



Bauvorhaben auf alten SiedlungsabfalldPONien

**Zum Abbau von organischem Material als Ursache von
belastetem Sickerwasser, Deponiegas und Setzungen**

Bericht über Ursachen, Untersuchungen und über
technische Lösungen

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU



Auftrags-Nr.
2019 - 0216

Auftraggeber
BAFU
Abteilung Boden und
Biotechnologie
Sektion Altlasten

Titelbild:

Am Fuss einer grossen alten SiedlungsabfalldPONie sammelt sich Hang- und Sickerwasser in einem Teich. Bei der Wasser-Probenahme werden wir von einem hungrigen Karpfen beobachtet.

29. März 2021

HAUPTSITZ

Büttenenhalde 42
CH-6006 Luzern

T 041 375 61 00
info@fsgeolog.ch

FILIALE

Klostermatt 4
CH-6415 Arth

www.fsgeolog.ch

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Boden und Biotechnologie, Sektion Altlasten

Auftragnehmer

Schenker Richter Graf AG, Luzern

Autor

Dr. Franz Schenker

Mit Beiträgen von

Dr. Andreas Bally

Dr. Angela Graf

Samuel und Peter Oester

Didier Pichonaz

Reto Tietz

Wolfgang Richter

Stefan Textor und Dr. Heiner Widmer

Datum

29. März 2021

Begleitung durch BAFU

Christiane Wermeille, Reto Tietz

Disclaimer

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Vorwort

1. Einleitung	1
2. Rechtliche Rahmenbedingungen	2
3. Alte Siedlungsabfalldeponien	5
3.1. Geschichtliche Entwicklung der Siedlungsabfalldeponien	5
3.2. Statistisches	7
3.3. Methodisches und Ergebnisse	9
3.4. Typologie von Siedlungsabfalldeponien	12
4. Sickerwasser	14
4.1. Entstehung von Sickerwasser	14
4.2. Untersuchung von Deponiesickerwasser	17
4.3. Einwirkung auf Grundwasser	19
4.4. Einwirkungen auf oberirdische Gewässer	19
4.5. Massnahmen zur Sickerwasserproblematik	21
4.6. Zusammenfassung Sickerwasserbehandlung	24
5. Gas	25
5.1. Entstehung und Auswirkungen	25
5.1.1. Entstehung von Deponiegasen	25
5.1.2. Gasemission - Gasmigration - Immissionsort	26
5.1.3. Eigenschaften und Gefährdungspotential der wichtigsten Gaskomponenten	27
5.2. Gastechnische Untersuchung	29
5.2.1. Emissionsnachweis durch Porenluftmessung	29
5.2.2. Erfassung von Emissions-Pfaden	30
5.2.3. Gas-Immissionen	30
5.3. Gefährdungsbeurteilung	31
5.4. Sanierungsmassnahmen	32
5.4.1. Grundsätze	32
5.4.2. Massnahmen zur Verringerung der Gasemissionen	32
5.4.3. Emissionsminderung durch Gasbehandlung	33
5.4.4. CO ₂ -Kompensation	33

5.4.5. Massnahmen am Immissionsort bei Neubauten	34
5.5. Zusammenfassung Gas	36
6. Setzungen	37
6.1. Entstehung und Auswirkungen	37
6.2. Geotechnische Untersuchungen	38
6.2.1. Kernbohrungen	38
6.2.2. Seismik	38
6.2.3. Rammsondierungen	38
6.2.4. Drucksondierungen	39
6.3. Chemische Untersuchungen	39
6.4. Massnahmen zur Gründung	39
6.4.1. Pfahlfundation	39
6.4.2. Kombinierte Pfahl-Platten-Fundation (KPP)	40
6.4.3. Flachfundation	41
7. Boden	42
8. Fallbeispiele	43
9. Ausblick	46

Anhang

Anhang 1: Tabelle mit alten Siedlungsabfalldeponien, welche mit Unterstützung des VASA-Fonds saniert wurden

Anhang 2: Seitenriss eines Bauvorhabens in Leichtbauweise auf einer alten Siedlungsabfalldeponie unter Berücksichtigung und Darstellung der speziellen Massnahmen

Vorwort

In der Schweiz gibt es mindestens so viele alte Siedlungsabfalldeponien wie Gemeinden. Sie enthalten beträchtliche Mengen von organischen Abfällen und produzieren deshalb Gase und belastete Sickerwässer. Solche Deponien sind immer belastete Standorte – oft auch sanierungsbedürftige Altlasten. Werden die alten Hauskehrrichtdeponien neuen Nutzungen zugeführt, braucht es besondere Massnahmen: Gase müssen gefasst, Sickerwasser behandelt und setzungsbedingte Schäden von Bauten verhindert werden.

Alte Siedlungsabfalldeponien liegen oft siedlungsnah oder mittlerweile sogar im Siedlungsgebiet selbst. Der Respekt vor den besonderen Massnahmen und ihren Kosten bewirkt, dass alte Deponien – es handelt meist um schlecht genutzte Brachflächen - nicht im Fokus von Landeigentümern und Investoren sind.

Als Folge der Umweltschutzgesetzgebung, insbesondere der Altlastenverordnung von 1998, wurden viele Deponien untersucht, beurteilt und zum Teil auch saniert. Damit konnte Wissen und Erfahrung im Umgang mit alten Siedlungsabfalldeponien gewonnen werden, sodass nun geeignete Massnahmen mit ausreichender Planungs-, Kosten- und Terminalsicherheit für eine höherwertige Nutzung dieser Brachflächen vorhanden sind.

Grundlage der vorliegenden Arbeit bildet einerseits das Fachwissen von Altlasten-Fachleuten. Andererseits dient auch die Auswertung der beim BAFU archivierten Dokumente von untersuchten und sanierten Siedlungsabfalldeponien, welche mit Beiträgen aus dem dafür geschaffenen Fonds unterstützt wurden, eine reichhaltige Informations- und Wissensquelle. Das BAFU hat die vorgeschlagene Studie initiiert und unterstützt.

Die Studie soll sich nicht primär an Fachleute der Deponietechnik oder der Altlastenbearbeitung wenden; Zielpublikum der Studie sind Eigentümer von alten Siedlungsabfalldeponien (z.B. Kommunen, aber auch Privatpersonen) sowie die Immobilienbranche, welche die häufig im Siedlungsgebiet liegenden Deponie-Brachflächen einer Neunutzung zuführen wollen. Nicht auszuschliessen ist auch, dass die Baubewilligungsbehörden diese Studie zu Rate ziehen werden.

Ziel und Absicht der vorliegenden Arbeit ist es, mit konkreten Lösungsvorschlägen die Bedenken zur Nutzung der verbreitet vorhandenen Brachflächen zu verringern. Dies nicht zuletzt zum Schutz des Kulturlandes, aber auch der Landschaft. Mit dem Verständnis der ablaufenden Prozesse und den daraus abgeleiteten technischen Massnahmen können bei neuen Bauvorhaben auf alten Siedlungsabfalldeponien Schäden durch den Zerfall von organischem Material vermieden werden. Werden solche Vorhaben fachgerecht geplant und realisiert, verschwinden Vorbehalte bezüglich gesundheitlicher Risiken und technischer Hindernisse. Gleichzeitig steigt die Rechts- und Kosten-Sicherheit.

Zusammenfassung

Bis vor etwa 20 Jahren wurde in Siedlungsabfalldeponien viel organisches Material (Garten- und Küchenabfälle, Papier, Holzreste etc.) abgelagert. Organisches Material zersetzt sich, produziert dabei Gase und belastetes Sickerwasser. Dabei verringert sich das Deponievolumen und es kommt zu Setzungen des Deponiekörpers und somit auch der Deponieoberfläche. Wie laufen solche Prozesse ab und mit welchen Massnahmen kann eine sichere Nach- und Neunutzung von alten Siedlungsabfalldeponien gewährleistet werden? Diese Themen werden in neun Kapiteln abgehandelt.

Im einleitenden Kapitel 1 wird das Potential von Siedlungsabfalldeponien als nutzbare Brachflächen erläutert und die damit verbundenen Risiken kursorisch aufgezeigt.

Die wichtigsten rechtlichen Rahmenbedingungen werden im Kapitel 2 zusammengefasst und auf Stolpersteine aufmerksam gemacht. So bedingen Bauvorhaben einen Nachweis, dass alte Siedlungsabfalldeponien, auch wenn sie aktuell als weder untersuchungs- noch überwachungsbedürftig eingestuft sind, durch das Vorhaben nicht sanierungsbedürftig werden. Auch kann davon ausgegangen werden, dass in der Regel keine Abgeltungen des Bundes für die Untersuchung, Überwachung und Sanierung der belasteten Standorte erwartet werden können.

Im Kapitel 3 wird die geschichtliche Entwicklung der Siedlungsabfalldeponien aufgearbeitet. Dabei wird auch die alte Einteilung der Deponien in die Klassen I bis IV erläutert, denn durch diese ergeben sich wichtige Hinweise auf die Zusammensetzung der Deponie und insbesondere auf den Anteil von organischem Material. Im gleichen Kapitel werden die Resultate der Auswertung der Deponie-Datenbank des BAFU zusammengefasst. Dabei ergab sich unter anderem die Erkenntnis, dass von den rund 16'000 bekannten Ablagerungsstandorten heute rund 4'800 ganz oder teilweise in Bauzonen liegen. Davon wurden die Mehrzahl nicht im Detail untersucht, sondern ohne detaillierte Abklärungen meistens als ohne schädliche oder lästige Einwirkungen beurteilt. Was sich bei Bauvorhaben ändern dürfte.

In den darauffolgenden drei Kapiteln werden der Umgang mit Sickerwasser, Deponiegas und Setzungen abgehandelt, wobei in jedem Kapitel zuerst die naturwissenschaftlichen Grundlagen zur Entstehung, dann die Untersuchungsmethoden und anschliessend die Massnahmen erläutert werden. Mit diesem Vorgehen wird angestrebt, den Bogen zwischen Problemanalyse einerseits und Problemlösung andererseits zu schliessen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde bei den technischen Massnahmen eng mit Fachleuten der Ingenieurskunst zusammengearbeitet.

Im Sickerwasser von Siedlungsabfalldeponien sind es primär die hohen Gehalte von schädlichem Ammonium, welche bei einer Neunutzung zu eliminieren sind. Dazu werden im Kapitel 4 verschiedene Techniken aufgezeigt und bewertet mit dem Fazit, dass bei Bauvorhaben das Sickerwasser gefasst und in die Kanalisation eingeleitet werden soll; zur Sickerwasserbehandlung von alten Deponien ohne nahegelegene Infrastrukturen eignen sich Pflanzenkläranlagen.

In Hinblick auf Neunutzungen bilden Deponiegase zentrale Herausforderungen. Nicht aus dem Grund, dass diese nicht mit einem verhältnismässigen Aufwand zu meistern wären, sondern weil Gase bren-

nen können, flüchtig sind und eine allfällige Gefahr nur mit Spezialgeräten erkennbar ist. Diese Umstände führen dazu, dass mit Deponiegas respektvoll und mit Fachwissen umgegangen werden muss, damit sich auch die zukünftigen BenutzerInnen garantiert sicher fühlen.

Deponiegase dürfen nicht in Räume gelangen, wo sich Menschen regelmässig über längere Zeit aufhalten oder aufhalten könnten. Im Kapitel 5 wird u.a. aufgezeigt, dass emissionsseitige Massnahmen zur Verringerung der Gasentstehung viel aufwändiger sind als präventive Vorkehrungen beim Bauvorhaben selbst. Dass dies möglich ist und wie dies gemacht werden muss, wird in den letzten Abschnitten von Kapitel 5 aufgezeigt. Nicht im Fokus der Ausführungen, aber im Text ebenfalls aufgenommen, steht die Sanierung von bereits auf gasproduzierenden Deponien bestehenden Bauten.

Bei Neunutzungen, z.B. für Gewerbe- oder Wohnbauten auf alten Siedlungsabfalldeponien, werden die geotechnischen Bedingungen hinsichtlich der Tragfähigkeit des Untergrundes von grosser Bedeutung sein. Generell sind Deponien der schlechtesten resp. anspruchsvollsten Baugrundklasse zuzuordnen, nämlich der Baugrundklasse F gemäss der SIA-Norm 261. In der Regel müssen deshalb bei Neubauten die Kräfte auf/in einer tragfähigen Schicht unterhalb des Deponiekörpers mit Pfählen abgetragen werden; bei setzungstoleranten und leichten Bauwerken könnten diese unter Umständen auch flach fundiert werden. Ziel der im Kapitel 6 aufgezeichneten Massnahmen ist es, aufzuzeigen, wie Gebäudeschäden durch Setzungen des Deponiekörpers zu vermeiden sind.

In sehr vielen Fällen ist die Überdeckung von Siedlungsabfällen dünn und mit Deponiegut vermischt. Bei Neunutzungen von alten Deponien für Wohnbauten ist eine hohe Qualität des Bodens unabdingbar und den Anforderungen von Standorten, auf denen Kinder regelmässig spielen, ist zu entsprechen. Details gehen aus dem Kapitel 7 hervor.

Im Kapitel 8 werden Beispiele von realisierten Bauvorhaben auf alten Siedlungsabfalldeponien vorgestellt und kurz kommentiert. Im abschliessenden Kapitel 9 werden einige Vorschläge für das weitere Vorgehen gemacht und ein Ausblick gewagt, wie alte Siedlungsabfalldeponien einer höherwertigen Nutzung zugeführt werden.

Im Anhang werden Beispiele von sanierten Siedlungsabfalldeponien aufgelistet und die technischen Massnahmen mittels Seitenriss eines Bauvorhabens in auf einer alten Siedlungsabfalldeponie als Gesamtes illustriert.

1. Einleitung

Um Transportwege kurz zu halten, wurden Kehrichtdeponien früher meistens in der Nähe von Wohnorten angelegt und gefüllt. Spätestens nach dem Inkrafttreten der TVA¹ ab 1991 wurde die Abfallentsorgung geregelt und zentralisiert; viele kommunale Deponien wurden stillgelegt. Im Laufe der Siedlungsentwicklung verringerten sich auch die Distanzen zwischen Deponiestandorten und überbaute Fläche mit der Folge, dass sich alte Siedlungsabfalldeponien heute als Brachflächen nahe oder sogar innerhalb von besiedeltem Gebiet befinden.

Im Rahmen der Siedlungsentwicklung nach innen haben alte Deponien ein Potential für höherwertige Nutzungen erhalten, auch wenn es sich um belastete Standorte (AltIV²) handelt. Alte Kehrichtdeponien resp. Siedlungsabfalldeponien enthalten viel biogene Abfälle (Holz, Papier, Gartenabfälle, etc.). Aufgrund des hohen Anteils von organischen Stoffen im Deponiegut und des vorhandenen Wassers werden Siedlungsabfalldeponien zu Bioreaktoren. Mikroorganismen zersetzen organisches Material und produzieren dabei Wärme, Gase und belastetes Sickerwasser. Dieser Abbau verringert die Menge von organischem Material und führt so zu Setzungen. Letztere können zu Schäden an bestehenden Bauwerken (Gebäuden, Rohrleitungen) führen.

Gase entweichen an die Deponie-Oberfläche und können in geschlossenen Räumen, in Schächten und Leitungen gefährlich werden. Mit Schadstoffen belastete Sickerwässer beeinträchtigen die Qualität von oberirdischen Gewässern und vom Grundwasser.

Trotz all dieser Hemmnisse ist es möglich, auf alten Kehrichtdeponien zu bauen. Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen und die damit verbundenen Fragen zu beantworten:

- Gefährdung der Umwelt: Führt die Deponie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen auf Schutzgüter? Gibt es einen Sanierungsbedarf? Was, wann und wie soll dann saniert werden?
- Sicherheit bei der Nutzung: Mit welchen zu treffenden Massnahmen kann gewährleistet werden, dass die Neunutzung nicht von Emissionen betroffen werden und die Personen sicher sind?
- Qualität von Bauwerken: Mit welchen allenfalls zu treffenden Massnahmen kann verhindert werden, dass Setzungen des Deponiekörpers die Qualität der Bauwerke verringern?
- Kostensicherheit: Führt eine höherwertige Nutzung von Deponiestandorten zu höheren Bau- und Betriebskosten? Wie hoch sind solche und wie werden diese minimiert?

¹ TVA: Technische Verordnung über Abfälle (Dez. 1990), bereits 1976 wurden «Richtlinien über allgemeine Anforderungen an Standort, Anlage, Betrieb und Kontrolle von geordneten Deponien» (Deponierichtlinie) erlassen

² AltIV: Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (1998)

2. Rechtliche Rahmenbedingungen

Mit dem Bevölkerungs- und dem Wirtschaftswachstum wurden auch die Entsorgungsprobleme grösser. Die Abfallentsorgung wurde vermehrt eine Aufgabe der öffentlichen Hand und so auch Thema für gesetzliche Regelungen. Die massgebenden Gesetze und Verordnungen über die Zeit sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt³:

Tabelle 1: Zusammenfassung Gesetze und Verordnungen

Jahr	Titel	Inhalt
1955	Gewässerschutzgesetz	Keine gewässerverunreinigenden Stoffe in Gewässern
1971	Revision Gewässerschutzgesetz	Schliessung von gewässergefährdenden Deponien
1976	Deponierichtlinie	Zuweisung der Abfälle in Deponieklassen/Deponieaufbau
1986	Abfall-Leitbild	Schliessung der Kreisläufe, Verwertung oder Endlagerung
1991	Technische Verordnung über Abfälle TVA	Bewilligungspflicht, Anforderungen an Planung, Standort, Technik, Betrieb, Abfallstatistik
1998	Altlastenverordnung	Sanierung von Standorten, welche zu schädliche Einwirkungen auf Schutzgüter führen
2000	Änderung der TVA	Verbot der Ablagerung von organischen Abfällen
2008	Verordnung Abgabe zur Sanierung VASA	Abgaben und Abgeltungen
2015	Verordnung über die Vermeidung von Abfällen VVEA	Gebot zur Vermeidung und Wiederverwendung von Abfällen

Deponien, auch alte Siedlungsabfalldeponien, sind immer auch belastete Standorte, sodass bei Bauvorhaben immer ein Spannungsfeld bezüglich zweier Interessen besteht:

- Rasche und kostengünstige Realisierung des Bauvorhabens
- Wiederherstellung und/oder Erhaltung eines gesetzeskonformen Zustandes bezüglich allfälliger Altlasten

Diese beiden Interessen können bei Bauvorhaben sowohl Synergien als auch Konflikte auslösen. Die Anforderungen und Verfahrensschritte gemäss Altlastengesetzgebung und auch die Abgrenzung von baubedingten und altlastenrechtlichen Kosten im Zusammenhang mit Abgeltungen durch Beiträge des Bundes gemäss der VASA⁴ sind in der Vollzugshilfe «Bauvorhaben und belastete Standorte» im Detail abgehandelt⁵.

³ Ergänzte Tabelle aus BAFU 2016: Erhebung Verwertung Deponiegas über Fackelanlagen in der Schweiz 1990-2014; Schlussbericht der consaba vom 23.9.2016

⁴ Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten (VASA) vom 26. September 2008 (Stand am 1. Januar 2016)

⁵ BAFU (Hrsg.) 2016: Bauvorhaben und belastete Standorte. Ein Modul der Vollzugshilfe «Allgemeine Altlastenbearbeitung». Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1616: 28 S.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die wichtigsten rechtlichen Randbedingungen wie folgt zusammengefasst:

- BAFU_Bauen auf Siedlungsdeponien
29. März 2021 Seite 3 von 47

baubedingten Gefährdungsabschätzung ist abzuklären, ob der Standort durch das Bauvorhaben sanierungsbedürftig wird resp. bei sanierungsbedürftigen Standorten zu prüfen, wie der Standort mit der Realisierung des Bauvorhabens saniert werden kann (vorgängig oder gleichzeitig).

- Die Behörde wird ein Entsorgungskonzept über die korrekte Entsorgung von Abfällen nach VVEA⁶ einfordern.
- Um sich vor Verzögerungen und Überraschungen zu wappnen, empfiehlt es sich, bei Bauvorhaben auf belasteten Standorten die für die Baubewilligung notwendigen Abklärungen frühzeitig anzugehen.
- Abgeltungen des Bundes werden bei belasteten Standorten nur für Massnahmen ausgerichtet, welche auch unabhängig eines Bauvorhabens altlastenrechtlich notwendig wären. Massnahmen, die nur aufgrund des Bauprojektes entstehen (baubedingte Untersuchungen, Gefährdungsabschätzungen, sowie Sanierungsmassnahmen, welche über die optimale Sanierungsvariante hinausgehen), sind gemäss VASA nicht anrechenbar.

⁶ Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) vom 4. Dezember 2015 (Stand am 1. Januar 2016)

3. Alte Siedlungsabfalldeponien

3.1. Geschichtliche Entwicklung der Siedlungsabfalldeponien

In kargen Zeiten bis ca. 1950 wurden in Siedlungsabfalldeponien vor allem Abfälle wie Gartenabfälle, Asche, Schlacke, Glas, Papier, Altpneus, Brandschutt, Küchenabfälle oder Kadaver abgelagert. Mit zunehmendem Wohlstand nahm die Abfallmenge zu und das Spektrum der Abfallarten erweiterte sich stark. Immer mehr Bauabfälle mit Holz und Gips, mit Treib- oder Heizstoffen verunreinigtes Erdreich, Schlamm aus Ölabscheidern, Kunststoffe, Metalle (z. B. Konservenbüchsen, Gebinde), Textilien und Batterien gelangten in die Siedlungsabfalldeponien. Es handelte sich um «wilde» Ablagerungen, die Abfälle wurden an unerlaubten Orten abgelagert, oder um «ungeordnete» Ablagerungen, in welchen an erlaubten Orten Abfälle abgekippt und sich selbst überlassen wurden, bis sie gelegentlich planiert und abgedeckt wurden.

Auf alten Kehrichtdeponien kam es während des Betriebs immer wieder zu spontanen oder beabsichtigten Bränden. Dies führte zur Verkleinerung der Menge von organischem Material (Holz, Kadaver, aber auch Autoreifen und brennbare Chemikalien). Der dabei entstandene übelriechende und zum Teil toxische Rauch führte oft zu massiven Belästigungen der Bevölkerung.

Ab den 60-er Jahren gelangten mehr und mehr brennbare Abfälle in die zunehmend verfügbaren Kehrichtverbrennungsanlagen, welche bis 1978 insgesamt eine Entsorgungskapazität von rund 400 t/h erreichten⁷. Ziel dabei war die Verkleinerung der Menge von organischem und brennbarem Material im Deponiegut, gleichzeitig jedoch nahm die gesamte Abfallmenge zu. Neue Deponien, «geordnete» Deponien nach der Deponierichtlinie 1976⁸, wurden in Betrieb genommen. Beispiele solcher «moderner» Deponien aus den 70-er und 80-er Jahren sind Arth «Bernerhöhe», Baar «Baarburg», Ennetmoos «Cholwald», Küssnacht «Chüelochtobel» oder Köniz «Gummersloch» (Vgl. BAFU 1980: Tabelle von geordneten Deponien⁷). Bestehende Siedlungsabfalldeponien wurden weiterhin bis ins Jahr 2000 und teilweise darüber hinaus genutzt und auch mit biologisch aktiven Materialien gefüllt. Gemäss heutiger Gesetzgebung (Altlastenverordnung 1998) sind/waren diese Deponien meistens entweder sanierungsbedürftig oder zumindest überwachungsbedürftig.

