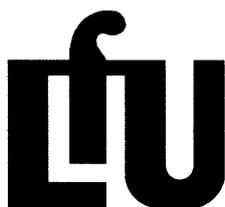
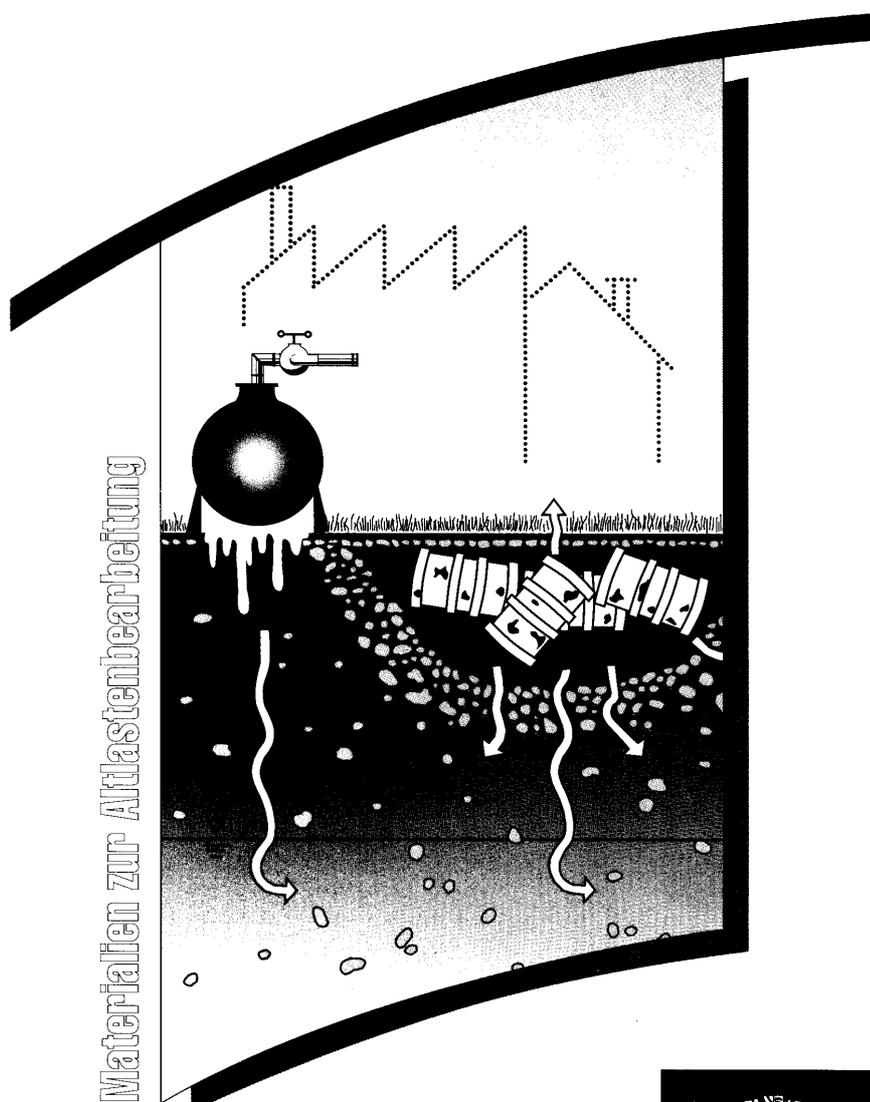


**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

**Immobilisierung von
Schadstoffen in Altlasten**

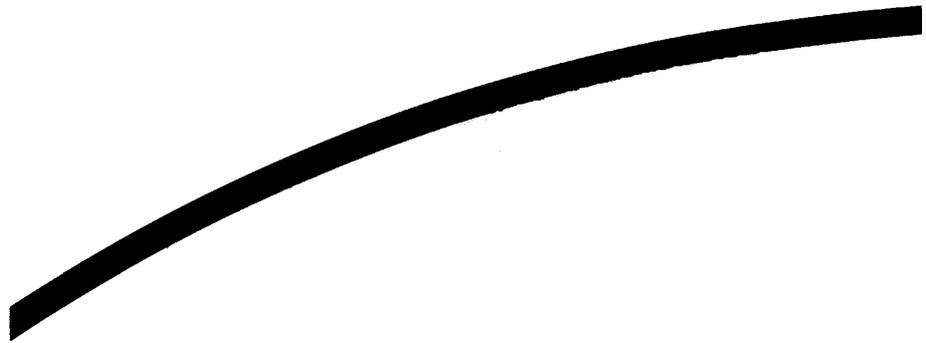


**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten



**Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage**

Karlsruhe 1994



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Projektbearbeitung: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54 Altlastensanierung
F. Kern

Verfasser: TAUW Umwelt GmbH
Janderstraße 9
68199 Mannheim

Karlsruhe, November 1994

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT DES HERAUSGEBERS	1
ABKÜRZUNGEN.....	2
1 EINLEITUNG.....	3
2 LEITFADEN FÜR PLANUNG UND PRÜFUNG	4
2.1 BEGRIFFE.....	5
2.2 ANWENDUNG.....	7
2.3 VERFAHRENSPRINZIP	8
2.4 SANIERUNGSVORPLANUNG	8
2.5 SANIERUNGSHAUPTPLANUNG	11
2.6 EIGNUNGSPRÜFUNG	13
2.7 QUALITÄTSSICHERUNG	14
3 GRUNDLAGEN DER SCHADSTOFFIMMOBILISIERUNG	17
3.1 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DER TECHNIK ZUR IMMOBILISIERUNG VON SCHADSTOFFEN IN ALTLASTEN ..	17
3.1.1 Ziele der Immobilisierung	17
3.1.2 Anwendung.....	18
3.1.3 Verfahrensübersicht	19
3.2 CHEMISCHE UND PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN VON IMMOBILISIERUNGSVERFAHREN	22
3.2.1 Wirkmechanismen	22
3.2.2 Bindemittel	24
3.2.3 Verglasung	29
3.2.4 Schadstoffaustrag.....	30
3.2.5 Wichtige Parameter bei der Auslaugung von Schadstoffen	32
4 PRÜFUNG.....	36
4.1 ÜBERSICHT DER PRÜFVERFAHREN.....	36
4.2 CHEMISCHE TESTVERFAHREN (ELUTIONSTESTS)	39
4.2.1 Elution nach DIN 38414-S4 (DEV S4)	40
4.2.2 Extraktion mit Königswasser nach DIN 38414-S7	41
4.2.3 Elution mit Ammoniumnitrat nach DIN V 19730.....	42
4.2.4 Elution im pH _{stat} -Versuch.....	42
4.2.5 TCLP.....	42
4.2.6 Niederländische Testverfahren	43
4.2.7 Schweizer TVA-Test	45
4.2.8 Soxhlet-Extraktion.....	46
4.2.9 Sequentielle Extraktion	47
4.2.10 Elution in der Triaxialzelle	48
4.3 PHYSIKALISCHE TESTVERFAHREN	50
4.3.1 Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136	50
4.3.2 Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 Teil 1	50
4.3.3 Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN 52104.....	50
4.3.4 Zerfallsziffer nach Endell.....	51
4.3.5 Nadelpenetration nach DIN 52010.....	51
4.4 MORPHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	52
4.4.1 Lichtmikroskopie	52
4.4.2 Rasterelektronenmikroskopie	52
4.4.3 EDX-Analyse.....	52
4.4.4 Röntgendiffraktometrie	52
4.5 BEURTEILUNG DER CHEMISCHEN TESTVERFAHREN	53
4.5.1 Ziele der Testverfahren	53
4.5.2 Vergleich zwischen Labor- und Praxisbedingungen.....	54
4.5.3 Praktische Anwendung von Prüfverfahren	57

