- [25] UVEK – Das Ablagerungsverbot setzt sich durch, <http://www.uvek.admin.ch/dokumentation/00474/00492/index.html?lang=de&msg-id=2415>, 16. Dezember 2014.
- [26] Meinfelder, T. und Richers, U. (2008): Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft.
- [27] Speiser, C. (2001): Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien: Mineralogische und geochemisch Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz. Dissertation, Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Technische Universität München.
- [28] Krümpelbeck, I. (2000): Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal.
- [29] Drees, K.T. (2000): Beschleunigter Stoffaustrag aus Reaktordeponien. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [30] Lale, A. (2001): Langzeitemissionsverhalten von Deponien für Siedlungsabfälle in den neuen Bundesländern. Dissertation, Technische Universität Dresden.

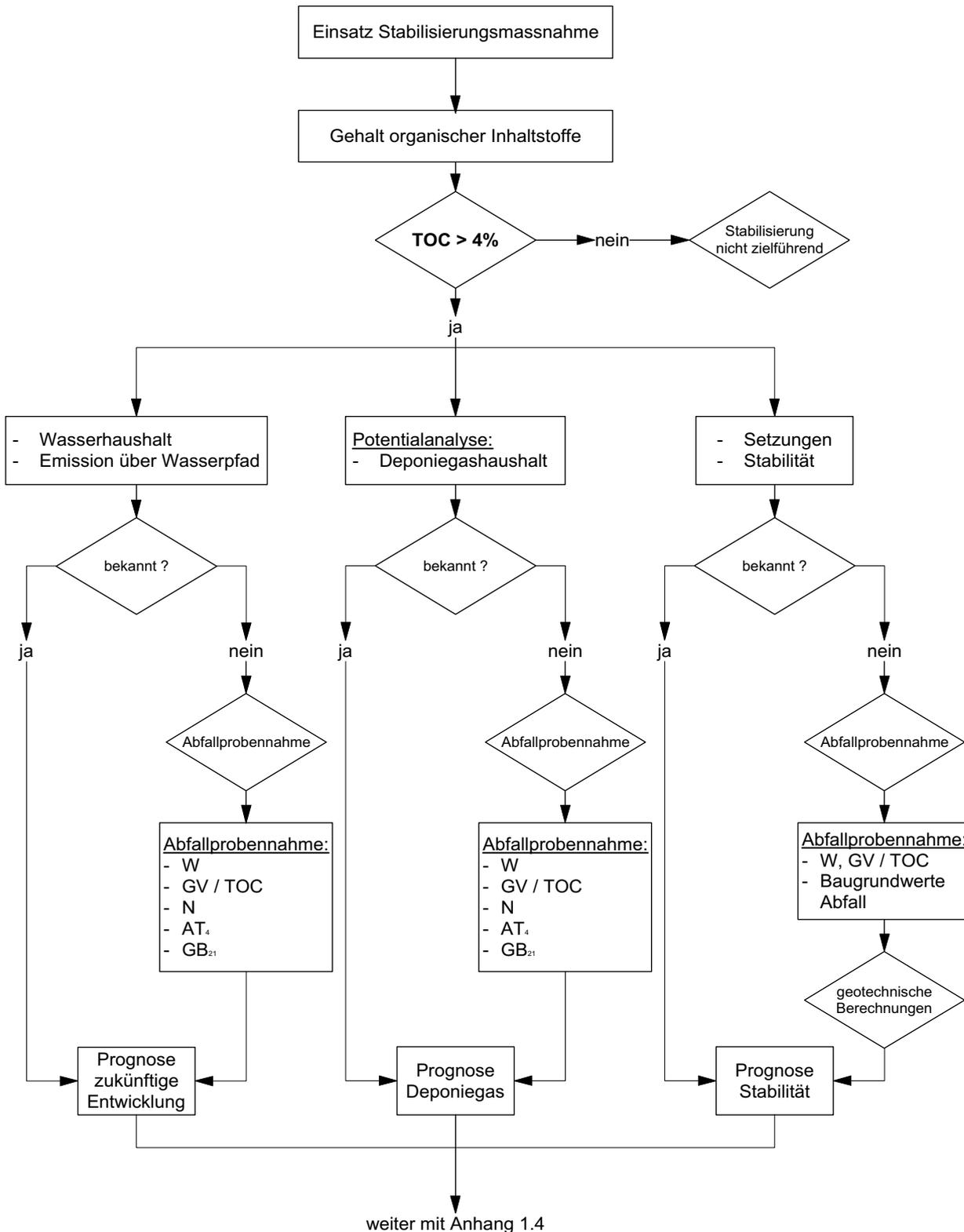
- [31] Prantl, R. (2007): Entwicklung der organischen Substanz im Zuge der In-Situ Belüftung von Deponien. Dissertation, Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien.
- [32] Prantl, R., Tesar, M., Huber-Humer, M. und Heiss-Ziegler, C. (2006): INTERLAND Technischer Leitfaden. In-situ Aerobisierung von Altablagerungen. Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien.
- [33] Heyer, K.-U., Hupe, K. und Stegmann, R. (2014): Niederdruckbelüftungsverfahren AEROflott® zur aeroben in situ Stabilisierung von Altdeponien. Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Hamburg, <http://www.ifas-hamburg.com/pdf/aeroflott.pdf>, 16. Dezember 2014.
- [34] Heyer, K.-U., Hupe, K. und Stegmann, R. (2006): Kriterien für die Beendigung der Nachsorge – Resultate eines UFOPLAN-Vorhabens. In: Deponietechnik 2010, Hamburger Berichte 35, Hamburg.