Die Deponierichtlinie 1976 *empfahl*, die Deponien im Hinblick auf die zu erwartende Qualität des Deponiesickerwassers in vier Klassen einzuteilen.

Klasse I: Deponien für ausschliesslich inertes Material, ohne nachteiligen Einfluss auf das Sickerwasser. Aushub- und Abbruchmaterial ohne Torf und Humus und ohne wasserbeeinträchtigende Anteile. Auch Beton, Eternit und Glas werden in kleinen Mengen toleriert.

Klasse II: Deponien für weitgehend inertes Material, deren Sickerwasser – obschon geringfügige Beeinträchtigungen zu erwarten sind – den Anforderungen der eidgenössischen Vorschriften über Abwassereinleitungen im Wesentlichen entspricht. Wichtigste Stoffgruppe: Abbruch-

⁷ Kommunale Abfallentsorgung in der Schweiz. BAFU 1980

⁸ Bundesamt für Umweltschutz (1976): Richtlinien über allgemeine Anforderungen an Standorte, Anlage, Betrieb und Kontrolle von geordneten Deponien. 45 Seiten. 1982 wurde eine zweite unveränderte Auflage herausgegeben.

material ohne wesentliche wasserbeeinträchtigende Anteile (Ziegel Steine, Beton, Holzanteile, Strassenaufbruch mit Belag, Aushubmaterial mit Torf- und Humusanteilen). Die Ablagerung von Altpneus und Glas ist möglich, Gartenabraum (Holz, Schnitt, Laub) in kleinen Mengen ist toleriert.

Klasse III: Deponien, deren Sickerwässer den Anforderungen den damals geltenden Vorschriften zur Einleitung in ein oberirdisches Gewässer nicht genügen, hingegen jenen zur Einleitung in die Kanalisation. Wichtigste Stoffgruppen: Siedlungsabfälle und deren Verbrennungsrückstände (KVA-Schlacken und Flugaschen), Garten- und Gewerbeabfälle, Haushaltsgeräte (Kühlschränke, Kochherde) und Möbel. Ebenfalls ölverschmutztes Erdreich, Baustellenabfälle und in kleinen Mengen pastöse Abfälle, Farbrückstände, Filterkuchen.

Klasse IV: Deponien, deren Sickerwässer den Anforderungen über Abwassereinleitungen ohne Vorbehandlung in die Kanalisation nicht genügen. Es handelt sich um Sondermülldeponien mit den wichtigsten Stoffgruppen: feste Sonderabfälle wie entwässerte Metallhydroxide, wasserlösliche Salze, aber auch Schlämme etc.

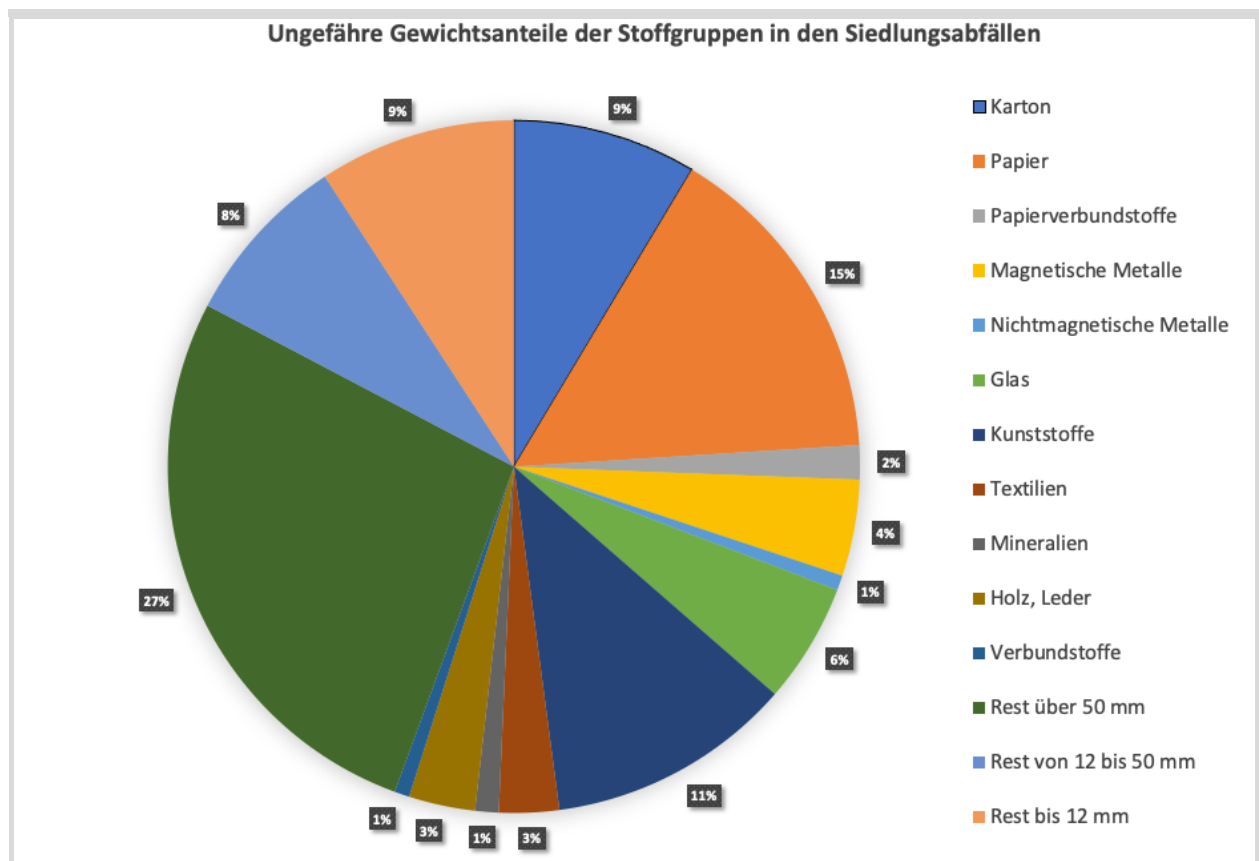


Abbildung 2: Ungefähre Gewichtsanteile der Stoffgruppen in den Siedlungsabfällen der Schweiz (BAFU 1984). Pflanzliche und tierische Küchenabfälle sowie ein Teil des Papiers, insgesamt 30 – 40 %, können biologisch leicht abgebaut werden).

Bei der Aufnahme in den Kataster der belasteten Standorte (KbS, vgl. Art. 5 AltIV) ab 1999 wurden die damaligen Klassenbezeichnungen meist berücksichtigt und erlauben damit Rückschlüsse auf den

Deponie-Inhalt. In den KbS – Einträgen findet sich nicht nur die Bezeichnung der Deponieklasse, sondern diese wird für die Art und Mengenanteile des deponierten Materials verwendet. Beispiel: Der Standort «Obermoos» wurde als Klasse II Deponie betrieben, enthält neben Abbruchmaterial 30% Klasse III-Material und 10% Klasse IV Material.

Eine Erhebung der Zusammensetzung von Siedlungsabfällen (BAFU 1984⁹) zeigt, dass Siedlungsabfalldeponien, welche zwischen 1950 und 1980 betrieben wurden, im Hauskehricht etwa 30 % biologisch leicht abbaubare Küchenabfälle und Papier enthielten (vgl. Abbildung 2). Zu berücksichtigen ist, dass in den alten Siedlungsabfalldeponien nicht nur Hauskehricht abgelagert wurde, sondern auch Bau- und Brandschutt, Pneus, Fahrzeuge und vieles andere.

3.2. Statistisches

Aus der Auswertung des Gesamtkatasters der belasteten Standorte und der Datenbank der sanierten Standorte (SANDAT) des BAFU ergeben sich folgende Resultate:

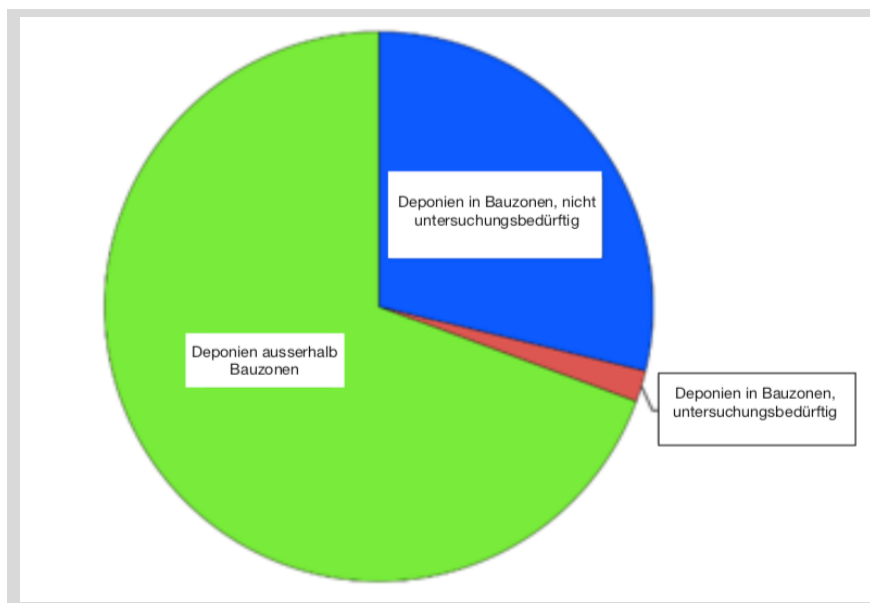


Abb. 3a:

Es sind rund 16'000 Ablagerungsstandorte bekannt. Davon liegen rund 4'800 ganz oder teilweise in Bauzonen. Etwas weniger als die Hälfte dieser Ablagerungsstandorte in Bauzonen sind Siedlungsabfalldeponien.

Von allen in der Bauzone liegenden Ablagerungsstandorten sind 6% noch untersuchungsbedürftig (gegenüber 14% bei allen Standorten). Jeder Ablagerungsstandort in einer Bauzone tangiert statistisch gut 3 Parzellen.

Zu beachten ist, dass 55% der Deponien (=2'600 Standorte), welche zwar belastet, aber bei denen keine schädlichen oder lästigen Einwirkungen zu erwarten sind, nicht untersucht, sondern von den zuständigen Behörden als nicht untersuchungsbedürftig klassiert worden sind. Bei Bauvorhaben auf diesen Deponien ist davon auszugehen, dass die Behörde im Rahmen des Baubewilligungsverfahrens eine baubedingte Gefährdungsabschätzung entsprechend Artikel 3 AltIV einfordern wird. Die zu erwartenden altlastenrechtlichen Verfahrensschritte werden in der BAFU-Vollzugshilfe «Bauvorhaben und belastete Standorte» im Detail erläutert (vgl. dazu Abbildung 1 im Kapitel 2).

⁹ BUWAL 1984: Abfallerhebung, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 27, Bern, ergänzt im März 1987

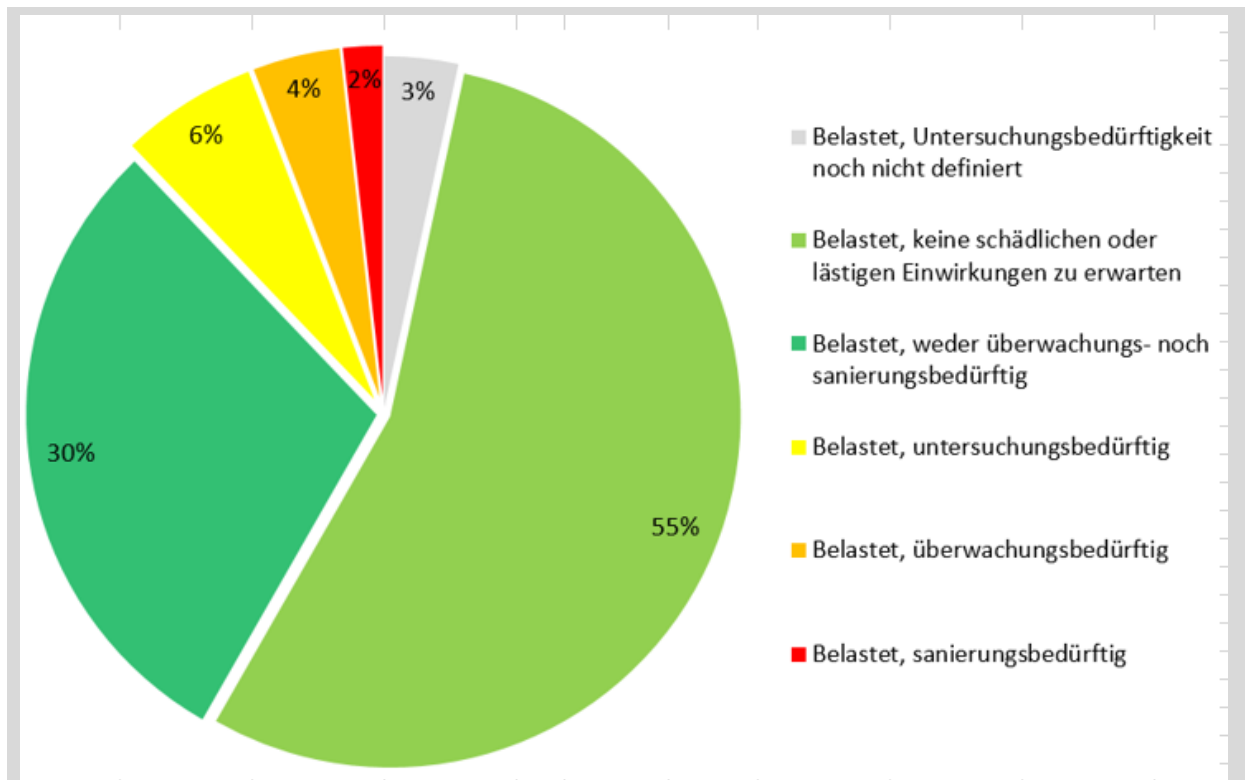


Abb. 3b: Status gemäss Altlastenverordnung der rund 4'800 sich in Bauzonen befindenden Deponien.

Deponievolumen

Bei rund 9'000 von 16'000 Deponien gibt es Angaben zum Volumen der Deponie. Der Mittelwert des Volumens dieser Deponien beträgt 51'000 m³, der Medianwert 7'000 m³. Die Differenz zwischen Mittel- und Medianwert zeigt, dass es viele Deponien mit wenig Deponievolumen und wenige Deponien mit grossem Volumen gibt. 1'500 Deponien mit Angaben zum Deponievolumen wurden nach 1970 in Betrieb genommen. Bei diesen beträgt der Mittelwert des Volumens 85'000 m³, der Medianwert liegt bei 8'800 m³. Die «jüngeren» Abfalldeponien haben deshalb, statistisch gesehen, ein grösseres Volumen als die zahlreicheren «alten» Siedlungsabfalldeponien.

Parzellen

Rund 16'000 der sich in der Bauzone befindenden Parzellen tangieren ganz oder teilweise einen belasteten Ablagerungsstandort. Dies entspricht rund 1 % aller sich in Bauzonen befindenden Parzellen. Jeder Ablagerungsstandort in einer Bauzone tangiert durchschnittlich etwas mehr als 3 Parzellen.

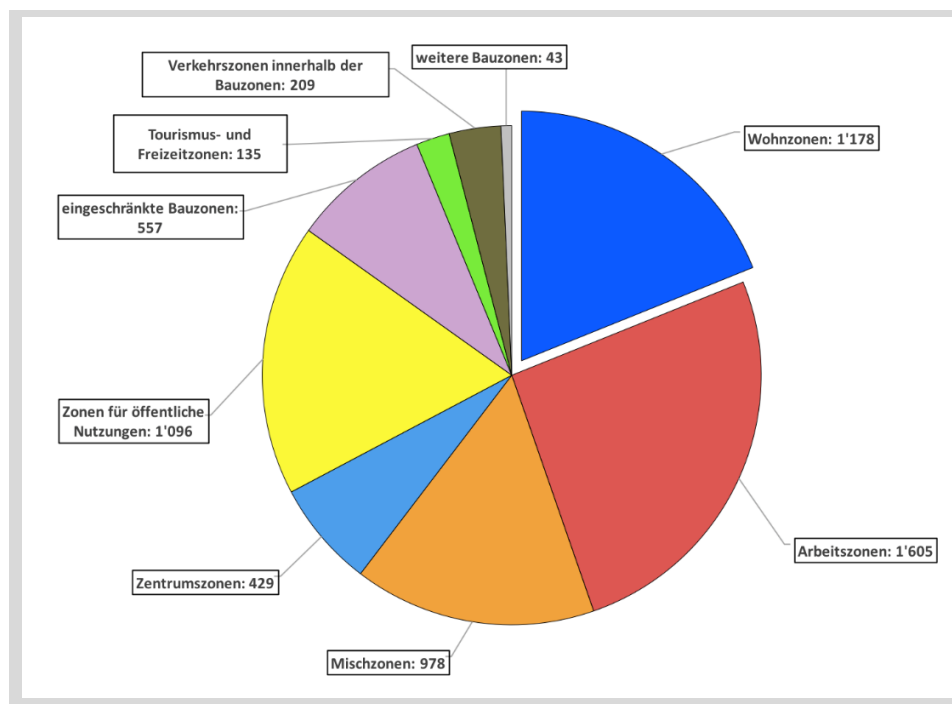


Abb. 3c:

Aufschlüsselung der Ablagerungsstandorte in Bauzonen nach Nutzungszonen¹⁰.

3.3. Methodisches und Ergebnisse

Zur Durchführung des Projekts wurde das Archiv des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Abteilung Boden und Biotechnologie, Sektion Altlasten, von Juni bis September 2019 ausgewertet. Von den gesamthaft sanierten Standorten wurden etwa 60 Hausmülldeponien ausgewählt.

Veranschaulicht man diese verschiedenen Projekte auf einer Karte der Schweiz (Abb. 4), so zeigt sich, dass die meisten Sanierungsarbeiten im Mittelland durchgeführt wurden, mit wenigen Ausnahmen im Graubünden, im Wallis und im Jura. Diese Beispiele werden daher für Wohn- und Industriegebiete repräsentativ sein, da einige Deponien bereits durch Gebäude wie Wohnhäuser oder Sportzentren überbaut waren oder nach der Wiederherstellung des Bodens als landwirtschaftliche Flächen genutzt wurden.

Bei den Recherchen in den Archiven des BAFU wurden für jede Deponie verschiedene Informationen gesammelt:

- **Allgemeine Angaben:** Kanton, Gemeinde, Bezeichnung, geografische Koordinaten, Fläche, Betriebsjahre, Abfallvolumen.
- **Art des Abfalls**
- **Schutzgüter:** Grundwasser, Oberflächenwasser, Boden, Luft.
- **Chemie des Sickerwassers:** Ergebnisse der verschiedenen chemischen Analysen des Sickerwassers der Deponie.
- **Grund- und Oberflächenwasserchemie:** Ergebnisse der verschiedenen chemischen Analysen.

¹⁰ Die Widmung der Nutzungszonen liegt in der Kompetenz der Gemeinden. Bei belasteten Standorten ist eine Stellungnahme der kantonalen Umweltbehörde erforderlich.

- **Bodenanalysen:** Ergebnisse der verschiedenen chemischen Analysen.
- **Gasanalysen:** Ergebnisse der verschiedenen chemischen Analysen.
- **Sanierung:** Datum, Methode, Beschreibung, Ursache, Bemerkungen, aktuelle Verwendung.

Anschliessend wurden die Informationen in elektronischer Form gesammelt, wobei die Daten nach den zu schützenden Gütern geordnet und gleichzeitig die Art der Schadstoffe und die verschiedenen Sanierungsmethoden erhoben wurden.

Die Deponien wurden nach der Art der zu schützenden Güter klassifiziert, die von der Verschmutzung betroffen sind, wobei sich zeigte, dass in vielen Fällen Oberflächengewässer betroffen sind. Der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers aus der Deponie wurde ebenfalls besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Häufig sind mehrere Grundstücke von der Verschmutzung durch eine Deponie betroffen. Eine Tabelle mit den erhobenen Daten ist im Anhang beigefügt (siehe Anhang 1). Es wurde eine Klassifizierung der Schadstoffe und Sanierungsmethoden nach Repräsentativität des zu schützenden Gutes vorgenommen.

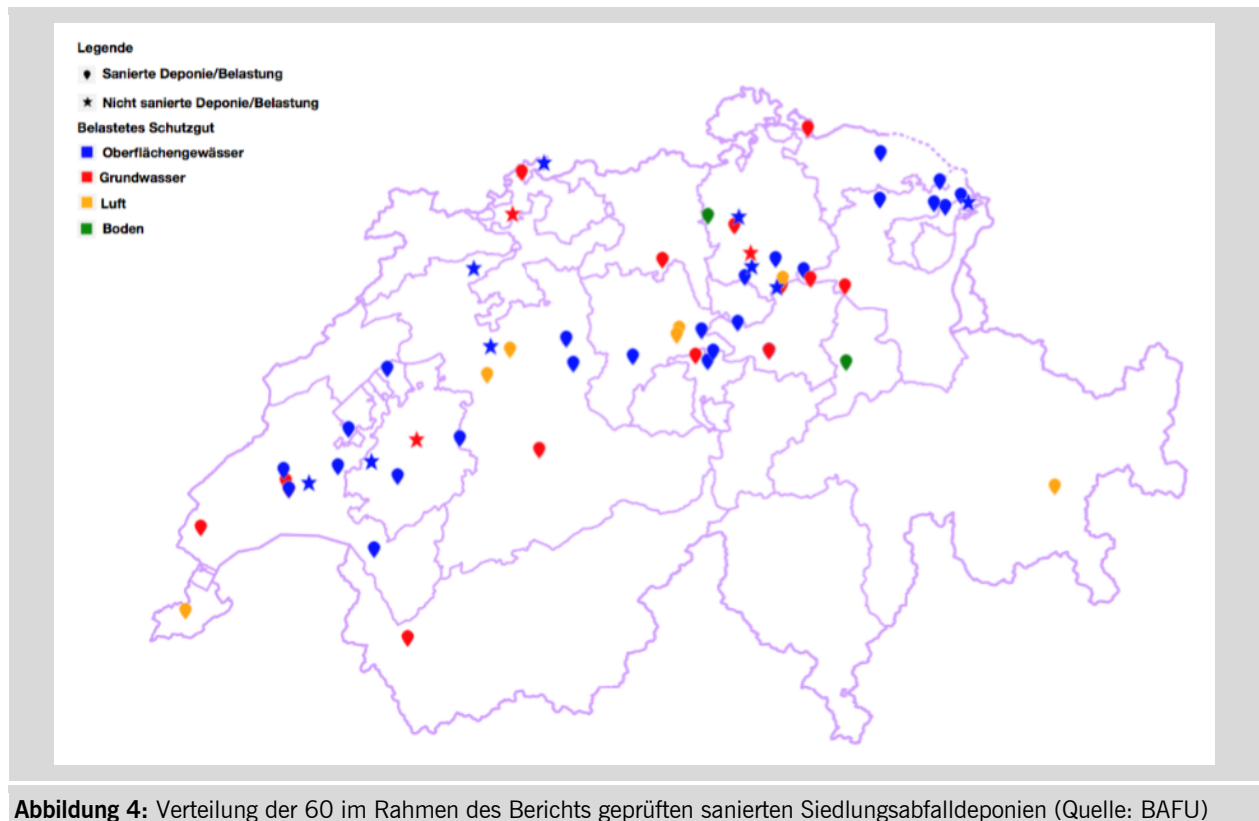
Tabelle 2: Zusammenstellung der sanierten Siedlungsabfalldeponien

Schutzgut	Stoffe (in der Reihenfolge der Bedeutsamkeit als Sanierungsauslöser)	Anzahl
Grundwasser	Halogenierte Kohlenwasserstoffe, Chromat, Zink, Blei, Kupfer, Quecksilber (Ammonium, Nitrit)	24
Oberirdische Gewässer	Ammonium, Nitrit, halogenierte Kohlenwasserstoffe, Blei, Kupfer, Zink, Arsen, Chromat (DOC, Eisen, Mangan)	41
Luft	Methan, Kohlendioxid, Benzol, halogenierte Kohlenwasserstoffe, (Wasserstoff)	16
Boden	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Blei, Zink, Quecksilber, Arsen, Chrom, Cadmium	7

Bei einigen Deponien wurde die Sanierung nicht durch eine chemische Verschmutzung, sondern durch die Gefahr von Erdrutschen und Abrutschen der Abfälle verursacht (Vgl. Anhang 1).

