

> Sicherung von Deponie-Altlasten

Stand der Technik, Grenzen und Möglichkeiten



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

> Sicherung von Deponie-Altlasten

Stand der Technik, Grenzen und Möglichkeiten

Hinweis: Am 1.1.2016 ist die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen vom 4. Dezember 2015 (Abfallverordnung, VVEA) in Kraft getreten und hat die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990 abgelöst. Diese Änderung wurde in der vorliegenden Vollzugshilfe angepasst. Ansonsten basiert der Inhalt auf dem Stand der Erstpublikation im Jahr 2007.

Rechtlicher Stellenwert dieser Publikation

Diese Publikation ist eine Vollzugshilfe des BAFU als Aufsichtsbehörde und richtet sich primär an die Vollzugsbehörden. Sie konkretisiert unbestimmte Rechtsbegriffe von Gesetzen und Verordnungen und soll eine einheitliche Vollzugspraxis fördern. Berücksichtigen die Vollzugsbehörden diese Vollzugshilfen, so können sie davon ausgehen, dass sie das Bundesrecht rechtskonform vollziehen; andere Lösungen sind aber auch zulässig, sofern sie rechtskonform sind. Das BAFU veröffentlicht solche Vollzugshilfen (bisher oft auch als Richtlinien, Wegleitungen, Empfehlungen, Handbücher, Praxishilfen u.ä. bezeichnet) in seiner Reihe «Umwelt-Vollzug».

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

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

Autoren

Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier; Dipl.-Ing. Christian Poggendorf;
Dipl.-Ing. Diana Rosenau; Dr. Ing. Martin F. Lemann;
Dipl.-Ing. Benno Kästli

Begleitung

Dr. phil. nat. Geologe Bernhard Hammer, Dr. phil. nat. Mineraloge
Christoph Wenger, Dipl. phil. nat. Biologe Christoph Reusser,
alle Sektion Altlasten und Industrieabfälle, BAFU;
Mitglieder der VASA-Fachkommission

Zitiervorschlag

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.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

Algroup (heute ALCAN)

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uv-0720-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

© BAFU 2007

> Inhalt

Abstracts	5		
1 Einleitung	7		
1.1 Ziele der Vollzugshilfe	7		
1.2 Struktur der Vollzugshilfe	8		
2 Grundlagen	9		
2.1 Rechtliche Grundlagen	9		
2.2 Sanierung im Rahmen der Altlastenbearbeitung	10		
2.3 Grundsätze der Sanierung	11		
2.4 Weitere Grundlagen der Sanierung von Deponie-Altlasten	12		
3 Gefährdungen bei Deponie-Altlasten	13		
3.1 Allgemeines	13		
3.2 Wirkungspfad Grundwasser	15		
3.3 Wirkungspfad Oberirdische Gewässer	16		
3.4 Wirkungspfad Luft	16		
3.5 Wirkungspfad Direkter Oberflächenkontakt	18		
4 Ziele der Sicherung von Deponie-Altlasten	19		
5 Oberflächensicherung	21		
5.1 Allgemeines	21		
5.2 Auswahl des Oberflächensicherungssystems	22		
5.2.1 Oberflächensicherung zur Verhinderung/Minimierung des Niederschlagseintritts	22		
5.2.2 Oberflächenabdeckungen	24		
5.3 Grundsätzlicher Aufbau der Oberflächensicherungssysteme	24		
5.3.1 Oberflächenabdichtung	24		
5.3.2 Qualifizierte Oberflächenabdeckung	27		
5.3.3 Oberflächenabdeckung	28		
5.4 Elemente der Oberflächensicherung	29		
5.4.1 Allgemeines	29		
5.4.2 Bewertung der Abdichtungsmaterialien	31		
5.4.3 Einsatz alternativer Materialien	32		
5.5 Gestaltung von Oberflächensicherungssystemen	32		
5.6 Bemessung und Nachweise	34		
5.6.1 Bodenmechanische Nachweise	34		
5.6.2 Statisch-konstruktive Nachweise	35		
5.6.3 Hydraulische und pneumatische Nachweise	35		
5.7 Qualitätsmanagement	35		
5.8 Aspekte der Nachnutzung von Deponieoberflächen	36		
6 Vertikale Sicherung	38		
6.1 Allgemeines	38		
6.2 Systemauswahl der vertikalen Sicherung	38		
6.3 Dichtwände	39		
6.3.1 Allgemeine Anforderungen an durch Dichtwände zu sichernde Standorte	39		
6.3.2 Allgemeine Anforderungen an Dichtwände	40		
6.3.3 Genereller Aufbau von vertikalen Abdichtungen	40		
6.3.4 Typen von Dichtwänden	41		
6.3.5 Ausführungsbesonderheiten	44		
6.4 Aktive hydraulische Sicherung	45		
6.4.1 Anwendung	45		
6.4.2 Einrichtungen der hydraulischen Sicherung	46		
6.4.3 Bemessung	47		
6.5 Passive hydraulische Sicherung (permeable Reinigungswände)	47		
7 Basisabdichtung	49		
7.1 Allgemeines	49		
7.2 Typen von Basisabdichtungen	50		
8 Gasfassung und Gasbehandlung	51		
8.1 Grundlagen der Gasproduktion	51		
8.2 Gasmenge und -zusammensetzung	53		
8.3 Gefährdungen durch Deponiegase	54		
8.4 Gasfassung und -entsorgung	54		
8.5 Aerobe Stabilisierung von Deponie-Altlasten	56		
9 Sickerwasserfassung und -behandlung	57		

10 Entwässerung	59
<hr/>	
11 Erfolgskontrolle, Überwachung und Nachkontrolle	60
11.1 Erfolgskontrolle	60
11.2 Nachkontrolle	60
11.2.1 Allgemeines	60
11.2.2 Langzeitbetrieb	61
11.2.3 Langzeiterhaltung	61
11.2.4 Funktionskontrolle von Bauwerken und Anlagen	61
11.2.5 Überwachung der Wirkungspfade	62
<hr/>	
Anhänge	63

> Abstracts

These executive guidelines provide an overview of the state of the art in matters of confinement of old landfills. They constitute a decision aid regarding the possible remediation measures and their cost benefit effectiveness, and are intended for cantonal and federal authorities, as well as for those obliged to carry out a remediation process and for planning engineers.

The guidelines mainly deal with municipal dumps and urban waste landfills and are divided into three sections:

- > a text part in which the threats to the environment posed by old landfills are described, the fundamentals of confinement explained and the basic requirements in that matter outlined;
- > Appendix A describing the technical systems;
- > Appendix B containing a glossary, abbreviations and literature sources.

Die Vollzugshilfe gibt einen Überblick über den Stand der Technik bei der Sicherung von Deponie-Altlasten. Sie bietet den Vollzugsbehörden auf Kantons- und Bundesebene, wie auch den Sanierungspflichtigen und planenden Ingenieuren eine Hilfestellung für die Entscheidung über mögliche Sanierungsmassnahmen sowie deren Wirtschaftlichkeit. Gegenstand sind dabei vor allem Gemeinde- und Siedlungsabfalldeponien.

Die Vollzugshilfe gliedert sich in drei Teile:

- > Textteil: Beschreibung der Umweltgefährdungen von Deponie-Altlasten Grundlagen und grundsätzliche Anforderungen der Sicherung,
- > Anhang A: Beschreibung der technischen Systeme,
- > Anhang B: Begriffsbestimmungen, Abkürzungen und Literatur.

La présente aide à l'exécution donne une vue d'ensemble de l'état de la technique en matière de confinement de d'anciennes décharges devant être assainies. Elle concerne principalement les anciennes décharges communales et de déchets urbains. Conçue comme aide à la décision concernant les mesures d'assainissement possibles et leur efficacité économique, elle s'adresse aux autorités d'exécution cantonales et fédérales, ainsi qu'à ceux qui sont tenus d'assainir un site et aux ingénieurs chargés de la planification. L'aide à l'exécution est divisée en trois parties:

- > le présent document décrit les dangers pour l'environnement dus aux anciennes décharges devant être assainies, explique les bases du confinement et indique les exigences fondamentales en la matière;
- > l'annexe A détaille les systèmes techniques;
- > l'annexe B comprend la définition des termes techniques, des abréviations et une bibliographie.

Keywords:

Landfill
Contaminated site
Confinement
Remediation

Stichwörter:

Deponie
Altlast
Sicherung
Sanierung

Mots-clés:

Décharge
Site contaminé
Confinement
Assainissement

Il presente aiuto all'esecuzione fornisce una panoramica sullo stato della tecnica nel settore della messa in sicurezza dei siti contaminati da discariche. La pubblicazione offre alle autorità esecutive cantonali e federali, ma anche a chi è tenuto a risanare una discarica e agli ingegneri addetti alla pianificazione, un strumento di supporto per stabilire le misure di risanamento possibili e per valutare la loro redditività. Il testo interessa soprattutto le discariche comunali e le discariche per rifiuti urbani.

L'aiuto all'esecuzione è strutturato in tre parti:

- > Testo: descrizione dei pericoli che i siti contaminati da discariche costituiscono per l'ambiente;
- > Allegato A: descrizione dei sistemi tecnici;
- > Allegato B: definizione dei termini, abbreviazioni e indicazioni bibliografiche.

Parole chiave:

Discarica

Sito contaminato

Circoscrizione

Risanamento

1 > Einleitung

1.1 Ziele der Vollzugshilfe

Deponien nach dem heutigen Stand der Gesetzgebung und Technik sind Bauwerke, die darauf ausgelegt sind, langfristig umweltverträglich zu sein. Dieser Ansatz wird im 3-Barrieren-Konzept realisiert, wonach die drei möglichen Barrieren

- > Standort (Geologie, Hydrogeologie)
- > Technisches Sicherungssystem (Abdichtung, Sammelsystem, Betriebskonzept)
- > Abfallinventar (Abfallart, Eigenschaften, Art der Behandlung, Stoffabbau)

unter Berücksichtigung der gesetzlichen Mindestanforderungen im Sinne der Umweltverträglichkeit optimal aufeinander abzustimmen sind. Es entsteht dabei ein Gesamtsystem, das langfristig beständig ist und in Abhängigkeit des Abfallinventars die möglichen Emissionen nach dem Stand der Technik in der Entstehung verhindert oder diese fasst und ihre Ausbreitung in die Umwelt verhindert.

Alte Deponien sind im Gegensatz dazu hinsichtlich der genannten Barrieren häufig ohne entsprechende Gesamtoptimierung errichtet und betrieben worden. In Abhängigkeit des realisierten Konzeptes zwischen dem deponierten Abfall, den technischen Sicherungssystemen und den Standorteigenschaften emittieren die Altdeponien bereits mehr oder weniger stark Stoffe in die Umwelt oder es besteht die konkrete Gefahr, dass nach dem Versagen vor allem der technischen Systeme zukünftig Stoffe freigesetzt werden und die Altdeponien damit sanierungsbedürftige Standorte (Altlasten) werden.

Da bei Deponie-Altlasten in vielen Fällen eine Dekontamination nicht sinnvoll und verhältnismässig sein wird, liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Vollzugshilfe in der Beschreibung von Strategien und Techniken zur Sicherung der Deponie-Altlasten.

Während für heutige Deponien ein technisches Regelwerk zur Verfügung steht, das für definierte Deponietypen die Anforderungen an die technischen Systeme und den Standort beschreibt, so dass bei deren Umsetzung gegen umweltgefährdende Emissionen Vorsorge getroffen ist, bestehen für die Altdeponien, von denen relevante Emissionen ausgehen und die deshalb als Deponie-Altlasten saniert werden müssen, keine «normierten» Sicherungskonzepte. Da für diese Deponie-Altlasten das Abfallinventar und der Standort festgelegt sind, besteht der Ansatz der Emissionsminderung oder -unterbrechung, abgesehen von der eigentlichen Dekontamination (Entfernung der Schadstoffe), in der Auswahl der technischen Sicherungssysteme. Ohne Festsetzung der technischen Systeme über gesetzliche Regelwerke besteht bei Deponie-Altlasten die Notwendigkeit aber auch die Chance, an die jeweiligen Standorteigenschaften und das Abfallinventar angepasste, individuelle technische Konzepte zu entwickeln und zu optimieren.

Ziel der vorliegenden Vollzugshilfe ist es, Hilfestellungen für die Entscheidung über mögliche technische Systeme zur Sicherung von Deponie-Altlasten zu geben. Hierfür sollen der Stand der Technik sowie Grenzen und Möglichkeiten der Systeme diskutiert werden. Ziel ist weniger eine vollständige Darstellung der technischen Details, sondern die Kriterien, mit denen eine Auswahl der Lösungen und deren Optimierung erfolgt, transparent zu machen.

Gegenstand der Vollzugshilfe sind dabei vor allem die so genannten Gemeinde- und Siedlungsabfalldeponien, in die neben dem üblichen Hausmüll insbesondere auch Bauschutt und Abfälle bzw. Sonderabfälle von Industrie und Gewerbe abgelagert wurden.

Die Vollzugshilfe richtet sich an die Vollzugsbehörden auf Kantons- und Bundesebene, die technische Sanierungssysteme hinsichtlich der Eignung und Genehmigungsfähigkeit zu prüfen haben. Die Vollzugshilfe soll gleichzeitig aber auch den Sanierungspflichtigen und den planenden Ingenieuren eine Hilfe bei der Bearbeitung sein. Sie soll insbesondere dem BAFU und der VASA-Fachkommission als wesentliche Grundlage zur Beurteilung von VASA-Abgeltungsgesuchen dienen (VASA: Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten).

1.2

Struktur der Vollzugshilfe

Die Vollzugshilfe «Sicherung von Deponie-Altlasten» gliedert sich in die Teile:

- > In diesem Teil werden die möglichen Umweltgefährdungen von Deponie-Altlasten beschrieben und die Grundlagen und grundsätzlichen Anforderungen an die Sicherung zur Beseitigung dieser Gefahrensituationen dargestellt. Textteil

Es wird gezeigt, wie sich aus den Gefährdungen die Zielsetzungen für die Sicherung entwickeln und welche Bausteine im Zuge der Sicherung anzuwenden sind.

Für die wesentlichen Bausteine der Sicherung von Deponie-Altlasten werden die zugehörigen technischen Elemente einzeln dargestellt und Hinweise zur Auswahl der einzelnen Elemente und ihre Wirkung in den Gesamtsystemen gegeben. Wesentliches Ziel ist es dabei, die Auswahl der Systeme und der einzelnen Elemente nachvollziehbar zu machen.
- > Enthalten sind für die einzelnen Elemente der Sicherung von Deponie-Altlasten detaillierte Beschreibungen ihrer Aufgabe im Rahmen der Gesamtsicherung, technische Angaben, Hinweise zur Anwendung, zu den spezifischen Kosten und eine abschliessende Bewertung. Dieser Anhang A dient als Ergänzung zu den Beschreibungen und Bewertungen im Textteil. Anhang A
- > Enthalten sind Begriffsbestimmungen zur Erläuterung der im Text verwendeten Bezeichnungen und Fachbegriffe, verwendete Abkürzungen und Literaturhinweise. Anhang B

2 > Grundlagen

2.1 Rechtliche Grundlagen

Die gesetzliche Grundlage zur Sanierung von Deponien und anderen durch Abfälle belasteten Standorten ist das Umweltschutzgesetz (USG) vom 7. Oktober 1983, das in Artikel 32c die Pflicht zur Sanierung, in Artikel 32d die Tragung der Kosten und in Artikel 32e die Abgabe zur Finanzierung von Sanierungen regelt.

Konkretisiert wird dieses Gesetz durch die Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998 und die Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten (VASA) vom 5. April 2000. Die AltIV enthält Vorschriften für diese Vollzugshilfe in den folgenden Abschnitten:

- > 3. Abschnitt: Überwachung und Sanierungsbedürftigkeit
- > 4. Abschnitt: Ziele und Dringlichkeit der Sanierung
- > 5. Abschnitt: Sanierung
- > 6. Abschnitt: Pflicht zu Untersuchungs-, Überwachungs- u. Sanierungsmassnahmen

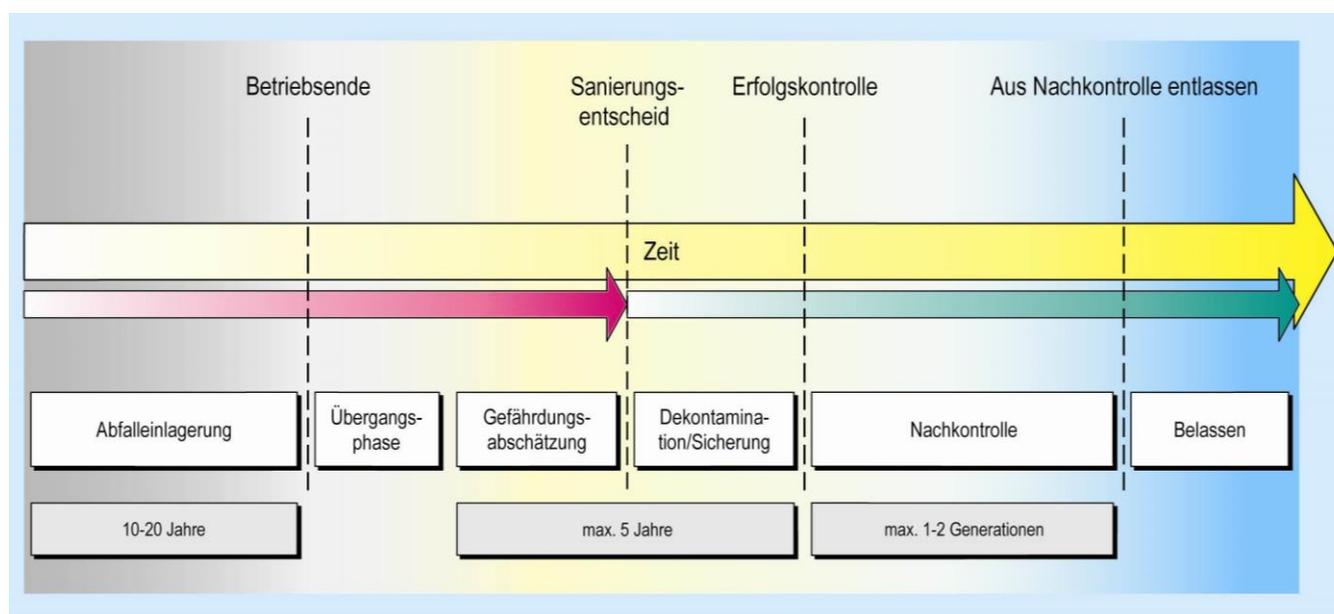
Die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) vom 4. Dezember 2015 enthält Regelungen für das Vermindern und Behandeln von Abfällen sowie das Errichten und Betreiben von Abfallanlagen, insbesondere von Deponien. Die VVEA kann hinsichtlich der grundsätzlichen Anforderungen an einzelne technische Bauteile zur Sicherung von Deponie-Altlasten herangezogen werden. So sind im Anhang 2 der VVEA Anforderungen an Errichtung und Abschluss von Deponien und damit an die Abdichtung, Entwässerung und Entgasung von Deponien gestellt, die in ähnlicher Weise auf Deponie-Altlasten angewendet werden können.

Ähnliches gilt für das untergesetzliche und technische Regelwerk. So ist die SIA-Norm 203 «Deponiebau» für die Projektierung und Errichtung/Ausführung von Deponien für Abfälle entsprechend den Anforderungen der VVEA anzuwenden. Sie gilt ebenso für die Instandsetzung von bestehenden Anlagenteilen und kann sinngemäss bei den einzelnen technischen Sicherungselementen angewendet werden.

2.2 Sanierung im Rahmen der Altlastenbearbeitung

Die Lebensphasen einer Deponie-Altlast (Abb. 1) beginnen mit dem Betriebsende der Abfalleinlagerung. Nach der Gefährdungsabschätzung und der Entscheidung über den Sanierungsbedarf sowie der eigentlichen Sanierung endet die Betrachtung mit der abschliessenden Entscheidung, dass der Standort aus der Überwachung entlassen werden kann.

Abb. 1 > Lebensphasen einer Deponie-Altlast



Die Sanierung steht als letzte Stufe im Ablauf der Altlastenbearbeitung, wie sie unter anderem auch in der AltIV festgelegt ist. Sie erfordert, dass auf der Grundlage der Voruntersuchung (Gefährdungsabschätzung) die Frage des Sanierungsbedarfes festgestellt worden ist. Der Abschluss der Phase der Gefährdungsabschätzung gilt deshalb auch als Grundlage für die Darstellungen in dieser Vollzugshilfe. Sie hat zum Gegenstand nur die bereits abschliessend untersuchten Deponie-Altlasten, bei denen der Bedarf einer Massnahme zur Gefahrenabwehr festgestellt ist.

Die Sanierung umfasst dabei die Dekontamination und/oder die Sicherung von Standorten. Die Nutzungsbeschränkung gilt nicht mehr als Sanierungsmassnahme.

Wie die übrigen Altlasten müssen auch die sanierungsbedürftigen Deponien mit der in einem detaillierten Variantenstudium als optimal evaluierten Methode saniert werden.

2.3

Grundsätze der Sanierung

Die Sanierung von Deponien und anderen durch Abfälle belasteten Standorten ist erforderlich (gem. Artikel 32 c Absatz 1 USG), wenn

- > «sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen oder
- > die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen.»

Die Altlastenverordnung (AltIV) konkretisiert diese Sanierungspflicht und definiert die Sanierungsbedürftigkeit in Abhängigkeit der Emissionen und der Expositionsbedingungen (s. Tabelle 1).