4.6 VORSCHRIFTEN ZUR PRÜFUNG.....	59
4.6.1 Prüfung von Immobilisierungsprodukten bei Altlastensicherungen mit Wiedereinbau am Standort	60
4.6.2 Prüfung von Immobilisierungsprodukten bei Einstufung als Abfall	62
4.6.3 Prüfung von Immobilisierungsprodukten bei Wiederverwendung	69
5 STAND DER TECHNIK BEI IMMOBILISIERUNGSVERFAHREN	72
5.1 ON SITE/OFF SITE-VERFAHREN MIT SCHADSTOFFEINBINDUNG	76
5.1.1 Verfestigung mittels HDT-Verfahren	76
5.1.2 Verfestigungsverfahren nach Heide/Werner.....	79
5.1.3 Das Spezialbindemittel-System von Heidelberger Zement.....	82
5.1.4 Das Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp Umwelttechnik.....	85
5.1.5 Das Verfestigungsverfahren der Fa. Pokker.....	89
5.2 IMMOBILISIERUNG IN KOMBINATION MIT ANDEREN SANIERUNGSVERFAHREN.....	93
5.2.1 Das Soilcrete Verfahren der Fa. Keller Grundbau GmbH	93
5.3 IMMOBILISIERUNG DURCH FIXIERUNG	96
5.3.1 Das Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec GmbH	96
5.4 FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	100
6 PRAXISBEISPIELE	102
6.1 VERFESTIGUNGSDEPONIE BOCHUM KORNHARPEN	102
6.2 LÄRMSCHUTZWALL AUS VERFESTIGTEN BÖDEN	106
6.3 SANIERUNG EINES SCHROTTPLATZES MITTELS HDT-VERFAHREN	108
6.4 TRAGSCHICHT AUS VERFESTIGUNGSPRODUKTEN NACH DEM HDT-VERFAHREN	110
6.5 VORVERSUCHE BEI DER VERFAHRENSVORAUSWAHL AM MODELLSTANDORT MÜHLACKER.....	112
6.6 EINBAU VON SCHWERMETALLVERUNREINIGTEM ERDAUSHUB ALS UNTERBAU EINES LAGERPLATZES	116
6.7 WIEDERVERWERTUNG VON TEERHALTIGEM AUSBAUASPHALT	118
7 RECHTLICHE BETRACHTUNG	120
7.1 ABFALLRECHT	121
7.2 IMMISSIONSRECHT	123
7.3 WASSERRECHT	124
7.4 BODENSCHUTZGESETZ UND NATURSCHUTZRECHT	124
7.5 GEFÄHRGUTVERORDNUNG STRASSE	125
7.6 ARBEITSSCHUTZRECHT.....	125
8 ANHANG: ANBIETERÜBERSICHT	127
HEINRICH BECKER GMBH	127
BILFINGER + BERGER UMWELTVERFAHRENSTECHNIK GMBH.....	129
BIODEC GMBH GESELLSCHAFT FÜR BIOLOGISCHE REINIGUNGSVERFAHREN	130
DYCKERHOFF AG	131
G.A.A. GESELLSCHAFT FÜR ABFALLAUFBEREITUNG MBH	132
GEODUR GMBH.....	134
HEIDELBERGER ZEMENT AG	135
HEITKAMP UMWELTTECHNIK GMBH.....	136
HOCHTIEF UMWELT GMBH	138
IFUWA GMBH	139
INCA BAUSTOFFTECHNIK GMBH.....	140
KELLER GRUNDBAU GMBH.....	141
LEO CONSULT GMBH	142
POKKER BODENSANIERUNG GMBH	144
RETHMANN SANIERUNGSDIENSTE GMBH	145
E. SCHWENK ZEMENTWERKE KG.....	146
LEONARD WEISS GMBH & CO	147
ED. ZÜBLIN AG	148
CHEMFIX INTERNATIONAL INCORPORATED	149
DE RUITER MILIEUTECHNIEK.....	150
ELKEM TECHNOLOGY	151
ESDEX BV	152
SOLIDIWASTE INC.	153
TECHFORM ENGINEERING AG	154

9 LITERATURVERZEICHNIS	155
9.1 LITERATUR ZU KAPITEL 2	155
9.2 LITERATUR ZU KAPITEL 3	155
9.3 LITERATUR ZU KAPITEL 4	156
9.4 LITERATUR ZU KAPITEL 5	157
9.5 LITERATUR ZU KAPITEL 6	158
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	159
TABELLENVERZEICHNIS	160
INDEXVERZEICHNIS	161

Vorwort des Herausgebers

Knapp werdender Deponieraum sowie knapper werdende Finanzmittel der öffentlichen Hände und auch im privaten Investitionssektor, zwingen bei der Altlastensanierung verstärkt nach kostengünstigen Sanierungsmaßnahmen zu suchen. Obwohl bereits seit Jahrzehnten von verschiedenen Stellen Methoden zur Immobilisierung von Schadstoffbelastungen entwickelt und auch erprobt worden sind, sind diese Methoden bislang kaum zur Anwendung gekommen.

Mit der Bekanntgabe von Prüf- und Grenzwerten in der Verwaltungsvorschrift des Landes Baden-Württemberg "Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" vom 16.09.1993 sind nunmehr Eckwerte für die Beurteilung von Verfahren vorhanden. Mit der genannten Verwaltungsvorschrift wird einzelfallbezogen der Weg geöffnet, die am Standort anzutreffenden Barrieren gegen eine Schadstoffabwanderung bei der Sanierungsziel festlegung in Abwägung der Angemessenheit einer Maßnahme zu berücksichtigen.

In dem vorliegenden Handbuch sind die für diese Abschätzung notwendigen Informationen nach dem derzeitigen Stand der Technik zusammengetragen. Das Handbuch enthält darüber hinaus wertvolle Hinweise für die praktische Anwendung und Realisierung. Für die Planer und Prüfer von Maßnahmen sind im ersten Kapitel die für diese Abwägung zu leistenden wesentlichen Vorarbeiten als Anwender-Leitfaden zusammengestellt.

Für die vielen sachdienlichen Hinweise und die freundliche Zusammenarbeit beim Zustandekommen des Handbuchs danken wir bestens:

Herrn Gaggia, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen

Herrn Dr. Gerschler, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie

Herrn Grimski, Umweltbundesamt Berlin

Herrn Dr. Wiedemann, Umweltbundesamt Berlin

Die Herausgeber gehen davon aus, daß künftig Immobilisierungsmaßnahmen als Sanierungsalternative häufiger in die Überlegungen einbezogen werden. Die LfU hofft, mit den vorliegenden Ausarbeitungen hierbei ein Hilfe geben zu können. Gleichzeitig werden Rückmeldungen aus der Praxis für die Fortschreibung und Aktualisierung des Handbuchs erwartet.

Dr.-Ing. Seng
(Abteilungsdirektor)

Abkürzungen

A	Jahr
AOX	Adsorbierbarer organischer Halogengehalt
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BTX	Benzol, Toluol, Xylol (leicht flüchtige KW)
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
D	Durchmesser, Tag
DEV	Deutsches Einheitsverfahren
DDT	1,1,1-Trichlor-2,2-bis(p-chlorphenyl)ethan
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
EDX	Elektronendispersive Röntgenanalyse
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
Gew.-%	Gewichtsprozent
GOK	Geländeoberkante
H	Stunde
H	Höhe
H-Wert	Hintergrundwert
HGT	Hydraulisch gebundene Tragschicht
I	Hydraulisches Gefälle
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz (Baden-Württemberg)
L/S	Flüssigkeits/Feststoffverhältnis
L/V	Verhältnis Flüssigkeit/Volumen des Probekörpers
LWA	Landesamt für Wasser und Abfall (Nordrhein-Westfalen)
M	Molar
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MVA	Müllverbrennungsanlage
N	Newton
NLÖ	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
NTA	Nitrilotriessigsäure
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PEHD	Polyethylen (high density)
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
SAD	Deponie für besonders überwachungsbedürftige Abfälle (Sonderabfalldeponie)
SZ-Wert	Sanierungszielwert
SZA-Wert	Sanierungszielwert aktuelles Risiko
T	Tonne (Megagramm)
TA	Technische Anleitung
TP	Technische Prüfung
TS	Trockensubstanz
TVA	Technische Verordnung Abfall (Schweiz)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung (TVO)
VOB	Verdingungsordnung für Bauleistungen
VwV	Verwaltungsvorschrift
ZTVT	Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau

1 Einleitung

Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen verringern oder unterbinden Emissionen dieser Schadstoffe in die Umwelt. Eine Eliminierung oder Zerstörung der Schadstoffe findet dabei in aller Regel nicht statt.