Die verschiedenen Berichte über die schweizweit durchgeführten Sanierungsprojekte heben einige typische Schadstoffarten hervor:

- Ammonium: sehr häufig im Sickerwasser, aber auch im Grund- und Oberflächenwasser vorhanden.
- Methan / Kohlendioxid im Deponiegas.
- Schwermetalle: im Grundwasser, Boden oder Sickerwasser vorhanden.
- Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) im Sickerwasser
- Organochlorverbindungen in Sickerwasser, aber auch im Grundwasser
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in Böden



Für Grund-, Oberflächen- und Sickerwasser ist eine der am häufigsten verwendeten Sanierungsmethoden die Umleitung von Sickerwasser in eine Kläranlage oder in die Abwasserleitung. Die Installation einer Drainage zum Sammeln des Sickerwassers aus der Deponie erfolgt häufig vor der Einleitung in die Kläranlage. In einem Fall wurde der Ansatz des überwachten natürlichen Abbaus (MNA) bevorzugt, bei dem die natürlichen biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse eingesetzt werden, um die Konzentration und Mobilität von Schadstoffen zu reduzieren.

Eine der Behandlungsmethoden ist diejenige mit natürlichen Pflanzenkläranlagen, welche den biologischen Abbau von Schadstoffen ermöglicht, die im Sickerwasser der Deponie vorhanden sind. Dazu wird das Wasser durch mehrere Becken geleitet und sein Schadstoffgehalt durch Bakterien reduziert.

Bei deponiegasbedingten Verschmutzungen können Gaspumpen mit vertikalen Brunnen und eine Gasaufbereitungsanlage installiert werden. Eine andere Methode, die jedoch näher am Prinzip des Containments liegt, ist die Installation eines Drainagesystems zum Auffangen der Gase. Es ist auch möglich, die Deponie zu belüften oder die Porenluft abzusaugen.

Von den geprüften Standorte wurden solche saniert und teilweise sogar wieder überbaut. Je nach Art des Schutzguts und der Art des Schadstoffs ergeben sich unterschiedliche Sanierungsmethoden, welche ihrerseits wieder erlauben, auf Deponien zu bauen, was durch mehrere Beispiele veranschaulicht wird.

WICHTIG

Für den vorliegenden Bericht wurden Akten der rund 60 sanierten und mit VASA-Geldern unterstützten Siedlungsabfalldeponien ausgewertet. Diese sind nicht zwingend repräsentativ für die Vielzahl der vorhandenen alten Siedlungsabfalldeponien.

3.4. Typologie von Siedlungsabfalldeponien

Obwohl in der Realität jede Deponie einen Einzelfall darstellt, werden diese in einzelne Typen zusammengefasst (siehe unten Abb. 5). Von grosser Bedeutung ist die Durchlässigkeit des «gewachsenen Untergrundes». Falls dieser gut durchlässig ist (z.B. Kies in einer ehemaligen Abbaugrube), migriert das Sickerwasser in das Grundwasser (blaue Pfeile); falls der Untergrund eine geringe Durchlässigkeit aufweist, tritt das Sickerwasser an der Oberfläche aus (blaue Punkte).

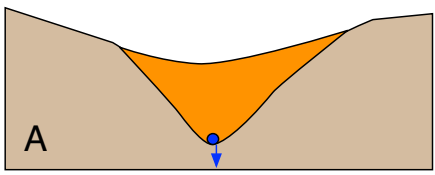
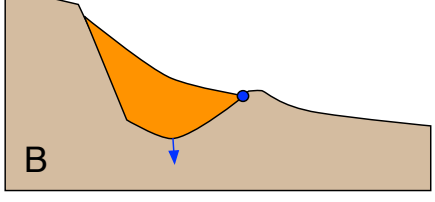
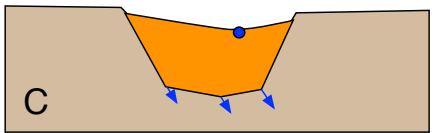
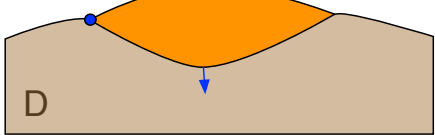
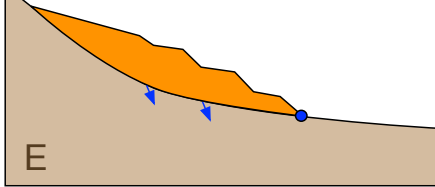
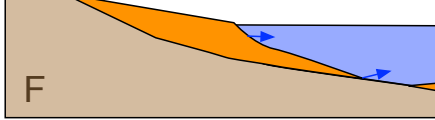
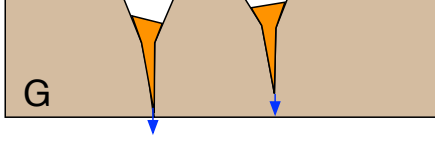
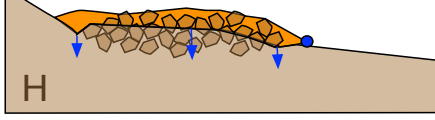
 A	Talfüllung: Das Bachwasser wird in Betonrohren unter der Deponie durchgeführt. Beton hat nur eine beschränkte Standzeit, Sickerwasser gelangt in das Bachwasser. Ein Zusammenbruch der Rohre führt zum Einstau der Deponie. Ablagerungen in Tälern und Tobeln sind sehr häufig und machen Probleme.
 B	Abbaustellen im Festgestein: Im Fels staut sich die Deponie ein, Sickerwasser tritt am Deponiefuss aus und gelangt in der Regel in ein oberirdisches Gewässer. Felswasserzutritte im Zustrom sind häufig, auch Freisetzungen über Klüfte oder Schichtgrenzen sind möglich.
 C	Abbaugruben: Bei ehemaligen Abbaustellen von Torf in Mooregebieten staut sich die Deponie auf und Sickerwasser gelangt in die Vorflut. Bei alten Kiesgruben exfiltriert das Sickerwasser meist in das Grundwasser. Mit Siedlungsabfällen verfüllte Kiesgruben sind im Mittelland sehr häufig.
 D	Hügeldeponie: Bei dichtem Untergrund fließt Sickerwasser am tiefsten Punkt aus. Hügeldeponien sind nicht sehr häufig. Da hier die Sickerwässer im natürlichen Gefälle fließen, erleichtert dies eine Sanierung.
 E	Hangdeponien: Bei dichtem Untergrund ist das Sickerwasser einfach zu fassen. Ab ca. dem Jahr 2000 häufig in Gebirgsgegenden gebauter Deponietyp. Sickerwasser migriert an die Deponiebasis und tritt am Deponiefuss aus.
 F	Uferschüttung an Flüssen und Seen: Sickerwasser exfiltriert unkontrolliert in das oberirdische Gewässer. Häufig vorkommender Depo-nietyp bei Uferaufschüttungen, in Städten vielfach überbaut.
 G	Karstdeponie: Häufig in Kalken realisierte Ablagerungsmethode, v. a. im Juragebirge und z.T. auch in den Voralpen. Sickerwasser ex-filtriert unkontrolliert in das Karstsystem.
 H	Ablagerung in Bergsturzgebiet: Bergstürze eignen sich nicht gut für landwirtschaftliche oder höherwertige Nutzungen und wurden deshalb für Ablagerungen genutzt. Sickerwasserpfade sind meist diffus.
	

Abbildung 5: Typologien von Deponien

4. Sickerwasser

4.1. Entstehung von Sickerwasser

Die Emission von Sickerwässern in die beiden Schutzgüter Grundwasser und oberirdische Gewässer war der Auslöser von 41 der 60 beim BAFU dokumentierten sanierten Siedlungsabfalldeponien. In den meisten Fällen waren die oberirdischen Gewässer gefährdet, in 24 Fällen bildete – oft zusätzlich – die Belastung von Grundwasser im unmittelbaren Abstrom des Standortes oder in Trinkwasserfassungen den Sanierungsauslöser.

Das Schutzgut „oberirdische Gewässer“ wurde primär durch Ammonium, Nitrit, Nitrat und gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) so stark gefährdet, dass eine Sanierung notwendig war (vgl. Kap. 3). In seltenen Fällen bildeten – meist zusätzlich – Kohlenwasserstoffe, Antimon, Kupfer, Arsen, Cadmium, Chromat und Nickel den Auslöser für die Sanierung.

Alte Siedlungsabfalldeponien sind in der Regel gegenüber Wasser nicht abgedichtet. Hingegen findet eine Aufnahme von oxidierendem Sauerstoff aus der Atmosphäre, wie dies während des Betriebs möglich war, nicht oder kaum mehr statt.

Regenwasser, Hang- oder Grundwasser sickert in den Ablagerungskörper ein und das Deponiegut sättigt sich bereichsweise oder, je nach Situation, vollständig mit Wasser. Wasser in der Deponie ist eine Grundvoraussetzung dafür, dass mikrobiologische Prozesse überhaupt stattfinden können und sich dabei Abbaustoffe im Sickerwasser lösen. Auch Deponiematerial, welches nicht im wassergesättigten Bereich liegt, enthält Wasser und ist «bergfeucht». Allerdings können ausnahmsweise auch trockene Bereiche vorkommen in denen, ohne Wasser, kein mikrobiologischer Abbau von organischem Material stattfindet (vgl. Abbildung 6a).

Bei neueren Deponien ab ca. 1980 wird darauf geachtet, dass mittels Basis-, Flanken- und Oberflächenabdichtungen kein Wasser in die Ablagerungen eindringen kann. Dies hat zur Folge, dass organisches Material – welches ohnehin nicht mehr deponiert, sondern verbrannt werden sollte – nicht mehr abgebaut wird und somit der Sickerwasseranfall auf ein Minimum reduziert wird. Unter Fachleuten wird diskutiert, ob durch das Trockenhalten von Deponien die Abbauprozesse nicht einfach auf spätere Zeiten verschoben werden.



Abbildung 6a:

Zeitung von 1884 (wohl umgelagert) aus einem Baggerschlitz (2014) aus einer Siedlungsabfall-Deponie in einer ehemaligen Kiesgrube. Da kein Wasser zum Papier gelangte, wurde dieses mikrobiell nicht zersetzt.

Auch in nassen Deponien gibt es trockene Bereiche mit minimaler mikrobiologischer Aktivität, z.B. wenn zur gleichen Zeit toniger Aushub und Kehrlicht abgelagert wurde

Durch die mikrobiologisch bedingte Sauerstoffzehrung im Deponiekörper ändern sich die geochemischen Bedingungen im Vergleich zu den aeroben Bedingungen an der Luft grundsätzlich. Das Milieu wird anaerob und reduzierend: die Abbauprozesse werden langsamer.



Abbildung 6b: Eisen-Mangan im Sickerwasser Altdeponie „Chüelochtobel“, Küssnacht am Rigi



Abbildung 6c: Reduzierendes Sickerwasser kann auch aus Mooren austreten. Nicht zu verwechseln mit Deponiewasser oder Ölfilm. Gelöstes Fe^{2+} oxidiert an der Luft (bakteriell) zu Fe^{3+} .

Untrügliche Hinweise auf reduzierende Bedingungen in einem Deponiekörper sind die Ausfällungen von Eisen- und Manganoxiden beim Austritt von Sickerwasser an die Atmosphäre (vgl. Abb. 6b und 6c). Es handelt sich dabei um lästige, aber kaum schädliche Einwirkungen auf oberirdische Gewässer, falls sich nach weitgehender Durchmischung keine Verfärbung oder Trübung im Abstrom ergibt.

Wie aus den Bildern hervor geht, können solche Ausfällungen jedoch den Durchfluss in Rohrleitungen verkleinern und so in letzter Konsequenz zum Einstau der Deponie führen. Folge davon sind unkontrollierte Sickerwasseraustritte, ggf. ungewollte Aufstauungen und Rutschungen (siehe Kap. 3.8).

Ein Kilogramm Trockensubstanz von organischem Material enthält durchschnittlich 450 g Kohlenstoff, 420 g Sauerstoff, 55 g Wasserstoff, 25 g Stickstoff, 5 g Schwefel und 2 g Phosphor, der Anteil von Asche (mineralisches Material wie Silikate oder Karbonate) beträgt etwa 40 g¹¹. Pflanzliches Material enthält zusätzlich etwa 50 % Wasser, welches auch zum mikrobiologischen Abbau beiträgt resp. diesen erst ermöglicht.

Beim anaeroben Abbau von organischem Material wird der **Stickstoff** in wasserlösliche Moleküle umgewandelt: in Nitrit (NO_2^-) und dann in Ammonium (NH_4^+). Dieser Prozess ist in der Natur weit verbreitet und führt zum Beispiel in Moorwässern zu Ammonium-Konzentrationen von bis zu 5 mg/l. Untersuchungen¹² von sich in Mooren befindenden Siedlungsabfalldeponien haben gezeigt, dass die Ammonium-Konzentrationen in solchen Sickerwässern grösser als 6 mg/l sind und meistens im Bereich zwischen 15-25 mg/l liegen.

Obwohl der Anteil von Stickstoff im organischen Material nur gering ist (ca. 25g/kg TS), stellt die Verkleinerung des Gehalts von im Sickerwasser gelösten Stickstoff-Verbindungen langfristig wohl eine der wesentlichen Aufgaben bei der Neunutzung von alten Siedlungsabfalldeponien dar.

Das beim Abbau von organischem Material entstehende Kohlendioxid (CO_2) löst sich im Deponiewasser gemäss Carbonat-Hydrogencarbonat-Gleichgewicht als Hydrogencarbonat (HCO_3^-), sodass nur ein Anteil des CO_2 als gasförmige Komponente in der Deponie verbleibt oder aus dieser entweicht. Hydrogencarbonat im Sickerwasser erhöht die Härte des Sickerwassers. Diese Erhöhung ist temporär, da es mit Magnesium- und vor allem Calciumkationen reagiert und als feste resp. zunächst geförmige Mineralphasen ausfällt.

Neben organischem Material werden in reduzierendem Milieu auch Metalle in Lösung gebracht. Vor allem in Gegenwart von Schwefel resp. von H_2S korrodiert metallisches Eisen zu wasserlöslichen Fe^{2+} -Ionen, welche, wie weiter oben beschrieben, bei Kontakt mit der Atmosphäre oxidieren und zu Fe^{3+} -Ausfällungen führen. Auch Mangan, Arsen und Antimon haben unter reduzierenden Bedingungen eine hohe Löslichkeit und können so im Sickerwasser erhöhte Konzentrationen erreichen.

Hingegen werden unter oxidierenden Bedingungen leichtlösliche Ionen (z.B. Chrom und Uran) unter reduzierenden Bedingungen immobil und kommen in Deponiesickerwässern deshalb nur ausnahmsweise vor.

Synthetische organische Verbindungen wie Lösungsmittel werden unter reduzierenden Bedingungen in kleinere Moleküle gespalten, wobei auch Verbindungen entstehen können, welche toxischer sind als die Ausgangsprodukte. So ist Vinylchlorid (VC) deutlich giftiger als die anderen Abbauprodukte von Lösungsmitteln wie PER oder TRI (vgl. Abb. 7). Vinylchlorid kann in alten Deponien bis zu Ethen (resp. Ethylen) reduziert werden, welches im Vergleich zu VC kaum giftig ist und über den Gaspfad in die Atmosphäre entweicht.

¹¹ H. J. M. Bowen (1979): Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press London

¹² Schenker, Korner + Partner GmbH (2007): Geogene Ammonium-, Nitrit- und Nitratgehalte von anoxischen Grundwässern. Bericht im Auftrag des BAFU. 33 Seiten.

Es gibt auch geringlösliche und schlecht abbaubare Schadstoffe, welche dispersiv mit dem Sickerwasser mobilisierbar sind, wie z.B. POP (*persistent organic pollutants*), jedoch in alten Siedlungsabfalldéponien selten vorkommen. Aktuell werden auch PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) in die Untersuchungen eingebunden und genauer geprüft.

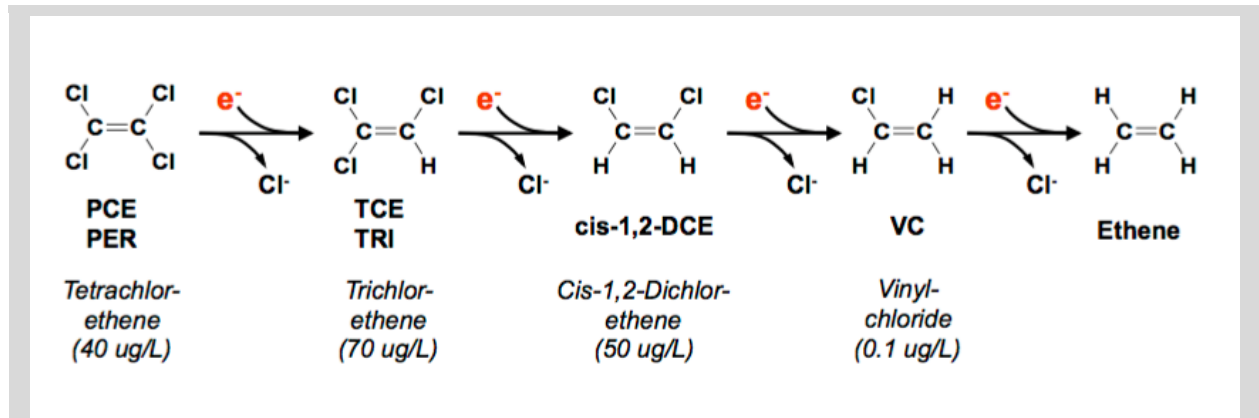


Abbildung 7: Reduktive Dechlorierung von chlorierten Ethenen (Quelle: Daniel Hunkeler¹³)

4.2. Untersuchung von Deponiesickerwasser

Sickerwässer von alten Siedlungsabfalldéponien können zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen auf das Grundwasser und auf oberirdische Gewässer führen. Solche werden in der Regel im Rahmen von Altlastenuntersuchungen analysiert und beurteilt (Altlastenverordnung und Vollzugshilfen des BAFU).

Im Hinblick auf Neunutzungen von alten Siedlungsabfalldéponien ist insbesondere Art. 3 der Altlastenverordnung von Bedeutung:

«Belastete Standorte dürfen durch die Erstellung oder Änderung von Bauten und Anlagen nur verändert werden, wenn sie nicht sanierungsbedürftig sind und durch das Vorhaben nicht sanierungsbedürftig werden; oder ihre spätere Sanierung durch das Vorhaben nicht wesentlich erschwert wird oder sie, soweit sie durch das Vorhaben verändert werden, gleichzeitig saniert werden.»

Derselbe Grundsatz gilt auch für Einwirkungen der Deponie auf oberirdische Gewässer, auf die Luft und den Boden.

Das Vorgehen für Altlastenuntersuchungen inkl. Analysenprogramme und zulässige Konzentrationswerte ist heute gut bekannt und es gibt eine Vielzahl von fachkundigen Personen und Firmen, welche solche Untersuchungen durchführen.

Betrachtet man das Sickerwasser aus Deponien über lange Zeiten, also über mehrere Jahrzehnte,

¹³ Daniel Hunkeler (2016): »Verhalten organischer Schadstoffe«. Zentrum für Hydrogeologie und Geothermie (CHYN) Universität Neuenburg.

http://www.rohstoff.unibe.ch/rohstoff/uploads/media/ausbildung/PDF%20Altlastenkurs%202016/08_09.%20Hunkeler_2016.pdf

verringern sich in der Regel sowohl die Menge wie auch der Gehalt an gelösten Stoffen. Lysimetermessungen im Grossmassstab (je 60 Tonnen Abfall) mit unterschiedlichen Hausmülltypen (lose, verdichtet, mit oder ohne Beimischung von Klärschlamm, Industrieabfällen) über einen Zeitraum von fünf Jahren (1987-1991) haben eine Verringerung des Abflusses bei verdichtetem Hausmüll mit Klärschlamm um einen Faktor von mindestens 3 ergeben¹⁴. Grund für die Abflussverringering über die Zeit ist die Verdichtung des Deponiegutes durch den Abbau von organischem Material, gravitativer Setzungen und Mineralisierung mit der Folge, dass sich die Wasserdurchlässigkeit des Deponiegutes verringert. Auch aus den nur spärlich vorhandenen Langzeitmessungen über den Stoffgehalt von Deponiesickerwässern gibt es Hinweise, dass sich auch die Konzentrationen der Stoffe über die Zeit verkleinern (vgl. Abbildungen 8).