- [35] Stegmann, R., Heyer, K.-U., und Hupe, K. (2007): Ergebnisse des UFOPLAN-Forschungsvorhabens zur Deponienachsorge Handlungsoptionen, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. In: Zeitgemässe Deponietechnik 2007, Kranert, M. (Hrsg), Stuttgarter Berichte zur Abfalltechnik, Band 90, Stuttgart.
- [36] Verfahrenshandbuch zum Vollzug des Abfallrechts – Entlassung von Deponien aus der Nachsorge. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Stand 2013, Wiesbaden.
- [37] Bachofner, A., Kranitz, J. (2005): Aerobe Stabilisierung mit dem A3-Verfahren, VBSA-Tagung 2005.
- [38] Bachofner, A., Meier, W., Düring, A. (2010): Aerobisierung von Deponien in der Schweiz, Referat Depotech 2010.
- [39] Laux, D. et al. (2011). Pilotversuch zur in-situ Aerobisierung von Altdeponien – Erste Ergebnisse bei der Deponie Dorfweiher. In: Müll und Abfall 43, Nr. 1, S. 11 – 15.
- [40] Reiser, M. et al. (2012). In-situ-Aerobisierung auf der Deponie Dorfweiher – Versuchsergebnisse nach 2 Jahren. In: Zeitgemässe Deponietechnik 2012, Kranert, M. (Hrsg), Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 104, Stuttgart.
- [41] Laner, D., Fellner, J. und Brunner P.H. (2010). Die Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer. Themenschwerpunkt Deponienachsorge. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 7-8 / 10, p. 131 – 1440, Springer Verlag, Wien, New York.
- [42] Kranitz, J. (2007): Erhöhung der Deponiegasausbeute durch Optimierung der Gasbrunnen, 18. Nürnberger Deponieseminar, CDM Consult GmbH, 2007.
- [43] dpuls – deponien intelligent bewirtschaften, <http://www.dplus.ch/DepoVerfahren.aspx>, 16. Dezember 2014.
- [44] MWM | Gas-Anwendungen, <http://www.mwm.net/de/kompetenzen/gas-anwendungen>, 16. Dezember 2014