Die bisherige Entwicklung und Anwendung dieser Verfahren konzentrierte sich auf den Bereich der Sonderabfälle, insbesondere Schlämme und Stäube, aber auch radioaktive Abfälle. Aufgrund verfahrenstechnischer Weiterentwicklungen, Schaffung gesetzlicher Rahmenbedingungen (TA Abfall) und nicht zuletzt wirtschaftlicher Überlegungen werden Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen als Sicherungsmaßnahme bei der Altlastensanierung zunehmend in Betracht gezogen; einige Projekte wurden in der Praxis bereits ausgeführt.

Das vorliegende Handbuch wendet sich an alle, die mit der systematischen Altlastenbearbeitung befaßt sind, sowohl an Behörden als auch interessierte Fachbüros. Ziel des Handbuches ist, durch einen Überblick über den Stand der Technik und die angebotenen Verfahren Hilfestellung in der Phase der **"Eingehenden Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E_{3,4})"** zu geben sowie die Anforderungen zu beschreiben, nach denen die einzelnen Verfahren auf ihre Einsetzbarkeit in der Altlastensanierung zu prüfen und zu beurteilen sind.

Um eine zielgerichtete Benutzung zu erleichtern, wurde das Handbuch in drei in sich geschlossene Teile gegliedert:

Der **Leitfaden für Planung und Prüfung (Kapitel 2)** liefert in gestraffter Form als Grundlage für Sanierungsvor- und -hauptplanung die wesentlichen Informationen zu Immobilisierungsverfahren.

Die **Kapitel 3 bis 7** bieten Möglichkeiten zu vertiefendem Studium:

In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Schadstoffimmobilisierung erläutert, deren Verständnis für eine Bewertung von Verfahren und Testmethoden hilfreich ist.

Wegen der zentralen Bedeutung der Prüfverfahren für die Beurteilung von Immobilisierungsprodukten werden diese in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

Kapitel 5 beschreibt den Stand der Technik, indem Verfahren einzelner Anbieter vorgestellt werden. Ergänzend werden in Kapitel 6 durchgeführte Projekte beschrieben.

In Kapitel 7 werden Hinweise zur rechtlichen Betrachtung gegeben.

Der **Anhang** liefert eine alphabetische Übersicht von Anbietern von Immobilisierungsverfahren in Form von Datenblättern.

2 Leitfaden für Planung und Prüfung

Der Leitfaden für Planung und Prüfung gibt einen Überblick über Anwendung und Beurteilung von Immobilisierungsverfahren sowie Hinweise für die Phasen Sanierungsvorplanung und Sanierungshauptplanung (E₃₋₄) entsprechend dem stufenweisen Vorgehen in Baden-Württemberg (Bild 2.1).

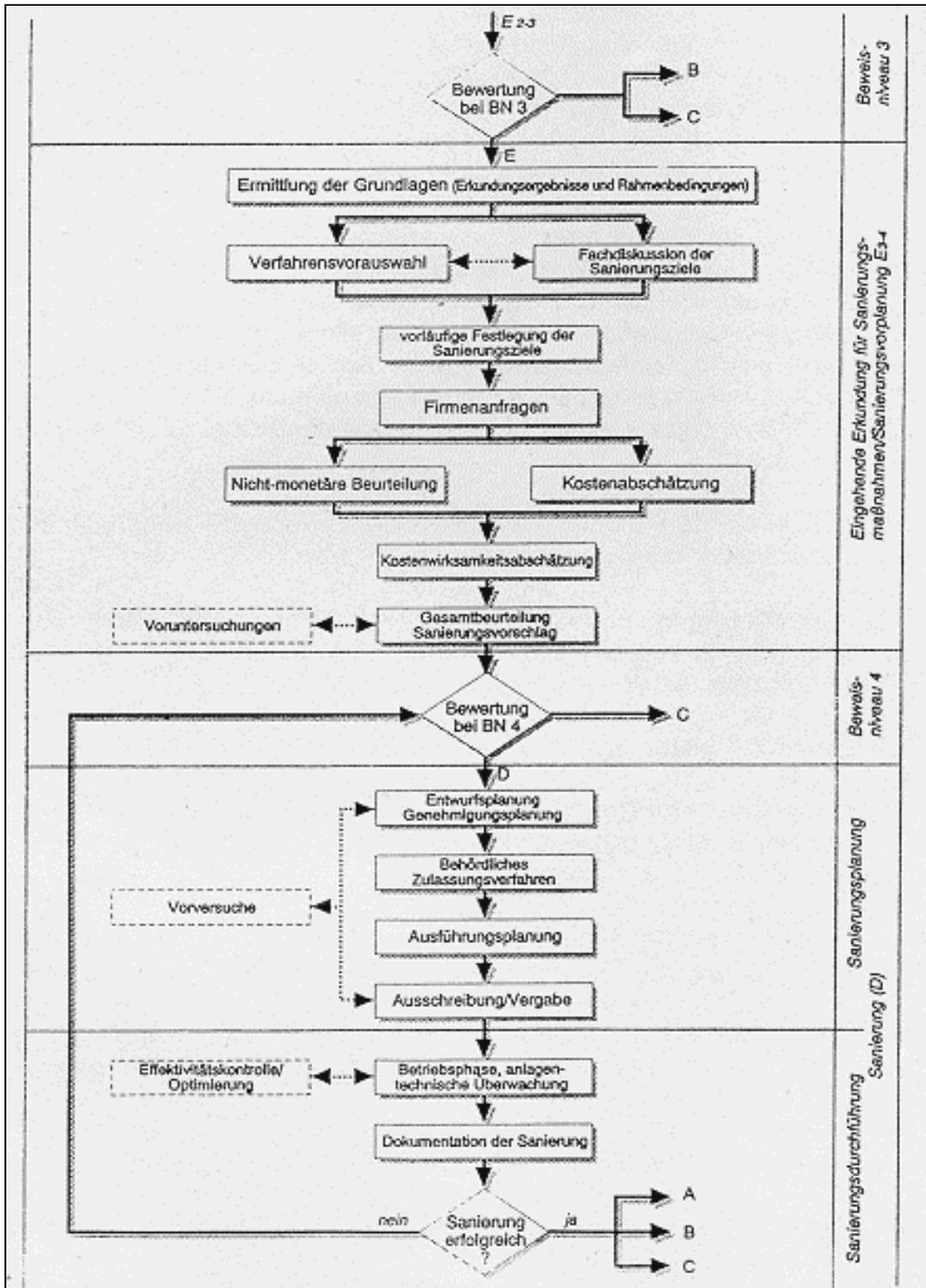


Bild 2.1: Ablaufschema einer Sanierung

2.1 Begriffe

Um einen einheitlichen Gebrauch herzustellen, werden wesentliche **Begriffe**, die im Zusammenhang mit Immobilisierungsverfahren oft verwendet werden, gegeneinander abgegrenzt.

Durch **Immobilisierung** soll das kontaminierte Material so beeinflusst werden, daß Emissionen der enthaltenen Schadstoffe langfristig unterbunden werden bzw. unterhalb festgelegter Zielwerte liegen.