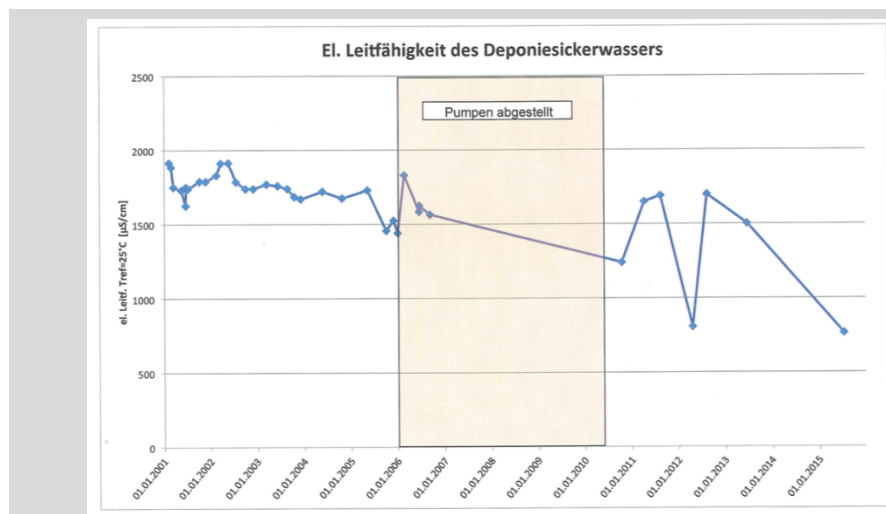


Abbildung 8a:

Ganglinie der elektrischen Leitfähigkeit als Summenparameter des Stoffgehalts im Sickerwasser über den Zeitraum von 2001-2016. Die Deponie wurde 1989 geschlossen, die älteste vorhandene Messung der elektrischen Leitfähigkeit stammt aus dem Jahr 1998 und betrug 2600 $\mu\text{S/cm}$.

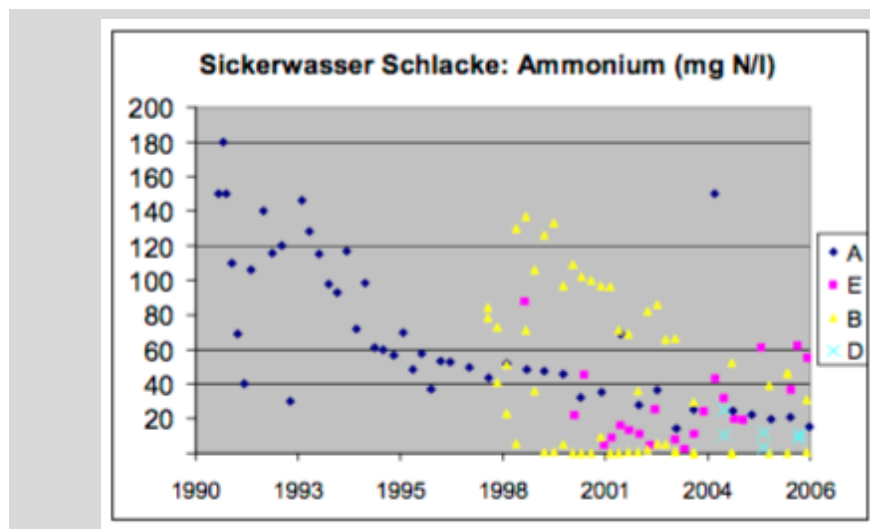


Abbildung 8b:

Ganglinie für Ammonium aus Schlacken-Deponien. In blau die Werte einer Deponie, bei welcher, im Gegensatz zu anderen (gelb, pink) seit 1996 kaum mehr Schlacke abgelagert wurde. Quelle: L. S. Morf & E. Kuhn (2010): Qualität von Sickerwasser aus Zürcher Schlackenkompartimenten. Baudir. Kt. ZH, A-WEL

¹⁴ Spillmann, Dörrie & Struve (Hsg.) 2006 : Langzeitgefährdung der Trinkwasservorkommen durch Abfalldeponien. Reihe «Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis» Band 139, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin. (Vgl insb. Kap. 5.2.).

Dies sind Argumente für die von Colombi et al. (1984) formulierte These, dass «nach einer Betriebs- und Übergangszeit von 50 bis 100 Jahren die (Deponie) Abwässer nicht mehr gereinigt zu werden brauchen» (vgl. Fussnote 15).

4.3. Einwirkung auf Grundwasser

In den 50er Jahren hat man die Gefahr von belasteten Sickerwässern auf die Grundwasserqualität erkannt und neue Deponiestandorte zunehmend ausserhalb von Grundwassergebieten gesucht und solche auch gefunden¹⁵. Wie auch Untersuchungen aus dem Archiv des BAFU zeigen (vgl. Kap. 3.2), sind Grundwasserverunreinigungen bei alten Siedlungsabfalldeponien vergleichsweise selten.

Einwirkungen von Sickerwässern aus alten Siedlungsabfalldeponien sind vielfältig und müssen im Rahmen von Altlastenuntersuchungen ermittelt werden. Die zulässigen Konzentrationswerte sind in der Regel um einen Faktor 5-20 strenger (d.h. kleiner) als beim Oberflächengewässer. Der berechtigte Wille des Gesetzgebers ist es, im unmittelbaren Grundwasser-Abstrom einer Deponie bezüglich Wasserinhaltsstoffen mindestens den Qualitätsanforderungen von Trinkwasser zu genügen.

4.4. Einwirkungen auf oberirdische Gewässer

Bei den meisten bislang sanierten alten Siedlungsabfalldeponien war der hohe Ammoniumgehalt im Sickerwasser, welches in ein oberirdisches Gewässer gelangte, der Sanierungsauslöser (vgl. Kap. 3.2). Die Fracht und Konzentrationen von löslichen Stickstoffverbindungen (Ammonium, Nitrit) im Sickerwasser von alten Siedlungsabfalldeponien dürfte meistens über dem Wert liegen, welche eine direkte Einleitung des Sickerwassers in ein oberirdisches Gewässer erlauben würde¹⁶. Einen Überblick über die Untersuchung von belasteten Standorten mit Einfluss auf oberirdische Gewässer, ihre Gefährdungsabschätzung oder auch die Festlegung der allfälligen Sanierungsziele gibt die Vollzugshilfe «Belastete Standorte und Oberflächengewässer»¹⁷.

Neben den direkten schädlichen Einwirkungen von Sickerwasser auf oberirdische Gewässer (nach AltIV) sind bei Hauskehrrichtdeponien, welche nahe oder über eingedolten oberirdischen Gewässern liegen, folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Betonrohre, durch welche eingedolte Bäche unter der Deponie geführt werden, werden nach einigen Jahrzehnten instabil (vgl. Abbildung 9a). Der Grund dafür sind chemische Angriffe auf die Kalkanteile des Betons durch Säuren und/oder ein treibender Angriff durch Sulfate im Sickerwasser¹⁸. Zuerst wird Sickerwasser bei den Rohrverbindungen in den Bach

¹⁵ C. Colombi et al. (1984): Neue Anforderungen an die Deponietechnik. Schweizer Ingenieur und Architekt 15/84, p. 283-287

¹⁶ Typische Werte für die Ammoniumkonzentration im Sickerwasser von alten Siedlungsabfalldeponien liegen zwischen 16 und 26 mg/l. Es gibt auch Deponien, welche Ammoniumkonzentrationen von mehreren Hundert mg/l im Sickerwasser aufweisen. Solche Deponien enthalten in der Regel viele Abfälle aus der Industrie und/oder mit Schlacken.

¹⁷ BAFU (Hrsg.) 2020: Belastete Standorte und Oberflächengewässer. Übersicht und Hilfestellung für den Altlastenvollzug. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 2015: 59 S.

¹⁸ Sulfat reagiert mit Bestandteilen des Betons unter Bildung von Gips oder v.a. von Ettringit, einem Calcium-Aluminium-Sulfat mit viel Kristallwasser. Gips und Ettringit haben deshalb ein deutlich grösseres Volumen als das Ausgangsmaterial, und durch den beim Wachstum entstehenden Kristallisationsdruck ergeben sich grosse mechanische Spannungen, die zu Rissen und Abplatzungen im Beton führen. Im grossen Massstab treten Schäden durch Sulfattreiben bei Untertagebauten

gelangen und das ganze Rohr wird durch den Überlagerungsdruck deformiert (vgl. Abbildungen 9).

- Kommt es zum Kollaps der Betonrohre, steigt der Wasserspiegel in der Deponie an, dies im Maximalfall bis zum totalen Einstau. Daraus entsteht die Gefahr, dass die Deponie instabil wird und zu rutschen beginnt (vgl. Abbildung 10).

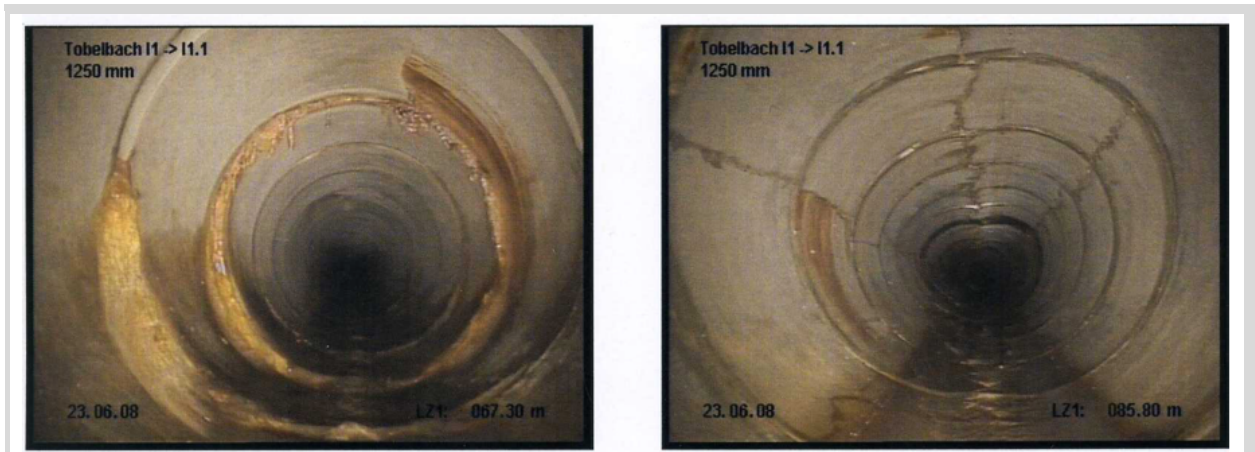


Abbildung 9a: Kanalfernsehaufnahmen von Betonrohren unterhalb einer Siedlungsabfalldeponie. Rohrdurchmesser 120 cm. Eindringen von Deponiesickerwasser mit karbonatischen, sulfatischen und Fe-Mn-Ausfällungen entlang von Rohrmuffen. Ursache sind kalklösende Säuren, treibende Sulfate sowie Scherkräfte im Deponiekörper.

Abbildung 9b: Kompressive Verformung mit Rissbildung von chemisch geschwächten Betonrohren, unterstützt durch starke Überlast. Die Rohre befinden sich im mit Sickerwasser eingestauten Bereich der überliegenden Deponie.

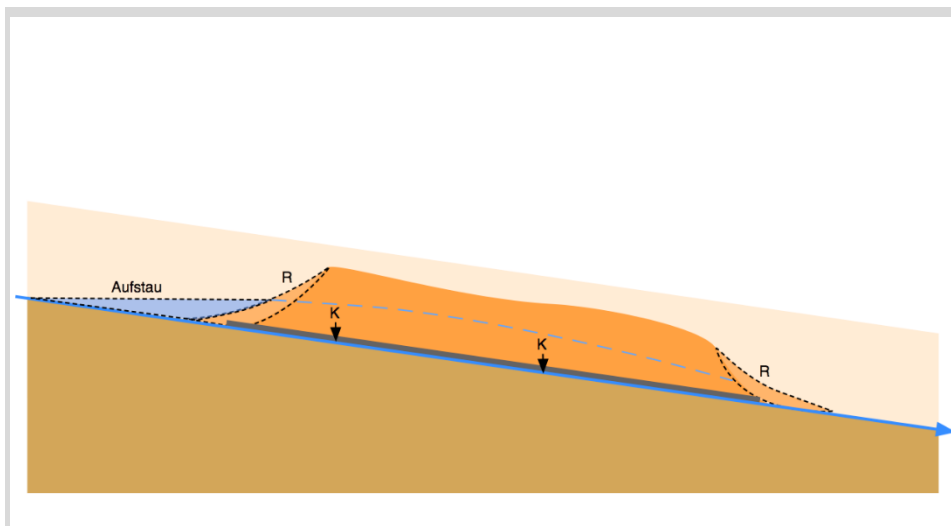


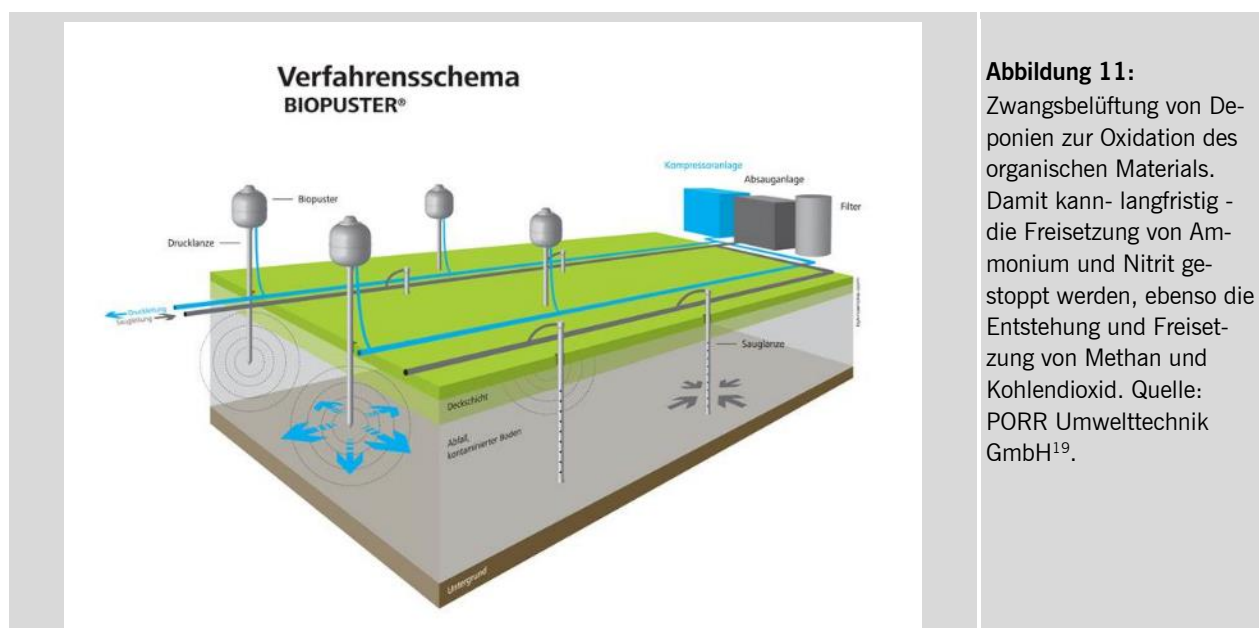
Abbildung 10: Gefährdungsbild einer Talfüllung-Hauskehrricht-deponie, bei dem der Bach in Betonrohren unter der Deponie geführt wurde. Beim Kollaps (K) der Rohre oder bei Rutschungen (R) der Deponieflanken kommt es zum Aufstau. Dadurch steigt der Wasserspiegel in der Deponie an und Teile oder die ganze Deponie können ins Rutschen geraten.

in Evaporit-reichen Formationen auf, z.B. im Gipskeuper des Jura gebirges auf.

4.5. Massnahmen zur Sickerwasserproblematik

Für die Neunutzung von alten Siedlungsabfalldeponien sind im Wesentlichen folgende Massnahmen zur Sickerwasserbehandlung möglich:

- Entfernung des Deponie-Inhalts und Wiederauffüllung mit sauberem Aushubmaterial. Damit wird die Bildung von Sickerwasser an der Quelle verhindert. Gründe sind die Attraktivität von siedlungsnahen Bauparzellen und dem regional unterschiedlich fehlenden Deponieraum für sauberen Aushub, und weniger die Wertschöpfung der rückgewonnenen Metalle (vgl. Kap. 8).
- Belüftung des Deponiekörpers: um den Abbau von organischem Material mittels Oxidation zu beschleunigen, wird Luftsauerstoff in die Deponie eingebracht. Ammonium wird über Nitrit zu Nitrat umgesetzt. Dazu kann Luft in vorhandene Migrationspfade (z.B. Sickerleitungen) eingeblasen resp. durch solche abgesaugt werden. Achtung: dabei dürfte nur ein Teil der Deponie oxidiert werden.
- Zu erwähnen ist auch das Verfahren BIO-PUSTER®, bei dem Deponien möglichst vollständig oxydiert werden. Dabei wird Luft mit Druckluftstössen eingebracht, was eine weitere Reichweite der Luft erlaubt, auch in Bereiche, die sonst nicht belüftet werden (vgl. Abb. 11).



- Verdichtung resp. Auspressen der Deponie mittels Belastung. Das Auftragen von mineralischem Material (z.B. Tunnelausbruch oder Felsaushub) in ausreichenden Mengen bewirkt, dass der Deponie-Inhalt verdichtet und somit die Wasserdurchlässigkeit des Deponiekörpers verringert wird. Damit wird zwar die Stoff-Konzentration des Sickerwassers nicht verkleinert, jedoch die Sickerwassermenge und somit die Stoff-Frachten. Die Verkleinerung der Stoff-Fracht für Stickstoff- und Phosphor-Verbindungen spielt bei Fliessgewässern eine wesentliche

¹⁹ PORR Umwelttechnik GmbH, Wien. <https://put.at/leistungen/abfallmanagement/biopusterr/>

Rolle. Sind diese Frachten gering, können Deponie-Sickerwässer in ein oberirdisches Gewässer eingeleitet werden; zur Beurteilung dient das Modulstufen-Konzept²⁰. Die Vorbelastung der Deponie verringert nicht nur die Schadstoff-Fracht im Sickerwasser, sondern verringert auch die Gasproduktion (vgl. Kap. 5) sowie Setzungen (vgl. Kapitel 6).

- Fassung des Sickerwassers und Anschluss an die Kanalisationsleitung, welche bei Neubauten ohnehin zu erstellen ist. Moderne und grössere Abwasserreinigungsanlagen (ARA) wurden in den letzten Jahren mit aeroben Nitrifizierungsverfahren ausgerüstet. Damit können Ammonium und Nitrit effektiv abgebaut und nicht nur verdünnt werden, wie dies früher der Fall war.
- Fassung des Sickerwassers und Behandlung in einer neu zu erstellenden Kleinkläranlage (KLARA). Diese häufig installierten, einfach gestalteten Anlagen dienen zur Behandlung von Abwässern aus Häusern und Betrieben im ländlichen Raum ohne Anschluss an kommunale oder regionale Kläranlagen (vgl. Empfehlungen des Verbandes Schweizer Abfall- und Gewässerschutzfachleute VSA²¹). Solche KLARA verwenden organisch leicht abbaubares Material (Fäkalien) zur Nitrifizierung. In alten Siedlungsabfalldeponien sind leicht abbaubare Stoffe kaum mehr vorhanden. Konventionelle KLARA sind somit für die Nitrifizierung von Deponie-sickerwässern deshalb ungeeignet. Bei KLARA für Deponiesickerwässer muss leicht abbaubares Material (z.B. Melasse) ständig zugegeben werden, damit die Kohlenstoffversorgung der nitrifizierenden Bakterien gewährleistet wird. Eine Dosieranlage muss elektronisch und mittels Sensoren gesteuert und die mit Membranfilter ausgerüsteten Anlagen müssen regelmässig gewartet werden. Solche Anlagen sind in den meisten Fällen teuer in der Beschaffung und aufwändig im Betrieb und Unterhalt.
- Fassen von Sickerwasser und Behandlung in einer Pflanzenkläranlage (PKA, vgl. Abb. 12). Da das Hauptproblem von Sickerwässern die zu hohen Ammonium-Frachten sind, eignen sich Pflanzenkläranlagen sehr gut für die Behandlung. Solche Anlagen sind vereinzelt in Betrieb, mit einem Wirkungsgrad von 95% und mehr. Allerdings wurden auch Pflanzenkläranlagen realisiert, welche den Anforderungen nicht genügen; dies z.B. weil a.) die Anlagen an sehr schattigen Orten installiert wurden, b.) die PKA weder die Gehalte von Sulfat noch Chlorid verringern, c.) gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) nicht oxidieren können oder d.) die Anlage grundsätzlich mangelhaft geplant, erstellt und betrieben wird.

Aus unserer Sicht haben PKA ein sehr grosses Potential zur Behandlung von Sickerwässern aus alten Kehrdeponien. Aus diesem Grund wird das Thema PKA, mit Unterstützung des Biologen Dr. Andreas Bally, einem Spezialisten von Pflanzenkläranlagen, hier vertieft abgehandelt.

²⁰ Liechti Paul 2010: Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Chemisch-physikalische Erhebungen, Nährstoffe. Umwelt-Vollzug Nr.1005. Bundesamt für Umwelt, Bern. 44 S.

²¹ <https://www.vsa.ch/fachbereiche-cc/siedlungsentwaesserung/abwasser-im-laendlichen-raum/kleinklaeranlagen/>

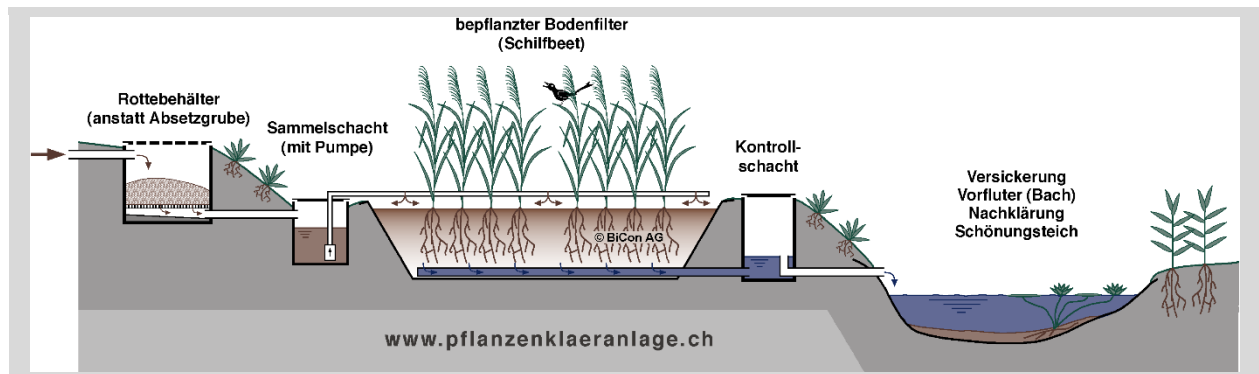


Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Pflanzenkläranlage gemäss BiCon AG, Kreuzlingen

In Pflanzenkläranlagen laufen grundsätzlich 3 Prozesse ab: a) mechanische Filtration, b) geochemische Prozesse (pH, Adsorption,...) und c) biologische Ab- und Umbauprozesse durch den Biofilm im Sand. Der oberirdische Teil der Bepflanzung selbst hat nur einen marginalen Einfluss auf die Reinigungseffizienz. Die tief wurzelnde Bepflanzung ist jedoch wichtig, damit a) der Sandfilter durchlässig gehalten wird und b) die Pflanzenwurzeln in ihrer direkten Umgebung ein Mikroklima schaffen, das sich günstig auf den Biofilm auf den Sandkörnern auswirkt. Durch Regulierung des Wasserstandes im Sandfilter, durch zumischen von spezifischen Zuschlagstoffen in den Sandfilter und durch Wahl der geeigneten Durchströmungsrichtung kann die Bodenfilteranlage für spezielle Anwendungen optimiert werden.