Tab. 1 > Definition der Sanierungsbedürftigkeit

Sanierungsbedürftigkeit hinsichtlich:	ist in folgenden Fällen gegeben:
Grundwasser	<ul style="list-style-type: none"> • Im Abstrom sind die zulässigen Konzentrationen (vgl. hierzu Art. 9 Abs. 2 Bst. a bis c AltIV) überschritten oder • bei überwachungsbedürftigen Standorten besteht wegen eines ungenügenden Rückhalts oder Abbaus von Stoffen, die vom Standort stammen, eine konkrete Gefahr einer Verunreinigung des Grundwassers (Art. 9 Abs. 2 Bst. d AltIV).
oberirdische Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> • Im Wasser, das in ein oberirdisches Gewässer gelangt, sind die zulässigen Konzentrationen (vgl. hierzu Art. 10 Abs. 2 Bst. a AltIV) von Stoffen, die vom Standort stammen, überschritten oder • bei überwachungsbedürftigen Standorten besteht wegen eines ungenügenden Rückhalts oder Abbaus von Stoffen, die vom Standort stammen, eine konkrete Gefahr einer Verunreinigung des Gewässers (Art. 10 Abs. 2 Bst. b AltIV).
Luft	<ul style="list-style-type: none"> • In der Porenluft des Standortes werden die zulässigen Konzentrationen überschritten und • die vom Standort ausgehenden Emissionen gelangen an Orte, wo sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können (vgl. Art. 11 AltIV).
Boden	<ul style="list-style-type: none"> • Belastete Standorte wirken nachteilig auf Böden ein oder belastete Böden gefährden Menschen, Pflanze oder Tier (vgl. Art. 12 AltIV). Belastete Böden, welche unter die AltIV fallen, werden nach den Bestimmungen der Bodenschutzgesetzgebung beurteilt.

Das Ziel der Sanierung wird in Artikel 15 AltIV allgemein definiert:

Beseitigung der Einwirkungen oder der konkreten Gefahr solcher Einwirkungen, die zur Sanierungsbedürftigkeit geführt haben.

Konkret bedeutet dies, dass die Einwirkungen oder die konkrete Gefahr langfristig und nachhaltig eliminiert werden muss: Die Behandlung soll nicht den folgenden Generationen aufgebürdet werden (Das bedeutet, der Standort kann nach spätestens ein bis zwei Generationen ohne weitere Massnahmen der Nachwelt überlassen werden).

Überdies sollte die Sanierung in ihrer Gesamtheit die Gefährdung der Umwelt wesentlich reduzieren, was sich am besten mit einer Ökobilanz darlegen lässt.

Die Ziele der Sanierung können auf folgende Weise erreicht werden (Art. 16 AltIV):

- > Umweltgefährdende Stoffe werden beseitigt (**Dekontamination**).
- > Die Ausbreitung umweltgefährdender Stoffe wird langfristig verhindert und überwacht (**Sicherung**).
- > Bei Bodenbelastungen wird die Nutzung eingeschränkt.

2.4 Weitere Grundlagen der Sanierung von Deponie-Altlasten

Vom BAFU sind verschiedene Vollzugs- und Arbeitshilfen zur Altlastenbearbeitung wie beispielsweise zur Durchführung der Sanierung von Altlasten veröffentlicht worden:

1. Altlasten: erfassen, bewerten, sanieren (BUWAL 2001)
2. Erstellung von Sanierungsprojekten für Altlasten (Vollzug Umwelt; BUWAL 2001)
3. Altlasten-Konzept für die Schweiz – Ziele und Massnahmen (Schriftenreihe Umwelt Nr. 220, BUWAL 1994)
4. Altlasten-Glossar (Vollzug Umwelt, BUWAL 1995)

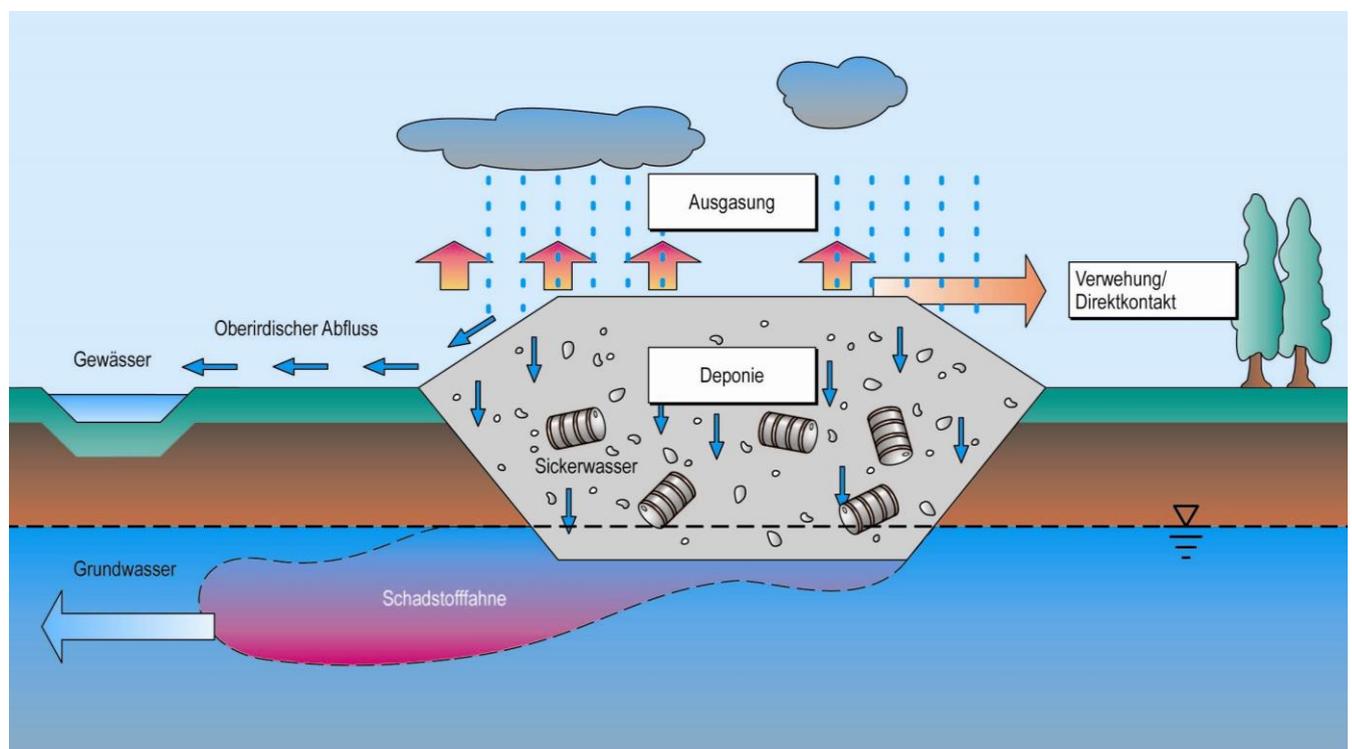
3 > Gefährdungen bei Deponie-Altlasten

3.1 Allgemeines

Von Deponien können wie von anderen belasteten Standorten verschiedene Emissionen (Umweltverschmutzungen) ausgehen und die Schutzgüter Grundwasser, oberirdisches Gewässer, Luft und Boden gefährden (vgl. Abb. 2):

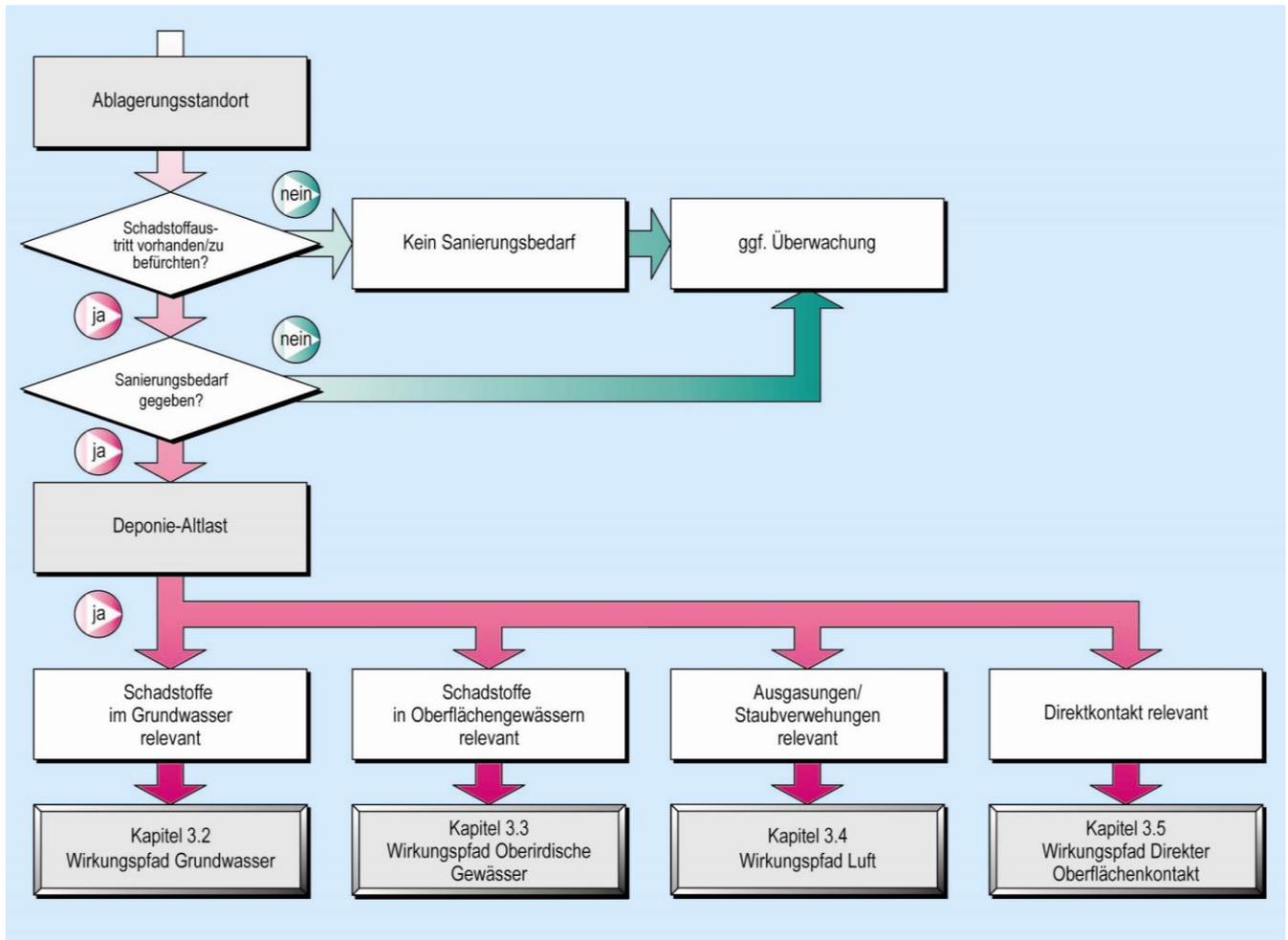
- > Sickerwasser (Kontamination durch die Abfallinhaltsstoffe)
- > Oberirdischer Abfluss (Kontamination durch die Deponieoberfläche)
- > Schadstofffahne im Grundwasser
- > Ausgasungen (Methan, toxische Gase)
- > Verwehungen / Direktkontakt
- > Direkter Oberflächenkontakt von Lebewesen mit dem abgelagerten Abfall

Abb. 2 > Emissionen von Deponien



In Bezug auf Ablagerungsstandorte ergibt sich der Sanierungsbedarf auf Grund folgender Wirkungspfade gemäss Abbildung 3:

Abb. 3 > Sanierungsbedarf für die einzelnen Wirkungspfade



Im Folgenden sind die möglichen Formen der Schadstoffausträge und die technischen Lösungen zur Sicherung, d. h. zur Emissionsminimierung oder -unterbrechung aus der Deponie-Altlast dargestellt. Es soll gezeigt werden, mit welchen technischen Einzellösungen die Bearbeitung der gesamten Sicherungsaufgabe möglich ist.

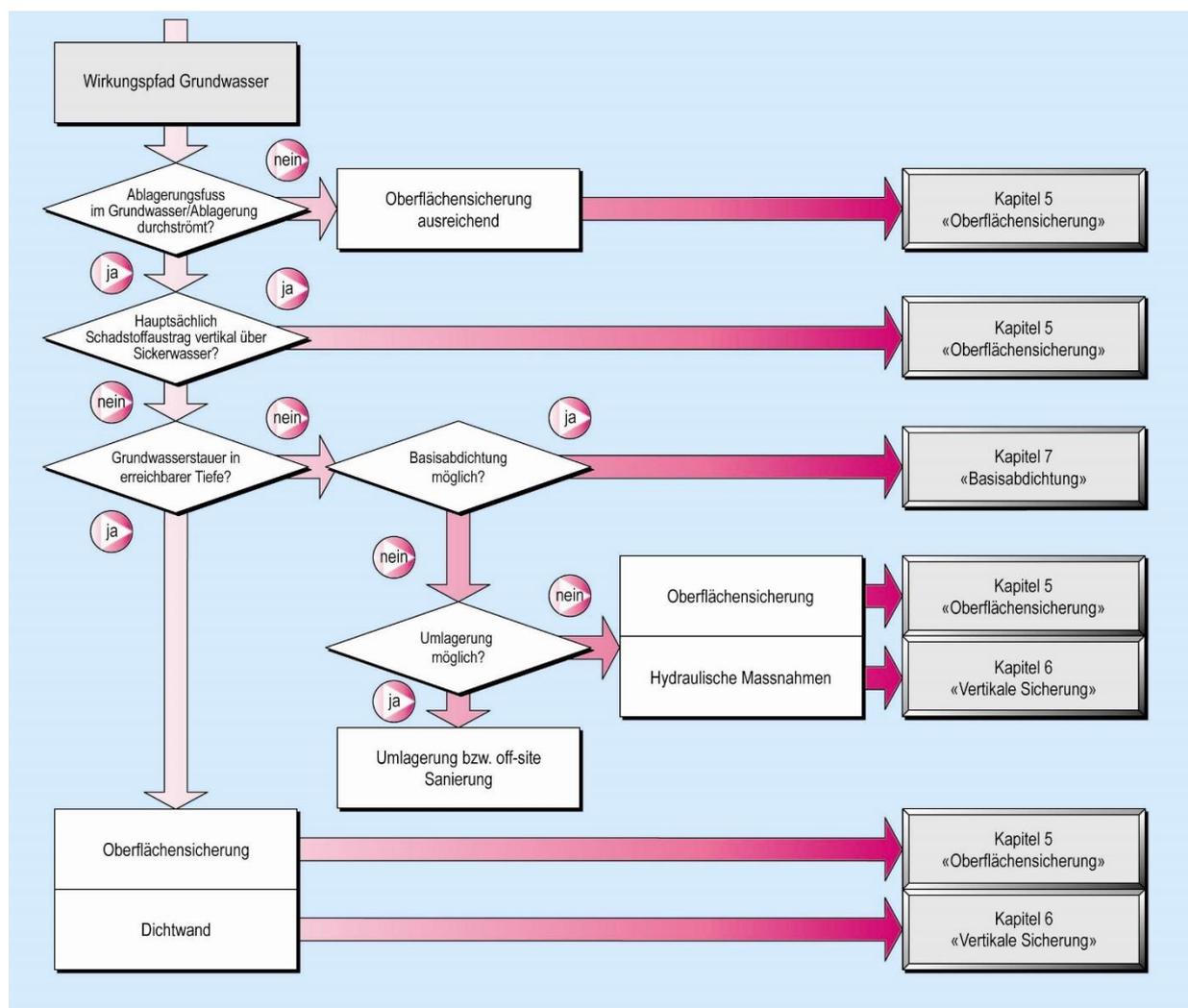
3.2

Wirkungspfad Grundwasser

Häufig sind Belastungen des Grundwasserpfad der wichtigste Grund für Sicherungsmassnahmen an Deponie-Altlasten. Die möglichen Sicherungsmassnahmen orientieren sich vor allem an der Lage des Abfallkörpers zum Grundwasser. Hinsichtlich der einzusetzenden Sicherungstechniken sind dabei Ablagerungen mit direktem Kontakt zum Grundwasser (vollständig durchströmt oder mit durchströmtem Ablagerungsfuss) von Ablagerungen, die vollständig oberhalb des Grundwasserspiegels liegen und nur vertikal durch versickerndes Niederschlagswasser durchströmt werden, zu unterscheiden.

In Abhängigkeit der geologischen Standortgegebenheiten können sich demnach sehr unterschiedliche Sanierungsmöglichkeiten bis hin zur Notwendigkeit einer Umlagerung ergeben. Die folgende Abbildung 4 verdeutlicht die grundsätzlichen Zusammenhänge.

Abb. 4 > Entscheidungen über Massnahmen zur Sicherung (Wirkungspfad Grundwasser)

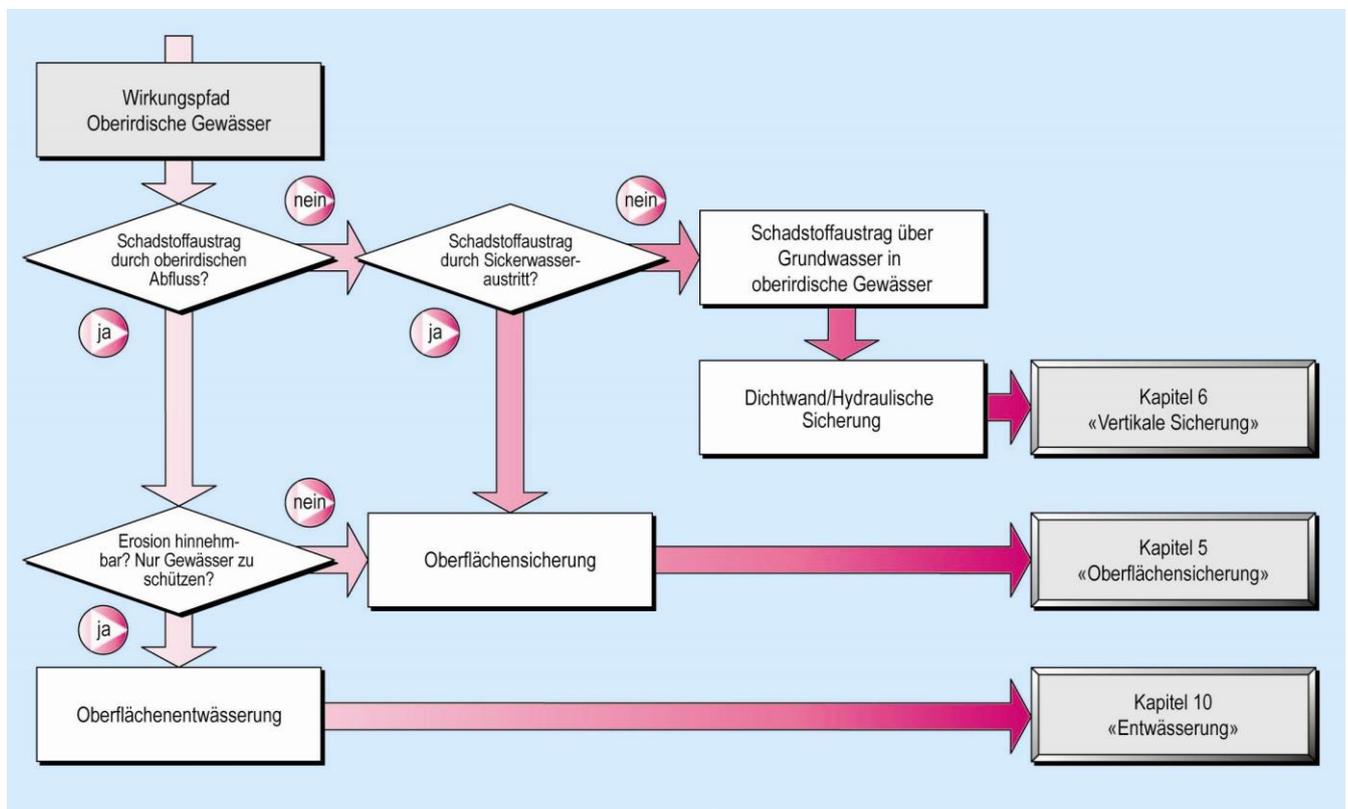


3.3

Wirkungspfad Oberirdische Gewässer

Deponiebürtige Schadstoffausträge über oberirdische Gewässer erfolgen entweder über Abschwemmungen von der Deponieoberfläche, den Direktkontakt des Deponates zum Gewässer oder indirekt über das Sicker- ins Grundwasser. Die denkbaren Sicherungen betreffen deshalb auch die Ablagerungsoberfläche oder die Verhinderung der Grundwasserkontamination durch das Sickerwasser.