In der Praxis der Altlastensanierung werden zur Immobilisierung von Schadstoffen im kontaminierten Material (Boden, Abfall) überwiegend Verfahren mit Schadstoffeinbindung durch Verfestigung angeboten. Dabei ist:

Immobilisierung	das Ziel
Schadstoffeinbindung	der Wirkmechanismus
Verfestigung	das Verfahren

Bei den **Zielen** der Behandlung kontaminierten Materials ist Immobilisierung von anderen häufig gebrauchten Begriffen, die in folgendem Zusammenhang

stehen, zu unterscheiden:

Immobilisierung	Verhinderung/Verminderung von Schadstoffemissionen
Inertisierung	Überführung in eine nicht reaktionsfähige Form
Konditionierung	Verbesserung von (mechanischen) Eigenschaften hinsichtlich Transport und Ablagerung

Wirkmechanismen zur Immobilisierung von Schadstoffen können sein:

Physikalische Einkapselung
Chemische Einbindung
Fällung
Sorption

Verfahren zur Immobilisierung sind:

Verfestigung	Herabsetzung der Durchlässigkeit, Beeinflussung der Löslichkeit
Verglasung	Inertisierung
Fixierung	Chemischer Einbau, Chemisorption

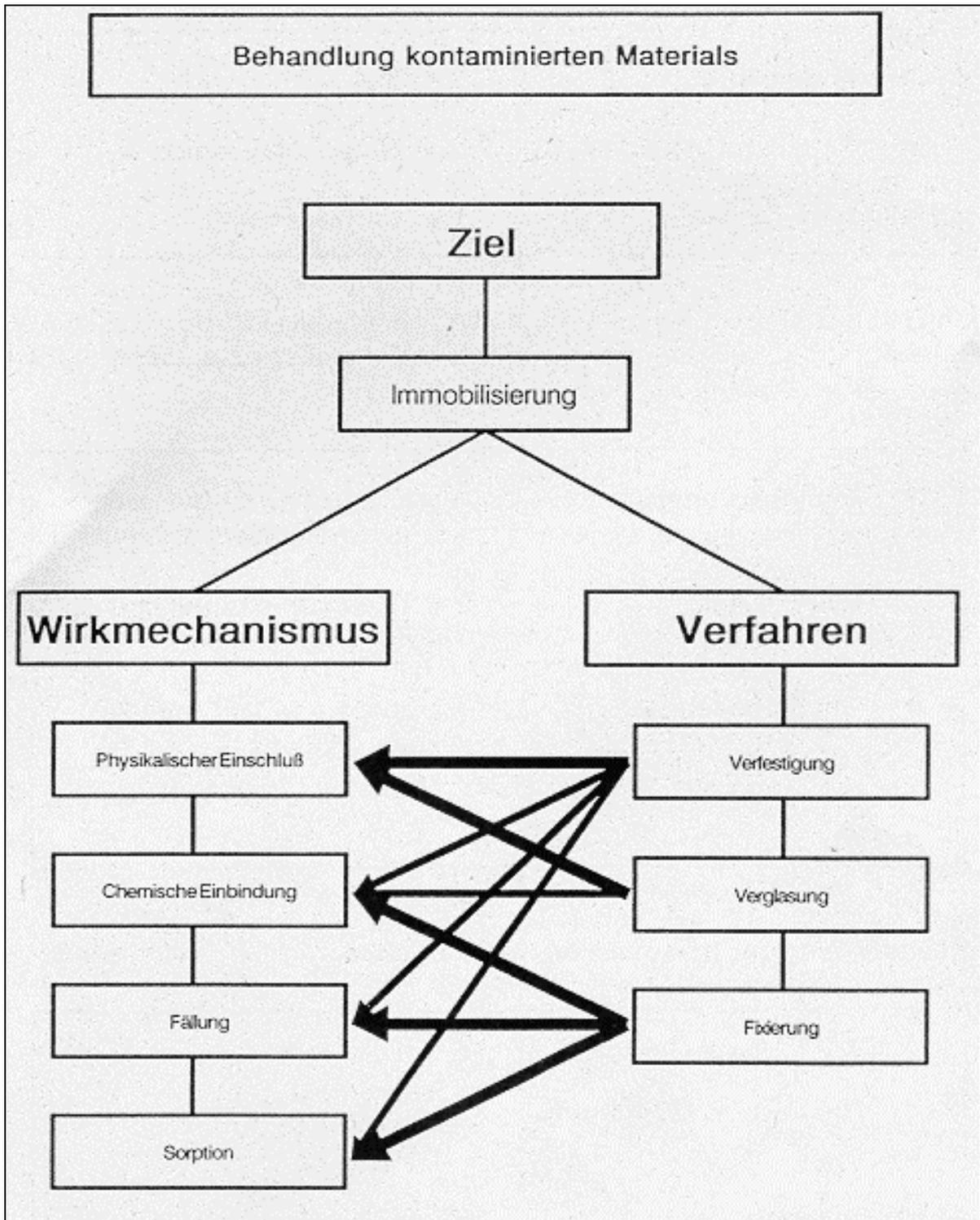


Bild 2.2: Schematische Darstellung der Immobilisierung

2.2 Anwendung

Wegen der relativ wenigen Praxisfälle von Altlastensanierungen mit Immobilisierung von Schadstoffen muß von einer Technik in der Entwicklung gesprochen werden, deren Eignung hinsichtlich der vielen denkbaren Einzelfälle beim Ausgangsmaterial und Schadstoffinventar noch nicht ausreichend beschrieben werden kann.

Prinzipiell kommen Verfahren zur Immobilisierung sowohl bei der Sanierung von Altablagerungen (pastöse, flüssige, staubförmige Abfälle) als auch von Altstandorten (Boden, Schutt) zur Anwendung.

Von praktischer Bedeutung für die Altlastensanierung sind Verfahren mit Schadstoffeinbindung durch Verfestigung. Andere Immobilisierungsverfahren wurden vereinzelt angewandt, haben sich jedoch als nur bedingt tauglich erwiesen bzw. blieben auf Einzelfälle beschränkt.

Verfestigungsverfahren mit hydraulischen Bindemitteln eignen sich prinzipiell gut zur Immobilisierung von Schwermetallen, die in Kationenform vorliegen und unter alkalischen Bedingungen schwerlösliche Verbindungen bilden [Lit:2.1].

Über das Langzeitverhalten liegen wegen der Kürze der Anwendung noch keine Erfahrungen vor.

Anwendungsbereiche:

Immobilisierungsverfahren können in bestimmten Fällen zur Sicherung einer Altlast geeignet sein. Hierbei kommen gerade die Fälle in Frage, in denen Dekontaminationsmaßnahmen nach Beurteilung der Kostenwirksamkeit und der nicht-monetären Kriterien nicht durchführbar sind und die Sanierungsziele auch durch eine Sicherungsmaßnahme erreicht werden können. Solche Fälle können sein:

- Böden mit hohem Feinkornanteil
- Mischkontaminationen
- Nicht empfindliche Nutzungen

Anwendungsgrenzen:

Die Immobilisierung organischer Schadstoffe durch hydraulische Bindemittel und ggf. organische Additive sollte auf Fälle niedriger Schadstoffgehalte beschränkt bleiben.

Das Immobilisierungsprodukt sollte nach Möglichkeit am Standort wiedereingebaut werden.

Entsorgung auf einer Deponie ist möglich, jedoch mit folgenden Einschränkungen:

Ablagerung auf einer Bauschuttdeponie sollte nicht erfolgen, da Immobilisierungsprodukte nach wie vor kontaminiertes Material darstellen und über das Langzeitverhalten dieser Produkte z.Zt. keine Erfahrungen vorliegen. Auswirkungen auf die Stoffmobilität durch Reaktion mit anderen Abfallstoffen oder durch Änderung der Milieubedingungen sind nicht vorhersehbar.

Der Deponieraum auf Sonderabfalldeponien ist begrenzt, so daß von einer Annahme der Immobilisierungsprodukte durch eine SAD nicht in jedem Falle auszugehen ist.

2.3 Verfahrensprinzip

Altlastensanierungen mit Immobilisierung von Schadstoffen sind in der Praxis on site-Maßnahmen (am Standort) mit

- Auskoffering,
- Behandlung,
- Wiedereinbau am Standort bzw. Ablagerung auf Deponien.

In situ-Maßnahmen (Behandlung ohne Auskoffering) sind möglich, praktisch jedoch von geringer Bedeutung.

Das in der Praxis überwiegend angewandte Verfahren zur Behandlung des ausgekofferten Materials (Boden, Schlamm) ist die Schadstoffeinbindung durch Verfestigung. Das kontaminierte Material wird dabei in der Regel mit einem hydraulischen Bindemittel auf Basis verschiedener Zemente unter Zugabe von Wasser und ggf. Additiven vermischt. Teilweise werden auch zusätzlich organische Bindemittel zugesetzt.

Das Mischprodukt wird anschließend am Standort lagenweise eingebaut und verdichtet oder in Formkörper gepreßt und eingebaut. Immobilisierungsprodukte können ihre Endfestigkeit je nach Ausgangsmaterial und Verfahren binnen ca. 28 Tagen erreichen.