Als Bepflanzung haben sich in erster Linie Schilf (*Phragmites australis*) sowie Rohrkolben (*Typha latifolia*) bewährt, auch weil sie tief wurzeln. Beide Sumpfpflanzen brauchen aber viel Licht, d.h. die bepflanzten Sandfilter dürfen nicht an schattigen Stellen errichtet werden, sie brauchen gute Besonnung. Andernfalls verkümmern sie und werden von Gras, Brennnesseln (*Urtica*) oder ähnlichen Pflanzen verdrängt, die nur oberflächlich wurzeln.

Hier auch der Hinweis, dass Schilf viel Wasser in der „grünen Saison“ verdunstet; je nach Wind- und Standortverhältnissen sollen das im Bereich von 1600 mm Wassersäule pro Saison sein. Im Sommer und insbesondere nach Trockenperioden fliesst kaum oder gar kein Wasser aus PKAs ab, die dann als reine Verdunstungsanlagen laufen. Dies hat dann zur Folge, dass sich Schadstoffe im Wasser der Anlage aufkonzentrieren und nach dem Einsetzen von Regenfällen konzentrierter als üblich ablaufen. Pflanzenkläranlagen arbeiten auch im Winter zuverlässig. In Lagen über 1000 m ü.M. müssen Vorkehrungen eingeplant werden, damit die Zulaufrohre auf dem Sandfilter nicht zufrieren und verstopfen.

Deponiesickerwässer sind weitgehend biologisch abgebaut. Umgelegt auf die analytischen Parameter heisst dies, dass der CSB im Verhältnis zum BSB₅²² sehr hoch ist. Daher kann eine Pflanzenklär-

²² **CSB:** Chemischer Sauerstoffbedarf ist die Menge an Sauerstoff, welche zur Oxidation der gesamten im Wasser enthaltenen organischen Stoffe verbraucht wird. **BSB₅:** Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen gibt die Menge an Sauerstoff an, welche Bakterien und andere Kleinstlebewesen in einer Wasserprobe im Zeitraum von fünf Tagen bei einer Temperatur von 20 °C verbrauchen, um die Wasserinhaltsstoffe aerob abzubauen.

anlage beim biologischen Abbau von Kohlenstoffverbindungen wenig ausrichten. Falls jedoch Ammonium im Abwasser vorhanden ist, kann sie sehr wirkungsvoll nitrifizieren.

Nicht selten sind aber Metalle das Problem. Z.B. Eisen, das unter anaeroben Bedingungen gelöst wird und beim Austritt und Kontakt zur Luft als bräunlich-roter Schlamm ausfällt. Dieser kann dann in einer PKA abfiltriert werden, wobei das auf die Dauer die notwendige Permeabilität des Sandfilters verringert. Sind Phosphat oder Schwermetalle das Problem, kann in einem Schacht ein Adsorbermaterial, wie z.B. GEH (granuliertes Eisenhydroxid), hineingehängt werden, das dann aber von Zeit zu Zeit ausgewechselt werden muss. Je nachdem kommt auch Aktivkohle in Frage.

Ein wichtiger Aspekt bei der Planung einer PKA ist die hydraulische Dimensionierung und Abstimmung auf die Körnung des Filtersandes. Feiner Sand filtert besser, verstopft aber auch schneller und kann weniger Wasser „schlucken“. Ebenso wichtig ist die mechanische Vorreinigung, wenn das Abwasser Feststoffe/Trübstoffe enthält, die den Sandfilter verstopfen können.

Wichtig ist weiter, geeigneten Filtersand zu verwenden, d.h. gewaschenen Sand mit steiler Körnungskurve. *Dringend* abzuraten ist vom sogenannten „Wurzelraumverfahren“ nach Prof. Kickuth (resp. „Wurzelraumanlagen“), das natürliches resp. „bindiges“ Bodenmaterial mit mehr oder weniger hohen Schluff-/Lehmanteilen als Filtermatrix einsetzt. Diese Filtermatrix verstopft früher oder später immer und führt zu anaeroben Verhältnissen im Bodenfilter, die oft/meistens unerwünscht sind.

Zu achten ist ausserdem auf eine gleichmässige Durchströmung der Bodenfilter, d.h. auf eine gute Verteilung des zugeführten Abwassers und dass - bei mehrkammrigen Anlagen - kein einzelner Filter im System hydraulisch überlastet wird.

4.6. Zusammenfassung Sickerwasserbehandlung

Die im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Massnahmen sind in der Tab. 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Methoden der Sickerwasseraufbereitung

Methode	Vorteile	Nachteile
Rückbau der Deponie	Quellenstopp von Sickerwasser, Gewinnung von Deponieraum für unverschmutztes Aushubmaterial und /oder Bereitstellung von unbelastetem Baugrund	Emissionen während des Rückbaus, lange Bauzeit (Jahre), hohe Kosten
Belüftung des Deponiekörpers	Keine Aushubarbeiten. Rascherer Abbau der organischen Inhaltsstoffe.	Zeit- und kostenaufwändig, Verringerung der Sickerwasserbelastung erst nach vollständiger Oxidation des Deponiekörpers
Auspressen der Deponie mittels Vorbelastung	Kostengünstig, kann als Vorbereitung von Bauten wirken	Braucht längere Zeit, während des Auspressens gibt es mehr Schadstofffracht im Sickerwasser
Sickerwasser in Kanalisation	Die Massnahme ist einfach und entspricht dem Stand der Technik	Abwassergebühren über lange Zeiträume
Technische Kleinkläranlage	Geringer Platzbedarf	Wenig geeignet zur Sickerwasserbehandlung, Betriebskosten sind rel. hoch (ca. Fr. 20-50'000/Jahr).
Pflanzenkläranlage	Bei fachgerechter Ausführung gute Reinigungswirkung, geringe Betriebskosten	Relativ hoher Flächenbedarf; Kosten für die Anlage mit notwendigen Sandfiltern. Es braucht Sonne und Licht, in schattigen Lagen gibt es keine Photosynthese!

5. Gas

5.1. Entstehung und Auswirkungen

5.1.1. Entstehung von Deponiegasen

Deponiegase entstehen vorwiegend durch mikrobiellen Abbau von abgelagertem organischem Material sowie teilweise aus chemischen Prozessen in abgelagerten Stoffen, welche Gase freisetzen. Unter Sauerstoffabschluss wird ein wesentlicher Teil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs von Mikroorganismen zu Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) und weiteren Spurengasen abgebaut. Bei Abwesenheit von Luftsauerstoff nutzen die Mikroorganismen als Sauerstoffquelle für diesen Oxidationsprozess andere Quellen: Sauerstoff in Sulfaten (SO_4^{2-}) – wie sie in abgelagertem Gips im Bauschutt vorkommen – kann von Mikroben beispielsweise zu Schwefelwasserstoffgas (H_2S) und zum Teil auch zu elementarem Schwefel reduziert werden²³. Falls schwefelhaltige Verbindungen im Deponiegas vorhanden sind, kann dies schon in geringsten Mengen als Geruch nach faulen Eiern festgestellt werden. Bei der Nutzung von Nitraten (NO_3^-) als Sauerstoffquelle entsteht durch Denitrifikation molekularer Stickstoff (N_2). Bei Ablagerung von Metalloxiden (wie in Schlacken) kann zudem auch elementarer Wasserstoff (H_2) entstehen.

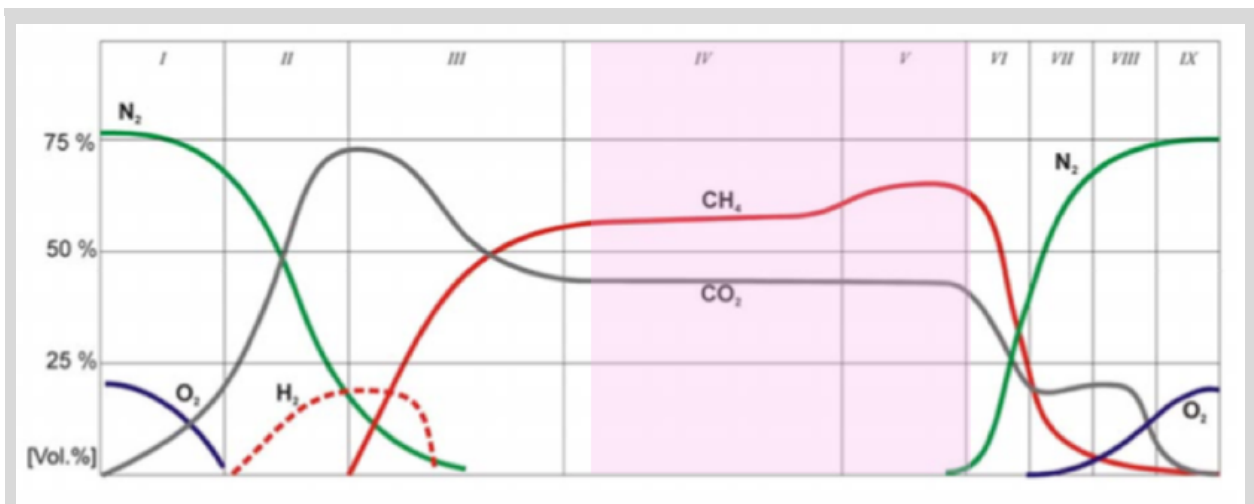


Abbildung 13: Zusammensetzung von Deponiegas in einzelnen Phasen (Quelle: Vollzugshilfe «Sicherung von Altlasten», BAFU 2007). Alte Siedlungsabfalldeponien produzieren CH_4 und CO_2 mit hohen Volumenanteilen (Methan-Phase und Langzeitphase). Ein Gasgemisch mit über 50 Vol.-% CH_4 und mehr als 30 Vol.-% CO_2 ist nicht explosiv (Vgl. Abbildung 15a), bei einer Vermischung mit Luft verändert sich jedoch die Explosionsfähigkeit gemäss Abbildung 16.

Falls molekularer Wasserstoff (H_2) auftritt, ist die Deponie noch jung (< 10 Jahre), oder es handelt sich um Deponien mit viel KVA-Schlacken. Wasserstoff im Gasgemisch führt zu einer drastischen Erhöhung der Explosionsgefahr (Knallgas).

²³ Eine detaillierte Beschreibung der Rolle von Bakterien beim anoxischen Abbau von organischem Material finden sich in: Killips & Killips (1993): An Introduction to Organic Geochemistry. Longman Scientific & Technical, John Wiley & Sons., N.Y.

In Deponien mit einem grossen Anteil an organischem Material (z.B. Siedlungsabfälle, Bausperrgut, Grüngut, Klärschlamm, organische Betriebsabfälle) können hohe Konzentrationen von brennbaren und gesundheitsgefährdenden Deponiegasen entstehen. Diese sind abhängig von der Abbaubarkeit und Menge des abgelagerten organischen Materials sowie den herrschenden Bedingungen im Deponiekörper (z.B. Durchlüftung, Feuchte, Temperatur). Die Gasproduktion verändert sich mit der Zeit: In den Anfangsphasen (stabile Methanphase, Langzeitphase) wird viel Methan und Kohlendioxid produziert. Dies kann zu einem Gasüberdruck und zu einer erhöhten Gefahr durch die Deponiegase innerhalb und ausserhalb des Ablagerungsstandortes führen. Mit den Jahren wird weniger Deponiegas produziert und die Gaszusammensetzung ändert sich. Die häufigsten Deponiegaskomponenten sind: Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Schwefelwasserstoff (H_2S), Wasserstoff (H_2), Kohlenmonoxid (CO) und Ammoniak (NH_3).

5.1.2. Gasemission - Gasmigration - Immissionsort

Emissionsort: Deponiegase entweichen aus dem Deponiekörper über den Weg des geringsten Widerstandes entlang gut durchlässiger Freisetzungspfade - dazu gehören zum Beispiel auch Sickerleitungen, Schächte und andere Hohlräume - an die Oberfläche (vgl. Abb. 14 & 15) und können so auch in Gebäude migrieren. In Hohlräumen (wie Schächte) können sie sich allenfalls auch sammeln.

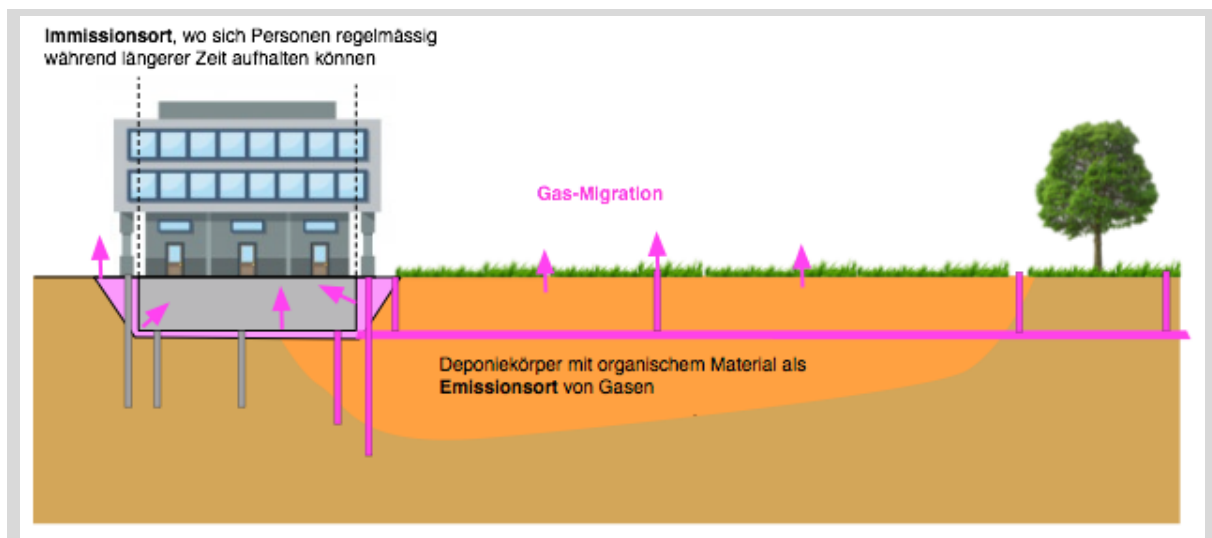


Abbildung 14: Schematische Darstellung von Gasmigrationspfaden aus Siedlungsabfalldeponien.

Gasmigration: Durch Gasmigration können auch Immissionsorte betroffen sein, welche nicht direkt auf dem Standort liegen. Gasförmige Emissionen von belasteten Standorten können in gasgängigem Untergrund oder entlang von Werkleitungen über weite Strecken (auch mehrere 100 m) im Untergrund durch Diffusion oder in/entlang Leitungen migrieren. Die mögliche Distanz hängt vom Gasdruck und vom Luftdruck ab, der wetterbedingt schwankt. Je höher die Konzentration der in der Quelle entstehenden Bodengase, je höher der gemessene Gasdruck und je gasgängiger die Migrationswege sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, relevante Konzentrationen an einem Immissionsort zu finden. Optische Anhaltspunkte können auch Vegetationsschäden auf bewachsenen Flächen sein.

(gelbliche Verfärbungen oder Ausfall von Bewuchs). Migrationspfade können beispielsweise sein: Gasgängiger Untergrund (z.B. Bauschutt und Kies), Schächte, unterirdische Bauwerke, Werkleitungen mit drucklosen Leitungen, etc.

Immissionsort: Der Gesetzgeber führt in Art. 11 AltIV aus, dass das Schutzgut Luft dann in Betracht gezogen werden muss, wenn «Orte, an denen sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können» betroffen sind. Damit meint er im Regelfall bewohnte, geschlossene Räume, aber auch Orte, an denen sich Gase ansammeln können (z.B. Senken oder Gruben, Beurteilung im Einzelfall). Als Immissionsorte kommen Bauteile, Gebäude und Bauwerke aller Art auf oder im Einflussgebiet der Quelle in Frage.



Abbildung 15: Gasaustrittsstellen (Volumenverhältnis $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 5:3$) aus einer Siedlungsabfalldeponie, welche während 30 Jahren bis 1971 betrieben wurde. Die Austrittsstellen zeigen auch im Jahr 2020 noch Vegetations-Schäden durch Deponiegas. Die regelmässige Anordnung in der Böschung ergibt sich aus der Lage von Sickerwasserleitungen, welche zur Entwässerung des Trainingsplatzes dienen. Das Deponiegas diffundiert aus der Deponie in die Sickerwasserrohre im aufgeschütteten Material und von diesen an die Oberfläche.

5.1.3. Eigenschaften und Gefährdungspotential der wichtigsten Gaskomponenten

Methan (CH_4) ist bezüglich Menge und Gefährdung das wichtigste Deponiegas. 1990 trug Methan aus Abfalldeponien mit einem Anteil von 16% sämtlicher Schweizer Methan-Emissionen bei, 2007 wurde dieser Anteil noch auf rund 8 % abgeschätzt ²⁴. Methan (CH_4) ist brennbar, die untere Explosionsgrenze (UEG) liegt – je nach Zusammensetzung des Gasgemisches – bei rund 4-5 Vol.-%, die obere Explosionsgrenze liegt bei 16.5 Vol.-%.

Kohlendioxid (CO_2) wirkt bezüglich Explosionsfähigkeit von Methan als Inertgas und verringert dadurch den Explosionsbereich. Durch CO_2 kann eine Erstickungsgefahr entstehen, wenn sich das Gas wegen seiner hohen Dichte in Senken sammeln kann. Den Gefahren durch Explosion und Erstickung muss bei der Begehung von Bauwerken (Kellerräume, Rohrleitungen, Schächte) auf und um Deponien herum Rechnung getragen werden. Beim Einstieg in Rohrleitungen und Schächten sind die Richtlinien der SUVA einzuhalten, welche unter anderem den Einsatz von Gaswarngeräten vorsehen.

²⁴ Rytec AG 2010: Review of the waste sector of the national greenhouse gas inventory of Switzerland. Final report. Rytec AG, Münsingen.

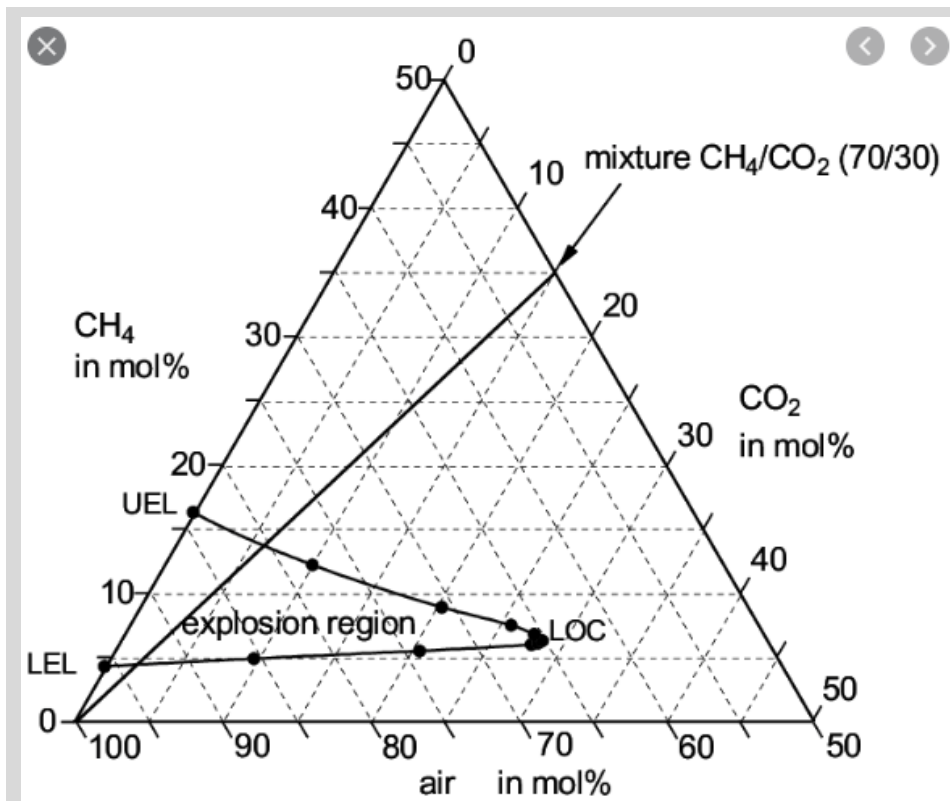


Abbildung 16:

Aus: V. Schroeder, B. Schalau & M. Molnare 2014: Explosion Protection in Biogas and Hybrid Power Plants. Procedia Engineering 84, p. 259-272

Quelle: researchgate.net

Die Explosionsfähigkeit von Deponiegasen wird durch die Konzentrationen an brennbaren Gasen (Methan, molekularer Wasserstoff) im Verhältnis zu Luft-Sauerstoff und zu Inertgasen (CO₂, Stickstoff) bestimmt. Deponiegase sind aufgrund ihrer Entstehungsweise in aller Regel wasserdampfgesättigt, was die Explosionsfähigkeit verringert. Aus der Abbildung 16 geht hervor, dass der Bereich von explosionsfähigen Gasgemischen mit Methan eng ist. So sind aus der Erfahrung nur wenige Fälle bekannt, dass sich auf Deponien Gase entzündet haben. Dabei handelt es sich um «Verpuffungen» im Bereich von Gräben und undichten Räumen, welche in der Deponie selbst angelegt wurden. Zu Explosionen oder gar Detonationen²⁵ kam es in seltenen Fällen auf reinen Hausmülldeponien.

Neben den Hauptkomponenten CH₄ und CO₂ kann Deponiegas auch Stoffe mit toxischem bzw. krebserzeugendem Potential wie Schwefelwasserstoff, Vinylchlorid, Benzol u.a. enthalten. In alten Siedlungsabfalldeponien ist der Anteil solcher Deponiegasspurenstoffe in der Regel gering und nimmt mit dem Alter der Deponie ab.

²⁵ Unter anderen wichtigen Aspekten der Gassicherheit werden die Begriffe Explosion resp. Detonation in folgender Publikation abgehandelt: SUVA 1999: Gasexplosionen-Schutz vor Explosionen durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel im Gemisch mit Luft. ISSA Prevention Series No. 2032 (G)

5.2. Gastechnische Untersuchung

Bei der Untersuchung von Deponiegasen in Hinblick auf Neunutzungen stehen grundsätzlich folgende Fragen im Vordergrund:

- Gasemissionen am Standort: Produziert die Deponie noch Gase, die freigesetzt werden können? Wenn ja, welche, wieviel und wie lange noch?
- Über welche Emissionspfade erfolgt diese Freisetzung?
- Ist die Migration der emittierten Gase an einen Immissionsort, an dem sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können, möglich?