Abb. 5 > Entscheidungen über Massnahmen zur Sicherung (Wirkungspfad Oberirdische Gewässer)



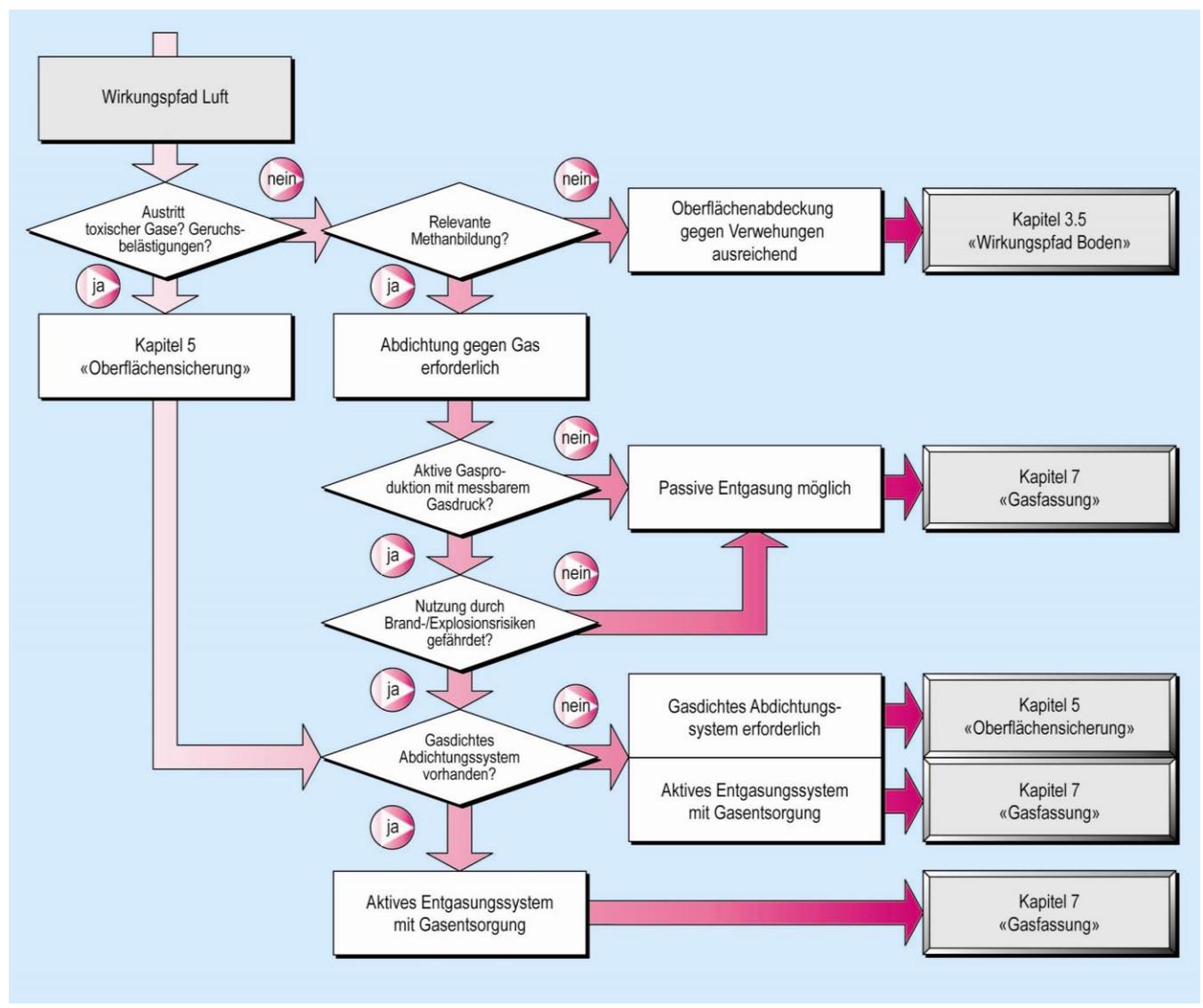
3.4

Wirkungspfad Luft

Häufig treten bei Deponie-Altlasten Verunreinigungen der Luft durch Gase (Deponiegase aus den Abbauprodukten der organischen Inhaltsstoffe wie Methan oder Kohlendioxid), gasförmige Abfallstoffe (z. B. chlorierte und aromatische Kohlenwasserstoffe) oder Stäube (Abfallstoffe an der Ablagerungsoberfläche) auf. Erhebliche Belästigungen durch Gerüche können den Gefährdungen durch Gase gleichgesetzt werden. Bei den üblichen Siedlungsabfalldeponien tritt die Deponiegasbildung in der Regel gemeinsam mit Grundwasserbelastungen auf, da die mikrobielle Umsetzung der Abfallstoffe an einen Wasserumsatz im Deponiekörper gebunden ist, welcher wiederum Sickerwasser produziert.

Betrachtet man die Thematik der Luftverunreinigungen alleine, ergeben sich bei Deponie-Altlasten, die relevante Gasmengen oder toxische Gase emittieren und deshalb saniert werden müssen, Möglichkeiten zur Sicherung vor allem durch die Oberflächenabdichtung. Zusätzlich wird bei aktiver Gasbildung ein System zur Gasfassung und -entsorgung benötigt. Dabei ist zu beachten, dass das Gas irgendwo in der Deponie-Altlast entsteht (abhängig von der vorhandenen Feuchtigkeit und von eindringendem Sickerwasser) und es ebenso überall auf der Deponie-Altlastenoberfläche austreten kann. Es reicht somit nicht, nur bei festgestellten «Hot Spots» eine Gasfassung und -entsorgung vorzusehen. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Zusammenhänge.

Abb. 6 > Entscheidungen über Massnahmen zur Sicherung (Wirkungspfad Luft)

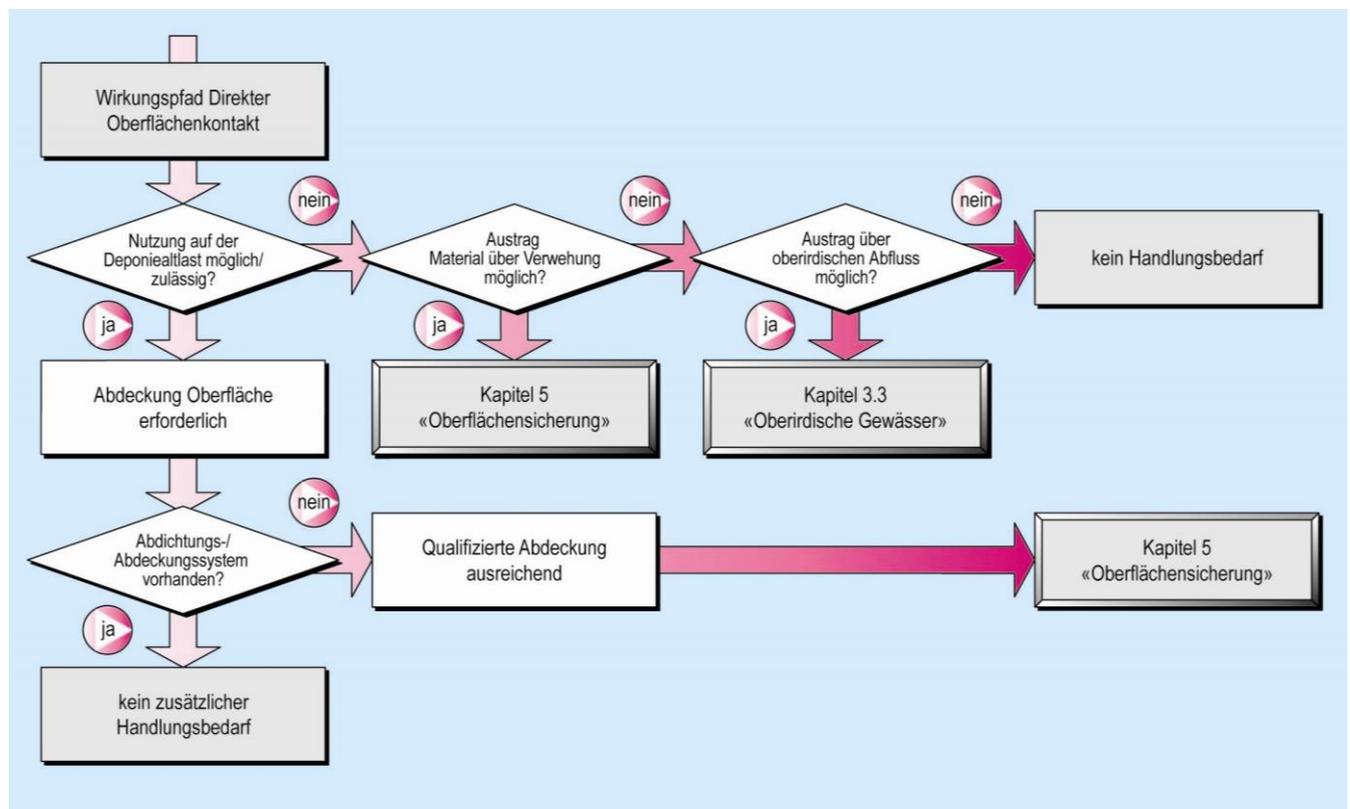


3.5

Wirkungspfad Direkter Oberflächenkontakt

Die Betrachtung des Wirkungspfades «Direkter Oberflächenkontakt» unterstellt, dass schadstoffhaltiges Ablagerungsmaterial direkt an der Deponieoberfläche zu finden und dass ein Direktkontakt zwischen dem belasteten Material und Menschen oder Tieren auf der Ablagerungsfläche möglich ist. Gleiches gilt für bewirtschaftete Deponieoberflächen. Die Sicherungsmöglichkeiten betreffen deshalb vor allem die Oberfläche.

Abb. 7 > Entscheidungen über Massnahmen zur Sicherung (Wirkungspfad Direkter Oberflächenkontakt)



4 > Ziele der Sicherung von Deponie-Altlasten

Das Ziel der Sanierung von Deponie-Altlasten besteht wie dargestellt darin, dass der Standort mittelfristig ohne weitere Massnahmen der Nachwelt überlassen werden kann.

Dieser nachsorgefreie Zustand der Deponie-Altlast setzt voraus, dass die Deponie bis zu diesem Zeitpunkt in einen weitgehend mineralisierten Zustand überführt worden ist. Das heisst für die meisten alten, von organischen Abfällen dominierten Siedlungsabfalldeponien, dass die biologischen Abbauvorgänge überwiegend abgeschlossen sein müssen. Dies macht sich z. B. dadurch bemerkbar, dass weitestgehend kein Deponiegas mehr gebildet wird.

Die im Rahmen dieser Vollzugshilfe beschriebenen Sicherungen von Deponie-Altlasten gehen dem entsprechend weitgehend nicht von einer flüssigkeitsdichten oberen Abdichtung aus. Dadurch wird der Niederschlagseintritt und die Sickerwasserbildung nicht vollständig verhindert, sondern nur soweit reduziert, dass eine Gefährdung z. B. des Grundwassers verhindert wird. So wird erreicht, dass gleichzeitig das für die biologischen Abbauvorgänge erforderliche Wasser aus der Deponie nicht gänzlich ferngehalten wird und die Deponie folglich nicht ganz austrocknet, sondern nur emissionsarm gemacht wird. Damit können in der Deponie-Altlast die Umsetzungsvorgänge bis zur vollständigen Mineralisation weiter ablaufen und der erwünschte nachsorgefreie Zustand erreicht werden («Deponie als Reaktor»). Der Schutz des Grundwassers muss dabei technisch sichergestellt und durch entsprechende Kontrollmessungen überwacht werden.

Eine vollständige Abdichtung der Deponie-Altlast ist nur für die Fälle denkbar, bei denen das Deponat aufgrund seiner Eigenschaften nicht in den erwünschten mineralisierten Zustand überführt werden kann oder die aus ihnen resultierenden Gefährdungen für das Grundwasser so hoch sind, dass jegliche Sickerwasserbildung verhindert werden muss. Bei einem langfristig denkbaren Versagen der Dichtungssysteme können dabei die Abbauvorgänge wieder in Gang kommen und erneut Emissionen frei setzen. Deshalb können vollständig abgedichtete Deponien nicht in einen nachsorgefreien Zustand gelangen und müssen als Bauwerke auf unbestimmte Zeit betrieben und überwacht werden. Bei der Planung von solchen vollständig dichten Einkapselungen, bei denen eine Entlassen der Deponie-Altlast aus der Nachkontrolle innerhalb von 1 bis 2 Generationen nicht möglich ist, ist alternativ die Dekontamination durch Entnahme und Entsorgung des Deponiegutes zu erwägen.

Eine gezielte Befeuchtung des Deponiekörpers durch Zuführung von Wasser von aussen oder durch die Rückführung von Sickerwasser auf den Deponiekörper mit dem Ziel, eine möglichst schnelle Stabilisierung des Deponates zu erreichen ist nicht mehr als Sicherung, sondern als Dekontamination zu verstehen und auf die Anwendungsfälle

beschränkt, in denen der Grundwasserschutz durch zusätzliche Massnahmen sichergestellt ist, z. B. durch eine Basisabdichtung und Sickerwasserfassung.

Zur Stabilisierung von Deponien ist grundsätzlich auch eine Belüftung des Deponates zur Herstellung aerober Verhältnisse und einem schnellen Abbau der organischen Substanz (z. B. «Biopuster»-Verfahren) möglich (vgl. Kap. 8.5).

5 > Oberflächensicherung

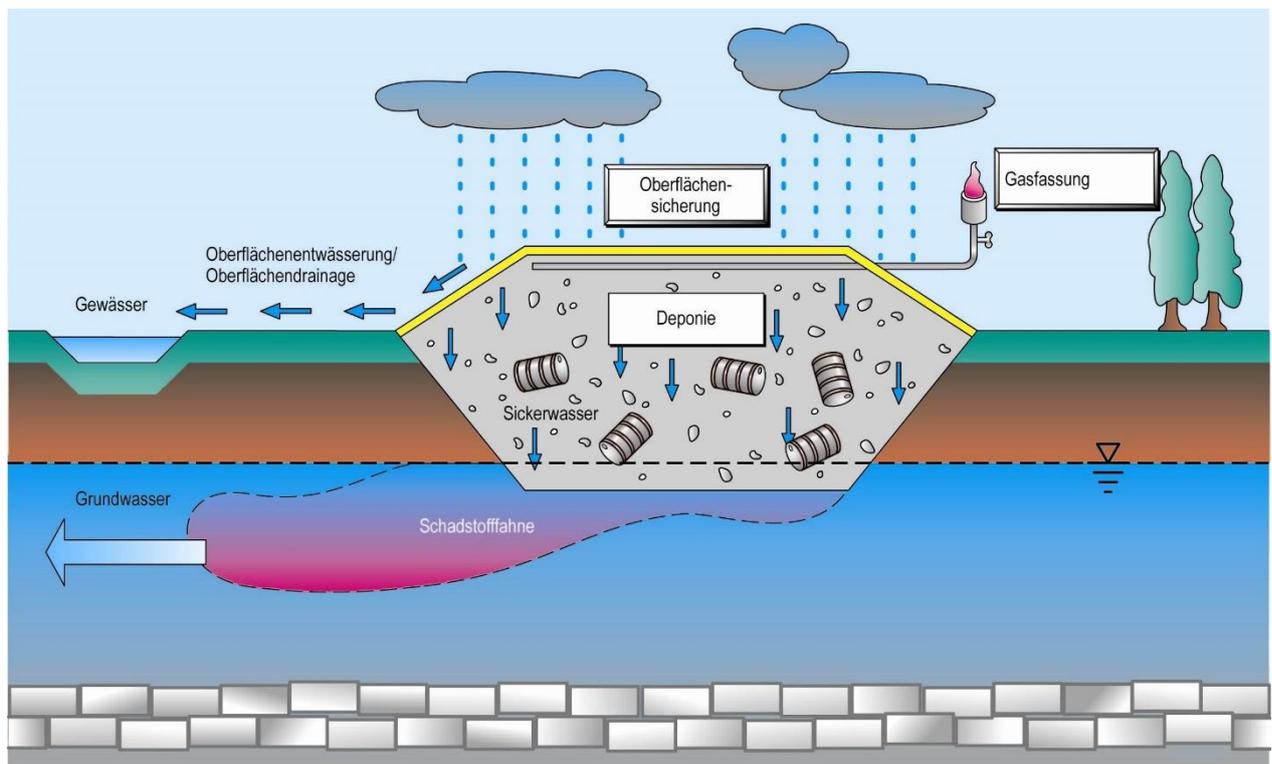
5.1 Allgemeines

Mit dem Bau einer Oberflächensicherung werden grundsätzlich folgende Ziele verfolgt:

- > Verhinderung/Minimierung der Schadstoffausbreitung und deren Einwirkung auf Schutzgüter
- > Minimierung des Eintrages von Sickerwasser in den Deponiekörper
- > Reduzierung der Emission von flüchtigen Schadstoffen oder Deponiegas
- > Verminderung der Geruchsemissionen, Staub- und Abfallverwehungen
- > Rekultivierung des Standortes
- > Langfristige Sicherung
- > Geringer Unterhaltsaufwand

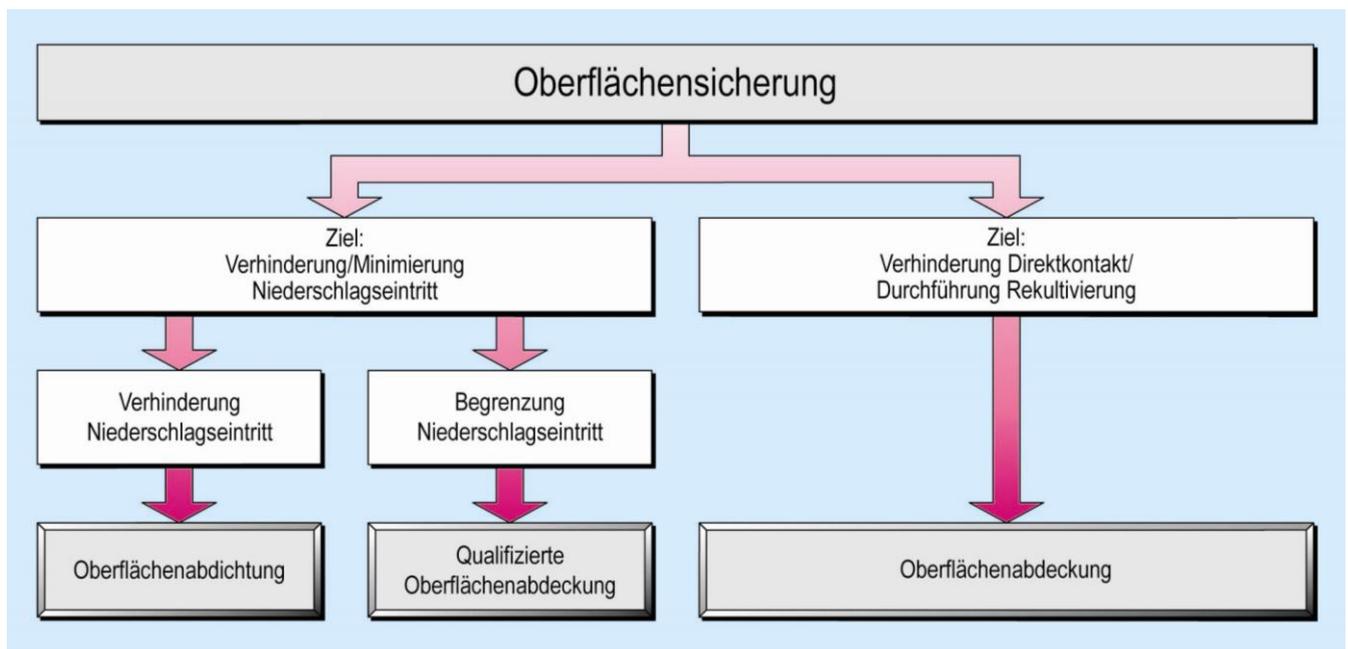
Die generelle Funktionsweise der Oberflächensicherung ist der Abb. 8 zu entnehmen:

Abb. 8 > Generelle Funktionsweise der Oberflächensicherung



Oberflächensicherungssysteme lassen sich hinsichtlich der Ziele, die sie im Rahmen der Gesamtsicherung der Deponie-Altlasten haben, systematisieren:

Abb. 9 > Systematik der Systeme zur Oberflächensicherung



5.2 Auswahl des Oberflächensicherungssystems

In einem ersten Schritt ist für jede Deponie-Altlast zu prüfen, welche Art der Oberflächensicherung zu realisieren ist. Neben den Standortbedingungen und der Art des Deponates sowie dem Zustand der technischen Barriere ist insbesondere die vorhandene Gefährdung ein Massstab für die Auswahl der zu errichtenden Oberflächensicherung.

5.2.1 Oberflächensicherung zur Verhinderung/Minimierung des Niederschlagseintritts

Bei den auf die Verhinderung bzw. Minimierung des Niederschlagseintritts zielenden Systemen sind zwei wesentliche Typen zu nennen, die sich hinsichtlich der Zulässigkeit von Restdurchsickerungen von Niederschlagswasser unterscheiden:

Oberflächenabdichtung

Die verschiedenen Formen der mineralischen Abdichtungen können von sich aus keine Sicherheit geben, dass unter bestimmten Standortbedingungen nicht doch eine Sickerwasserbildung auftritt. Im Gesamtzusammenhang des Abdichtungssystems, vor allem mit der Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht, sind die Restsickerwassermengen sehr gering, im Verhältnis zum begrenzten Gefährdungspotential hinnehmbar und hinsichtlich der Stabilisierung des Deponates sogar erwünscht.

Eine wegen der mumifizierenden Wirkung nur für Ausnahmefälle anzuwendende Sonderform der Oberflächenabdichtung sind die vollständig flüssigkeitsdichten Systeme («Konvektionssperre»). Darunter werden Systeme verstanden, die bei ordnungsgemäsem Einbau und ohne Ausnahme hinsichtlich der Jahreszeit oder Witterungsbedingungen keine Durchsickerung zulassen. Hierzu zählen in einer Kombinationsabdichtung zur Zeit nur die Kunststoffdichtungsbahn und die Asphaltbetondichtung.

Qualifizierte Oberflächenabdeckung

Die Abdeckungen mit einer qualifizierten Rekultivierungsschicht minimieren die Sickerwassermengen erheblich, eine bestimmte Restdurchsickerung ist aber im Jahresmittel zulässig.

Der Einsatz einer qualifizierten Abdeckung bietet sich bei Ablagerungen mit geringem Gefährdungspotential und des Weiteren in niederschlagsarmen (650–700 mm pro Jahr) Regionen an.

Die Entscheidung für ein dichteres oder weniger dichtes System der Oberflächensicherung richtet sich nach den Bedingungen des Standortes, der technischen Barriere und dem Gefährdungspotential des Abfalls. Entscheidungskriterien sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2 > Entscheidungsgründe für Oberflächensicherungssysteme

Entscheidungsgründe für	
Flüssigkeitsdichtere Oberflächensicherungssysteme	Weniger flüssigkeitsdichte Oberflächensicherungssysteme
Ungünstige Standortbedingungen, z. B. <ul style="list-style-type: none"> • gut durchlässige Geologie, • geringe Überdeckung des Grundwassers, • hohe Niederschlagsmengen 	Günstige Standortbedingungen, z. B. <ul style="list-style-type: none"> • dichter geologischer Untergrund, • Grundwasser durch Überdeckung geschützt, • geringe Niederschlagsmengen
Schlechte oder nicht vorhandene technische Barriere im Untergrund	Gute technische Barriere im Untergrund
Hohes Gefährdungspotential des Abfalls	Geringes Gefährdungspotential des Abfalls
Stabilisierung des Deponates durch Sickerwassereintritt nicht zu erreichen (Mumifizierung)	Beabsichtigte schnelle Stabilisierung des Deponates

Zusätzlich sollte als weiteres grundsätzliches Auswahlkriterium die Gasdichtigkeit berücksichtigt werden. Nur bei Systemen mit einer Konvektionssperre kann auch ein Austritt von Gas sicher verhindert werden. Systeme mit Restdurchlässigkeiten werden auch zu mehr oder minder starken Gasaustritten führen. Es ist zu prüfen, inwieweit in Bezug auf die Gefährdung verbleibende Gasaustritte zulässig sind.