Der immobilisierende Effekt von Verfestigungsverfahren beruht überwiegend auf der Verringerung der Durchlässigkeit des mit einem Bindemittel vermischten Ausgangsmaterials. Bei einigen Schwermetallen wirkt zusätzlich die Herabsetzung der Löslichkeit im alkalischen Milieu immobilisierend.

Zur Erreichung niedriger Durchlässigkeitswerte sind eine gute Vermischung von Ausgangsmaterial und Bindemittel sowie eine gleichmäßige und hohe Verdichtung der Mischung beim Einbau von besonderer Bedeutung.

2.4 Sanierungsvorplanung

Im Rahmen der "Eingehenden Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E₃₋₄)" sollen die in Frage kommenden Sanierungsalternativen erarbeitet werden. Nach einer Verfahrensvorauswahl und einer Kostenermittlung werden in einer Kostenwirksamkeitsabschätzung Kosten und Wirksamkeit der Verfahren zum Erreichen festgelegter Sanierungszielwerte vergleichend gegenübergestellt. Abhängig vom Sanierungsziel kann das Verfahren ausgewählt werden, bei dem mit den geringsten Kosten das Sanierungsziel erreicht werden kann. Das in Bild 2.1 (Seite 2) dargestellte Vorgehen wird in der Informationsschrift "Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung" der LfU Baden-Württemberg [Lit:2.6] detailliert erläutert werden. Nachfolgend werden ergänzende Hinweise speziell hinsichtlich der Auswahl von Immobilisierungsverfahren gegeben.

Verfahrensvorauswahl

Im Rahmen der Verfahrensvorauswahl gilt es, für die prinzipiell in Frage kommenden Sanierungsverfahren Anbieter auszuwählen und konkrete Firmenanfragen zu stellen. Abhängig von Ausgangsmaterial und Schadstoffart kann aus den im vorliegenden Handbuch genannten Anbietern - sollte die Immobilisierung zu den möglichen Sanierungsverfahren zählen - eine Vorauswahl getroffen werden. Dabei sollte bez. "know-how" differenziert werden zwischen:

- Anbietern mit Verfahren und Referenzen zur Durchführung von Altlastensanierungen (heterogen, einzelfallspezifisch)
- Anbietern mit Verfahren und Referenzen zur Behandlung von Sonderabfällen, z.B. Schlämme (homogen, Massen abfälle)

Firmenanfrage

Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, sich von einem Sachverständigen eine geeignete Rezeptur entwickeln zu lassen und danach im Rahmen einer Ausschreibung den günstigsten Anbieter für die Behandlung des Materials auszuwählen. Bei der derzeitigen Marktsituation erscheint es aber günstiger, unter den vorhandenen Anbietern über konkrete Anfragen auszuwählen.

Die an die Anbieter gerichtete Firmenanfrage sollte von seiten des Auftraggebers folgende Informationen enthalten:

- Art und Beschaffenheit des Ausgangsmaterials (Boden, Bauschutt, Schlamm)
- Schadstoffinventar
- Gesamtmenge
- Standortbeschreibung:
(Geologie, Hydrogeologie, Bebauung, Lage, Nutzung)
- Ziel der Maßnahme (z.B. Wiedereinbau am Standort)

Die Anbieter sollten zu folgenden **Fragen** Stellung nehmen:

- Prinzipielle Machbarkeit
- Verfügbarkeit der Mischanlage
- Mengenbezogene Referenzen
- Erfahrung in Zusammenarbeit mit Behörden
- Verfahrensbeschreibung
- Beschreibung des Wirkmechanismus, mit dem für die beschriebene Konfiguration Ausgangsmaterial/Schadstoff-inventar die Immobilisierung der Schadstoffe realisiert werden soll
- Art und Kosten von Voruntersuchungen, Eignungsprüfungen für ein verbindliches Angebot

- Verfahrenseffektivität, ausgedrückt in:
 - mechanische Eigenschaften des Immobilisierungsproduktes
 - Eluatwerte des Immobilisierungsproduktes
 - Langzeitwirksamkeit der Immobilisierung
- Eigenkontrolle oder Fremdüberwachung
- Arbeitsschutz und Emissionsschutz
- Qualitätssicherung
- Kosten des Verfahrens inkl.
 - Auskoffern
 - Behandeln
 - Transport
 - Wiedereinbau, alternativ Ablagerung oder
 - Verwertung
 - Arbeitsschutz
 - Qualitätssicherung
- Garantieleistung, Maßnahmen bei Nachbesserung
- Leistungen des Auftraggebers, die zur Ausführung des Vorhabens notwendig sind
- Angaben des Auftraggebers zur möglichen späteren Ausarbeitung eines verbindlichen Angebotes (z.B. Schadstoffinventar, Zusammensetzung des Untergrundes)

Bei der Auswertung der Firmenanfragen können die in diesem Handbuch formulierten Mindestanforderungen zugrunde gelegt werden. Nach Auswahl geeigneter Anbieter und Vergleich der Kostenschätzungen lassen sich die Größenordnung der Kosten und die Wirksamkeit einer Sicherungsmaßnahme durch Immobilisierung festlegen (siehe Kap. 2.5 und 4.6).

Kostenwirksamkeitsabschätzung

Bei der Kostenwirksamkeitsabschätzung ist zu bedenken, daß das gesicherte, aber immer noch kontaminierte Material eines Tages u.U. doch entfernt, d.h. ausgekoffert werden muß. Die Kosten für die Entfernung von größeren Mengen z.B. betonartig verfestigten Materials können beträchtlich sein.

Nicht-monetäre Beurteilung

Neben den für alle on site-Maßnahmen mit Auskoffierung gültigen nicht-monetären Kriterien, die an anderer Stelle ausführlich beschrieben sind [Lit:2.2], sind für Immobilisierungsverfahren relevant:

Umweltverträglichkeit

1. Langzeitverhalten, Dauer der vollen Wirksamkeit
2. Kontroll- und Reparaturmöglichkeiten
3. Emissionen von Lärm, Stäuben, Gasen, Abwasser, Schadstoffen

Technische Kriterien

4. Entwicklungsstand (Referenzen)
5. Flexibilität
6. Arbeitsschutz

Organisatorische Kriterien

7. öffentliche Akzeptanz
8. Genehmigungsanforderungen

2.5 Sanierungshauptplanung

Ausführungsplanung

Die Ausführungsplanung umfaßt die detaillierte Erarbeitung des Sanierungsverfahrens. Für den Fall einer Immobilisierung ex situ (Behandlung des ausgekofferten Materials on site oder off site) mit Wiedereinbau am Standort sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

Berechnungen

Massenermittlung

Materialarten

Durchsatz

Zeitbedarf

Konzepte

Behandlung

Qualitätssicherung

Arbeitsschutz

Emissionsschutz

Begleitmaßnahmen

Öffentlichkeitsarbeit

Beweissicherung

Meßprogramm

Immissionen

Genehmigungsplanung

Bei der Genehmigungsplanung von Immobilisierungsmaßnahmen können folgende Rechtsgebiete berührt sein:

- Baurecht
- Immissionsschutzrecht
- Abfallrecht
- Wasserrecht
- Bodenschutzrecht
- Naturschutzrecht
- Chemikalienrecht
- Arbeitsschutzrecht

In der Praxis werden Sicherungsmaßnahmen mittels Immobilisierung baurechtlich genehmigt. Der Betrieb der Behandlungsanlage ist genehmigungspflichtig nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz.

Ausschreibung

Bei den meisten Sanierungsverfahren, insbesondere bei Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten, können diese wegen ihrer Eigenart und besonderen Anforderungen nur von einer begrenzten Zahl von Unternehmen in geeigneter Weise ausgeführt werden.

Es empfiehlt sich daher eine **beschränkte Ausschreibung**, bei der im allgemeinen drei bis acht fachkundige, leistungsstarke und zuverlässige Bewerber (Kommentar VOB/A § 3) aufgefordert werden, Angebote abzugeben. Sollten nicht genug Anbieter bekannt sein, so kann als Variante der beschränkten Ausschreibung ein **öffentlicher Teilnahmewettbewerb** durchgeführt werden.