- [45] Anaerobic Bioreactors | Municipal Soil Waste | Wastes | US EPA
<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/facultative.htm>,
16. Dezember 2014.
- [46] Österreichischer Verein für Altlastenmanagement (ÖVA)
<http://www.altlastenmanagement.at/home/?p=62>, 16. Dezember 2014.
- [47] Kreiswirtschaftsbetriebe Goslar (2012). Stilllegung und Nachsorge der Deponie Bornhausen, Landkreis Goslar – Gutachterliches Konzept unter Berücksichtigung flankierender Massnahmen zur Verbesserung des Deponieverhaltens. IFAS, Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft Prof. Dr. R. Stegmann und Partner, Hamburg.
- [48] Heyer, K.-U. et al. (2014): 15 Jahre Praxiserfahrung mit der Deponiebelüftung: Aufwand, Kosten, NKI-Investitionsförderung und Kostensenkungspotentiale in der Stilllegung und Nachsorge. ORKESTRA2-Workshop, Kassel.
- [49] Landkreis Rotheburg Wümme (2012). Beschleunigte aerobe in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt zur Minderung des Kosten- und Nachsorgeaufwands. BMBF Verbundvorhaben, Abschlussbericht.

ANHANG







Legende:

- W = Wassergehalt
- GV = Glühverlust
- N = Stickstoff
- AT₄ = Atmungsaktivität in 4 Tagen
- GB₂₁ = Gasspendensumme in 21 Tagen

FRIEDLIPARTNER AG

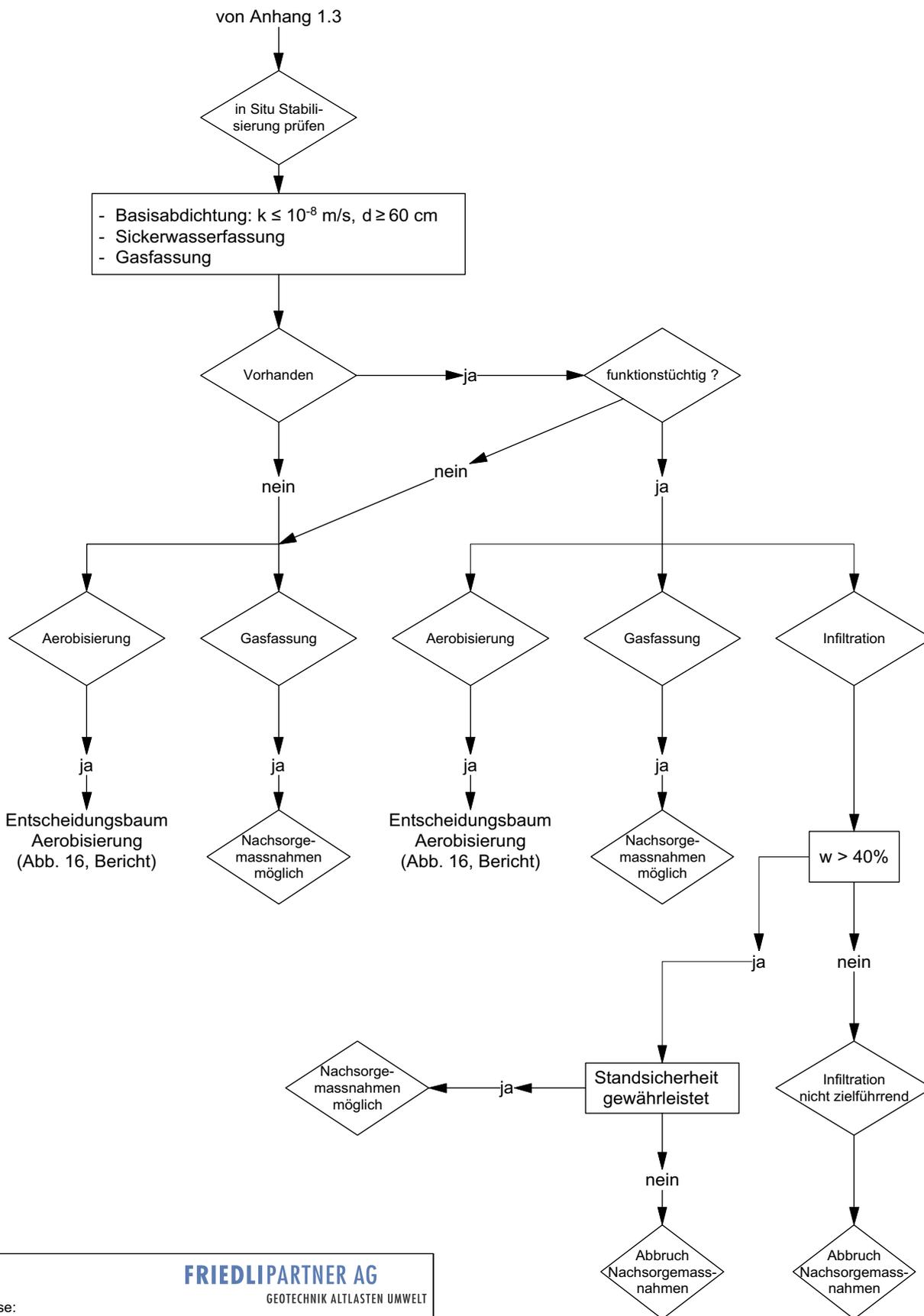
GEOTECHNIK ALLLASTEN UMWELT

Projektadresse:

Nachsorgemassnahmen bei Deponie

Projekt-Nr.: 14.097.1
Deponie

Erstellt: fm
Datum: 04.05.15



FRIEDLIPARTNER AG
GEOTECHNIK ALTLASTEN UMWELT

Projektadresse:
Nachsorgemassnahmen bei Deponie

Projekt-Nr.: 14.097.1
Deponie

Erstellt: fm
Datum: 04.05.15