5.2.2 Oberflächenabdeckungen

Bezüglich der reinen Oberflächenabdeckungen ergeben sich wegen der ohnehin geringen Anforderungen an die Schutzfunktion keine weiteren Auswahlkriterien. Es ist aber zu überprüfen, ob eine Abdeckung als langfristige Sicherung ausreicht ist oder nur als temporäre Massnahme verstanden werden muss. Bei der Auswahl der Materialien für die Abdeckung und ihrem Einbau sind die Anforderungen der Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBo) und der Publikation «Boden und Bauen» (BAFU, 2015, UW-1508-D) zu beachten.

5.3 Grundsätzlicher Aufbau der Oberflächensicherungssysteme

5.3.1 Oberflächenabdichtung

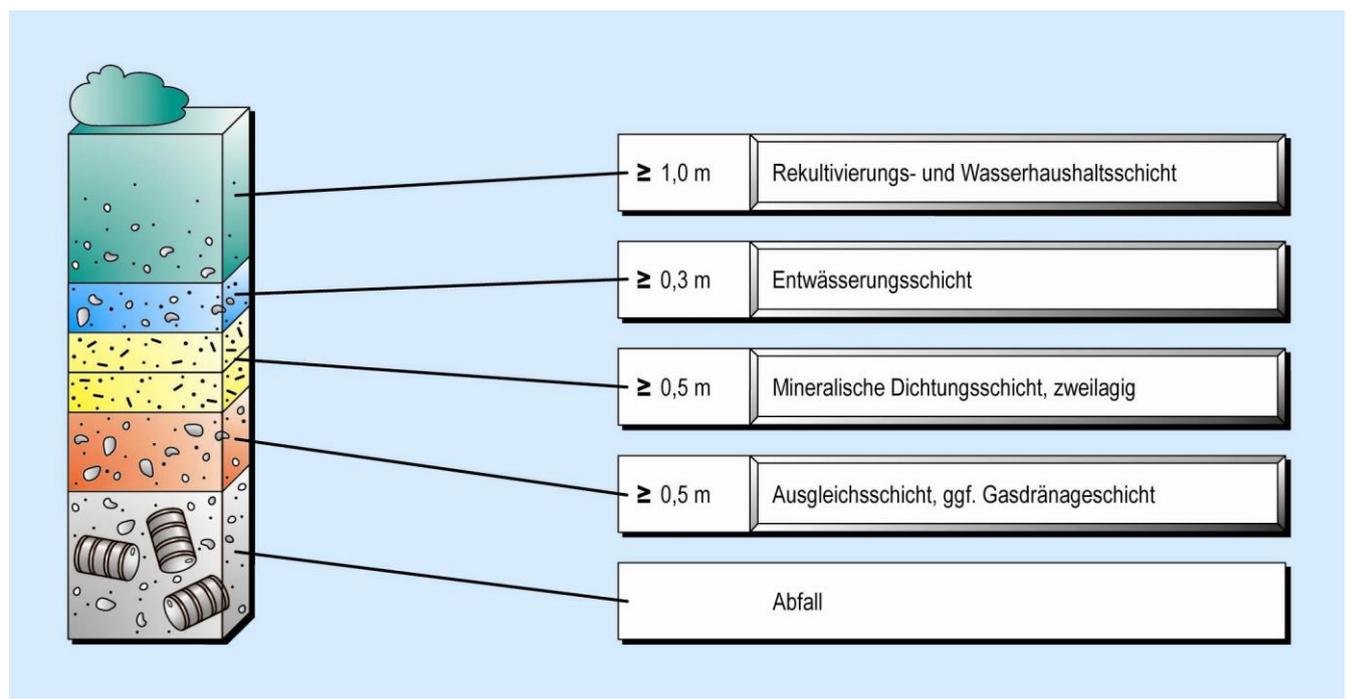
Die relevanten Elemente einer Oberflächenabdichtung sind eine Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht, an welche die eigentliche Dichtungsschicht anschliesst, sowie die Gas- und Ausgleichsschicht, die an den Deponiekörper angrenzt. In Tabelle 3 werden diese Komponenten in ihrem Aufbau und ihrer Funktion näher beschrieben.

Tab. 3 > Elemente der Oberflächenabdichtung mit ihren Funktionen

Elemente	Bestehend aus	Funktion
Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht	Begrünung ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.1.1	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsschutz • Evapotranspiration • Einbindung in die Landschaft
	Rekultivierungsboden ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.1.2	<ul style="list-style-type: none"> • Profilierung der Oberfläche • Durchwurzelungsbereich • Speicherung Niederschlagswasser • Austrocknungsschutz (optional) • Frostschutz (optional) • Vergleichsmässigung des Wasserzutritts in die Drainageschicht
Entwässerungsschicht	Entwässerungsschicht ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.2	<ul style="list-style-type: none"> • Fassung und Ableitung des versickernden Niederschlagswassers (Vermeidung von Staunässe) • Gegebenenfalls auch Schutz der Dichtung gegen mechanische Einflüsse und Durchwurzelung (Drainmatte)
Dichtungsschicht	Schutzschicht	• Schutz der Dichtung
	Dichtung ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.3	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtung gegen Niederschlagswasser • Dichtung gegen Deponiegas (wenn vorhanden) • Durchwurzelungssperre (Kunststoffdichtungsbahn)
	gegebenenfalls Leckortungssystem ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.4	• Überprüfung der Dichtwirkung
	Schutzschicht	• Schutz der Dichtung
Gasdrainage- und Ausgleichsschicht	Gasdrainageschicht ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.5	<ul style="list-style-type: none"> • Gegebenenfalls auch Schutz der Dichtung (Sandschicht) • Auflager für Dichtungsschicht • Fassung und Ableitung des Deponiegases (wenn vorhanden)
	Ausgleichsschicht ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.6	<ul style="list-style-type: none"> • Planum für Gasdrainage- und Dichtungsschicht • Profilierung der Ablagerungsoberfläche (Herstellung Mindestgefälle)

Die übliche **Oberflächenabdichtung** sieht für die Dichtungsschicht eine zweilagige mineralische Dichtung (Anhang A; Kap. 1.3.1) mit einer Mächtigkeit von $d \geq 0,50$ m vor (vgl. Abb. 10).

Abb. 10 > Genereller Aufbau Oberflächenabdichtung

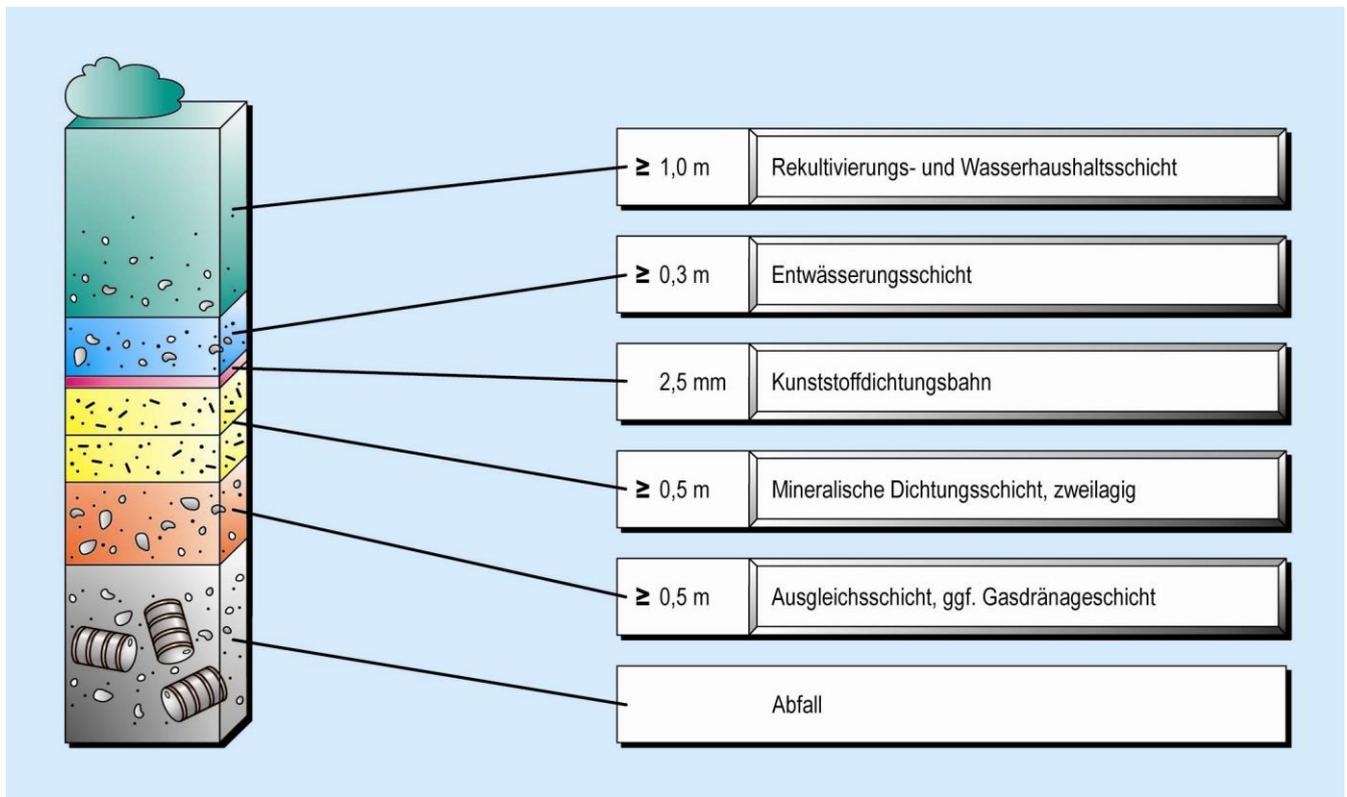


Alternativ kann die Dichtungsschicht durch folgende Elemente gleichwertig ersetzt werden:

- > Bentonitvergütetes Mineralgemisch (Anhang A; Kap. 1.3.7, nach Einzelfallprüfung gegebenenfalls $< 0,5$ m)
- > Bentonitmatten (Anhang A; Kap. 1.3.3) in flach geneigten Bereichen von Deponien, zweilagig
- > Kapillarsperre (Anhang A; Kap. 1.3.5) bei weitgehend abgeklungener Gasproduktion

Die Dichtungsschicht einer gänzlich undurchlässigen **Oberflächenabdichtung mit Konvektionssperre** besteht standardmässig aus der Kombination einer Kunststoffdichtungsbahn ($d \geq 2,5$ mm) (Anhang A; Kap. 1.3.2) mit einer zweilagigen mineralischen Dichtung (Anhang A; Kap. 1.3.1) der Mächtigkeit $d \geq 0,50$ m (vgl. Abb. 11).

Abb. 11 > Generelle Aufbau Oberflächenabdichtung mit Konvektionssperre



Als Alternativen können nachstehende Dichtungssysteme anstelle der vorgenannten Kombination von Kunststoffdichtungsbahn mit mineralischer Dichtung eingebaut werden:

- > Kunststoffdichtungsbahn mit $d \geq 2,5$ mm (Anhang A; Kap. 1.3.2) als alleiniges Dichtungselement bei geringem Gefährdungspotential oder kombiniert mit Leckortungssystem (Anhang A; Kap. 1.4)
- > Asphaltbetondichtung (Anhang A; Kap. 1.3.6) als Ersatz der Kunststoffdichtungsbahn mit gegebenenfalls reduzierter Schichtstärke der mineralischen Dichtung oder auch unter Verzicht derselben
- > Bentonitvergütetes Mineralgemisch (Anhang A; Kap. 1.3.7) (nach Einzelfallprüfung gegebenenfalls $< 0,5$ m) als mineralische Dichtung mit Kunststoffdichtungsbahn oder Asphaltabdichtung; bei optimierter Rekultivierungsschicht Verzicht auf Kunststoffdichtungsbahn möglich
- > Bentonitmatten (Anhang A; Kap. 1.3.3) mit Kunststoffdichtungsbahn bei Eignungsnachweis
- > Kapillarsperre (Anhang A; Kap. 1.3.5) als mineralische Komponente mit Kunststoffdichtungsbahn oder Asphaltabdichtung; bei weitgehend abgeklungener Gasproduktion

5.3.2 Qualifizierte Oberflächenabdeckung

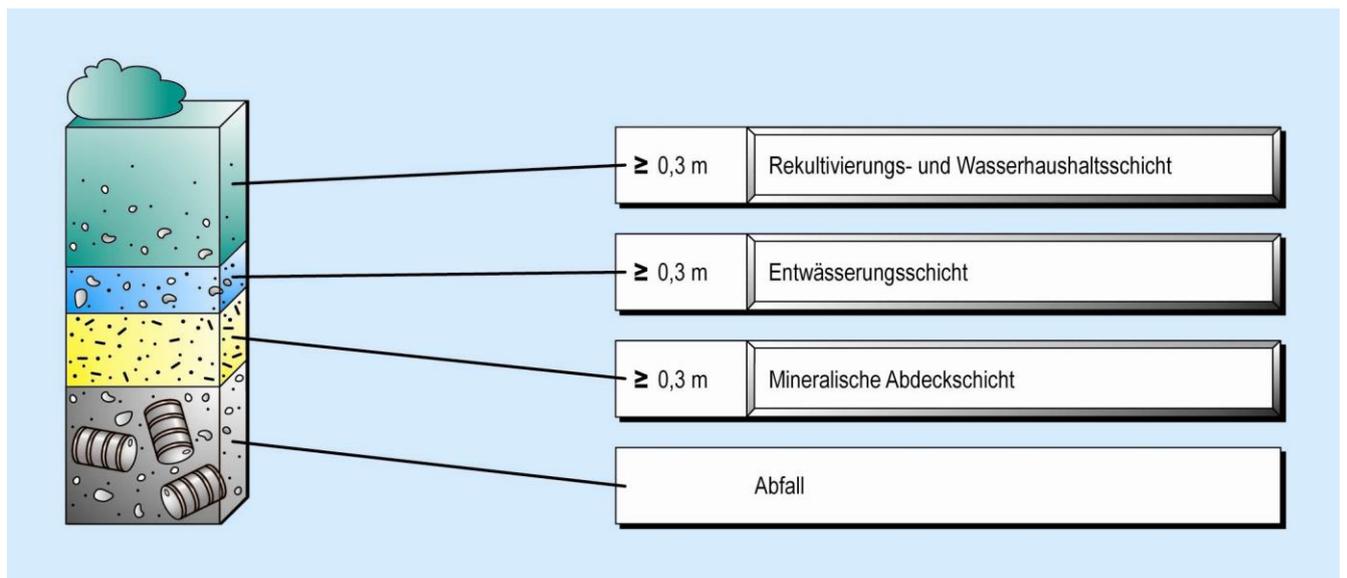
Den Schichtenaufbau für eine qualifizierte Oberflächenabdeckung gibt Tabelle 4 wieder.

Tab. 4 > Elemente der qualifizierten Abdeckung mit ihren Funktionen

Element	Aufbau des Elements	Funktion
Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht	Begrünung ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.1.1	s. Oberflächenabdichtung (Tabelle 3)
	Rekultivierungsboden ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.1.2	s. Oberflächenabdichtung (Tabelle 3)
Entwässerungsschicht	Entwässerungsschicht ⇒ Kap. 5.4.1 und Anhang A, Kap. 1.2	s. Oberflächenabdichtung (Tabelle 3)
Abdeckschicht		Reduzierung des Wasserzutritts Minderung der Gas- und Geruchsemissionen

Eine qualifizierte Abdeckung wird in der Regel als je mindestens 30 cm mächtige Abdeckschicht und anschließender Entwässerungs- sowie Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht (Anhang A; Kap. 1.1 und 1.2) ausgeführt (vgl. Abb. 12).

Abb. 12 > Genereller Aufbau qualifizierte Oberflächenabdeckung



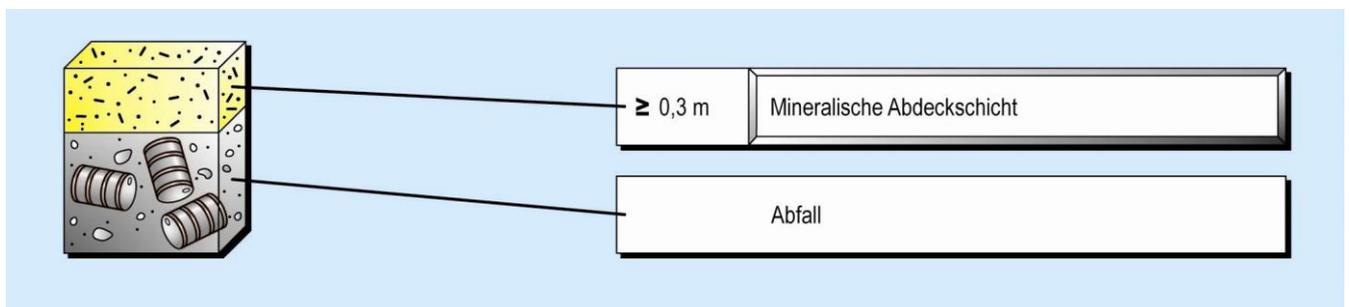
5.3.3 Oberflächenabdeckung

Die Oberflächenabdeckung weist in der Regel einen einfachen Aufbau auf, deren Ausgestaltung und Ziele in Tabelle 5 sowie in Abb. 13 aufgezeigt werden.

Tab. 5 > Elemente der Abdeckung mit ihren Funktionen

Element	Aufbau des Elements	Funktion
Abdeckschicht	In der Regel einfacher Aufbau als Bodenabdeckung, evtl. lagenweise eingebaut, aber auch Kunststoffdichtungsbahnen einsetzbar	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Sickerwasserbildung • Reduzierung der Gasmigration • Unterbindung des unmittelbaren Kontaktes mit kontaminierten Medien / Verhinderung von Deponatverwehung • Gegebenenfalls Verbesserung des optischen Eindruckes und Einbindung in die Landschaft • Geruchsreduzierung • Reduzierung der Brandlast

Abb. 13 > Genereller Aufbau der Oberflächenabdeckung



5.4 Elemente der Oberflächensicherung

5.4.1 Allgemeines

Nachdem eine grundsätzliche Entscheidung zum erforderlichen Oberflächensicherungssystem getroffen wurde, ist eine Entscheidung bezüglich des konkreten Abdichtungs- oder Abdeckungssystems und seiner Elemente herbeizuführen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Oberflächensicherung u. a. den folgenden Belastungen ausgesetzt sein kann:

- > Hydraulische Belastungen
- > Ungleiche Setzungen
- > Klimaeinflüsse
- > Erosion
- > Standsicherheit
- > Bodenmechanische Einflüsse
- > Durchwurzelung
- > Kleintierbefall
- > Gase, Dämpfe

Daraus können für eine Oberflächensicherung grundsätzliche Anforderungen abgeleitet werden, die für eine Beurteilung eines Systems oder einzelner Elemente heranzuziehen sind. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um Kriterien in Bezug auf

- > Dichtigkeit (Gas, Wasser)
- > mechanische Widerstandsfähigkeit (z. B. Standsicherheit, Setzungsempfindlichkeit)
- > Beständigkeit (z. B. Austrocknung, Durchwurzelung, Witterungsbeständigkeit)
- > Herstellbarkeit (z. B. bautechnische Ausführung, Witterungsabhängigkeit, Materialverfügbarkeit)
- > Systemsicherheit (Kontrollierbarkeit, Reparierbarkeit)
- > Kosten

Mit Hilfe der folgenden Ausführungen zu jedem Element eines **Oberflächensicherungssystems** kann eine standortbezogene Auswahl der möglichen Komponenten abgewogen werden. Für jedes Element einer Oberflächensicherung werden im Anhang A tabellarisch technische Daten beschrieben und Hinweise zur Anwendung gegeben. Anschliessend wird eine kurze Bewertung auf der Grundlage der im Anhang A ausführlich beschriebenen Eigenschaften – bezogen auf die zuvor genannten Anforderungskriterien – vorgenommen.