Die Ausschreibung setzt die Aufstellung detaillierter **Leistungsbeschreibungen** voraus, wobei nach VOB/A unterschieden werden:

- Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis
- Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm

Während im Leistungsverzeichnis detailliert die einzelnen Leistungspositionen aufgelistet werden, in die der Anbieter nur Einheitspreise und Gesamtpreise einzusetzen hat, wird im Leistungsprogramm die Bauaufgabe mit ihren maßgebenden Bedingungen und Umständen beschrieben, wodurch alle Anbieter zu Planungsüberlegungen gezwungen werden und bereits in der Angebotsphase ein Ideenwettbewerb stattfindet. Nachteil des Leistungsprogrammes ist, daß die Angebote u.U. schwer vergleichbar sind.

Aufgrund der noch geringen Zahl ausgeführter Sanierungen mittels Immobilisierung und der für Altlasten typischen Einzelfallbetrachtung ist die Vorgabe eines detaillierten Leistungsverzeichnisses nicht sinnvoll bzw. schwer realisierbar, so daß die Ausschreibung über eine **Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm** erfolgen sollte.

In der folgenden Übersicht sind wesentliche Punkte zur Beurteilung und Qualitätssicherung aufgelistet, die Bestandteil der Leistungsbeschreibung sein sollten.

Positionen zur Aufnahme in eine **Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm bei Ausschreibung** von Immobilisierungsmaßnahmen:

- Beschreibung des Wirkmechanismus des Immobilisierungsverfahrens
- Vorversuch mit Eignungsprüfung und **Nachweis** der Einhaltung der Anforderungen für den beschriebenen Wirkmechanismus
- Elutionsversuche nach DEV S4 sowohl am Originalmaterial als auch am Immobilisierungsprodukt und Offenlegung der Ergebnisse; ("schärfere" Elutionsversuche in Abstimmung mit Fachbehörden und Gutachtern)
- Offenlegung der prinzipiellen Zusammensetzung der verwendeten Bindemittel und Additive (Arbeitsschutz, Umweltverträglichkeit)
- Prüfung der Bindemittel und Additive gemäß TA Abfall Teil 1, Anhang H, Kapitel 1, Ziffer 1 und Nachweis der Einhaltung der Zuordnungswerte nach Anhang D* (bei Wiedereinbau adäquat als Mindesttextkörper)
- Gütekontrolle während des Mischvorgangs, Entnahme von Rückstellproben
- Gütekontrolle während des Einbaus

- Erfolgskontrolle durch einen unabhängigen Sachverständigen:
Untersuchung von Proben aus dem eingebauten Endprodukt (z.B. Bohrkern) nach bestimmten Fristen, z.B. nach 28 und nach 56 Tagen.
- Langzeitkontrolle bei Wiedereinbau am Standort durch Sickerwasser- und Grundwasserüberwachung
- Garantieleistung (min. 5 Jahre) des Anbieters für volle Wirksamkeit der Maßnahme;
Vereinbarung einer Gütekontrolle vor Ablauf der Garantie
- Verbindliche Kosten

* Organische Bindemittel können diese Zuordnung nicht erfüllen. Sollen organische Bindemittel eingesetzt werden, ist zu fordern, daß diese zu spezifizieren sind und eine gleichbleibende Qualität zu garantieren ist.

2.6 Eignungsprüfung

Für die **Eignungsprüfung** sollten abhängig vom angebotenen Verfahren und dem geplanten Verbleib der Immobilisierungsprodukte (Wiedereinbau, Deponie, Wiederverwendung) als Mindestaussage folgende Untersuchungen gefordert werden:

Verfestigung:

Der immobilisierende Effekt der Verfestigung beruht auf der Herabsetzung der Durchlässigkeit und Beeinflussung der Löslichkeit durch pH-Einstellung (Schwermetalle).

Am verfestigten Produkt sind zu prüfen:

- Mechanische Eigenschaften
 - Durchlässigkeitsbeiwert k_f nach DIN 18130
Orientierungswert $k_f \leq 10^{-9}$ m/s
 - Einaxiale Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 18136
Orientierungswerte:
Wiedereinbau: $q_u \geq 2,5$ MN/m² [Lit:2.1, 2.3]
Ablagerung : $q_u \geq 1,0$ MN/m² [Lit:2.5]
 - Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN 52104
 - Zerfallsbeständigkeit unter Wasser nach Endell
Ablagerung : $z \leq 2$ %
- Eluatwerte
DEV S4, modifiziert konform LAGA-Richtlinie EW/77 (z.B. NLÖ-Verfahren, s. Kap. 4.2.1), ggf. weitere ("schärfere") Elutionsversuche
Wiedereinbau: Parameterliste standortspezifisch
Ablagerung : Zuordnungswerte Anhang D, TA Abfall, Teil 1

Fixierung:

Der immobilisierende Effekt der Fixierung beruht auf chemischem Einbau in Verbindungen bzw. Mineralneubildungen und auf Chemisorption.

Am behandelten Material ist die chemische Fixierung nachzuweisen:

- DEV S4 am zerkleinerten Material
Wiedereinbau: Parameterliste standortspezifisch
Ablagerung: Zuordnungswerte Anhang D, TA Abfall

zusätzlich in Absprache mit Fachbehörden und Gutachtern:

- (Elution im pH_{stat} -Test, Cremer-Obermann-Verfahren)*
- (sequentielle Extraktion bei Schwermetallen) *
- (Extraktion mit org. Lösungsmitteln bei org. Schadstoffen) *

* nicht genormt

2.7 Qualitätssicherung

Die im folgenden aufgeführten Kriterien zur **Qualitätssicherung** sind weitestgehend an die TA Abfall, Teil 1, Anhang H, angelehnt und sind demgemäß auf die Verfestigung von Sonderabfällen zur Ablagerung auf Deponien bezogen. Der Verfahrensablauf bei der Verfestigung von Materialien aus Altlasten ist prinzipiell identisch, doch sind bei geplantem Wiedereinbau am Standort oder gar Wiederverwendung des Immobilisierungsproduktes außerhalb vom Standort oder von Deponien besonders hohe Anforderungen an die Qualität (d. h. Schadstoffemission langfristig unterhalb festgelegter Sanierungsziele) zu stellen. Die hier beschriebenen Qualitätsanforderungen sind als absoluter Mindesttextkörper zu betrachten.

Neben der **Eignungsprüfung**, die im Rahmen von Vorversuchen im Vorfeld einer technischen Ausführung stattfindet, sollte während der Ausführung eine Qualitätskontrolle durchgeführt werden, um zu prüfen, ob das Verfestigungsprodukt die in der Eignungsprüfung ermittelten Eigenschaften auch im technischen Maßstab besitzt.

Unter dem Stichwort "Gütekontrolle" fordert der Anhang H der TA Abfall,

Teil 1 für die Ausführung einer Verfestigungsmaßnahme:

1. Einbaukontrolle
2. Gütekontrolle (beim Einbau)
3. Betriebstagebuch

Einbaukontrolle

Als Einbaukontrolle ist die Rezeptur des eingebauten Materials für die gesamte Abfallmenge zu dokumentieren, z.B. durch Protokolle der Mischanlage (Abfall-, Additiv-, Wassermengen).

Gütekontrolle

Es ist eine Gütekontrolle durchzuführen, um sicherzustellen, daß die in der Eignungsprüfung ermittelten Eigenschaften des Verfestigungsproduktes beim Einbau im technischen Maßstab tatsächlich erreicht werden.

Über Art und Umfang dieser Gütekontrolle macht die TA Abfall, Teil 1 keine Aussagen, doch sollten auch hier wie bei der Eignungsprüfung untersucht werden:

- Einzelkomponenten
- Verfestigungsprodukte (Eluat, mechanische Eigenschaften)

Als konkrete Maßnahmen zur Gütekontrolle kommen in Frage [Lit:2.3, 2.4]:

- **Entnahme von Rückstellproben** für bestimmte Mengen des Immobilisierungsproduktes durch Ausstechzylinder* aus dem frisch eingebauten Material oder
- **Herstellung von Probekörpern** auf der Baustelle zur Eigenkontrolle während der Produktion (Referenzmischungen).
- **Prüfung der Probekörper** analog der Eignungsprüfung und statistische Auswertung der Ergebnisse.
- **Überprüfung** durch eine unabhängige Institution.