Zur Beantwortung dieser Fragen muss eine gastechnische Untersuchung am belasteten Standort durch Fachleute durchgeführt werden, um daraus eine **Gefährdungsbeurteilung** und die erforderlichen bautechnischen Sicherungsmassnahmen ableiten zu können.

5.2.1. Emissionsnachweis durch Porenluftmessung

Zur Untersuchung von Gas-Emissionen aus Deponien stellen Porenluftmessungen eine standardisierte Erkundungsmethode dar (Abb. 17). Hier dienen sie dem Nachweis der typischen Deponiegase, aber auch der Suche nach abgelagerten leichtflüchtigen organischen Stoffen (z.B. Lösungsmittel). Zur Probenahme haben sich aktive Verfahren (direkte und anreichernde Verfahren) durchgesetzt, bei denen entweder mittels Hohlsonde oder durch einen Packer Luft angesaugt wird. Die «Vollzugshilfe Probenahme und Analyse von Porenluft»²⁶ gibt konkrete Angaben über die Untersuchung von Gasen. Hinweise auf den «Reifungsgrad» der Deponie (Abbaugrad der organischen Anteile) ergeben sich aus einer möglichst vollständigen Analyse der Volumenanteile der Deponiegase. Die Konzentrationen von CH₄, CO₂, Sauerstoff (O₂) und H₂S können häufig mit Gasmessgeräten während der Probenahme (online) bestimmt werden. Andere Gasbestandteile wie aliphatische, halogenierte oder aromatische Kohlenwasserstoffe können nur mittels Gasproben im Labor genau bestimmt werden.



Abbildung 17: Porenluftmessungen, Vegetationsschäden

²⁶ BAFU (Hrsg.) 2015: Probenahme und Analyse von Porenluft. Ein Modul der Vollzugshilfe «Untersuchung von belasteten Standorten». Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1521: 42 S.

5.2.2. Erfassung von Emissions-Pfaden

Für die Messung der Emissionspfade eignen sich Bodengasuntersuchungen nur bedingt. Im Fokus stehen Schächte, Rohrleitungen und auch Austrittsstellen von Deponiesickerwasser. Häufig treten erhöhte Deponiegas-Konzentrationen im Übergangsbereich des Deponiekörpers zum «gewachsenen» Boden resp. Untergrund auf. Auch können Migrationspfade von Deponiegas in die Luft anhand von Vegetationsschäden erkannt werden (vgl. Abbildung 15).

Das Bodengas von alten Deponien steht oft nicht unter Druck, sondern bleibt in den Grobporen der Bodenmatrix liegen. Es kann mittels Diffusion entlang dem Konzentrationsgefälle migrieren. Zudem oxidiert Methan partiell in den oberen Bodenschichten und/oder kann langfristig in geringen Konzentrationen über die Oberfläche entweichen. Für die Ermittlung möglicher Migrationspfade eignen sich daher geologische Profilaufnahmen oder Werkleitungspläne.

5.2.3. Gas-Immissionen

Zur Untersuchung von Gasimmissionen in **bestehende** Gebäude dienen in einer ersten Phase Messungen mittels Gasmessgeräten (Abb.18). Die Gaskonzentrationen müssen an folgenden Stellen gemessen werden:

- Bei möglichen Eintrittspfaden für Immissionen (z.B. Werkleitungen, Risse, Fugen, Schächte)
- An möglichen Fremdquellen (z.B. neue Anstriche oder Lösungsmitteldepots als Hinweis auf Quellen für Hintergrundbelastungen).
- Zudem ist die durchschnittliche Raumluftbelastung zu bestimmen (in ca. 1.4 m Höhe und 2 m Abstand von Wänden). Die zu untersuchenden Räume sind unmittelbar vor der Immissionsmessung mindestens acht Stunden geschlossen zu halten (Türen, Fenster und Öffnungen verschliessen).

Bei Hinweisen auf Deponiegasvorkommen in bestehenden Gebäuden ist eine **Gefährdungsabschätzung** notwendig (vgl. Kap. 5.3, unten). Bei der Planung von Neubauten ist mittels Massnahmen zu verhindern, dass Deponiegase in Gebäude gelangen können (vgl. Kap. 5.4, Massnahmen).



Abbildung 18: Bsp. Immissionsmessungen entlang Hausfassade oder an Rissen in der Bodenplatte

5.3. Gefährdungsbeurteilung

Eine Gefährdungsabschätzung basiert auf der durchgeführten gastechnischen Vermessung am Emissions- und Immissionsort. Beurteilt werden die Ex-, Tox-, Erstickungs-Gefährdung, sowie mögliche Migrationsmöglichkeiten. Die Beurteilung nimmt Bezug auf Art. 11 der AltIV.

Tabelle 4: Übersicht der wichtigsten akuten Gefahren, ausgehend von gasförmigen Stoffen, welche aus belasteten Standorten stammen (Quelle: AWEL 2019, Vollzugshilfe zum Schutzgut Luft der Altlasten-Verordnung).

Akute Gefahr	Wirkung des Gases	Mögliche Gase	Alarmierung und Sofortmassnahmen
Sauerstoffmangel/ Ersticken	Verdrängung des Sauerstoffs in Atemluft Schwindel: (O ₂) <14 Vol-% Ersticken: (O ₂) <7 Vol-%	Stickstoff, Methan, Propan	(O ₂) <14 Vol-%
Ersticken	Schwindel, Benommenheit: CO ₂ >4-6- Vol-% Bewusstlosigkeit: CO ₂ >15- Vol-% toxisch	Kohlendioxid	CO ₂ >4-6- Vol-%
Div. organische Schädigungen Tod durch Kreislaufversagen Explosion/ Brand	Vgl. Abb. 16	Schwefelwasserstoff (H ₂ S) Kohlenmonoxid Methan (Explosionsdreieck)	MAK-Werte 4.6 Vol-% > CH ₄ <16- Vol-%
Geruchsbelästigungen durch aromatische Kohlenwasserstoffe	Schwindel, Übelkeit, Kopfweg	Benzol, Toluol	

Die von der SUVA definierte maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für Methan beträgt 1 Vol.-% (entspricht 10'000 ppm). Dieser Wert darf an Orten, an welche sich Personen regelmässig und über längere Zeit aufhalten, nicht überschritten werden. Der MAK-Wert entspricht etwa 20% der unteren Methan-Explosionsgrenze (vgl. Abb. 16). Gaswarngeräte, die dienen primär zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit z.B. beim Begehen von Schächten und Rohrleitungen, sind in der Regel so konfiguriert, dass bei Überschreitung von 1 Vol.-% Alarm ausgelöst wird.

Werden im Deponiebereich in der Porenluft oder auch in Schächten oder Rohrleitungen erhöhte Gasgehalte (z.B. > 1 Vol.% Methan oder > 0.5 Vol.% CO₂²⁷) gemessen, entsteht dadurch nur dann ein Handlungsbedarf, wenn die Gase an einen Immissionsort gelangen können, wo sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können. Gelangen die Gase an solche Immissionsorte, besteht nach Altlastenverordnung eine Sanierungsbedürftigkeit.

²⁷ Für die Beurteilung von Porenluft belasteter Standorte gilt die Tabelle flüchtiger Verbindungen gemäss Anhang 2 der Altlastenverordnung

5.4. Sanierungsmassnahmen

5.4.1. Grundsätze

Es gibt eine ganze Reihe von Massnahmen, mit welchen **bestehende** Bauten auf alten Siedlungsabfalldeponien bezüglich eindringenden Deponiegasen saniert resp. gesichert werden können. Weitere Hinweise zu möglichen Sanierungsmassnahmen werden in der kantonalen Vollzugshilfe «Beurteilung des Schutzgutes Luft gemäss Art. 11 Altlasten-Verordnung»²⁸ des AWELs geliefert.

Für die Neunutzung von alten Siedlungsabfalldeponien wie auch zur Sicherung bestehender Bauwerke gilt der Grundsatz, dass keine Gase in Räume gelangen dürfen, in welchen sich regelmässig und über längere Zeit Personen aufhalten (Artikel 11 der Altlastenverordnung).

Falls bestehende Gebäude bezüglich Gasgefährdung saniert werden müssen oder nicht auf neue unterirdische Räume (Keller, Parkplätze) verzichtet werden soll, sind grundsätzlich folgende Massnahmen zur Gas-Sicherung möglich²⁹:

- Gastechnische Sanierung der Deponie (Beseitigung gefährlicher Gasemissionen)
- Gassperren und Schaffen von präferenziellen Gasmigrationspfaden (passive Sicherung).
- Absaugung der Deponiegase aus der Bodenluft ausserhalb oder allenfalls unterhalb der Gebäude mittels Gasbrunnen oder Leitungen. Abblasen, Verbrennen oder energetische Verwertung der Bodenluft (aktive Sicherung).

5.4.2. Massnahmen zur Verringerung der Gasemissionen

Eine Reduktion der Gasproduktion kann nur an der Quelle erreicht werden. Durch kontrollierte Behandlung der Gasemissionen kann aber eine Gasmigration an den Immissionsort verhindert werden. In der Folge eine Auflistung einiger möglicher Massnahmen:

- «Totalsanierung» mittels Entfernung des Deponiematerials. Dadurch wird die Gasquelle entfernt.
- Vorbelastung und/oder dynamische Tiefenverdichtung der Deponie zur Verringerung des Porenraums und somit der Zirkulation von Wasser und Gas; Verbesserung der Tragfähigkeit; Verringerung von Setzungen.
- Aktive Entgasung mittels vertikaler Gasbrunnen oder horizontaler Gasrigolen und Gebläse (blasend oder saugend); Verwertung des Gases mittels Schwachgasfackel, *Flox*-Brenner oder nicht-katalytische Oxidation.
- Aktive Aerobisierung mittels Einblasen von Luft (Wechsel vom anaeroben zum aeroben Abbau von organischen Anteilen im Abfall). Dadurch werden auch die Setzungen beschleunigt.

²⁸ Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (5. Juni 2019): Beurteilung des Schutzgutes Luft gemäss Art. 11 Altlasten-Verordnung. Vollzugshilfe für den Kanton Zürich

²⁹ Ingenieurbüro Roth & Partner GmbH (1995): Sicherung von bestehenden Bauten gegen Gefahren durch Deponiegas. Herausgegeben vom Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

5.4.3. Emissionsminderung durch Gasbehandlung

Siedlungsabfalldeponien verharren Jahre in der Methan- und Langzeitphase (vgl. Abb. 13), bevor in der Lufteindringphase die Gasproduktion oft erst nach mehreren Jahrzehnten wieder zurückgeht und sich der Stickstoff- und Sauerstoffgehalt wieder der Zusammensetzung der Atmosphäre annähert.

Falls CH₄-Emissionen³⁰ in die Atmosphäre, Gebäude oder Infrastrukturanlagen verhindert werden sollen, müssen die Deponiegase in geeigneten Vorrichtungen durch ein Erfassungssystem aufgefangen und in speziellen Anlagen behandelt oder verbrannt werden. Neben der Verbrennung in Fackeln bieten sich katalytische Verbrennung, Verfahren der Membrantechnik sowie biologische Methoden zur Verringerung der Methankonzentration in Deponiegas an. Die Erstellung und der Betrieb von Anlagen zur energetischen Nutzung ist allerdings aufwändig und rechnet sich selbst bei älteren Siedlungsabfalldeponien mit vorhandener technischen Entgasungsanlagen meist kaum – zu gering ist die Menge und zu unbeständig die Gas-Zusammensetzung. Die Investitions- und Wartungskosten sind hoch.

5.4.4. CO₂-Kompensation

Da Methan ein starkes «Klimagas» ist, werden Massnahmen finanziell gefördert, welche nachweislich³¹ verhindern, dass Deponiegase in die Atmosphäre austreten. Mit Förderbeiträgen der «Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation» (klik.ch) können sich die Kosten einer Gasbehandlung verringern, wobei die Emissionsreduktion wie folgt vergütet wird:

- CHF 120 pro Tonne Emissionsreduktion in CO₂-Äquivalenten, solange bis die Vergütung für die insgesamt erzielten Emissionsreduktionen 150% der Investitionskosten deckt. Ab dann werden noch CHF 60 pro Tonne abgegolten.

Abgasbehandlungen mit dem Ziel der Emissionsreduktion sind beispielsweise (Quelle: klik.ch³²):

Vorhabentitel	Wirkungsbeginn	Erwartete Bescheinigungen bis 2030	Ausgestellte Bescheinigungen bis 2018
AVAG Deponie, Uttigen (BE)	19.09.18	8404 tCO ₂ e	240 tCO ₂ e
Chestel, Liesberg (BL)	01.10.17	3726 tCO ₂ e	715 tCO ₂ e
Châtillon, Posieux (FR)	12.09.19	3855 tCO ₂ e	0 tCO ₂ e
Courte-Queue, Boécourt (JU)	07.05.15	3392 tCO ₂ e	746 tCO ₂ e
En Craux, Châtel-Saint-Denis (FR)	27.03.15	22180 tCO ₂ e	10398 tCO ₂ e
Gummersloch, Köniz (BE)	20.03.17	6621 tCO ₂ e	1445 tCO ₂ e
Kehlhof, Berg (TG)	28.09.16	20520 tCO ₂ e	6470 tCO ₂ e
Plaun Grond, Rueun/Ilanz (GR)	01.09.15	6207 tCO ₂ e	1663 tCO ₂ e

³⁰ Methan wirkt als «Treibhausgas» rund 25x stärker als Kohlendioxid

³¹ Wie der Nachweis der erzielten Emissionsverminderungen erbracht werden kann wird vom BAFU, Abteilung Klima, Geschäftsstelle Kompensation im Anhang G zur Mitteilung «Projekte und Programme zur Emissionsverminderung im Inland» unter dem Titel «Standardmethode für den Nachweis von Emissionsverminderungen bei Deponiegasprojekten» vom April 2015 im Detail abgehandelt.

³² Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation KliK, Streulistrasse 19, 8032 Zürich, deponiegas@klik.ch

Ronde Sagne, Tavannes (BE)	15.02.17	1330 tCO ₂ e	229 tCO ₂ e
Sass Grand, Bever (GR)	10.01.17	10501 tCO ₂ e	2757 tCO ₂ e
Tambrig, Obfelden (ZH)	01.11.14	259 tCO ₂ e	259 tCO ₂ e
Türliacher, Jaberg (BE)	01.01.19	13813 tCO ₂ e	0 tCO ₂ e
Val Casti, Sagogn (GR)	01.09.15	3303 tCO ₂ e	855 tCO ₂ e
Valle della Motta, Coldrerio (TI)	24.03.17	10597 tCO ₂ e	2535 tCO ₂ e
Total		114708 tCO ₂ e	28312 tCO ₂ e

5.4.5. Massnahmen am Immissionsort bei Neubauten

Neben den erwähnten Massnahmen zur Reduktion der Gasemissionen und -migration an der Quelle können beim Bauen auf Altdeponien beispielsweise folgende bauliche Massnahmen am Bauwerk getroffen werden:

- Eine Gasgefährdung kann am effizientesten mit dem Verzicht auf unterirdische Räume vermieden werden. Mit einer offenen Pfeilerkonstruktion des Erdgeschosses (Pilotis) wird die Gasgefährdung von Gebäuden zusätzlich minimiert.
- Foundation und Konstruktion der Bodenplatte mit minimalem Setzungsmass ausführen (vgl. Kap. 7, Setzungen). Damit werden Risse in der Bodenplatte vermieden. Als Bodenplatte hochwertigen Zement oder Flüssigboden mit rissarmem Abbindecharakter und gute Verteilarmierung verwenden.
- Beton ist auch mit einer „wasserdichten“ Zementqualität (z.B. XC4) grundsätzlich nicht vollständig gasdicht. Auch im Zusammenhang mit periodisch gestautem Wasser ist eine Diffusion von Gasen aus Prinzip möglich. Flüssigboden³³ kann gasdicht und mit geeigneter Elastizität und Restplastizität eingesetzt werden.
- Ansammlungen von Gasen und deren mögliche Aufkonzentration in den kiesigen Fundamentalschichten unter einer Bodenplatte müssen vermieden werden; es sollen abdichtende Fundamentmaterialien verwendet werden (Zitat: Dr. Andreas Leemann, EMPA, Gruppenleiter Bontontechnologie, Stv. Abteilungsleiter). PE Folien als Dichtelement ist bei Pfahlfundamenten nicht empfehlenswert (aufwändige Verlegung mit vielen Durchbrüchen, teuer, schadenanfällig).
- Installation von Gasfenstern oder Gasrigolen zur passiven Entgasung des Deponiekörpers mittels natürlichen Luftdruckschwankungen.
- Die Übergänge von Leitungseinführungen flexibel und gasdicht ausgestalten, um Schäden durch Setzungen zu vermeiden.
- Brandschleusen gelten als gasdicht.
- Sicherstellen einer natürlichen Durchlüftung der Räume im Untergeschoss.

³³ Flüssigboden hat steuerbare Konsistenzen und Durchlässigkeiten, ist zeitweise fließfähig und selbstverdichtend. Er wird vor allem in Deutschland im Kanal- und Grabenbau eingesetzt, vermehrt auch beim Bauen von und auf Deponien.

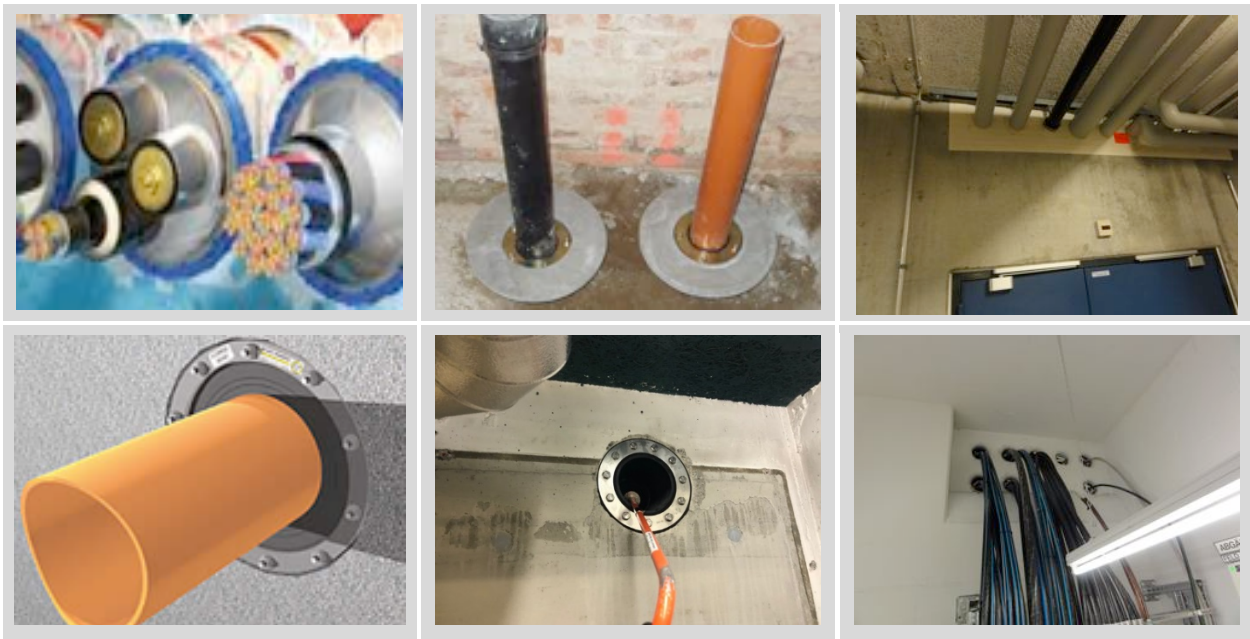


Abbildung 19: Beispiele von gasdichten Leitungseinführungen.

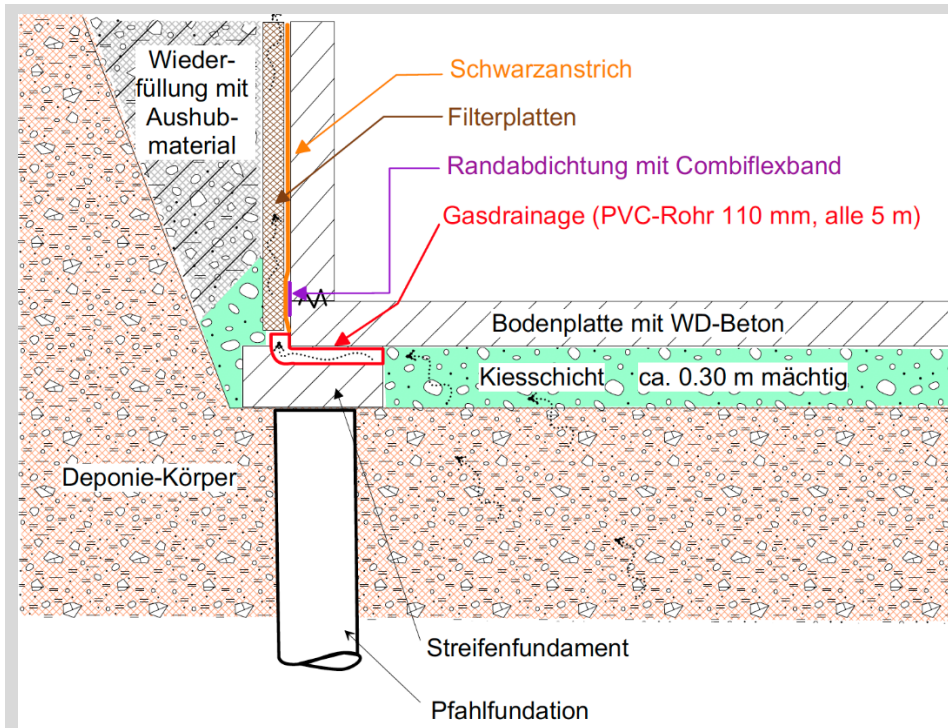


Abbildung 20:
 Schematisches Beispiel
 einer Entgasungsschicht
 unter der Bodenplatte und
 an den Wänden.

Weitere Massnahmen zur Beurteilung und immissionsseitigen Verringerung der Gasgefährdung von bestehenden Gebäuden sind in der Vollzugshilfe des AWEL ZH «Beurteilung des Schutzgutes Luft» beschrieben³⁴.

Neben bautechnischen Massnahmen sind auch organisatorische Massnahmen zu beachten. Dazu gehören, falls der Standort nicht totalsaniert wird, ein adäquater **Arbeitssicherheitsplan** während der Bauphase sowie eine gastechnische **Abnahmemessung** nach dem Erstellen des Gebäudes oder von allfälligen Nutzungseinschränkungen an der Oberfläche.

5.5. Zusammenfassung Gas

Im Folgenden werden jene Massnahmen aufgelistet, mit welchen sich die Gasgefährdung bei **Neunutzungen** auf Siedlungsabfalldeponien verringern lassen.