Für folgende Elemente sind im Anhang A Beschreibungen verfügbar:

Sicherungselement	Anhang A Kapitel
Begrünung	
<ul style="list-style-type: none"> Die Begrünung der Oberflächen von Deponie-Altlasten stellt den obersten Teil einer Oberflächenabdichtung dar und dient zum Schutz der darunter liegenden Schichten und zur naturnahen Gestaltung der Oberfläche abgeschlossener Deponien. Der Begrünung kommt im Zusammenhang mit der Beeinflussung des Wasserhaushaltes im Rahmen der Wasserhaushaltsschicht eine wesentliche Bedeutung zu. 	1.1.1
Rekultivierungsboden	
<ul style="list-style-type: none"> Der Rekultivierungsboden stellt den zweiten wesentlichen Teil der Wasserhaushaltsschicht dar, der einerseits den Wurzelraum für die Begrünung zur Verfügung stellt und andererseits die Dichtungsschicht schützt. 	1.1.2
Entwässerungsschicht	
<ul style="list-style-type: none"> Die Entwässerungsschicht hat vorrangig die Aufgabe, das durch die Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht bzw. den Oberbelag durchsickernde Niederschlagswasser abzuleiten. Neben dem Einsatz herkömmlicher mineralischer Materialien können auch künstliche Drainstoffe gewählt werden. 	1.2
Dichtungsschicht	
<ul style="list-style-type: none"> Für die Dichtungsschicht eines Oberflächensicherungssystems sind verschiedene Materialien einsetzbar. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die gängigsten Dichtungselemente und deren Eigenschaften. 	1.3
Leckortungssysteme	
<ul style="list-style-type: none"> Leckortungssysteme dienen dazu, der Forderung nach der Kontrollierbarkeit zu entsprechen. Neben der Kontrolle des Sicherungssystems beim Einbau und der Kontrolle der gesicherten Deponie-Altlasten insgesamt (vgl. Kap. 11 «Überwachung und Nachkontrolle») kann bei besonders problematischen Deponie-Altlasten der Bedarf nach der direkten Überwachung des Sicherungssystems bestehen. Da Oberflächensicherungen im Gegensatz zur Basisabdichtung technisch und wirtschaftlich realistisch reparierbar sind, kann gegebenenfalls durch ein Leckortungssystem auf die Redundanz von Oberflächensicherungen in Form einer Kombinationsdichtung verzichtet werden, wodurch sich auch wirtschaftliche Vorteile ergeben können. 	1.4
Gasdrainageschicht	
<ul style="list-style-type: none"> Bei Deponien mit aktiver Gasbildung (Näheres vgl. Kap. 8) oder bei der Notwendigkeit der Erfassung toxischer Gase ist unterhalb der Dichtungsschicht eine Gasdrainageschicht erforderlich. Sie sammelt das Gas flächenhaft und führt es den Gasfassungssystemen (vgl. Kap. 8) zu. 	1.5
Ausgleichsschicht	
<ul style="list-style-type: none"> Die Ausgleichsschicht ist die unterste Ebene der Deponieoberflächensicherung und stellt den Zusammenhang zwischen dem Abfallkörper und den eigentlichen Sicherungselementen dar. Die Ausgleichsschicht hat im Wesentlichen die Aufgabe, für die Sicherungssysteme die erforderliche Tragfähigkeit und die Profilierung der Oberfläche für eine Entwässerung herzustellen. Die Ausgleichsschicht kann entweder Teil des Abfallkörpers sein (sie ist auch durch den Einbau von kontaminiertem Material aufbaubar) oder mit der Gasdrainageschicht kombiniert werden. 	1.6

5.4.2 Bewertung der Abdichtungsmaterialien

Zusammengefasst können die verschiedenen Materialien für die eigentliche Dichtungsschicht wie folgt bewertet werden:

Tab. 6 > Bewertungshilfe gängiger Dichtungsmaterialien

Anforderungskriterien		Dichtungsmaterial						
		Kunststoffdichtungsbahn	Asphaltbetondichtung	Mineralische Dichtung	Bentonitmatte / GTD	Polymervergütete Abdichtung	Kapillarsperre	
Dichtigkeit	Wasser	++	++	+	+	+/++	+	
	Gas	++	++	+	-	+/++	.. ¹⁾	
Mechanische Widerstandsfähigkeit	Standsicherheit	+	++	++	+	++	++	
	Setzungsempfindlichkeit	mittel	mittel	hoch	gering	gering	gering	
	mechanische Einwirkungen	-	++	+	++	++	+	
Beständigkeit	Austrocknung	++	++	--	--	++	++	
	biologische Einwirkungen	++	+	--	-	+	+	
	chemische Einwirkungen	++	++	++	+	++	+	
	Langzeitverhalten/Alterung	++	++	+	-	+	++	
	Witterungsbeständigkeit	+/++	++	-	-	+	++	
Herstellbarkeit	Bautechnischer Aufwand	gering	hoch	mittel	gering	mittel	mittel	
	Witterungsabhängigkeit	hoch	gering	hoch	hoch	mittel	gering	
	Anforderungen an Zulassung	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	mittel	
	Qualitätssicherung	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	
	Materialverfügbarkeit	++	++	-	++	++	+	
	Platzbedarf	gering	gering	hoch	gering	gering	hoch	
Systemsicherheit	Kontrollierbarkeit	-/++ ²⁾	-/++ ³⁾	-	-	-	-	
	Reparierbarkeit	++	+	++	+	+	+	
	Schwachstellen	mittel	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	
Anwendung	Einsatzmöglichkeiten	++	++	++	+	++	++	
	Folgenutzung	-	+	-	-	-	-	
Kosten		mittel	hoch	gering	gering	gering	mittel	

Anmerkungen:

- ++ (uneingeschränkt) gegeben
- + bedingt gegeben
- eingeschränkt
- nicht gegeben

¹⁾ nur mit KDB unterhalb der Kapillarsperre gasdicht

²⁾ uneingeschränkt kontrollierbar in Kombination mit Leckortungssystem oder mit unterhalb der KDB angeordneter Kapillarsperre

³⁾ bei Nachnutzung optische Prüfung möglich

5.4.3 Einsatz alternativer Materialien

Anstelle der oben beschriebenen Materialien, die nicht immer standortnah oder in ausreichender Menge verfügbar sind, kann der Einsatz gleichwertiger Naturmaterialien erwogen werden. Gegebenenfalls müssen die Materialien durch geeignete Zusatzstoffe so konditioniert werden, dass sie mit den genannten definierten Materialien gleichwertig sind. Denkbar ist der Einsatz von

- > standortbürtigen Materialien, wie gemischtkörnige Böden oder Schotter anstelle von Kies (für Gasdrainage/Entwässerungsschicht), und
- > konditionierten standortbürtigen Materialien, wie bentonitvergütete Böden (Anhang A; Kap. 1.3.7)

Prioritär ist dabei der Einsatz von Aushub- oder Ausbruchmaterial, das auf diesem Wege bei der Sicherung von Deponie-Altlasten verwertet werden kann. Dabei sind die Anforderungen der Aushubrichtlinie zu beachten.

Im Sinne der Ressourcenschonung, vor allem hochwertiger mineralischer Baustoffe, sollte besonders bei der Ausführung von Deponieabdichtungssystemen auch geprüft werden, ob Recycling-Baustoffe gemäss den Bestimmungen der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle eingesetzt werden können.

5.5 Gestaltung von Oberflächensicherungssystemen

Mit den vorangegangenen Informationen kann nun eine Auswahl der erforderlichen und geeigneten Komponenten erfolgen, um ein standortspezifisches Oberflächensicherungssystem zu entwickeln.

Für die Gestaltung und Entwicklung eines vollständigen Oberflächensicherungssystems kann die Tabelle 7 herangezogen werden. Diese zeigt zusammengefasst die Anforderungen, die jedes einzelne Sicherungselement an die jeweils übrigen Schichten bzw. Elemente eines Oberflächensicherungssystems stellt. Die Anwendung der Tabelle ist im Anschluss anhand von Beispielen erklärt.

Tab. 7 > Anforderungen der Sicherungselemente an andere Bauteile

....stellt folgende Anforderungen an das Sicherungselement		Rekultivierungs-/ Wasserhaushaltsschicht		Entwässerungsschicht		Dichtungsschicht						Gasdrainage-/Ausgleichsschicht	
		Bepflanzung	Rekultivierungsboden	Mineralische Entwässerungsschicht	Drainagematte	Kunststoffdichtungsbahn	Mineralische Abdichtung	Bentonitmatte	Asphaltbetondichtung	Kapillarsperre	Polymervergütete Materialien	Gasdrainageschicht	Ausgleichsschicht
Rekultivierungs-/ Wasserhaushaltsschicht	Bepflanzung		+ 1	+ 2	+ 2	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rekultivierungsboden	+ 3		+ 2	+ 2	-	-	-	-	-	-	-	-
Entwässerungsschicht	Mineralische Entwässerungsschicht	4	5			+ 6	-	-	-	-	-	-	-
	Drainagematte	4	5			+	-	-	-	-	-	-	-
Dichtungsschicht	Kunststoffdichtungsbahn	-	+	+ 7	+		K	K		K	K	+ 7	+ 9
	Mineralische Abdichtung	+ 8	+ 8	+ 7	+	K			K			+	+ 9
	Bentonitmatte	+ 8	+ 8	+	+	K	K					+	+ 9
	Asphaltbetondichtung	-	+ 11	+ 11	+ 11		K					+	+ 9
	Kapillarsperre	+	+ 5	- 12	- 12	K						- 10	+ 9
	Polymervergütete Materialien	+ 8	+ 8	+ 7	+	K						+ 7	+ 9
Gasdrainage-/ Ausgleichsschicht	Gasdrainageschicht	-	-	-	-	+	+ 5	+	+	- 13	+		+
	Ausgleichsschicht	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Anmerkungen:

- + ist erforderlich
- keine Anforderungen
- K als Kombinationsdichtung möglich
- 1 Substrat ist an Bepflanzung anzupassen, ausreichend Durchwurzelungstiefe muss vorhanden sein
- 2 zur Verhinderung von Staunässe im Rekultivierungsboden bei vorhandener Dichtungsschicht erforderlich
- 3 zur Erosionsverhinderung erforderlich
- 4 ggf. Wurzelsperre erforderlich
- 5 filterstabiler Aufbau erforderlich
- 6 ggf. strukturierte Oberfläche als Schutz gegen Gleitfugen erforderlich
- 7 Schutzschicht (Sandschicht, Geotextil) gegen Beschädigung erforderlich
- 8 zur Verhinderung der Austrocknung erforderlich
- 9 Mindestgefälle - auch nach möglichen Setzungen - erforderlich
- 10 erforderlich bei unterhalb der Kapillarsperre angeordneter Kunststoffdichtungsbahn
- 11 nicht erforderlich bei Nutzung der versiegelten Oberfläche (vgl. Kap. 4.8)
- 12 erforderlich bei oberhalb der Kapillarsperre angeordneter Kunststoffdichtungsbahn
- 13 Kombination nicht sinnvoll, da Kapillarsperre nicht gasdicht

Anforderungen, die das Sicherungselement «Bepflanzung» an andere Sicherungselemente stellt:

- > Rekultivierungsboden ist erforderlich, Substrat ist an Bepflanzung anzupassen, ausreichend Durchwurzelungstiefe muss vorhanden sein
- > Mineralische Entwässerungsschicht (bzw. Drainagematte) ist erforderlich zur Verhinderung von Staunässe im Rekultivierungsboden
- > An die restlichen Sicherungselemente werden keine Anforderungen gestellt.

Beispiel 1
für die Anwendung der Tabelle 7

Anforderungen, die das Sicherungselement «Rekultivierungsboden» an andere Sicherungselemente stellt:

- > Bewuchs ist erforderlich zur Erosionsverhinderung
- > Mineralische Entwässerungsschicht (bzw. Drainagematte) ist erforderlich zur Verhinderung von Staunässe im Rekultivierungsboden
- > An die restlichen Sicherungselemente werden keine Anforderungen gestellt.

Beispiel 2
für die Anwendung der Tabelle 7

5.6 Bemessung und Nachweise

5.6.1 Bodenmechanische Nachweise

Im Einzelnen können folgende bodenmechanische bzw. erdstatische Nachweise erforderlich sein:

- > Stabilität der Böschungen
- > Gelände- bzw. Grundbruchsicherheit
- > Verformungsnachweise
- > Verankerungen von Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien (Geogitter usw.)
- > Gewölbewirkungen als Belastungen von Bauteilen im Deponiekörper oder Abdichtungssystem
- > Mantelreibung als Belastung für Bauteile im Deponiekörper oder Abdichtungssystem
- > Setzungen

Vor allem die Nachweise über die Setzungen des Untergrundes des Abdichtungssystems (insbesondere des Abfallkörpers selbst) sind wichtig für die Tauglichkeit des eingesetzten Systems. Bei den Setzungen sind die lastabhängigen Setzungen (z. B. aus Auflasten durch das Sicherungsbauwerk und gegebenenfalls Nutzungen auf der Oberfläche) und die zeitabhängigen Setzungen (vor allem durch den Abbau des organischen Materials im Deponiekörper) zu berücksichtigen. In der Regel wird die zu erwartende Setzung durch Überhöhung des Systems (Mindestgefälle) vorweggenommen. Bemessungsrelevant sind neben den absoluten Setzungsbeträgen speziell auch relative Setzungen, die bei den Sicherungsbauwerken (z. B. Kunststoffdichtungsbahnen) zu lokalen Dehnungen und bei Überschreiten der zulässigen Dehnungen zu Versagenszuständen führen können.

5.6.2 Statisch-konstruktive Nachweise

Statisch-konstruktive Nachweise sind für alle Bauwerke und Bauteile aus Beton, Steinzeug, Kunststoff oder Metall zu führen. Es sind dies im Rahmen des Deponiebaus vor allem die Entwässerungs- und Entgasungsleitungen, Schachtbauwerke sowie gegebenenfalls Bauwerke zur Nutzung der Deponieoberfläche.

5.6.3 Hydraulische und pneumatische Nachweise

Hydraulische und pneumatische Nachweise bzw. numerische Modellierungen spielen bei den Oberflächensicherungssystemen eine besondere Rolle. Zu unterscheiden ist zwischen hydraulischen Nachweisen von Einzelbauteilen (Dränageschichten, Entwässerungsleitungen, Entwässerungsmulden etc.) sowie hinsichtlich des Wasserhaushalts der gesamten Abdichtung bzw. Abdeckung.

Simuliert werden bei den Wasserhaushaltsberechnungen Prozesse wie Niederschlag, Oberflächenwasserabfluss, Infiltration, Evapotranspiration, Speichervorgänge im Boden, Durchsickerung sowie lateraler Abfluss auf den Entwässerungsschichten. Den hydraulischen Berechnungen des Wasserhaushalts der Oberflächensicherung kommt eine besondere Bedeutung beim Nachweis der Gleichwertigkeit unterschiedlicher Abdichtungsaufbauten zu, da im Wesentlichen die Gleichwertigkeit hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften wichtig ist.

Für Einrichtungen und Anlagen der Deponiegasfassung und -entsorgung sind pneumatische Nachweise bezüglich der Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit zu führen.

5.7 Qualitätsmanagement

Die hohen Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit der Sicherung von Deponie-Altlasten, vor allem der Langzeitbeständigkeit, erfordern qualitativ hochwertige Sicherungsbauwerke. Die Anforderungen an die Qualität betreffen einerseits die verwendeten Materialien und andererseits den Herstellungsprozess.

Entsprechend ist für die Deponiesicherung ein umfassender Qualitätsmanagementplan zu erstellen, der alle am Bauwerk beteiligten Instanzen umfasst und in welchem die Verantwortlichkeiten, die Ausführung sowie die Qualitätskontrollen und deren Intervalle festgelegt sind. Nähere Erläuterungen zum Qualitätsmanagement sind der SIA-Norm 203 «Deponiebau» zu entnehmen.

Darin sind auch für folgende bei der Sicherung von Deponie-Altlasten vorkommenden Sicherungsbauwerke detaillierte Hinweise zur Ausführungsüberwachung gegeben:

- > mineralische Abdichtungen
- > bituminöse Abdichtungen
- > Kunststoffdichtungsbahnen

Auch aus dem Bereich der Bundesrepublik Deutschland existieren umfangreiche Regelwerke zur Qualitätssicherung von Deponiesicherungen. Neben den Regelungen der Deponieverordnung (DepV), der Technischen Anleitung Abfall (TA Abfall) bzw. Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASI) sind es vor allem die GDA-Empfehlungen «Geotechnik der Deponien und Altlasten», die umfangreiche Hinweise zur Qualitätssicherung geben.

Gegenstand eines Qualitätsmanagements ist darüber hinaus die eindeutige Strukturierung der Zuständigkeiten auf der Baustelle. Hierzu gehört auch die Installation eigens auf die Qualitätssicherung ausgelegter Strukturen. Neben der Eigenüberwachung des bauausführenden Unternehmens spielt hierbei die Fremdüberwachung, die im Auftrag des Bauherrn Qualitätsprüfungen vornimmt, eine grosse Rolle.

5.8

Aspekte der Nachnutzung von Deponieoberflächen

Der hohe Flächenverbrauch, vor allem in den Ballungsgebieten, führt zunehmend zu Überlegungen, die Oberfläche von ehemaligen Deponien einer Nachnutzung zuzuführen. Die Bandbreite reicht dabei von extensiven Nutzungen als Landschaftsbauwerke (Park- und Grünflächen), als Verkehrsflächen (Strassen, Parkplätze, Lagerflächen), landwirtschaftliche oder gärtnerische Nutzungen bis hin zur Bebauung. Bei der Bebauung von Deponieoberflächen bieten sich vor allem Gewerbe- und Industriebauwerke an, die hinsichtlich des Schutzes der Nutzer geringere Anforderungen erfüllen müssen und gleichzeitig bautechnisch weniger anspruchsvoll sind (z.B. leichte Hallenkonstruktion ohne Unterkellerung). Eine Nutzung gesicherter Deponie-Altlasten zur Energieerzeugung durch Windkraft-, Photovoltaik- und/oder Deponiegasverwertungsanlagen ist sinnvoll, weil sie das Deponiesicherungssystem wenig beansprucht.

Bei einer allfälligen Bebauung von Deponieoberflächen durch Hochbauten ist ungünstigen Baugrundeigenschaften spezielle Aufmerksamkeit zu schenken. Folgende Besonderheiten sind dabei zu beachten:

Erhöhte Anforderungen an die Emissionsminimierung: Hier vor allem die Minimierung der Gasaustrittsmöglichkeiten zur Verhinderung von Brand- und Explosionsrisiken (Methangasaustritt) sowie von Gesundheitsgefährdungen (Austritt toxischer Gase). Technische Massnahmen hierzu sind z. B.:

- > Gasdichte Bodenplatten von Gebäuden (Rissfreier Beton, Foliendichtungen, gezielte Abdichtung von Durchdringungen z. B. für Rohr- und Leitungseinführungen)
- > Passive Gasdrainagen (Drainagegräben, Drainageschichten, Aufständigung von Gebäuden mit freier Belüftung des Zwischenraumes)
- > Aktive Entgasung (Absauganlagen in aussenliegenden Drainagen, Belüftung von Gebäuden etc.)
- > Messtechnische Überwachung kritischer Bereiche in Gebäuden

Erhöhte Anforderungen an die Tragfähigkeit des Untergrundes: Höhere Lasten aus der Nutzung und gleichzeitig höhere Anforderungen an die Minimierung oder Vergleichmässigung von Setzungen bei Bauwerken erfordern in der Regel besondere Vorbereitungen des Deponiekörpers, wie z. B.

- > gezielte Baugrundverbesserungen in Form von Vorverdichtungen (dynamische Intensivverdichtungen)
- > Einbau tragfähiger Strukturen (Rüttelstopfverdichtung, Pfahlgründungen)
- > Einbau von Geotextilien zur Lastverteilung und Vergleichmässigung der Setzungen
- > Erhöhung der Schichtmächtigkeiten zur Vergleichmässigung von Setzungen.

In der Regel wird der Aufbau der Abdichtungssysteme ähnlich vorgenommen wie bei nicht folgegenutzten Deponiesicherungen. Es ergeben sich aber Kombinationsmöglichkeiten zu den nutzungsbezogenen Aufbauten. Beispiele hierzu sind:

- > Herstellung von Asphaltabdichtungen mit gleichzeitiger Nutzung als Verkehrsfläche
- > Kombination von Tragschichten unter Fundamenten oder Verkehrsflächen mit Flächenentwässerungen oberhalb der Dichtungsschichten

Durch die Kombination der Sicherung der Deponieoberfläche und einer Nachnutzung lassen sich auch wirtschaftlich sinnvolle Kombinationen aus den Aufbereitungskosten für die Nutzung und den Kosten für die Deponiesicherung erzielen.

Die Überbauung von Deponie-Oberflächen und die damit verbundenen Eingriffe in den Körper der Deponie-Altlast erfordern eine einzelfallbezogene Betrachtung der jeweiligen Risiken und Nutzen. Es ist vor allem auf folgende Punkte zu achten:

- > Es dürfen keine unerwünschten Auswirkungen auf den Sickerwasserhaushalt der Altablagerung entstehen, z. B. durch
 - Zu hohen Versiegelungsgrad bei flächenhafter Überbauung,
 - Punktuelle Einleitung des Niederschlagswassers.
- > Erhöhte Schadstoffaustritte in das Grundwasser sind zu vermeiden:
 - Gefahr der Zerstörung von abdichtenden Schichten z. B. bei Pfahlgründungen
 - Gefahr der Schadstoffmobilisierung z. B. bei zusätzlichen flächenhaften Verdichtungen
- > Verstärkte Ausgasungen dürfen nicht auftreten:
 - Gefahr der Schaffung vertikaler Ausgasungsmöglichkeiten in Richtung z. B. der Gebäude

Generelle Aussagen zur Möglichkeit und technischen Gestaltung der Überbauung von Deponieoberflächen sind nicht möglich. Im Einzelfall sind durch eine integrierende ingenieurtechnische Bearbeitung, die neben den rein bautechnischen vor allem auch die altlastenbezogenen Fragestellungen zu berücksichtigen hat, Vor- und Nachteile der Überbauung darzustellen und zu bewerten.

6 > Vertikale Sicherung

6.1 Allgemeines

Mit der vertikalen Sicherung von Deponie-Altlasten werden folgende Ziele verfolgt:

- > Verhinderung der Durchströmung von Abfallkörpern, die im grundwassererfüllten Bereich liegen
- > Unterbindung des Abstroms von kontaminiertem Grundwasser

Die technischen Möglichkeiten zur vertikalen Sicherung lassen sich in folgende Gruppen unterteilen:

Tab. 8 > Möglichkeiten der vertikalen Sicherung.

Ziel	Ausführung
Dichtwände	
Unterbrechen des Grundwasserstroms im Bereich der Deponie-Altlast	Herstellen einer dichtenden vertikalen Wand im Aquifer (Ab- und gegebenenfalls Oberstrom)
Aktive hydraulische Massnahmen	
Fassen des kontaminierten Wassers im Abstrom	Fördern des kontaminierten Wassers über Drainage oder Brunnen in eine Abwasserreinigungsanlage
Passive hydraulische Massnahmen	
In situ-Reinigung von abströmendem kontaminiertem Grundwasser	Herstellen einer durchlässigen Wand mit reaktivem Material im Grundwasserabstrom

6.2 Systemauswahl der vertikalen Sicherung

Die Auswahl der Systeme zur vertikalen Sicherung ergibt sich anhand der folgenden Kriterien:

- > Durchlässigkeit des Untergrundes, Geometrie des Aquifers (z. B. Tiefe des Grundwasserstauers), Eignung des Baugrundes für den Dichtwandbau, Platzverhältnisse.
- > Dichtwände sind als Baumassnahmen mit relativ hohen Investitionskosten aber geringen Betriebskosten (z. B. auf Grund einer geringen Grundwasserhaltung im Inneren) gekennzeichnet.
- > Aktive hydraulische Massnahmen hingegen weisen geringe Investitions- aber relativ hohe Betriebskosten auf (Fördern des kontaminierten Wassers, Betrieb der Abwas-

Technische Machbarkeit

Wirtschaftliche Kriterien

serreinigungsanlage, Ableitung des Wassers). Zur wirtschaftlichen Abwägung sind Kostenvergleichsrechnungen unter Berücksichtigung der Kapitalkosten und der Teuerung sinnvoll.