* Diese Art der Probenahme ist gut geeignet für verfestigte Stäube und Schlämme. Bei verfestigten Böden können schon geringe Kornanteile im Kieskornbereich zu stark verfälschten Ergebnissen bei der Durchlässigkeitsbestimmung führen.

Betriebstagebuch

In einem Betriebstagebuch sollen für jede Charge des Verfestigungsproduktes der Zeitpunkt der Mischung, des Einbaus und die Einbauart festgehalten werden. Über Inhalt, Führung und Aufbewahrungsfristen informiert Nr. 5.4.3 der TA Abfall, Teil 1.

Langzeitkontrolle

Eine Langzeitkontrolle verfestigter Produkte wird in der TA Abfall, Teil 1 unter Nr. 12.2 (Ablagerung auf Altdeponien) und 12.3 (Ablagerung auf Übergangs-Monodeponien) gefordert. Danach ist die Wirksamkeit von Maßnahmen (Einbindung, Verfestigung, Einkapselung) während des Betriebs und in der Nachsorgephase zu untersuchen und zu dokumentieren. Dazu sind **langjährige** Untersuchungen über die Festigkeit, die Durchlässigkeit und das Auslaugverhalten durchzuführen.

Nach Ansicht des LWA Nordrhein-Westfalen sind diese Untersuchungen nur bei der Ablagerung größerer Mengen verfestigter Abfälle oder beim Betrieb von Monodeponien (Brutto-Abfallmenge größer als 10.000 t/a) gerechtfertigt [Lit:2.5]. Als Untersuchungsmethode wird vorgeschlagen:

- Herstellung von zwei gesonderten zylindrischen Probekörpern (Ø 100 mm, Höhe 100 mm) des Verfestigungsproduktes mit Beginn der Verfestigungsmaßnahme (Aushärtezeit min. 28 Tage) oder
- Kernbohrungen am Deponiekörper nach frühestens 28 Tagen.

- Langzeit-Elution in der Triaxialzelle (Kap. 4.2.10) über mindestens 5 Jahre.

Bei der Altlastensicherung mit Wiedereinbau von Immobilisierungsprodukten am Standort ist die wirkungsvolle Langzeitkontrolle ein entscheidendes Kriterium für die Anwendung dieser Verfahren, insbesondere in der öffentlichen Diskussion.

Als Maßnahmen zur Langzeitkontrolle einer Sicherungsmaßnahme mit Wiedereinbau am Standort könnten gefordert werden:

- Kontrolle von Oberflächen-, Sicker- und Grundwasser bez. Menge und Qualität
- Beständigkeitsprüfung durch Probenahme und Untersuchung von Probekörpern (z.B. Bohrkerne)

Bei Wiederverwendung verfestigten Materials außerhalb des Standortes oder außerhalb von Deponien (z.B. in Straßenbauwerken, Lärmschutzwällen) sollte zusätzlich eine Dokumentation erfolgen, die langfristig aufzubewahren ist.

3 Grundlagen der Schadstoffimmobilisierung

3.1 Allgemeine Beschreibung der Technik zur Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten

3.1.1 Ziele der Immobilisierung

Immobilisierungsverfahren dienen zur Sicherung von Altlasten, da bei ihnen die Schadstoffe - im Unterschied zur Dekontamination- nicht entfernt, sondern lediglich ihre Mobilität und Mobilisierbarkeit herabgesetzt werden.

Durch Immobilisierung soll das kontaminierte Material so beeinflusst werden, daß Emissionen der enthaltenen Schadstoffe langfristig unterbunden werden oder zumindest unterhalb festgelegter Prüf- oder Richtwerte liegen und so die Gefährdung von Schutzgütern durch die Altlast minimiert wird.

Kontaminiertes Material aus Altlasten kann nach der Immobilisierung:

- bei in situ-Verfahren in der Altlast verbleiben
- bei ex situ-Verfahren
 - wieder am Standort eingebaut
 - auf Deponien verbracht
 - bei Baumaßnahmen verwendet werden

In allen drei Fällen ist als entscheidendes Kriterium zur Beurteilung von Immobilisierungsprodukten deren langfristiges Emissionsverhalten zu sehen.

Neben der Gefährdungsminimierung sollen durch Immobilisierung in der Regel auch die mechanischen Eigenschaften des Materials beeinflusst werden. Durch Formung, Verfestigung und Aushärtung werden Handhabbarkeit und Ablagerbarkeit verbessert.

Sanierungsziele werden in den einzelnen Bundesländern nach landeseigenen (sofern vorhanden) bzw. nach in anderen Bundesländern gebräuchlichen "Listen" ermittelt, die sich z.T. in wesentlichen Details unterscheiden. Hinzu kommen einzelne Regelwerke und Richtlinienentwürfe verschiedener Fachkommissionen, die zur Findung von Sanierungszielen begleitend herangezogen werden können.

Abhängig von der Einstufung von Immobilisierungsprodukten (Abfall oder Wirtschaftsgut) und dem weiteren Verbleib (Standort, Deponie, Baumaterial) sind die jeweiligen "Listen" nur bedingt geeignet, realistische Sanierungsziele festzulegen. So gelten die Anforderungen der TA Abfall, Teil 1 (sog. TA Sonderabfall) für Sonderabfälle und tragen den Ansprüchen von Deponien Rechnung. Ob diese Forderungen bei Sicherungsmaßnahmen am Standort einer Altlast genügen, muß im Einzelfall entschieden werden.

In Baden-Württemberg werden Sanierungsziele für Altlasten auf Grundlage der Informationsschrift "Orientierungswerte bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" der Landesanstalt für Umweltschutz ermittelt. Über die Anwendbarkeit bei Immobilisierungsverfahren liegen noch keine Erfahrungen vor.

In Nordrhein-Westfalen, wo schon einige Altlastensanierungen mittels Immobilisierung durchgeführt wurden, wurden einzelne Richtwerte der Deponieklasse 2 gemäß dem "Entwurf einer Richtlinie über die Untersuchung und Beurteilung von Abfällen, Teil 2" des Landesamtes für Wasser und Abfall vom Juni 1987 zur Festlegung von Sanierungszielwerten herangezogen.

Bundeseinheitlich gilt die "Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Teil 1" vom März 1991, die in den Anhängen D und H Prüfkriterien und Prüfwerte (sog. Zuordnungswerte) für Verfestigungsprodukte vorgibt, die jedoch nur für den Fall der Ablagerung auf Sonderabfalldponien oder Übergangsdeponien gelten.

Allgemeine Ziele, die durch eine Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten erreicht werden sollten, wurden in der Literatur schon mehrfach genannt: (Sachverständigenrat für Umweltfragen [Lit:3.11], Wienberg/Calmano [Lit:3.2])

- Verminderung der Eluierbarkeit bzw. Löslichkeit
- Verminderung der spezifischen Oberfläche
- Verminderung der Wasserdurchlässigkeit (Porosität)
- Verbesserung der Druckfestigkeit und der Lager- und Tragfestigkeit
- Verminderung der Staubbildung
- Überführung von fließfähigen Stoffen in den festen Aggregatzustand
- Gewährleistung einer mechanischen Langzeitstabilität und Langzeitintegrität
- keine Schadstofffreisetzung bei langfristig ablaufenden biochemischen Umsetzungs- bzw. Abbauprozessen
- keine Abgabe von schädlichen Reaktionsprodukten bzw. Metaboliten

Generell sollten Sanierungsziele einzelfallspezifisch, schutzgutbezogen und nutzungsabhängig festgelegt werden.

3.1.2 Anwendung

Das auf Altlasten angetroffene kontaminierte Material kann sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein. An Altstandorten und Altablagerungen werden angetroffen:

- kontaminierter Boden
- kontaminierter Schutt
- Abfälle
- flüssige oder pastöse Gemische

Während es sich z.B. bei Schlämmen aus Altablagerungen meist um relativ homogenes Material handelt, können Böden bzw. Substrate von Altstandorten sehr heterogen zusammengesetzt sein. Das Spektrum der Kontaminationen reicht vom einzelnen Schadstoff bis hin zu Fällungen,

in denen gleichzeitig anorganische sowie leicht- und schwerflüchtige organische Verunreinigungen angetroffen werden.