Tabelle 5: Methoden zur Verringerung der Gasgefährdung

Methode	Vorteile	Nachteile
A: Immissionsseitige Massnahmen		
Keine Räume schaffen, in welchen sich regelmässig und über längere Zeit Personen aufhalten können	Geringe Kosten, hohe Sicherheit	Nutzbare Räume im Deponie-Untergrund (z.B. Keller, Parkgaragen) fallen weg.
Bauliche Massnahmen umsetzen (Vgl. Kap. 5.4.4)	Gasgefährdung wird minimiert	Erhöhter Aufwand bei Planung, Realisierung und Kontrolle
B: Emissionsseitige Massnahmen (z.B. als Ergänzung zu A)		
Entfernung des Deponie-Inhalts	Es entstehen keine Deponiegase mehr, Entlassung aus dem KbS möglich, Verfahren sind erprobt.	Hohe Kosten für Transport und Entsorgung, Emissionen beim Aushub (Lärm, Gerüche, Staub). Nur bei kleineren Volumen interessant.
Vorbelastung/Tiefenverdichtung der Deponie	Neben der Gasentstehung werden auch Setzungen verringert. Ev. Möglichkeit zur Ablagerung von unverschmutztem Aushub/Ausbruch.	Allenfalls werden durch die Vorbelastung erhöhte Stoffmengen über das Sickerwasser freigesetzt.
Aktive Entgasung oder Aerobisierung inkl. Gasverwertung (Vgl. Kap. 5.4.2)	Rel. kostengünstiges Verfahren, allenfalls sind Kostenbeiträge für CO ₂ -Kompensationen möglich	Muss während Jahren betrieben werden. Nach dem Abstellen der Massnahme können die Gaskonzentrationen wiederum ansteigen

³⁴https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/altlasten/untersuchung,-ueberwachen,-sanierung/20190605_Vollzugshilfe_Luft.pdf (letztes Mal abgerufen am 15.10.2020)

6. Setzungen

6.1. Entstehung und Auswirkungen

Bei Neunutzungen, z.B. für Gewerbe- oder Wohnbauten auf alten Siedlungsabfalldeponien, werden die geotechnischen Bedingungen hinsichtlich der Tragfähigkeit des Untergrundes von grosser Bedeutung sein. Generell sind Deponien der schlechtesten resp. anspruchsvollsten Baugrundklasse zuzuordnen, nämlich der Baugrundklasse F gemäss der SIA-Norm 261. In der Regel müssen deshalb bei Neubauten die Lasten und Kräfte auf einer tragfähigen Schicht unterhalb des Deponiekörpers mittels Pfählen abgetragen werden. Der Geologe wird daher die dreidimensionale Lage der tragfähigen Schicht(en) mit genügender Genauigkeit erkunden wollen.

Es gibt auch Fälle, in denen die Bauwerke flach auf dem Deponiekörper fundiert werden können: dies ist bei setzungstoleranten und leichten Bauwerken durchaus möglich und mit Beispielen belegt (vgl. Kapitel Fallbeispiele).

Alte Deponien, ob mit Aushub, Bauschutt oder Siedlungsabfall gefüllt, wurden meist „vor Kopf“ geschüttet und nicht oder nur geringfügig verdichtet. Dies führt zu langfristigen, meist differenziellen Setzungen. Enthält das Deponiegut auch organisches Material, was bei Siedlungsabfalldeponien immer der Fall ist, wird dadurch das Ausmass der Setzungen verstärkt. Das Ausmass von Setzungen wird somit durch folgende Faktoren bestimmt:

- Verdichtungsgrad der Deponie.
- Mächtigkeit der Deponie (im Zentrum höhere Setzungen als im Randbereich).
- Menge, Verteilung und Anteil von noch nicht abgebautem organischem Material.



Abbildung 21: Ehemals ebenerdig abgeschlossene Schächte einer Aushub-/Siedlungsabfalldeponie. Setzungen entstehen sowohl durch die Verdichtung des Abfalls wie auch durch die Zersetzung von organischem Material. Links: Schacht am Deponierand mit einem Setzungsbetrag von 45 cm über 40 Jahre. Rechts: zwei Schächte im Zentrum auf der gleichen Deponie mit Setzungsbeträge 59 cm resp. 93 cm (Schacht vorne).

Numerische Langzeitwerte über Setzungsbeträge von Deponien sind uns nicht bekannt, können jedoch aufgrund des Überstandes von ehemals ebenerdig verlegten Schachtdeckeln ermittelt werden (vgl. Abbildung 22).

6.2. Geotechnische Untersuchungen

Aufgrund des oftmals sehr heterogenen Schüttmaterials reicht es in der Regel nicht aus, nur mittels Baggersondierungen den Aufbau und die geotechnischen Rahmenbedingungen eines Deponiekörpers zu untersuchen. Baggersondierungen sind meistens auf eine Tiefe von rd. 5-6 m beschränkt; diese Tiefe genügt in der Regel nicht aus, um die Lage eines tragfähigen Horizonts zu erreichen.

Die Wichtigkeit resp. stärkste Aussagekraft ergibt sich durch die Reihenfolge der Sondierungsmethoden gemäss folgender Auflistung; dabei sind auch allfällige Vorkenntnisse und -untersuchungen oder sonstige Standortfaktoren einzubeziehen.

6.2.1. Kernbohrungen

Kernbohrungen haben grundsätzlich folgende Vorteile:

- a. Mit den Kernbohrungen kann das Deponiematerial schicht- resp. schüttungsgetreu entnommen und tiefenbezogen zugeordnet werden.
- b. Die Grenze der Deponiebasis zum gewachsenen, natürlichen Untergrund lässt sich eindeutig bestimmen: dies besonders dann, wenn ein hoher anthropogener Fremdanteil vorhanden ist.
- c. Das Deponiematerial kann zusätzlich chemisch untersucht werden.
- d. Im Bohrloch kann ein Piezometer installiert werden, welcher z.B. der Überwachung oder Analyse des Grund-/Sickerwassers dient.

6.2.2. Seismik

Obwohl in der Schweiz noch eher selten durchgeführt, sind seismische Methoden³⁵ dazu geeignet, den gesamten Deponiekörper dreidimensional einzugrenzen. Als Hilfsmittel dienen hierzu die Kernbohrungen, an denen das Modell „aufgehängt“ werden kann. Generell wird diese Untersuchungsmethode bereits am Anfang einer Deponieerkundung angewendet.

6.2.3. Rammsondierungen

Rammsondierungen sind ein zusätzliches Hilfsmittel zur Bestimmung der Untergrenze einer Deponie, wenn der Grundaufbau bereits bekannt ist. Mittels Rammkernsondierungen können auch Materialproben entnommen werden. Diese sind, im Vergleich zu Kernbohrungen, weniger aussagekräftig da das Volumen der Rammkerne klein ist und kaum ungestörte Proben entnommen werden können.

Nachteil dieser Methoden: viele mögliche Rammhindernisse in der Deponieschüttung (z.B. (Beton)Blöcke, Holz, Metalle etc.), können zu einer Fehlinterpretation des Schichtaufbaus führen.

³⁵ Die enorme Entwicklung bei Geophonen (so enthält heute jedes Smartphone mindestens einen Beschleunigungssensor) und bei der Datenverarbeitung hat zu einer starken Verbilligung von seismischen Untersuchungen geführt. Was früher der Erdölindustrie vorbehalten war, kann heute kostenverträglich für grössere Bauvorhaben eingesetzt werden.

6.2.4. Drucksondierungen

Drucksondierungen eignen sich nur bei locker geschütteten Deponiekörpern, wobei auch hier die möglichen undurchdringbaren Hindernisse (Blöcke etc.) als ein noch grösseres einschränkendes Kriterium gelten.

Diese Sondierungen empfehlen sich nur, wenn der grobe Aufbau der Deponie bekannt ist und es darum geht, die Pfahldimensionierung hinsichtlich Mantelreibung und Spitzendruck zu quantifizieren.

6.3. Chemische Untersuchungen

Bei einer Pfahlfundation, die in das Grund- und/oder Sickerwasser in einem Deponiekörper eintaucht, ist besonders die Kenntnis vom Chemismus des Deponiewassers wichtig. Mit einer chemischen Analyse dieses Wassers soll die Betonaggressivität festgestellt und somit die Wahl des Betons festgelegt werden können.

Bei gewissen Pfahlarten (z.B. Kies-/Schotterpfahl) wird zu entsorgendes Deponiematerial anfallen. Je nach chemischer Belastung des zu durchdringenden Abfalls können sich die Entsorgungspreise um Grössenordnungen unterscheiden.

6.4. Massnahmen zur Gründung

Abhängig von den Gebäudelasten und den Anforderungen an den Baugrund müssen die Fundationsbedingungen von Fachleuten der Geotechnik resp. der Ingenieurskunst beurteilt und die erforderlichen Massnahmen definiert werden. Im Bereich Geotechnik gelten folgende Normen und Richtlinien:

- SIA 118/267: Allgemeine Bedingungen für geotechnische Arbeiten
- SIA 267: Geotechnik
- SIA 267/1: Ergänzende Festlegungen zur SIA 267
- SIA V192: Pfähle
- SIA 261: Einwirkungen auf Tragwerke / Erdbeben
- BAFU, Umwelt-Wissen Nr. 1603: Erdbeben: Karten der Baugrundklassen, 2016

6.4.1. Pfahlfundation

Die Wahl des richtigen Pfahlsystems hängt einerseits von den definierten Rahmenbedingungen gemäss den geotechnischen Voruntersuchungen ab und andererseits von den Standortfaktoren mit limitierenden Einschränkungen hinsichtlich der einsetzbaren Maschinen.

Wann immer möglich, muss einer Fundation mit Standpfählen der Vorzug gegeben werden; eine schwimmende Pfählung ist oftmals mit unkalkulierbaren Pfahlsetzungen verbunden. Nachfolgend eine Auswahl der gebräuchlichsten Pfahlsysteme:

Ortsbetonpfahl: Sofern ein ausreichend tragfähiges Planum vorhanden ist resp. aufgebaut werden kann, lässt sich der Ortsbetonbohrpfahl uneingeschränkt einsetzen. Harte Schichten (Blöcke etc.) lassen sich damit durchhören.

Abhängig vom Durchmesser ist er geeignet, auch (sehr) hohe Gebäudelasten aufzunehmen (d.h. 2'000 >> 3'000 kN).

Injektionsbohrpfahl: Bohrpfahl mit Stahlkern und verpresst aufgebautem Mantel; Tragfähigkeit begrenzt (rd. 1'500 kN).

Rammpfahl: Ein Rammpfahl ist nur dann geeignet, wenn der Deponiekörper ausreichend gut erkundet ist, dass keine einschränkenden (Ramm-)Hindernisse vorhanden sind. Die gängigsten Systeme hierfür:

- Fertigbeton (voll oder hohl (Schleuderbeton))
- duktilen Gusseisen
- Stahlprofile (Injektionsrammpfahl mit HEB-Träger und Mantelverpressung)

Verdränger- und Schraubpfahl: Solche sind in sehr harten Schichten und bei Blöcken etc. nicht geeignet

- Vollverdränger, ohne Materialentnahme (z.B. *Fundex* oder *FDP*)
- Teilverdränger, mit Materialentnahme

Kies-/Schotterssäulen (evtl. betonierte): Da es sich hierbei um eine Bodenverbesserung mit tragfähigem Material handelt, d.h. Verdrängung resp. Verdichtung des Untergrundes und Einbau einer Schotterssäule, ist dieses Verfahren nur für flachere Deponiestandorte geeignet. Weiter muss das entnommene Deponiematerial teuer entsorgt werden.

Holzpfähle: Holzpfähle können nur geringe Lasten aufnehmen (max. rd. 250 kN).

Aus Gründen der Langlebigkeit müssen sie permanent im wassergesättigten Untergrund stehen (allenfalls mit Betonaufsatz bis in den Grundwasserbereich).

Allgemein muss bei einer Pfahlfundation folgendes berücksichtigt werden:

- Negative Mantelreibung: d.h. bei Setzungen des Untergrundes kann sich der Boden an die Pfähle „anheften“, so dass diese noch zusätzliche Lasten, als jene vom Gebäude alleine tragen müssen.
- Setzungen der Umgebung: gegenüber den starren, auf Pfählen gegründeten Gebäuden wird sich die Umgebung wahrscheinlich auch langfristig setzen. Der Betrag dieser Setzungen richtet sich nach der Mächtigkeit und Zusammensetzung der Aufschüttungen. Ausgleichsmaßnahmen und konstruktive Anpassungen etc. sind von vornherein einzuplanen.
- Werkleitungen: Wegen den Setzungen der Umgebung sollte geprüft werden, ob Leitungen evtl. auch auf Pfählen fundiert werden müssen (vor allem Abwasser/Kanalisation, bei denen das Gefälle wichtig ist). Allenfalls bestünde die Option, einen Teil der Leitungen an das Gebäude anzuhängen.
- Übergänge von Leitungen im Setzbereich (Deponiekörper) zu starren, auf Pfählen gegründeten Bauwerken sollten flexibel ausgeführt werden.

6.4.2. Kombinierte Pfahl-Platten-Fundation (KPP)

Mögliche Variante, falls der Untergrund dies erlaubt: die Bauwerkslasten werden nicht komplett auf die Pfähle abgetragen; ein Teil wird über die Bodenplatte auf den Baugrund übertragen.

6.4.3. Flachfundation

Eine Flachgründung auf alten Siedlungsabfalldeponien eignet sich bei geringen abzutragenden Lasten bei gleichzeitig setzungstoleranten Bauwerken. Schwierig wird eine Flachfundation insbesondere dann, wenn ein Bauteil auf den gewachsenen und tragfähigen Untergrund und ein anderer in den Deponiebereich zu liegen kommt. Auch bei Flachfundationen sind die immissionsseitigen Massnahmen bezüglich Gasmigration zu berücksichtigen (Vgl. Kap. 5.4).

Tabelle 6: Tabellarische Zusammenstellung der Massnahmen im Umgang mit Setzungen

Methode	Vorteile	Nachteile
Flachfundation & steifer Kasten auf Bodenplatte	Vergleichsweise günstige Fundationsart, geeignet bei geringen abzutragenden Lasten und gleichzeitig setzungstoleranten Bauwerken	Nicht geeignet zum Abtragen von hohen Lasten und bei setzungsempfindlichen Bauwerken
Pfahlfundation	In den meisten Fällen die geeignete Fundationsweise beim Bauen auf Siedlungsabfalldeponien, da diese generell der schlechtesten resp. anspruchvollsten Baugrundklasse zuzuordnen sind (Baugrundklasse F gemäss SIA 261).	Tragfähige Schicht muss gut bekannt sein, was geologische Sondierungen und vorzugsweise auch seismische Untersuchungen voraussetzt. Die Wahl des richtigen Pfahlsystems obliegt dem Tiefbauingenieur.

7. Boden

In sehr vielen Fällen ist die Überdeckung des Deponieguts bei alten Siedlungsabfalldeponien nur dünn und besteht aus etwas Humus, welcher durch die Bewirtschaftung bereits wieder mit Deponiegut vermischt wurde. Ein eigentlicher Bodenaufbau (Drainageschicht, Unterboden, Oberboden) wurde meist nicht erstellt. Durch Gas-Austrittsstellen kann das Pflanzenwachstum beeinträchtigt sein (vgl. Kap. 5.1 und Abbildung 14) und bei eingestauten Deponien können Vernässungen mit belastetem und verfärbtem Sickerwasser auftreten.

Bei Neunutzungen ist der Bodenaufbau und Bodenchemismus über dem Deponiegut zu prüfen und meistens zu verbessern. Mittels Geotextilien sollte das Deponiegut vom neu aufgetragenen Boden abgetrennt werden. Eine undurchlässige Abdeckung ist dabei nur in Spezialfällen erforderlich. Eine Abhandlung über die Auswahl von Oberflächensicherungssystemen von – allerdings sanierungsbedürftigen – Deponien gibt unter anderem die Vollzugshilfe «Sicherung von Deponie-Altlasten»³⁶.

Bei Neunutzungen von alten Hauskehrichtdeponien für Wohnbauten ist eine hohe Qualität des Bodens unabdingbar und dieser muss den Anforderungen von Standorten, auf denen Kinder regelmässig spielen, genügen (Anhang 2 AltIV). Dies gilt insbesondere auch für den Fall, wenn alte, als Brachflächen vorhandene Siedlungsabfalldeponien, nicht als Neubauflächen verwendet, sondern beispielsweise im Sinne einer städtebaulichen Bereicherung als Parkfläche oder Begegnungszone genutzt werden. Beispiele einer solchen Nutzung z.B. von ehemaligen Siedlungsabfalldeponien sind in den Städten Zürich, Luzern und Neuenburg zu finden.

³⁶ Burmeier H., Poggendorf C., Rosenau D., Lemann M.F., Kästli B. 2007: Sicherung von Deponie-Altlasten. Stand der Technik, Grenzen und Möglichkeiten. 2. aktualisierte Ausgabe, Oktober 2016; Erstausgabe 2007. Umwelt-Vollzug Nr. 0720. Bundesamt für Umwelt, Bern. 63 S

8. Fallbeispiele



Abbildung 22a:

Leichtbauweise auf alter Bauschuttdeponie mit ca. 30 % Siedlungsabfällen. Geringe Setzungen werden toleriert, Gas entweicht entlang einer Sickerschicht unterhalb der dichten Bodenplatte. Ammonium im Sickerwasser genügt den Anforderungen der Gewässerschutzgesetzgebung.



Abbildung 22b:

Betonwerk auf alter Siedlungsabfalldeponie. Die hohen Lasten der neuen Bauwerke und der stark armierten Bodenplatte werden mit Ortsbetonpfählen auf den Fels abgetragen. Gas kann im Freiraum zwischen Deponieoberfläche und der Bodenplatte entweichen. Sickerwässer treten durch die Deponieböschung aus, dabei wird Ammonium durch den starken Pflanzenbewuchs reduziert.

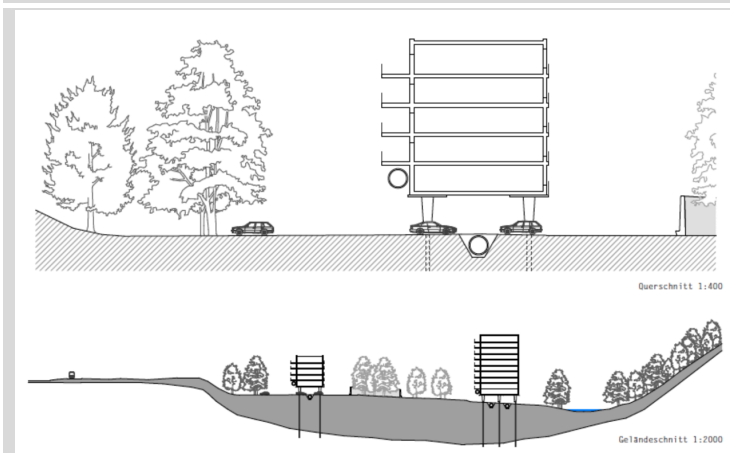


Abbildung 22c:

Machbarkeitsstudie zur Neunutzung einer grossen Deponie ($> 500'000 \text{ m}^3$) mit Bauschutt, Aushub, Sperrgut und Hauskehricht. Fazit: Wohnhäuser sind möglich und nicht teurer, falls:

- Keine Bauten im Deponiekörper selbst,
- Bei setzungstoleranter Leichtbauweise, und
- neuem Aufbau des Bodens.



Abbildung 22d:

Neubaubauten in Pilotisbauweise am westlichen Rand einer grossen sanierungsbedürftigen Siedlungsabfalldeponie.

Unter den Grünflächen liegt Deponiematerial, auch rechts des Strässchen. Die Siedlungsabfalldeponie liegt in der Bauzone, attraktiv am Nordrand der Aare gelegen.



Abbildung 22e:

Alte Deponie Typ III-IV in bester Lage. Die Entgasungsanlage wurde nach Jahren des Betriebs infolge zu geringem Methangehalt stillgelegt. Sickerwasser diffundiert unkontrolliert in den Untergrund. Es ist keine Neunutzung vorsehbar.



Abbildung 22f:

Sportanlagen auf einer alten Siedlungsabfalldeponie. Für die Sanierung wurde das ammoniumreiche Deponiesickerwasser, welches vorher in ein oberirdisches Gewässer floss, gefasst und in die Kanalisation geleitet.

Setzungen der Spielflächen dauern an. Der Halbzeit-Seitenwechsel bei Fussballspielen sorgt dabei für Chancengleichheit.

Im Anhang 1 werden etwas über 30 Siedlungsabfalldeponien aufgelistet, welche untersucht und saniert wurden; dies mit Unterstützung des Bundes aus dem VASA-Fonds. Sanierungsauslöser waren primär schädliche oder lästige Einwirkungen auf oberirdische Gewässer, gefolgt von Gasimmissionen in bestehende Gebäude. Auch die geotechnische Instabilität von Deponiekörpern und Verschmutzung des Grundwassers sind Sanierungsauslöser.

9. Ausblick

Auf oder im Einflussbereich alter Siedlungsabfalldeponien wurde schon oft gebaut. Allein im Kanton Aargau wurden in mehr als hundert solcher Bauwerke erhöhte Gasgehalte festgestellt, wobei die Migrationspfade häufig entlang setzungsbedingter Gebäudeschäden verliefen. Bei etwa 20% mussten Sanierungsmassnahmen geplant und durchgeführt werden. Ursache für die Schäden und Massnahmen war immer der Abbau von organischem Material im Deponiegut und dessen Auswirkungen. Solche möglichen Auswirkungen wurden in der Vergangenheit bei der Planung und Realisierung von Bauwerken nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.

Der Druck zur Neunutzung von Brachflächen wird in Zukunft zunehmen. Dies betrifft neben stillgelegten Industriestandorten auch jene rund 5'000 Ablagerungsstandorte, welche sich in Bauzonen befinden. Mit dem Verständnis der ablaufenden Prozesse und den daraus abgeleiteten technischen Massnahmen können bei neuen Bauvorhaben auf alten Siedlungsabfalldeponien Schäden durch den Zerfall von organischem Material vermieden werden. Werden solche Vorhaben fachgerecht geplant und realisiert, verschwinden Vorbehalte bezüglich gesundheitlicher Risiken und technischer Hindernisse. Gleichzeitig steigt die Rechts-, Termin- und Kostensicherheit.

Damit wäre das Ziel der vorliegenden Arbeit erreicht.

Luzern, 29. März 2021

Franz Schenker
Dr. phil. nat., Geologe CHGEOL

Wolfgang Richter
Diplomgeologe CHGEOL

Übersetzung Deutsch - Französisch

Angela Graf
Dr. phil.nat., Geologin CHGEOL

DANK

Ohne fachliche Unterstützung durch verschiedene Spezialisten wäre es nicht möglich gewesen, den in diesem Bericht angestrebten Bogen zwischen Problemanalyse und Problemlösung zu schlagen.