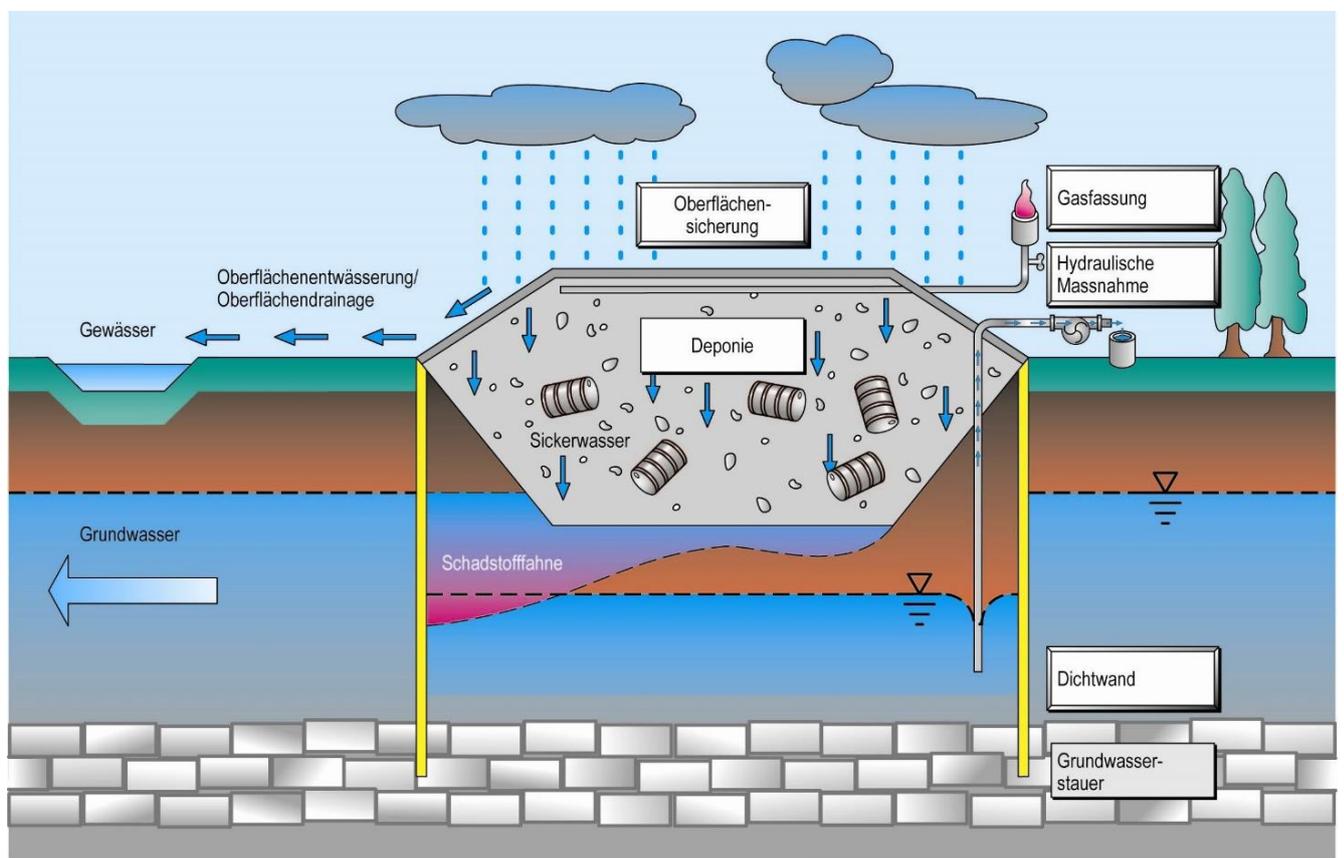
- > Passive hydraulische Massnahmen wiederum haben den Vorteil, keine oder nur geringe (z. B. für Monitoring) Betriebskosten zu verursachen.

6.3 Dichtwände

6.3.1 Allgemeine Anforderungen an durch Dichtwände zu sichernde Standorte

Häufig besteht bei der Sicherung von Deponie-Altlasten die Notwendigkeit, den Abstrom von kontaminiertem Grundwasser zu verhindern. Auch wenn durch eine Oberflächensicherung die Bildung von Deponiesickerwasser stark reduziert oder unterbunden werden kann, liegt häufig bei Deponie-Altlasten die Basis der Ablagerung im grundwassererfüllten Bereich. Dadurch besteht direkter Kontakt des Ablagerungsmaterials mit dem Grundwasser und es werden Schadstoffe ohne zusätzliche vertikale Sicherung mit dem Grundwasser ausgetragen.

Abb. 14 > Prinzip der Sicherung durch Dichtwände



Für die Sicherung des Grundwasserabstroms durch vertikale bautechnische Sicherungselemente (Dichtwände) sind folgende Anforderungen an den Standort zu stellen:

- > Der Standort verfügt nicht über eine funktionsfähige Basisabdichtung, die den Ablagerungskörper nach unten und zur Seite hin abdichtet.
- > Unterhalb des Ablagerungskörpers existiert ein ausreichend dichter Grundwasserstauer, in den eine vertikale Abdichtung eingebunden werden kann.
- > Der Untergrund der Deponie-Altlast weist die für die Herstellung der Dichtwand erforderlichen Eigenschaften auf (Rammbbarkeit, Grabfähigkeit, Injizierbarkeit usw.; vgl. Kap. 6.3.4).

6.3.2 Allgemeine Anforderungen an Dichtwände

In Ergänzung dazu müssen auch an die Dichtwände Anforderungen gestellt werden, die sich auf die Eigenarten des Standortes und die zu erreichenden Schutzziele beziehen:

- > Die Dichtwand muss unter den gegebenen Standortbedingungen herstellbar sein (Anforderung an die Bautechnik und die Auswahl der Dichtwandmaterialien).
- > Die Dichtwand muss über eine ausreichende und dokumentierte Geometrie (Ausdehnung, Dicke) verfügen um eine definierte Dichtwirkung zu erzielen.
- > Die verwendeten Dichtwandmaterialien müssen gegenüber dem geologischen Umfeld, vor allem aber gegenüber den im Boden und Grundwasser vorhandenen Schadstoffen eine ausreichende Beständigkeit haben, welche die dauerhafte Wirksamkeit des Abdichtungssystems sicherstellt. In jedem Einzelfall sind die Materialien der Dichtwände unter Beachtung der am Einsatzort herrschenden Milieubedingungen, d. h. der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse, unter Einbeziehung der vorhandenen bzw. zu erwartenden Kontaminationen festzulegen. Art und Umfang der notwendigen Eignungsprüfungen für mineralische Dichtwandmassen sind in der GDA-Empfehlung E 3–2 geregelt.
- > Gegebenenfalls muss das vertikale Sicherungssystem kontrollierbar/reparierbar sein.

6.3.3 Genereller Aufbau von vertikalen Abdichtungen

Die Dichtwände werden durch folgende Elemente ergänzt:

- > **Einbindehorizont:** Der Bereich, in dem die Dichtwand in die grundwasserstauende Schicht eingreift und mit dieser zusammen die Abdichtung bewirkt. Der Einbindehorizont (häufig >1 m) muss entsprechend so dicht und die Einbindelänge so gross sein (Verhinderung der Umläufigkeiten für Wasser entlang des Dichtwandfusses!), dass ein sinnvolles Verhältnis zur erforderlichen Dichtwirkung des Gesamtsystems gegeben ist.
- > **Dichtwandkopf:** Der Bereich an der Geländeoberkante, an dem die Dichtwand endet und in dem der Anschluss an die Gestaltung der Oberfläche (gegebenenfalls an die Oberflächensicherung) erfolgt. Bei Anschluss an eine Oberflächensicherung ist eine spezielle Gestaltung erforderlich, die ausreichende Dichtigkeiten für Wasser (Abfluss von Niederschlagswasser von der Oberflächensicherung) und Deponiegas erlaubt.

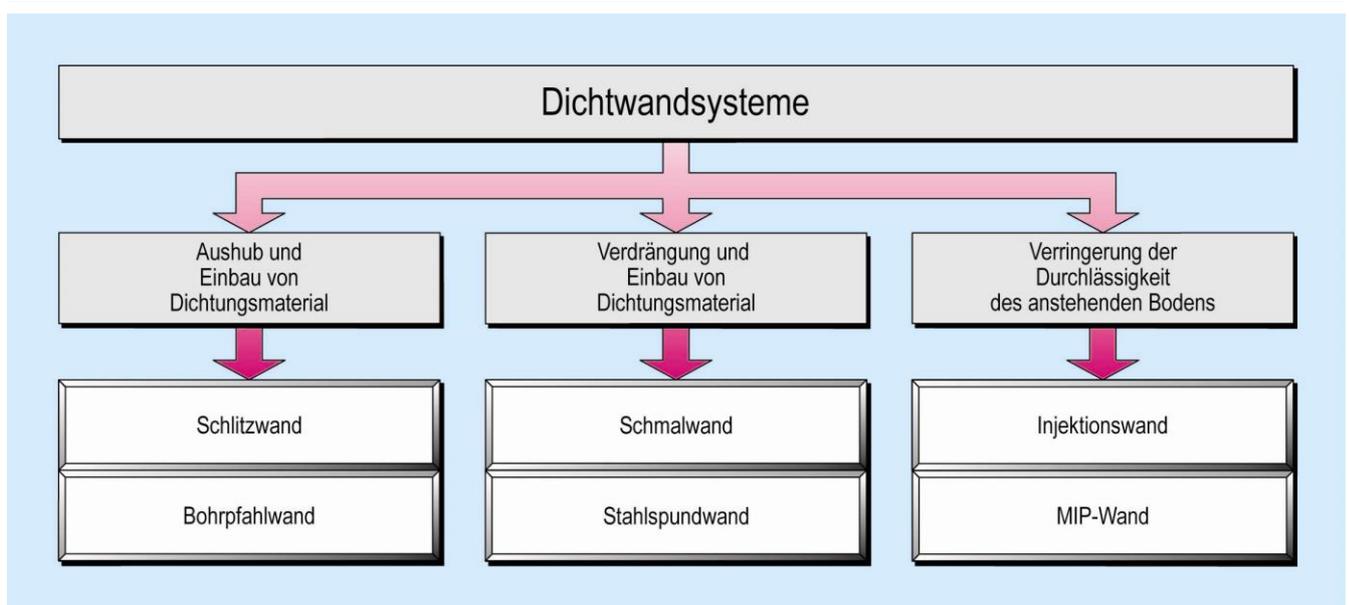
> **Zusätzliche hydraulische Massnahmen (Inversionsströmung):** Da Dichtwände immer eine technisch bedingte Restdurchlässigkeit aufweisen und auch bei einer Oberflächenabdichtung eine Rest-Grundwasserneubildung oft nicht ausgeschlossen werden kann, ist zur Ergänzung der reinen bautechnischen Sicherung eine hydraulische Massnahme manchmal erforderlich. Dabei wird aus dem von der Dichtwand umschlossenen Bereich Grundwasser entnommen (vgl. Kap. 6.4), mit denen der Grundwasserstand innerhalb des gedichteten Bereiches gegenüber dem umliegenden Grundwasserkörper geringfügig abgesenkt wird, falls sinnvoll unter das Niveau der Deponiesohle. Damit wird sichergestellt, dass auf Grund des hydraulischen Gefälles Grundwasser immer nur von ausserhalb der Altlast nach innen strömen kann (Inversionsströmung) und so eine Schadstoffverfrachtung aus dem Deponiekörper in die Umgebung ausgeschlossen ist.

Die zu fördernden Wassermengen sind i.d.R. gering, vor allem wenn eine optimierte Oberflächensicherung die Grundwasserneubildung durch eindringendes Niederschlagswasser reduziert.

6.3.4 Typen von Dichtwänden

Zur Herstellung von Dichtwänden für die Umschliessung von Deponien und Altlasten stehen zahlreiche Bauverfahren zur Verfügung, die u.a. in Abhängigkeit von den geotechnischen Randbedingungen auszuwählen sind. Es ist zwischen den folgenden, häufig angewendeten Verfahren zu unterscheiden:

Abb. 15 > Dichtwandsysteme



Schlitzwand

Schlitzwände werden durch lamellenweisen Aushub oder Ausfräsen des Untergrunds im Schutz einer stützenden Suspension hergestellt. Entweder wird die Stützsuspension anschliessend durch eine abdichtende Suspension ersetzt (Zweimassen-Verfahren) oder sie bindet nach dem Herstellen des Erdschlitzes selbst zur dichtenden Lamelle ab (Einmassen-Verfahren). Teilweise werden zusätzlich noch weitere dichtende Elemente (z. B. Kunststoffdichtungsbahnen) in den suspensionsgefüllten Erdschlitz eingestellt (Kombinationsdichtwand).

Bohrpfahlwand

Dieser Wandtyp wird durch sich überschneidende verrohrte Grossbohrungen hergestellt, die mit einem Dichtungsmaterial verfüllt werden, das nach dem Ziehen der Bohrröhre zur Dichtung abbindet.

Schmalwand

Schmalwände entstehen durch ein aneinandergereihtes, sich überschneidendes Einbringen eines speziellen Doppel-T-Trägers in den Untergrund. Der beim Ziehen dieser Träger entstehende Hohlraum wird mit dichtender Suspension verfüllt. Es entsteht eine nur wenige Zentimeter starke Dichtungslamelle. Die Schmalwand kann auch als doppelte Wand mit einer Abteilung von Kammern hergestellt werden.

Stahlpundwand

Die Abdichtung erfolgt mittels Stahlprofilen, die mit einem speziellen Schloss miteinander zu einer kontinuierlichen Wand verbunden und durch Rammen, Vibrieren oder Pressen in den Untergrund eingebracht werden.

Injektionswand

Bei der Injektionswand wird mit Hilfe einer in den Untergrund eingebrachten Bohrung Bindemittel mit Hochdruck injiziert. Entweder werden nur im Boden vorhandene Hohlräume (Poren, Klüfte) verpresst oder der Boden wird zusätzlich suspendiert und mit der dichtenden Suspension vermischt (z. B. Soilcrete-Verfahren).

Mixed-in-Place-Wand (MiP-Wand)

Eine neue Technik der Dichtwandherstellung bildet die «Mixed-in-Place»-Wand, bei der mit speziellen, vertikal in den Untergrund eingebrachten Bohrschnecken eine Vermischung von abdichtendem Bindemittel und Untergrund hergestellt wird. Es entstehen definierte rechteckige Verfestigungskörper.

Eine ausführlichere Beschreibung der verschiedenen Dichtwandtechniken ist im Anhang A, Kapitel 2, enthalten. Dort sind auch die Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen der Verfahren beschrieben. Die Eigenschaften der genannten Techniken, Grenzen und Möglichkeiten sind im Überblick der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tab. 9 > Eigenschaften von Dichtwandsystemen

Dichtungselement		Stahlpundwand	Schmalwand	Schlitzwand	Bohrpfahlwand	Injektionswand	Mixed-in-Place-Wand
Anforderungskriterien							
Dichtigkeit	Wasser	o/+ ²⁾	+/ ³⁾	++	++	o ⁴⁾	+
Mechanische Widerstandsfähigkeit	Standsicherheit	++	-	+	+	o ⁴⁾	+
	Setzungsempfindlichkeit	++	-	o	+	o ⁴⁾	+
	mechanische Einwirkungen	++	-	o	+	o ⁴⁾	+
Beständigkeit	biologische Einwirkungen	++	abhängig von gewählter Dichtwandrezeptur und nicht vom Bauverfahren				
	chemische Einwirkungen	+ ¹⁾					
	Langzeitverhalten/Alterung	+					
Herstellbarkeit	Bautechnischer Aufwand	mittel	hoch	hoch ⁵⁾	hoch	mittel	mittel
	Qualitätssicherung	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	mittel
	Materialverfügbarkeit	++	+/ ³⁾ (abhängig von Dichtwandrezeptur)				
	Platzbedarf	mittel	mittel	hoch	hoch	gering	hoch
Systemsicherheit	Kontrollierbarkeit	o	o/+ ³⁾	o	o	-	o
	Reparierbarkeit	+	o	o	o	o	o
	Schwachstellen	mittel	hoch/mittel ³⁾	gering	gering	hoch	mittel
Anwendung	Einsatzmöglichkeit	+	+	+	+	o	+
	Folgenutzung	+	-	+	+	+	+
Kosten		mittel-hoch	gering	hoch	mittel	mittel-hoch	gering-mittel

Anmerkungen:

++ = sehr gut, in hohem Maße gegeben etc.

+ = gut, vorhanden

o = weniger gut, bedingt gegeben

- = schlecht, nicht gegeben.

1) ggf. Beschichtung erforderlich

2) mit Schlossdichtung

3) bei doppelter Ausführung mit Kammern

4) abhängig von Standortbedingungen; nicht direkt prüfbar

5) sehr hoch bei gefräster Dichtwand

6.3.5 Ausführungsbesonderheiten

Grundlage für die Planung einer Dichtwand sind Baugrunderkundungen hinsichtlich des geologischen Aufbaus, der grundbautechnischen Standortbedingungen, der hydraulischen Bedingungen sowie der Schadstoffbelastungen im Boden und Grundwasser. Diese Untersuchungen sind so vorzunehmen, dass sie repräsentativ sind für die gesamte Fläche der Dichtwand. Sie gehen hinsichtlich der Art der Untersuchungen (z. B. bodenmechanische Parameter) und der Anzahl der erforderlichen Aufschlüsse über die üblichen altlastenbezogenen Untersuchungen hinaus.

Erforderliche Vorerkundungen

Bei höheren Schadstoffbelastungen im Boden oder Grundwasser ist die Eignung der vorgesehenen Dichtungsmaterialien in Laborversuchen zu überprüfen (z. B. Abbindeverhalten der Dichtwandsuspensionen). Auch die Langzeitbeständigkeit der Dichtwandmaterialien unter Standortbedingungen kann vorab im Labor getestet werden.

Soweit für das geplante Dichtwandverfahren keine Erfahrungen mit vergleichbaren Untergrundverhältnissen sowie Herstellungs- und Produktionsbedingungen zur Verfügung stehen, ist im Einzelfall das Erfordernis von Probewänden oder Probekästen zu prüfen.

Häufig wird vor der Herstellung der eigentlichen Dichtwand eine Leitwand erstellt, die dem Baugerät als Schablone für die Lage des Dichtwandelementes dient.

Baustelleneinrichtung

Zur Herstellung der mineralischen Suspensionen für die Dichtwände ist auf dem Standort eine Mischanlage inklusive Silos für die Bevorratung der Zuschlagstoffe sowie gegebenenfalls Becken zur Bevorratung der Suspension einzurichten. Zum Einsatz kommen entweder Fertigmischungen, die nur mit Wasser zur Dichtwandsuspension angemischt werden müssen, oder die Suspensionen werden aus einzelnen Zuschlagstoffen (Bentonite, Zement, Steinmehl, Wasser sowie Zuschlagstoffe zur Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften) vor Ort hergestellt. Bei gefrästen Schlitzwänden, bei denen die Suspension auch als Fördermedium für den gelösten Boden dient, ist auf der Baustelle zusätzlich eine Entsandungsanlage zur Trennung von Suspension und Boden vorzusehen.

Bei der Herstellung der Dichtwandsuspensionen sind teilweise umfangreiche Laborversuche zur Qualitätssicherung erforderlich. Hierfür ist allenfalls ein Baustofflabor auf der Baustelle vorzuhalten.

Im Gegensatz zu der Oberflächensicherung, bei der die Überprüfung der Dichtwirkung durch direkte Qualitätsprüfung (u. a. durch optische Kontrolle) und durch Leckortungssysteme möglich ist, lässt sich die Qualität von Dichtwänden nicht direkt bestimmen. Neben einer umfangreichen herstellungsbegleitenden Qualitätssicherung, die vor allem die Geometrie des Dichtwandkörpers (z. B. Vertikalität), die eingesetzten Baustoffe und die auf der Baustelle hergestellte Suspension betrifft, besteht zur Prüfung der Dichtwirkung nur der indirekte Nachweis über die Erfassung und den Vergleich der Grundwasserspiegel innerhalb und ausserhalb der Dichtwand. Eine Zuordnung evtl. festgestellter Restdurchlässigkeiten zur Dichtwand oder zum Grundwasserstauer/Einbindehorizont ist in der Regel nicht möglich und letztendlich kann nur das Ge-

Qualitätssicherung

samtsicherungssystem beurteilt werden kann. Für die Grundwasserüberwachung ist ein ausreichend ausgelegtes Monitoring vorzusehen.

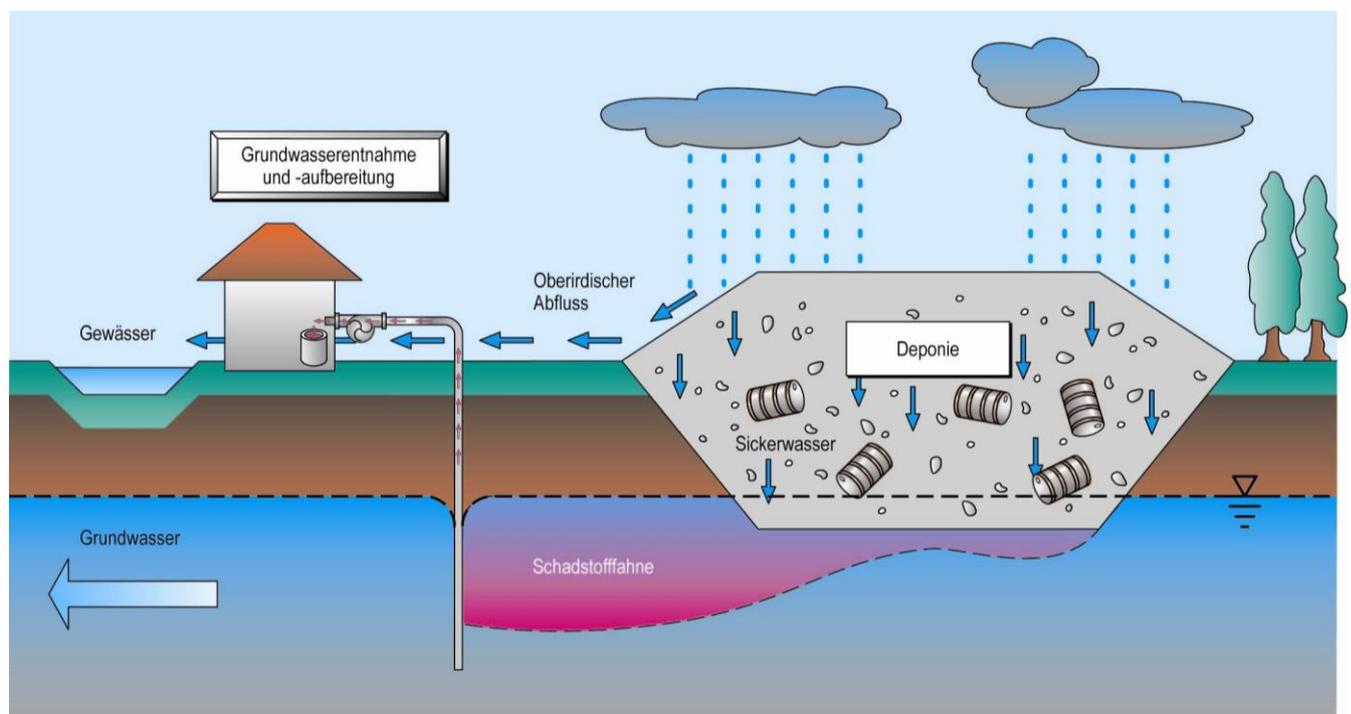
6.4 Aktive hydraulische Sicherung

6.4.1 Anwendung

Eine hydraulische Sicherung von Deponie-Altlasten wird in der Regel dann vorgesehen, wenn andere Formen der vertikalen Sicherung nicht möglich oder nicht wirtschaftlich sind. Wegen der betriebsbedingten Kosten für die Grundwasserförderung sowie die Aufbereitung und Entsorgung des Wassers über sehr lange Zeiträume ist diese Art der Sicherung von Deponie-Altlasten häufig betriebswirtschaftlich ungünstig und nur bedingt nachhaltig.

Vorteilhaft sind Verfahren zur hydraulischen Sicherung bei temporären Massnahmen, z. B. der Abwehr akuter Gefahren. Ein weiteres Einsatzgebiet sind die in Kap. 6.3.3 beschriebenen hydraulischen Massnahmen (Inversionsströmung) bei der Einkapselungen von Deponie-Altlasten mittels Dichtwänden.

Abb. 16 > Prinzip der hydraulischen Sicherung

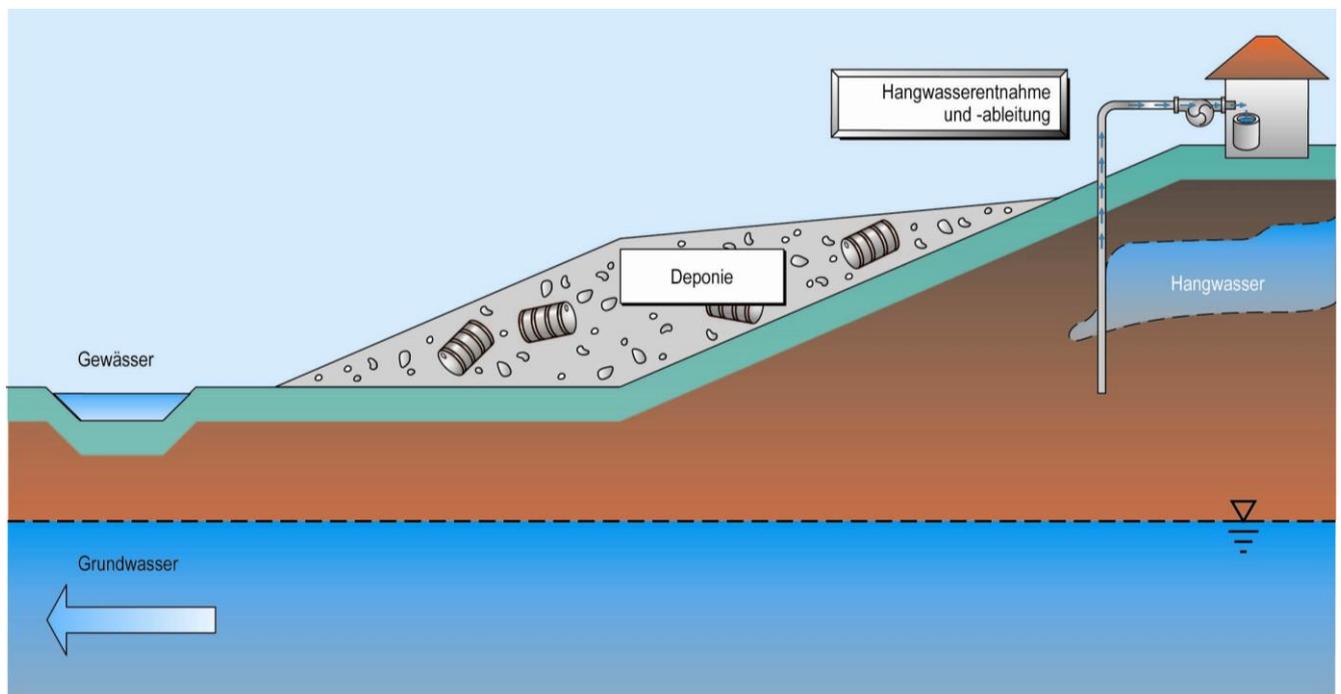


Die hydraulische Sicherung besteht aus den Funktionen

- > Grundwasserentnahme
- > Grundwasseraufbereitung
- > Entsorgung (Einleitung, Reinfiltration)

Eine Sonderform der hydraulischen Sicherung sind Hangdrainagen, bei denen oberflächennah auftretendes Grund- oder Oberflächenwasser auf der An- oder Abstromseite gefasst und entsorgt wird. Diese Form ist häufig bei Deponie-Altlasten anzutreffen, die in Taleinschnitte hinein errichtet worden sind (vgl. Abb. 17).

Abb. 17 > Prinzip der Hangwasserdrainage



6.4.2 Einrichtungen der hydraulischen Sicherung

Für die hydraulische Sicherung werden im Allgemeinen folgende Einrichtungen benötigt:

- > Grundwasserbrunnen oder Drainagen
- > Pumpen
- > Rohrleitungen
- > Wasseraufbereitungsanlage
- > Entsorgung: Versickerung auf dem Gelände (Reinfiltration); Einleitung in den Vorfluter; Ableitung in die Kanalisation
- > Mess- und Regeltechnik

Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in Kap. 2.2 des Anhangs A.

6.4.3 Bemessung

Bei der Auslegung der aktiven hydraulischen Massnahmen sind folgende Unterscheidungen zu treffen:

Die Bemessung der hydraulischen Wirkung «in situ» erfordert numerische Grundwassermodelle. Damit lassen sich folgende Punkte festlegen:

- > Anzahl, Lage und notwendiger Ausbau der Förderbrunnen
- > Fördermenge je Förderbrunnen
- > Einflussbereich der hydraulischen Massnahmen (Ausdehnung des Absenktrichters, Reichweite in Grundwasserfliessrichtung, Breite des erfassten Abstroms)
- > Gegebenenfalls Anzahl, Lage und Ausbau der Brunnen für die Reinfiltration

Im Wesentlichen sind folgende Punkte zu bemessen:

- > Förderpumpen (Durchfluss, Druckhöhe)
- > Rohrleitungen
- > Aufbereitungstechnik (hydraulische Belastbarkeit, Verweilzeit in Behältern usw.)
- > Einleitung in Gewässer oder Kanalisation

Hydrogeologische Bemessung

Hydraulische und verfahrenstechnische Bemessung der Anlagentechnik

6.5 Passive hydraulische Sicherung (permeable Reinigungswände)

Bei den passiven hydraulischen Verfahren zur Sicherung bzw. zur Reinigung des Grundwasserabstroms von Deponie-Altlasten werden permeable reaktive oder adsorptive Reinigungswände in den Untergrund quer zur Grundwasserfliessrichtung eingebaut, die bei möglichst geringer Beeinflussung des Grundwasserkörpers die natürliche Grundwasserhydraulik «in-situ» zur Durchströmung ausnutzen. Unterschieden werden die Systeme hinsichtlich

- > der **Wirkungsweise** der Wand: Einstellung von pH- und Redox-Verhältnissen, Fällung, Sorption, Freisetzung von Nährstoffen, katalytische Wirkungen,
- > der **Art des eingesetzten reaktiven Materials**: Aktivkohle, Eisen (nullwertiges Eisen, Eisenschwamm oder -späne), Zeolithe usw.,
- > der **Wirkungsdauer** des reaktiven Materials: permanente, temporäre oder austauschbare Einrichtungen,
- > der **Geometrie** der Wand: vollflächig durchströmte Wände oder Wände mit gelenktem Grundwasserfluss (Dichtwand oder Drainage mit kleinerem reaktiven Bereich (z. B. «funnel and gate»),
- > der **bautechnischen Ausführung** der Wand: offene Grabenbauweise, Schmalwand oder überschnittene Bohrungen, Schachtbauwerke.

Mit Hilfe von permeablen Reinigungswänden können organische (BTEX, CKW, PCB, PAK) wie auch anorganische Kontaminanten (Schwermetalle, Radionukleide, Nitrat) adsorbiert, umgewandelt oder abgebaut werden. Durch entsprechende Auswahl der Füllstoffe wird die in-situ-Sanierung an die Schadstoffcharakteristik des Aquifers angepasst. Bei Deponien mit den üblichen breiten Schadstoffspektren im Grundwasser eignen sich reaktive Wände nur begrenzt.

Generell sind Reinigungswände noch nicht als Stand der Technik anzusehen. Obwohl es vor allem in den USA aber auch in Österreich und Deutschland grosstechnische Anwendungen gibt, besteht hinsichtlich der Ausführung und der Wirkungsweise der Wände noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

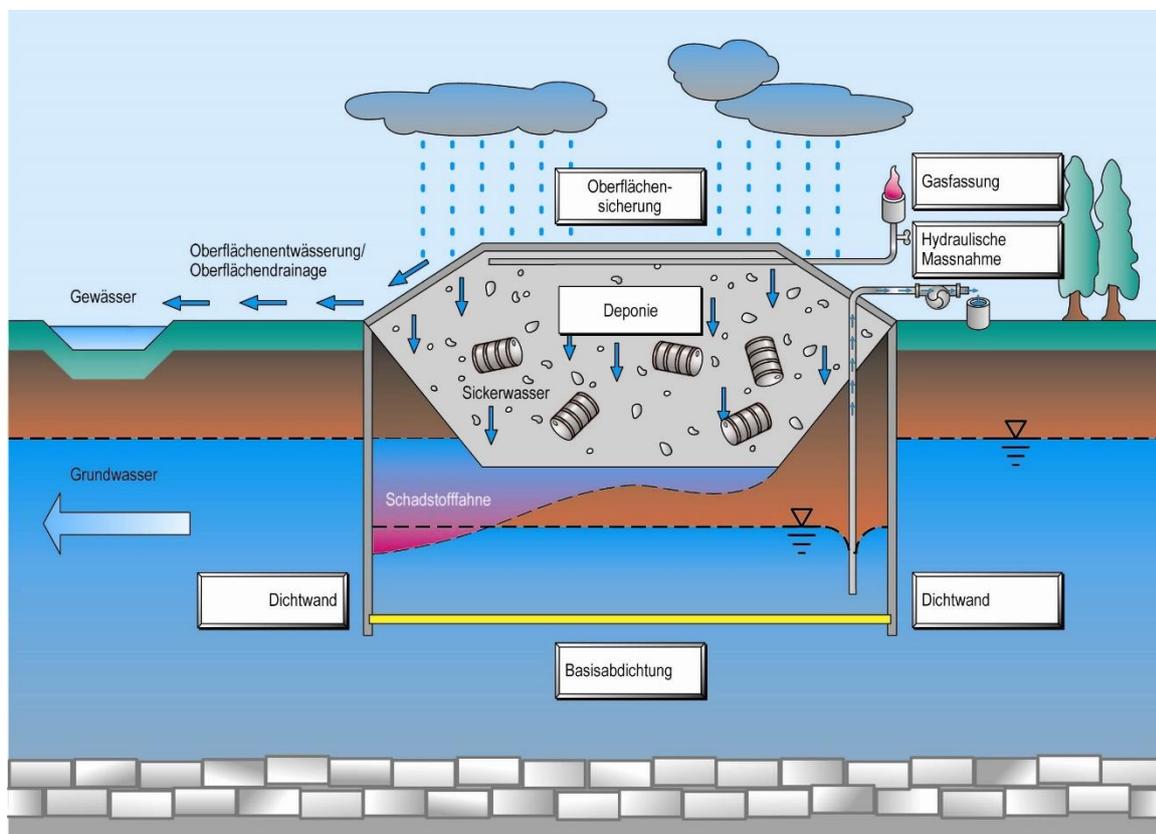
7 > Basisabdichtung

7.1 Allgemeines

Im Gegensatz zu Deponien, die nach dem Stand der Technik neu hergestellt werden, sind Deponie-Altlasten sehr häufig dadurch gekennzeichnet, dass sie keine Basisabdichtung haben und nur teilweise in einem ausreichend dichten geologischen Umfeld liegen.

Um diesem Mangel der fehlenden Basisabdichtung zur Minimierung der Emissionen über den Grundwasserpfad zu begegnen, wird häufig versucht, eine in grösserer Tiefe vorhandene, hydraulisch dichte geologische Schicht als Basisabdichtung zu nutzen (vgl. Kap. 3.2). Um ein taugliches Sicherungssystem zu erhalten, ist diese geologische Schicht durch eine Dichtwand in vertikaler Richtung (vgl. Kap. 6) und eine Oberflächenabdichtung (vgl. Kap. 5) zu ergänzen.

Abb. 18 > Prinzip der nachträglich hergestellten Basisabdichtung



Fehlt eine ausreichend dichte geologische Schicht in erreichbarer Tiefe und sind sonst keine Optionen der Sicherung oder Dekontamination gegeben, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, eine Basisabdichtung nachträglich herzustellen. Hierbei sind wesentlich andere Bautechniken erforderlich als bei der Basisabdichtung neuer Deponien. In der Praxis wurden bisher lediglich Injektionssohlen angewendet.

Die nachträglich einzubauende Basisabdichtung ist insgesamt als absolute Ausnahme für besonders problematische Fälle der Deponiesicherung zu verstehen.

7.2

Typen von Basisabdichtungen

Für die nachträgliche Herstellung von Basisabdichtungen sind grundsätzlich zwei Verfahren denkbar:

Injektionsverfahren

Von der Oberfläche her werden in der Regel durch den Abfallkörper Bohrungen niedergebracht, durch die in der vorgesehenen Tiefe der Dichtung abdichtende Materialien in kurzen Injektionskörpern flächenhaft hergestellt werden. Eine Sonderform sind horizontierte Bohrungen unter der Deponie-Altlast, von denen aus ein horizontaler Injektionsschleier hergestellt wird.

Bergmännische Verfahren

Bei diesen Verfahren, für die es bisher noch keine grosstechnische Praxisanwendung gibt, sollen in bergmännisch hergestellten Hohlräumen unter der Deponie-Altlast abdichtende Materialien (z. B. Kunststoffdichtungsbahnen) eingebracht und zu flächenhaften Abdichtungen verbunden werden. Eine Sonderform der nachträglich eingebauten Basisabdichtung sind überschnittene Schrägbohrungen oder schräg angeordnete Injektionswände, die eine Abdichtung in Form eines umgekehrten Daches ergeben.

Abschliessend ist festzustellen, dass nachträglich hergestellte Basisabdichtungen mit sehr hohen Ausführungsrisiken und sehr hohen Kosten verbunden sind und deshalb für die Sicherung von Deponie-Altlasten kaum in Frage kommen.

8 > Gasfassung und Gasbehandlung

8.1 Grundlagen der Gasproduktion

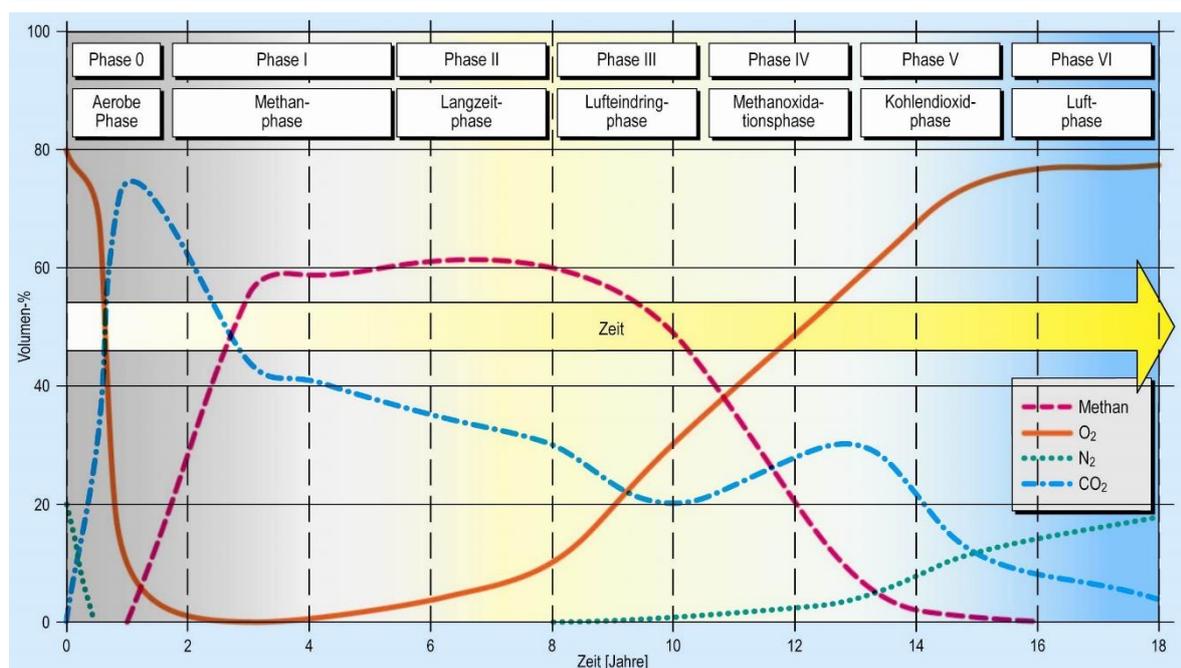
Grundlage der Bildung von Deponiegasen sind der

- > **aerobe Abbau** (Rotte, Kompostierung) von organischer Substanz bei Anwesenheit von Sauerstoff, die
- > **anaerobe Vergärung** bei Abwesenheit von Luftsauerstoff und die
- > **Ausgasung** leichtflüchtiger Abfallbestandteile.

Während bei Deponie-Altlasten die Ausgasung leichtflüchtiger Bestandteile alleine in der Regel nicht zu relevanten Emissionen führt, bildet sich durch die biologische Umsetzung von im Abfall enthaltenen organischen Substanzen Gas, das unter Druck steht und u.a. über die Oberfläche der Deponie austreten kann. Neben den vegetabilen Stoffen in Siedlungsabfällen (z. B. Küchenabfälle, Gartenabfälle) werden auch viele andere organische Stoffe biologisch unter Gasbildung umgesetzt.

Die Bildung von Deponiegas, bestehend aus Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2), verläuft in Abhängigkeit der Milieubedingungen in der Deponie bzw. Deponie-Altlast typischerweise in folgenden Phasen ab:

Abb. 19 > Zusammensetzung von Deponiegas in den einzelnen Phasen



Die Zeitdauer der einzelnen Phasen können von Ablagerung zu Ablagerung stark schwanken. Die angegebenen Zeiten sind als Beispiele zu verstehen. Die einzelnen Gasbildungsphasen sind durch folgende Bedingungen gekennzeichnet:

Tab. 10 > Phasen der Deponiegasbildung.

Phase	Bezeichnung	Bemerkungen
0	Aerobe Phase	Solange Sauerstoff im Deponiekörper vorhanden ist, werden die organischen Stoffe bevorzugt aerob umgesetzt; kein Methan
I	Stabile Methanphase	Beginnt ca. 1–3 Jahre nach Beendigung der Ablagerung; starke Gasbildung
II	Langzeitphase	Hoher Anteil an Methan im Deponiegas
III	Luft eindringphase	Das Eindringen von Aussenluft in den Deponiekörper reduziert den Methananteil im Deponiegas
IV	Methanoxidationsphase	Weiteres Eindringen von Luft führt zur biologischen Oxidation von Methan (erhöhte Gehalte an CO ₂)
V	Kohlendioxidphase	Diese Phase ist gekennzeichnet durch hohe Kohlendioxid- und sehr geringe Methangehalte
VI	Luftphase	Die Gasproduktion ist weitgehend abgeschlossen und im Porenraum der Ablagerung überwiegen die Aussenlufteinflüsse

In grossen Deponiekörpern können unterschiedliche Phasen in verschiedenen Teilbereichen auch zeitgleich ablaufen. Typisch ist der Übergang von Phase II nach Phase III von den nicht abgedichteten Oberflächen der Deponie her. Die Phasen III bis VI sind nur auf Deponie-Altlasten zu finden, die nicht nach oben abgedichtet sind. Bei Deponien, die mit einer gas- und flüssigkeitsdichten Oberflächenabdichtung versehen sind, werden diese Phasen nicht erreicht.