Dr. Andreas Bally von der BiCon AG hat mit seiner grossen Erfahrung in der naturnahen Abwassertechnik und mit seinem sowohl biologischen wie auch technischem Wissen wesentlich zum Kapitel Pflanzenkläranlagen beigetragen. Dank der Unterstützung von Bernhard Brunner (AfU Kt. Zug) und Joe Imgrüth (Risi AG) war es möglich, die bei der Deponie „Tännlimoos“ installierte Pflanzenkläranlage zu besuchen und uns vor Ort ein Bild zu machen. Dabei konnten wir die Planungsunterlagen der ilu AG einsehen.

Im Gespräch mit Samuel und Peter Oester, Oester Messtechnik GmbH Thun, konnten wir viel von ihrer langjährigen Erfahrung mit Gasmessungen auf Deponien lernen. Stefan Textor und Dr. Heiner Widmer von der textor engineering AG haben unseren Text mit wichtigen Massnahmen zur Verhinderung von Gasemissionen bereichert.

Die Strüby Konzept AG hat Erfahrung mit Bauvorhaben in Leichtbauweise auf alten Siedlungsabfalldeponien und ihr CEO Pius Kneubühler hat die damit verbundenen Chancen erkannt. Der Architekt Didier Pichonnaz hat die Massnahmen beim nachhaltigen Bauen auf Deponien aufgenommen und in einem Plan (Anhang 2) dargestellt. Vielen Dank dafür.

Die Gespräche mit Markus Röschli und Olaf Stolzenburg von der RSS Flüssigboden AG haben uns darauf aufmerksam gemacht, dass Flüssigboden bei Bauvorhaben auf alten Siedlungsabfalldeponien ein auch für die Schweiz interessantes Material darstellt. Mit René Brinkmann von der Geotest konnten Fragen zum Setzungsverhalten und zur aktiven Entgasung von alten Siedlungsabfalldeponien diskutiert und dabei von seiner Erfahrung und seinem pragmatischen Ansatz profitiert werden.

Christiane Wermeille und Reto Tietz von der Sektion Altlasten des BAFU haben die vorliegende Arbeit initiiert, begleitet und sowohl fachlich wie finanziell unterstützt. Ohne dies wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Name der Deponie	Jahr Erstellung	Kubatur	Beschreibung	Schutzgüter	Sanierung	Sanierungsgrund	Bemerkungen
		(ca. m ³)					
Sonnenberg	ca. 1950/60 bis 1978	150'000-200'000	Kehricht und Bauschutt, gewerbliche Abfälle (Abfallbeize und Galvanikschlämme); ab 1968 Kadaverplatz	OG, GW	Bach auf einer Länge von 220m offen gelegt. Bachsohle mit Lehm abgedichtet. Sickerrohre für die Deponiefussentwässerung. Neue Hang- und Sickerwasserleitung parallel zum Bach erstellt. 2005: Sickerleitung am Böschungsfuss mit Anschluss an die Gemeindekanalisation.	Trinkwasserfassung im Abstrom belastet. Sickerwasser der Deponie kann in das Totenbächli gelangen und auch über unterirdische Sickerwege in der Moräne talwärts fließen. Sowohl das Wasser des Totenbächlis, als auch jenes der Moräne können in das GW des Wynental infiltrieren und somit die GW Fassungen gefährden.	Trinkwasserfassung: Cadmium (0.4µg/L), Zink (0.15mg/l), Bor (bis zu 0.17 mg/L), Sulfat (bis zu 38mg/L) erhöht + leichtflüchtige halogenierte KW. Bohrung Abstrom: NH ₄ , Bor und Sulfat erhöht. Totenbächli: belastet mit NH ₄ , CKW, Sulfat, Bor, Mangan, Eisen und DOC
Deponie Hinterbissau	1920-1930	1500	Siedlungsabfälle	OG	2009: Hochwasserschutzprojekt mit Bachoffenlegung. Aufgrund der Querung der Altablagerung wären bauliche Zusatzarbeiten am Deponiekörper erforderlich. Die Sohle des neuen Bachlaufs und die Bachflanken wurden im Bereich der Deponie mit Kunststofffolien zur Minimierung des Sickerwasseranfalls abgedichtet.	Die best. Eindolung nach heutigen wasserbaulichen Kriterien bezüglich ihrer hydraulischen Kapazität ungenügend. Bei einem Hochwasserereignis drohte ein Wassereinstau und somit bestand eine konkrete Gefahr von Rutschungen sowie lästige und schädliche Einwirkungen auf das Bachwasser.	
Deponie Schurtanne	1935-1976	20'000	Hauskehricht und Bauschutt	OG	2013: Offenlegung des Schurtannenbach, Spundwand im Zuströmbereich der Deponie und Ableitung des gestauten Hangwassers in den Schurtannenbach, Überwachung Sickerwasser.	Schlechter Zustand der Bacheindolung, mit Hangwasserinfiltration gesättigt --> Rutschungen	Im Untergrund der Deponie floss eingedolt der Schurtannenbach
Deponie Schluckhals	1960-1974	240'000		OG, GW	2004: doppelte Sickerleitung zwischen dem Deponiefuss und dem Kanderufer zur Verhinderung der Exfiltration von kontaminiertem GW. Ev. Behandlung des Sickerwassers, nach Überwachungsergebnissen	Übermässige Emissionen von Schadstoffen via Grundwasser gelangen in die unmittelbar angrenzende Kander	
Deponie Lutzeren		1'000'000	Siedlungsabfälle, Gewerbe- und Industriemüll, Strassenschlämme, Bauschutt, Aushub	Gas	Beginn: Mai 2001 / Fassungs- und Ableitungssystem für Deponiegase entlang des am Deponierand liegenden Wohnhauses. Konzentration AltIV CH ₄ und CO ₂ weit überschritten.	Gefährdung Personen im Gebäude mit Gasemissionen.	
Deponie Bachtelgraben	1950	300'000 m ³ davon 100'000 m ³ Siedlungsabfälle	Hauskehricht und Gewerbeabfälle, mit Inertmaterial überdeckt. Bauschutt: 2'500 m ³ Reaktorstoffe: ca. 12'000 m ³	OG, Gas	1999: Gasdrainage erstellt und Materialersatz --> Ziel erreicht. Installation Zwangsentgasungssystem	Gefährdung Personen im Gebäude mit Gasemissionen.	
Deponie Chatzbach	1964-1975	56'000		OG	1. Phase 2000 Stabilisierung und Entwässerung der steilen Deponieböschung und Fassung Sickerwasser; 2. Phase 2008-2011 Rekultivierung	1997: Regen --> Rutschung Deponieböschung und abgelagerte Abfall in den Chatzbach. Belastung durch Deponiesickerwasser	
Deponie Steinweid Ost/West	1967-1990	130'000	Siedlungs- und Gewerbeabfälle, Bauschutt, Aushubmaterial	OG	2001: Reinigung Bachbett, Spülung Sickerwasserleitungen und Einbau einer zweistufigen Sickerwasser-Filteranlagen mit Tropfkörper --> Sanierungsziel nicht erreicht. 2013: rund 1km lange erdverlegte Abwasserleitung und ein entsprechenden Anschluss an die Kanalisation realisiert.	Beeinträchtigung des Bachwassers durch Deponiesickerwasser (40x NH ₄ ; DOC, Fe)	
Décharge d'Aveneyre	1965-1970	9400	Siedlungsabfälle (Textilien, Glas, Altmüll, Plastik, Konservbüchsen, Holz, Stromkabel, Pneus, Papier, Beton, Porzellan, Kautschuk)	OG, Gas	Neue Sickerwassersammelstelle: Bach fliesst ohne mit den Abfällen in Kontakt zu kommen.	oberirdisches Wasser ist gefährdet	Der Bach wurde 1965 in Rohre verlegt, um die Menge an Siedlungsabfällen aufnehmen zu können, bis Mitte Juli 1967. Bis 1970 wurden Inertabfälle entsorgt.
Deponie Klosters	1950-1970	90'000	Hausmüll, Aushubmaterial, 3 Parzellen: Papier, Hobelspäne, Karton, Holz, Metall, Konservdosen, Pfannen, Autowracks, Pneus	OG	Im Oberstrombereich der Deponie wurde die Saane umgeleitet. Dies ermöglichte es währenddessen, die Fliessrichtung vom Deponiefuss wegzuführen. --> Stabilisierung Hang mit Blockwürfen und Aushubarbeiten werden gemacht (ca. 5'000 m ³).	Bei Hochwasserereignissen können Abfälle ins Fließgewässer freigesetzt werden. Ein Grossteil vom Sickerwasser gelangt direkt in das Sensebett.	2014: Hochwasser, führte zu Hangrutschen. Die Fundamente eines Betriebsgebäudes des auf der ehemaligen Deponie stehenden Unternehmens wurden freigelegt, so dass das Gebäude in der Folge entfernt werden musste.
Deponie Jardins d'Onex	1957-1962	270'000		Gas	2005: Sanierung durch Isolierung: Aufnahme des Gases und des Sickerwassers, zusätzlich wird das Sickerwasser zu einer ARA geführt. Anschliessend Überwachung	Schutz der Benutzer des Familiengartens schützen und Verringerung von Sickerwassereinträgen in den Bach.	2005: Vertikal abgesachtete Gaspumpe und Gasfangnetz, sowie Trocknungsausrüstung und eine Gasbehandlungsanlage wurden installiert.
Deponie Batschen	1. 1920 2. 1940-1965 3. ab 1960 - 1977	1. 150 2. 1000 3. 4000	Siedlungsabfälle	OG, GW, Boden	1999: die Deponie soll oberflächlich abgeräumt werden --> 6.5 t Abfall wurden nach Rüti geflogen und in der KVA verbrannt.	Wegen Hangrutschung rutschte ein Teil der Deponie ab. Entsorgung des abgerutschten und anstehenden Materials (Siedlungsabfälle) in Kehrichtverbrennungsanlage.	3 ehemalige Siedlungsabfalldeponien und eine Bauschuttdeponie/Aushubdeponie.

Name der Deponie	Jahr Erstellung	Kubatur	Beschreibung	Schutzgüter	Sanierung	Sanierungsgrund	Bemerkungen
		(ca. m ³)					
Deponie Sass Grand	1967-1995	300'000	Hausmüll (75%), Sperrgut (15%), Bauschutt, Grünabfälle, Klärschlamm	OG, GW, Gas	2004: Aeration des Deponiegutes 2007: Gasbrunnen erstellt, Absaugen von Deponiegas 2008: Aerobisierung des Deponiekörpers 1. Sanierung der Etappe 0 2. Entgasung der Etappen 1 und 2 Absaugverfahren mit tiefenverfilterten Brunnen	starke Belastung oberirdischen Gewässers und des Grundwassers	Die Sickerwässer werden gefasst und in der kommunalen Kläranlagen gereinigt. Von 1980 bis 2000 wurden auf diesen Etappen brennbare Abfälle abgelagert, hauptsächlich Kehricht und geringe Mengen Gewerbe- und Bauabfälle sowie Klärschlamm.
Deponie Siedenmoos	1970-1996	120'000	Hauskehricht und Aushub Drei Bereiche: 1. Bauschuttlager 2. Alterdeponiekörper 3. Aktueller Deponiekörper	OG, Gas	Die Sanierung wurde mit dem Bau einer Inertstoffdeponie im Perimeter der alten Deponie gekoppelt. - Abdichtung der Deponieoberfläche mit Ca-Bentonit-vergüteter und aufbereiteter KVA-Schlacke. - Erstellung eines Entwässerungssystems und eines 3-stufigen Pflanzenklärbeckens für die Behandlung des Sickerwassers - Errichtung einer Deponie-Entgasungsanlage	technische Barriere, ein wirksames Entwässerungssystem und eine Entgasungsanlage fehlten	Da sich die Deponie ca. 1.6 km vom nächsten ARA-Anschluss befindet und die jährlichen ARA-Gebühren speziell für die Deponiesickerwasser hoch sind, wurde eine örtliche Lösung angestrebt -> mehrstufige, bepflanzte Bodenfilter.
Deponie Udelboden		700'000 m ³	Zwischen 1956 und 1970 Ablagerung Bauschutt und gasbildende Abfälle (Schlämme, Grüngut und Holz) -> nach Schliessung überbaut -> Gase im Gebäude festgestellt	Gas	Lüftung der Räume und Abdichtung der Bodenrisse. Erfolgskontrolle seit 2003	Gefährdung Personen im Gebäude mit Gasemissionen.	
Sackweid	bis 1980	17'000 m ³		Gas	Entlüftungsröhre und Gasdrainage. 2008: die Porengasmessungen zeigen, dass im Untergrund für CO ₂ und CH ₄ die massgebenden Konzentrationswerte überschritten werden.	Gefährdung Personen im Gebäude mit Gasemissionen.	
Deponie Moosweiher	1938-1971	80'000 - 12'000	60% Siedlungsabfälle	OG, Gas	Sickerwasser wird in einen neuen Pumpenschacht geführt und von dort via einer bestehenden Schmutzwasserleitung in die Kanalisation geleitet.	2003: im Sickerstrang Nord NH4 mehr als 10fach überschritten im Sickerwasser. Der Sickerstrang Nord entwässert in den angrenzenden Mühlebach -> GschV: nicht erfüllt	
Deponie Hostetten					2004: Siedlungsabfalldeponie vollständig ausgehoben und dekontaminiert.	im Rahmen der Bauarbeiten des Hochwasserschutzprojekt Engelberger Aa	
Deponie Scheidgraben	ca. 1954	100	Siedlungsabfälle wie Gebrauchsgegenstände aus Glas, Blech, Metall, Gummi, Verbrennungsrückstände, belastetes Aushubmaterial.	OG, GW	vollständige Dekontamination: belastetes Material mit KW, PAK, Nitrit und SM ausheben und auf einer Reaktordeponie entsorgt.	Im Rahmen der 2. Etappe des Hochwasserschutzprojekt Engelberger Aa wurde der Bach Scheidgraben aufgeweitet und renaturiert. Während den Bauarbeiten wurde eine unbekannte Siedlungsabfalldeponie festgestellt. Akute Gefährdung GW und Oberflächengewässer	
Deponie Seehof	1957-1958	400	Siedlungsabfälle wie Gebrauchsgegenstände (Blechdosen, Glasflaschen, Pneus, Holz, Schuhe, Velosattel, Keramik, öldurchtränkte Textilien, usw.), belast. Aushubmaterial.	GW	ab 2007: im Zusammenhang mit der Ausführung der Wohnüberbauung. Das Deponiematerial wurde ausgehoben, triagiert und entsorgt Mittels Abpumpen und Abscheidetechnik wurde das kontaminierte Grundwasser vorbehandelt und anschliessend der ARA zugeführt.	offene Kehrichtdeponie, aufgrund von Klagen der Anwohner sowie unhaltbarer hygienischer Zustände nach nur etwa einjähriger Betriebsdauer aufgegeben. GW wurde durch die freigelegten Abfälle kontaminiert.	
Deponie Unterbüel	1955-1993	190'000	1955-1972: Kehricht , 1982-1984: Aushubmaterial und Bauschutt, 1991-1993: Aushubmaterial aus dem Bau des Autobahnzubringers.	OG	Fassung des sauberen Hangwassers und Ableitung in den Schwärzenbach Fassung des Sickerwassers an der nördlichen Deponiestirn und Ableitung in die Kanalisation	Hanggrundwasser durchfliesst den Deponiekörper und gelangt via diffuse Austritte oder Ableitungen in den Bach.	Eine Oberflächen- oder eine Basisabdichtung sowie eine qualifizierte Entwässerung fehlen.
Deponie Schönbrunn	1949-1961	38'000	Siedlungsabfälle, Bauschutt, Aushub, Schlacke, Gewerbeabfälle.	OG	neue Bachrinne mit Sohlenabdichtung und ausreichender Abflusskapazität. Neue Sickerleitung wird in einen Pumpschacht geführt, welcher je nach effektiver Qualität des Sickerwassers eine Einleitung in den Mühltoelbach oder eine Umleitung in den Schmutzwasserkanal ermöglicht.	Einleitung in schlechtem Zustand und Rohrdurchmesser zu klein; bei Hochwasserereignissen können Abfälle weggeschwemmt werden.	Offenlegung des Baches, Ausdolen des Baches und neu über den Deponiekörper geführt.

Name der Deponie	Jahr Erstellung	Kubatur	Beschreibung	Schutzgüter	Sanierung	Sanierungsgrund	Bemerkungen
		(ca. m ³)					
Helltobel	bis ca. 1970	2'000	Siedlungsabfälle bis 1970er Jahre Glas, Plastik div. Metalle, Schlacke Holz, Bauschutt	OG	Vollständige Entfernung des Deponiematerials	Sanierung wegen Ausschwemmung / Rutschung	
Décharge Colliare	1971-1995	750'000	Schlacke und Asche aus einer Kehrichtverbrennungsanlage, Autowrackzerkleinerungsabfälle, Reststoffe von Biostabilisatoren, Siedlungsabfälle, Kompost, quecksilberhaltige Weizensamen.	OG, GW	2008: 1. Etappe: Sichern von Hot spots. > ev. 2. Etappe: Belüftung der Abfälle > ev. 3. Etappe: Bekämpfung der Chrombelastung durch Abdichten. Hydraulische Sicherung durch Seitenwände aus Bentonit. Es kam nie zur zweiten Phase: Die Kosten waren zu hoch, das Gebiet wurde als üB klassiert und natürliche NH4-Werte (1mg/l) wurden gemessen.	oberirdische Gewässer (NH ₄) und Grundwasser (NH ₄ , Nitrit, Chrom) hatten erhöhte Konzentrationen. An der Flanke der Deponie sind oberflächliche Rutschungen vorhanden.	Gewässerschutzgebiet Au Sanierung durch Eingrenzung oder Durchlüftung
Décharge Pré-des-Fourches	1972-1996	360'000		OG	Installation eines Abflussrohres, um das Sickerwasser zu einer Kläranlage zu leiten. Zweijährige Überwachung Projekt mit Durchlüftung und Rezirkulation des Sickerwassers	Ammonium Beseitigung der Gefahr, welche durch das Sickerwasser in den Oberflächengewässern entsteht	Aushub eines Grossteils des abgelagerten Abbruchmaterials.
Décharge sur les Roches	1973-1995	15'000	Aushubmaterial und Siedlungsabfälle	GW, Boden	Sicherung durch Abräumen der oberen Partie der Rinne. Sortierung und Beseitigung von 2'500 m ³ Material	2007: Sanierungsmassnahmen nach Erdrutsch im Jahre 2001. Aber laut GSchV besteht keine Gefahr	Schwermetalle und Ammonium in tolerierbaren Konzentrationen enthalten.
Décharge en Vuchy	1967-1996	env. 8'000	Siedlungsabfälle, Sperrmüll, Planzen, Plastik, Pneus, diverse Fässer, Elektrohaushaltsgeräte, Altmittel, Abbruchmaterial, Aushubmaterial	OG	> Bergseitiges Sammeln der Bachwässer > Stabilisierung des Deponiekörpers (Drainage mittels Drainagegräben, Aufschüttungen, Aufforstung) > Talseitige Abgrenzung der Deponie	Erdrutschgefahr, welche wiederum einen Wasserlauf gefährdet. AOX, OC, NH ₄	
Décharges la Chavanne et Bois-de-Vaux	1965-1979 Vaux 1980-1996 Chavanne	20'000	Siedlungsabfälle, Planzenabfälle, Abbruchmaterial, Sperrmüll, Altmittel und Strassenausbruchmaterial	OG	Totalsanierung: Alle Abfälle werden ausgegraben, getrocknet, triagiert und entsorgt	Revitalisierungsprojekt der Venoge -> Kompletter Aushub des belasteten Materials.	
La Fare	1965-1983	2'000'000	Bauschutt (40%), Schlacke von Siedlungsabfällen (20%), Aushubmaterial (40%)	OG	2010: Monitored natural attenuation (MNA)	Zu hohe NH ₄ Werte im oberirdischen Gewässer	Falls MNA nicht wirksam genug müssten 2 Bäche umgeleitet werden und das Sickerwasser in die Kanalisation geleitet werden.
Au Gottau	1960-1969 / Auffüllung mit Erde	11'400	Siedlungsabfälle, Erden und Steine	OG	2013 gab es starke Regenfälle: Ein Teil der Böschung der alten Deponie rutschte ab und überschwemmte einen Teil des Flusses weiter talabwärts. Sofortmassnahmen waren: Entfernung eines Teils des Abfalles, das ziehen von Drainagegräben, sowie Steinschüttungen am Fusse der Böschung, um einen geringeren Böschungswinkel zu erreichen. Anschliessende Rückgabe der Parzelle an den Bauern.	Abgesehen von den Regenfällen 2013 gab es keine weiteren Probleme.	1996: Stickstoffreiche Sickerwasser drohten durch Eutrophierung des Bachwassers am Fusse der Böschung zu führen und die Vegetation, sowie einige Bäume zu ersticken 1997: pH ist anormal gestiegen (auf pH=8), das Sickerwasser führte zum Wildwuchs von Bakterien, Algen und Pilzen.
Verney	1967-1975	67'000	Siedlungsabfälle, Eisen, Glas, Papier	OG, GW	1. Etappe: Sortierung der Abfälle und deren Entsorgung, Ausplanieren, Oberflächenabdichtung, Einsetzen von Drainageleitungen 1997-1999 2. Etappe: Fertigstellung der Sanierungsarbeiten 2001-2002	Schwermetalle und Nitrit in widerrechtlichen Mengen im GW	GW mit Cu, Ko, Pb und Zn belastet.
Frickentobel	1930-1960	36'000	Aushubmaterial, Humus, Bauschutt, Siedlungsabfälle, Gerbereiabfälle, Galvanikschlamm, sonstiger Gewerbeabfall	OG, Gas	Ableitung des Sickerwassers mittels Pumpbetrieb. Sept. - Okt. 2009. Hochbelastetes Material ausheben und entsorgen, Gasdrainage, Geländeversiegelung	Hohe Konzentrationen an Ammonium, Ammoniak und Nitrit im benachbarten Bach. Wohnüberbauungen mit Gasemissionen	3 Varianten: 1) Auskoffung der ganzen Deponie und Materialersatz 2) Fassung und Ableitung von Hangwasser im Anströmbereich / Versiegelung 3) Fassung und Ableitung von Hangwasser und Sickerwasser im Anströmbereich
Cd- & Hg-Altlast Überbauung Twinpark	1936-1992	10'000	Im Zeitraum zw. 1936-1992 wurden Abfälle aus der Herstellung von Amalgamlegierungen für Zahntechnische Praxen im Umfeld des Twinpark in Dietikon vergraben	Boden	Totalsanierung. Ausheben und Entsorgung des sanierungsbedürftigen Bodens. Dezember 2012 - Februar 2013	Schwere Cd- und Hg-Konzentration im Boden	

Nachhaltiges Bauen auf Deponie

Strüby Holzbau Gesamtdienstleister