8.2 Gasmenge und -zusammensetzung

Die in einem Deponiekörper aktuell erzeugten Deponiegasmengen sind u.a. von folgenden Faktoren abhängig:

- > dem **theoretischen Gaspotential** (Gasmenge, die aus einer Gewichtseinheit Abfall unter optimalen Bedingungen entsteht; abhängig von der Abfallzusammensetzung),
- > den **Milieubedingungen** (Vorhandensein von Sauerstoff) und
- > der **Temperatur** im Abfallkörper sowie
- > den **Feuchtigkeitsgehalten** in der Deponie.

Unter realen Bedingungen ist bei reinen Hausmülldeponien (ohne Vorbehandlung des Abfalls vor der Deponierung) mit einem Gaspotential von ca. 100 Nm³ Deponiegas/t Abfall auszugehen, welche in der gesamten Zeit der biologischen Aktivität entstehen können.

Die aktuell produzierte Gasmenge entspricht dabei den in Kap. 8.1, Tab. 10 dargestellten Phasen. Während der Phasen I und II werden die wesentlichen Mengen an Deponiegas gebildet, danach nimmt die Gasbildung exponentiell ab. Bei den meisten Deponie-Altlasten sind diese Phasen bereits abgeschlossen und die aktuelle Gasbildungsrate fällt sehr viel geringer aus. Da auch bei guter Kenntnis der Deponie-Altlast grosse Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Gasmenge verbleiben, ist bei der Auslegung der Entgasungsanlagen auf eine ausreichende Reserve an Behandlungspotential zu achten.

Die Zusammensetzung des Deponiegases ändert sich über die Zeit entsprechend der sich ändernden Milieubedingungen im Deponiekörper. Sie kann z. B. in Abhängigkeit der obgenannten Phasen der Gasbildung folgende charakteristische Zusammensetzung haben:

Tab. 11 > Typische Gaszusammensetzung in den Phasen der Deponiegasbildung.

Phase	Bezeichnung	Zusammensetzung des Deponiegases			
		CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
0	Aerobe Phase	0 %	max. 20 %	max. 21 %	max. 78 %
I	Stabile Methanphase	55 %	44 %	Spuren	Spuren
II	Langzeitphase	60 %	40 %	Spuren	Spuren
III	Luft eindringphase	10–40 %	5–30 %	5–15 %	10–30 %
IV	Methanoxidationsphase	20 %	30 %	5 %	45 %
V	Kohlendioxidphase	2–5 %	5–20 %	<15 %	>60 %
VI	Luftphase	0 %	4 %	18 %	78 %

Ca. 1 Vol.-% des Deponiegases sind flüchtige Nebenprodukte wie Wasserstoff, Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Mercaptane, halogenierte und höhere Kohlenwasserstoffe, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) usw., die zum Teil toxische oder kanzerogene Eigenschaften aufweisen.

8.3 Gefährdungen durch Deponiegase

Die von Deponiegasen ausgehenden Gefährdungen können in folgender Weise beschrieben werden:

- > **Explosionsgefahr** (Methan als brennbare Gaskomponente)
- > **Erstickungsgefahr** (Verdrängung von Sauerstoff durch CO₂ z. B. in unterirdischen Hohlräumen)
- > **Gesundheitsgefahr** (Deponiegasspurenstoffe mit toxischem bzw. krebserzeugendem Potential)
- > **Schädigung der Rekultivierung** (Erhöhung der Bodentemperatur; Verdrängung von Sauerstoff aus dem Wurzelbereich)

Ausserdem ist Deponiegas ein Träger sehr geruchsintensiver Spurenstoffe und führt deshalb zu Belästigungen.

Die Deponiegasausbreitung kann nicht nur über die Oberfläche der Deponie erfolgen. In gaswegsamen Böden (z. B. auch in Leitungsgräben) kann Deponiegas über grössere Entfernung horizontal transportiert werden und in Gebäude in der Umgebung eindringen.

8.4 Gasfassung und -entsorgung

Bei der Fassung und Entsorgung von Deponiegas sind grundsätzlich aktive und passive Systeme zu unterscheiden. Passive Entgasungen werden eher bei Deponie-Altlasten einzusetzen sein, die über eine geringe Restproduktion von Deponiegas und nicht über eine konvektionsdichte Oberflächenabdeckung verfügen. Demgegenüber sind Deponie-Altlasten mit hoher Gasproduktion und weitgehend gasdichter Oberflächenabdichtung aktiv zu entgasen.

Bei den **passiven Entgasungen** wird der Eigendruck des Gases zur Förderung genutzt. Die Entsorgung des Gases erfolgt durch biologisch aktive Filter, die das Deponiegas aufbereiten (Biologische Oxidation von Methan und Spurengasen) und damit vor allem auch desodorieren. Die passiven Systeme bestehen deshalb aus:

- > Flächen- und linienhafte Gasdrainage (Gasdrainageschicht, vgl. Kap. 5.3 mit Gaskollektoren); vertikale Gasbrunnen
- > Gasfenster (Öffnungen in der Oberflächenabdeckung) mit Kompostfiltern

Bei geringer Gasproduktion und fehlender Dichtungsschicht kann eine Rekultivierungsschicht die Aufgaben einer passiven Deponiegasentsorgung übernehmen.

Für die **aktive Fassung und Behandlung** von Deponiegasen werden im Allgemeinen folgende Einrichtungen benötigt:

- > Flächen- und linienhafte Gasdrainage (Gasdrainageschicht, vgl. Kap. 5.3 mit Gaskollektoren); vertikale Gasbrunnen
- > Gasleitungen; Schächte
- > Wasserabscheider
- > Sammelbalken und Messstrecken
- > Gasfördereinrichtungen (Pumpen / Gebläse)
- > Gasentsorgungsanlagen (Fackeln, katalytische Anlagen, Gasmotoren zur Energienutzung)

Die Gasfassung erfolgt optimalerweise über flächenhafte Gasdrainageschichten, in die Gassammelleitungen (Gaskollektoren) eingelegt sind. Nachträglich herstellbar sind vertikale Gasbrunnen, die oberhalb der Abdichtung in Gasdomen enden, allerdings eine schlechtere Flächenwirkung hinsichtlich der Gasfassung erzielen.

Die Entsorgung des Deponiegases in Fackeln ist nur bei sehr methanhaltigen Deponiegasen möglich, welche selbstständig verbrennen (Einsatz deshalb nur in den ersten Phasen der Deponiegasbildung).

Bei älteren Deponien, bei denen Gasmenge und vor allem der Methananteil im Deponiegas reduziert sind, bietet sich eine katalytische Verbrennung an, die auch bei niedrigen Gehalten an Methan wirksam sind.

Eine thermische Zerstörung des Methans kann auch in Gasmotoren erzielt werden, die für die Energieerzeugung (Wärme, Strom) nutzbar sind.

Im Kapitel 3 des Anhangs A sind die technischen Systeme der Deponiegasfassung und -entsorgung detaillierter beschrieben.

Im Übrigen sind die Regelungen der SIA-Norm 203 «Deponiebau», vor allem die Kapitel 2.44 und 4.5, sinngemäss anzuwenden.

Bei aktiven Deponieentgasungsanlagen ist auf folgende Punkte besonders zu achten:

- > Deponiegas ist im Deponiekörper wassergesättigt und warm. Bei einer Abkühlung z. B. in Rohrleitungen und Schächten fällt Wasser als Kondensat an, das getrennt abgeführt und aufgrund seiner Belastungen entsorgt werden muss. Das Kondensat ist sehr korrosiv.
- > Deponiegas bildet in der Mischung mit Luft explosible Gemische. Sämtliche Entgasungsanlagen sind deshalb gasdicht auszuführen um den Eintritt von Luft zu verhindern. Ausserdem sind sie explosionsgeschützt auszuführen. Für die Entgasungsanlagen sind Sicherheitskonzepte zu erstellen; Arbeiten an Entgasungsanlagen müssen unter entsprechenden Arbeitsschutzmassnahmen stattfinden.
- > Bei der Entsorgung oder Verwertung von Deponiegas ist darauf zu achten, dass die Spurenbestandteile nicht zu toxischen Abbauprodukten führen und Verwertungsanlagen nicht durch Säurebildung (Salzsäure aus chlorhaltigen Gasbestandteilen) geschädigt werden.

8.5

Aerobe Stabilisierung von Deponie-Altlasten

Eine Massnahme zum aktiven Einriff in das Deponiegas stellen die aeroben Stabilisierungen dar. Ziel ist es dabei die Methanbildung durch den Eintrag von Sauerstoff zu unterbinden und den Abbau der organischen Substanz auf aerobem Wege ablaufen zu lassen. Im Prinzip wird die in Kap. 8.1 dargestellte aerobe Phase der Deponiegasproduktion wieder hergestellt bzw. die Lufteindring- und Methanoxidationsphase vorweggenommen. Neben der Vorbereitung einer Deponieumlagerung (Vermeidung von explosiblen Gasgemischen und von Geruchsemissionen beim Aufgraben der Deponie-Altlasten) dient die aerobe Stabilisierung vor allem auch der schnelleren Umsetzung des Deponates und der Verbesserung der Sickerwasserqualität.

Bei der aeroben Stabilisierung kommt es darauf an den erforderlichen Sauerstoff auf künstlichem Wege und möglichst gleichmässig im gesamten Ablagerungskörper zu verteilen.

Beim patentrechtlich geschützten BIOPUSTER®-Verfahren erfolgt der Eintrag nicht ausschliesslich in Form von Luft sondern mit einer Beigabe von technischem Sauerstoff. Über Lanzen wird der Sauerstoff mit Druckstössen in den Ablagerungskörper eingebracht und gleichzeitig über Sauglanzen Deponiegas entnommen. Da die Absaugleistung um ca. 30 % höher als die Einblasleistung liegt, herrscht im Deponiekörper ein ständiger Unterdruck vor.

9 > Sickerwasserfassung und -behandlung

Da Sickerwasser bei Deponie-Altlasten in der Regel wegen der fehlenden Basisabdichtung nicht gesondert gefasst werden kann, sind Systeme der Sickerwasserfassung und -behandlung für solche Deponien meist nicht relevant. Denkbar sind

- > nachträglich hergestellte Stauwasserdrainagen bzw. -brunnen im Deponiekörper
- > nachträglich hergestellte Sickerwasserfassungen im Abstrom

Beide Varianten erfordern ähnliche Bautechniken wie sie bei der hydraulischen Sicherung beschrieben wurden (vgl. Kap. 6.4). Die Stau- oder Sickerwasserfassung besteht aus den folgenden Bausteinen:

- > Entnahme
- > Aufbereitung
- > Entsorgung

Die **Förderung von Stauwasser** erfolgt entweder durch Brunnen, die (nachträglich) in den Deponiekörper hinein errichtet werden oder über Drainageleitungen, die wegen der Höhenverhältnisse im Nachhinein eher im Randbereich von Deponie-Altlasten angeordnet werden. Die Anordnung der Fördereinrichtungen setzt eine gute Kenntnis der Wasserkörper innerhalb der Deponie voraus. Zu beachten ist, dass innerhalb des Deponiekörpers extreme Schwankungen der Durchlässigkeiten auftreten, so dass auf kleinstem Raum wassergesättigte und trockene Bereiche aneinander grenzen können. Bemessungsregeln, welche aus der Grundwasserhydraulik bekannt sind, können deshalb nur begrenzt eingesetzt werden.

Die **Förderung von Sickerwasser im Abstrom** entspricht weitgehend der hydraulischen Abstromsicherung (vgl. Kap. 6.4).

Beim Umgang mit Sicker- oder Stauwasser ist zu berücksichtigen, dass sie durch Deponieinhaltsstoffe häufig sehr stark belastet sind. Dies betrifft neben toxischen Substanzen aus bau- und verfahrenstechnischer Sicht vor allem hohe Gehalte an Salzen und Härtebildnern, extreme pH-Werte, gelöste Gase, sehr geruchsintensive Stoffe und eine insgesamt hohe Fracht an organischen Stoffen. Förder- und Aufbereitungseinrichtungen müssen entsprechend ausgelegt werden, um

- > Inkrustationen zu verhindern oder zu beseitigen (Kontrollier- und Spülbarkeit der Brunnen und Rohrleitungen),
- > Korrosion zu vermeiden (z. B. Einsatz von beständigen Materialien wie Steinzeugrohre oder PEHD),
- > Gefahren aus explosiblen oder toxischen Atmosphären zu vermeiden (Ex-Schutz, Arbeitsschutz).

Zusätzlich ergeben sich besondere Anforderungen an die Einrichtungen zur Sickerwasserfassung aus der statischen Beanspruchung innerhalb des Deponiekörpers (hohe vertikale Lasten, ungleichmässige Setzungen, negative Mantelreibung usw.).

Die **Aufbereitung** der Sicker- oder Stauwässer kann am Standort erfolgen, wobei dies nur bei grossen Sickerwassermengen wirtschaftlich sinnvoll ist. Hierzu sind spezielle verfahrenstechnische Prozesse erforderlich, die auf die Besonderheiten der Sickerwasserzusammensetzung und die Entsorgung der aufbereiteten Sickerwässer abgestimmt sein müssen.

Die **Entsorgung** der Sickerwässer kann entweder ohne Aufbereitung erfolgen (z. B. durch Abfahren in eine externe Kläranlage) oder nach einer Aufbereitung durch die Einleitung in eine Kanalisation (Einleitbedingungen beachten; häufig grosse Entfernungen von Deponie-Altlasten zur nächsten Kanalisation).

Im Übrigen sind für die Erfassung und Behandlung von Stau- oder Sickerwasser die Regelungen der SIA-Norm 203 «Deponiebau», vor allem die Kap. 2.43 und 4.4, sinngemäss heranzuziehen.

10 > Entwässerung

Die Entwässerung der Deponie-Altlasten umfasst folgende Bereiche:

- > Entwässerung der Deponieoberfläche (direkter Abfluss oberhalb der Rekultivierungsschicht)
- > Entwässerung der Drainageschicht (Abfluss oberhalb der Dichtungsschicht)

Betrachtet werden sollen folgende Aspekte:

Die Oberfläche der gesicherten Deponie-Altlast ist so zu gestalten, dass Niederschlagswasser, das nicht in der Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht eindringt, oberflächlich abfließen kann. Hierbei sind einerseits Erosionen an der Rekultivierungsschicht zu vermeiden (Begrünung, gegebenenfalls auch Ausbildung von befestigten Rinnen), andererseits ist an den Tiefpunkten der gesicherten Oberfläche das Wasser zu fassen und abzuleiten (z. B. durch offenen Randgraben). Ein Aufstau von Wasser ist dabei ebenso zu vermeiden, wie die Beeinflussung von Nachbargrundstücken durch die Niederschlagswässer.

**Gestaltung der Oberflächen-
entwässerung**

Die Entwässerung der Deponie-Altlast auf der Dichtungsschicht der Oberflächensicherung erfolgt durch Drainageschichten (vgl. Kap. 5.4). Die Drainageschichten müssen randlich so gestaltet werden, dass das aus der Entwässerungsschicht zulaufende Niederschlagswasser abgeführt werden kann und einerseits ein Aufstau in der Entwässerungsschicht und andererseits ein Rückfluss unter die Dichtungsschicht vermieden wird. Hierzu wird in der Regel am Rand der Dichtungsschicht ein gedichteter Randgraben angelegt, der mit Kies gefüllt und mit Rekultivierungsboden überschüttet werden kann (gegebenenfalls auch Anordnung eines Drainagerohres) und an eine Entwässerung ausserhalb des Deponiebereiches (Regenwasserkanalisation, Vorfluter) angeschlossen werden muss.

Gestaltung der Drainagen

11 > Erfolgskontrolle, Überwachung und Nachkontrolle

11.1 Erfolgskontrolle

Die Erfolgskontrolle steht am Ende der Sanierung, die in Form einer Sicherung oder Dekontamination durchgeführt werden kann. Sie dient dem Nachweis der Erreichung der Sanierungsziele und erfolgt bei der Schlussabnahme der (Bau-)Massnahmen (siehe Abb. 1).

Bei der Sicherung ist das Sanierungsziel vor allem die Unterbrechung von Emissionswegen. Es wird deshalb im Wesentlichen die Übereinstimmung der erstellten Bauwerke mit dem Bauprojekt nachzuweisen sein. Ausserdem ist die direkte Wirkung bezogen auf die Wirkungspfade (z. B. Gas-/Wasserdichtigkeit) zu prüfen.

Bei der Dekontamination ist die Erfolgskontrolle der positive Nachweis, dass die Sanierungszielwerte (verbliebene, tolerierbare Schadstoffgehalte in Boden und Grundwasser) erreicht werden.

Erfolgskontrolle entspricht also weitgehend der Qualitätssicherung der Sanierungsmassnahme vor allem bei Dekontaminationsmassnahmen.

11.2 Nachkontrolle

11.2.1 Allgemeines

Als Nachkontrolle wird der zeitliche Abschnitt der Sanierung bezeichnet, der nach der Erfolgskontrolle erforderlich ist. Er dient bei der Dekontamination dem Beleg, dass das Entfernen der Schadstoffe auch nachhaltig zu einer Reduzierung der Gefährdungen der Schutzgüter geführt hat. Bei der Sicherung z. B. von Deponie-Altlasten ist die Nachkontrolle notwendig, da aufgrund des verbliebenen Schadstoffpotentials eine langfristige Erhaltung der Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit der Bauwerke und Anlagen sowie eine Überwachung der Wirkungspfade notwendig ist. Nachkontrolle setzt voraus, dass aktuell keine Gefahr mehr besteht, diese für die Zukunft aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Der Sanierungspflichtige hat im Rahmen der Erstellung des Sanierungsprojektes ein Konzept für die Erfolgs- und Nachkontrolle aufzustellen. Dabei sind insbesondere die vom Pflichtigen durchzuführenden Eigenkontrollmassnahmen und die gegenüber der zuständigen Behörde einzuhaltenden Berichts- und Nachweispflichten darzustellen.

Zu den grundsätzlichen Aufgaben der Nachkontrolle zählen:

- > Langzeitbetrieb
- > Langzeiterhaltung
- > Funktionskontrolle von Bauwerken und Anlagen
- > Überwachung der Wirkungspfade

Hinsichtlich der Überwachung und Nachkontrolle gesicherter Deponie-Altlasten wird auf die Vollzugshilfe «Erstellung von Sanierungsprojekten für Altlasten» und dort insbesondere auf Kapitel 9 verwiesen, welches grundlegende Informationen zu diesem Themenbereich enthält.

11.2.2 **Langzeitbetrieb**

Der Langzeitbetrieb im Rahmen der Nachkontrolle beinhaltet die Betriebsführung der maschinentechnischen Anlagen (z. B. hydraulische Sperren, Deponieentgasungsanlagen, Sickerwasserentnahme- und -behandlungsanlagen, Fördereinrichtungen), die sicherungsbegleitend erforderlich ist, sowie die Unterhaltung von Anlagen und Bauwerken (z. B. Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen, Dichtwände, durchströmte Wände).

Zur Unterhaltung gehören alle wiederkehrenden Tätigkeiten zur Aufrechterhaltung der Funktionen von Bauwerken und Anlagen, wie z. B. Inspektion, Wartung, Pflege, Reinigung und Instandhaltung.

11.2.3 **Langzeiterhaltung**

Die Langzeiterhaltung umfasst die Reparatur oder teilweise Erneuerung von Bauwerken und zugehörigen Anlagen, d. h. alle Massnahmen, die bei einem Schaden oder bei Abnutzung notwendig sind, um die angestammten Funktionen wiederherzustellen (z. B. Ersatz von schadhaften oder abgenutzten Anlagenteilen, teilweise Erneuerung von Entwässerungsanlagen oder der Oberflächenabdichtung).

11.2.4 **Funktionskontrolle von Bauwerken und Anlagen**

Funktionskontrollen dienen dem Nachweis, dass Sicherungsbauwerke und -anlagen ihre Aufgaben im Sinne der Sanierungsziele erfüllen.

Funktionskontrollen können darin bestehen, dass

- > in und an den Sicherungselementen Wasser- und Stoffflüsse ermittelt werden, die Deponiegasausbreitung untersucht wird und Stoffbilanzen erstellt werden,
- > die Reinigungsleistung und die dafür erforderliche Betriebsführung von Anlagen kontrolliert werden und
- > die Bauwerke oder Teile von ihnen direkt beprobt und untersucht werden.

11.2.5 Überwachung der Wirkungspfade

Nach der Durchführung von Sanierungsmassnahmen wird bei Deponie-Altlasten die langfristige Wirksamkeit der Sicherungsmassnahmen, d. h. der Sanierungserfolg bezogen auf die relevanten Wirkungspfade und Schutzgüter, überwacht. Gleichfalls ist das Entstehen neuer, von der Schadstoffquelle ausgehender Gefahren zu überwachen.

Die Überwachung kann neben der wiederholten oder kontinuierlichen Kontrolle der dauerhaften Einhaltung festgelegter Sanierungsziele somit umfassen:

- > die Ermittlung von Veränderungen des Schadstoffpotentials, das sich nach der Sicherung der Deponie-Altlast noch im Deponiekörper befindet,
- > eine Beschreibung, Bewertung und Prognose des Emissionsverhaltens sowie eine Prognose der weiteren Entwicklung im Hinblick auf die Gefährdung oder Beeinträchtigung von Schutzgütern,
- > die Erfassung und Prüfung von Standortparametern wie hydrogeologische, geochemische, hydrochemische Standortgegebenheiten, Versiegelungsgrad, Geländemorphologie, Pflanzenbewuchs, klimatische Einflüsse und besondere Vorkommnisse im Hinblick auf eine Beeinflussung der relevanten Wirkungspfade
- > die Erfassung und Kontrolle aktueller und planungsrechtlich zulässiger Nutzungen auf dem Standort und in seinem Umfeld im Hinblick auf sich verändernde Expositionsbedingungen (bei nachgenutzten Deponieoberflächen).

> Anhänge

Anhang A: Beschreibung der technischen Systeme

Anhang B: Begriffsbestimmungen, Abkürzungen, Literatur

Siehe separate PDF: www.bafu.admin.ch/uv-0720-d