Zusammen mit den Variationen im Gefüge des kontaminierten Materials, vom einfachen Sandboden bis hin zum Gemisch aus Boden, Schutt und Abfall ergibt sich eine Vielzahl von Ausgangsmaterialien, die bei Anwendung von Immobilisierungsverfahren alle einer speziellen Behandlung bedürfen, sofern sie nach den Ergebnissen der Vorversuche und unter Zugrundelegung bestimmter Sanierungsziele überhaupt wirksam behandelbar sind.

Die Anwendung von Immobilisierungsverfahren bei der Altlastensanierung konzentriert sich in der Praxis bisher auf die Fälle, in denen aufgrund der Beschaffenheit des Ausgangsmaterials und des Schadstoffinventars die erprobten Dekontaminationstechniken nicht sinnvoll einsetzbar sind und keine Verunreinigungen durch leichtflüchtige Verbindungen vorliegen.

3.1.3 Verfahrensübersicht

Bei der Behandlung von Rückständen und Sonderabfällen werden schon seit vielen Jahren, vor allem auch im Ausland (USA, Japan), Techniken zur Immobilisierung von Schadstoffen eingesetzt.

In den USA wird die Immobilisierung (solidification/ stabilization) in großem Umfange angewandt. Mit "solidification" oder "stabilization" werden dabei sowohl kontaminierte Böden als auch verschiedene Abfälle behandelt. Es existieren Tests und Kriterien zur Beurteilung immobilisierter Endprodukte. Verschiedene Kategorien von Sonderabfällen können nach der Immobilisierung angeblich auf Hausmülldeponien abgelagert werden.

Das im Jahre 1986 lancierte SITE-Programm (Superfund Innovative Technology Evaluation Program) brachte umfassende Untersuchungen auf dem Gebiet der Immobilisierung und auch im Rahmen des ARCS-Programmes (Assessment and Remediation of Contaminated Sediments) ist die Immobilisierung ein wichtiges Thema.

In Japan werden Immobilisierungsverfahren von einer beschränkten Anzahl Firmen angeboten. Aus der Fachliteratur wird deutlich, daß die Immobilisierung in großem Umfange angewandt wird, insbesondere bei Klärschlämmen.

Entwicklungen in Europa sind vor allem in Deutschland und den Niederlanden zu verzeichnen. Bisher wurde die Anwendung von Immobilisierungsverfahren in den Niederlanden staatlich nicht gefördert. Diese Haltung wird allerdings zur Zeit sowohl von behördlicher als auch industrieller Seite überdacht, was sich auch in der steigenden Zahl der Anbieter widerspiegelt.

In Deutschland war die Entwicklung der Verfahren bis zum Aufkommen der Altlastenthematik überwiegend auf Immobilisierungsverfahren für Schlämme unterschiedlicher Herkunft (z.B. Ölschlämme, anorganische Schlämme, metallhaltige Schlämme, radioaktive Schlämme) konzentriert. Bekannte Verfahren sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Verfahren zur Behandlung von Schlämmen [Lit:3.13]

Ausgangsmaterial	Verfahren	Bindemittel
Ölschlamm	D C R	Ungelöschter Kalk
	G F S	Flugasche, hydraulische Bindemittel
	K F K	Gips/Bimsstein, Gips/Wasserglas
Anorganische Schlämme	Verfestigung	Zement
	Verfestigung	Kalk
	G F S, FAKMAD	Asche
	H D T	Hydraulische Bindemittel, hydrophobe Additive
	Heide-Werner	Braunkohlenasche

Einhergehend mit der zunehmenden Akzeptierung von Sicherungsverfahren als Möglichkeit zur Altlastensanierung hat es Weiter- und Neuentwicklungen von Verfahren gegeben. Eine weitere Stimulierung bewirkte die TA Abfall, Teil 1 vom 12.03.1991. Abfälle mit höheren Schadstoffgehalten, die wegen nicht ausreichender Kapazitäten nicht chemisch/physikalisch oder thermisch behandelt werden können, dürfen auf Altdeponien bis zum 1.4.1997 oder Übergangs-Monodeponien bis zum 1.4.1999 abgelagert werden.

Vergleicht man die in der Literatur beschriebenen Verfahrensprinzipien zur Immobilisierung mit den Referenzlisten der ausführenden Firmen, so wird deutlich, daß in der Praxis der Altlastensanierung zum gegenwärtigen Zeitpunkt Verfahren mit Schadstoffeinbindung durch Verfestigung ausgekofferten Materials den Regelfall darstellen.

Die Verfestigung wird durchgeführt, um die Durchlässigkeit zu verringern und die mechanischen Eigenschaften des Materials zu verbessern. Das Schwergewicht liegt auf der on site/off site-Behandlung; in situ-Verfahren haben geringe Bedeutung.

Vorteile der Verfestigungsverfahren gegenüber anderen Techniken zur Immobilisierung (Fixierung, Verglasung) sind sicherlich, daß sie mit herkömmlicher Verfahrenstechnik der Bauindustrie durchgeführt werden können und daß von der Genehmigungsseite her für die Verfestigung als einzigem Verfahren genormte Prüfmethode und Prüfwerte durch den Anhang H der TA Abfall, Teil 1 vorliegen, wenngleich die TA Abfall in den meisten Fällen nicht anwendbar ist.

Die Qualität einer Altlastensanierung durch Verfestigung des kontaminierten Materials hängt im wesentlichen von drei Faktoren ab:

- Bindemittel und Rezeptur
- Mischtechnik
- Einbautechnik

Vorversuche

Die prinzipielle Machbarkeit und Wirksamkeit einer Immobilisierung mittels Verfestigung wird zunächst durch Vorversuche mit Prüfkörpern festgestellt. Dabei werden geeignete Rezepturen (Bindemittel, Additive) ermittelt und optimiert. Bei geplanter Ablagerung von Verfestigungsprodukten werden die Prüfkörper gemäß den Vorgaben der TA Abfall, Teil 1 auf Festigkeit, Durchlässigkeit und Zusammensetzung des Eluates hin untersucht. Bei Altlastensanierungen mit Wiedereinbau des Immobilisierungsproduktes am Standort sollten zusätzliche Prüfungen (z.B. weitere Elutionstests, siehe Kapitel 4) durchgeführt werden.

Ausführung

Vor Beginn der technischen Durchführung muß in jedem Fall der spätere Verbleib des Verfestigungsproduktes geklärt sein.

Bei Ausführung der Sanierungsmaßnahme wird das ausgekofferte Material zunächst sortiert und homogenisiert; ggf. müssen Fremdstoffe (z.B. Schrott, Schlacken, Holz usw.) ausgesondert werden.

Zur Immobilisierung werden je nach Verfahren und Ausgangsmaterial unterschiedliche Rezepturen von Bindemitteln, Additiven und Wasser über Dosiereinrichtungen dem kontaminierten Material zugesetzt. Liegen auf der Altlast kontaminierte Wässer vor, so können diese u.U. als Anmachwasser eingesetzt und somit gleichzeitig behandelt werden.

Kontaminiertes Material und Zuschlagstoffe werden intensiv vermischt. Zur Mischung werden Durchlaufmischer (Schneckenmischer) oder Chargenmischer (Zwangsmischer) eingesetzt.

Die Qualität eines Verfestigungsproduktes hängt stark von der möglichst innigen Vermischung von Ausgangsmaterial und Zuschlagstoffen ab. Am besten läßt sich dies im Chargenmischer erreichen, der jedoch eine geringere Durchsatzleistung als ein Durchlaufmischer erbringt.

Für das Endprodukt ergeben sich prinzipiell mehrere Möglichkeiten, über die bereits zu Beginn der Maßnahme entschieden sein muß:

- Einbau am Standort
- Ablagerung auf einer dafür zugelassenen Deponie
- Wiederverwendung als Baustoff (z.B. Tragschicht von Straßen, Kern von Dämmen und Wällen)

Das umgesetzte Material wird üblicherweise lagenweise eingebaut und anschließend mit Erdbeugeräten verdichtet, um das Porenvolumen und damit die Durchlässigkeit zu verringern; im Ergebnis soll ein monolithischer Körper entstehen. Nach der Ablagerung härtet das Material, abhängig von der Rezeptur und Umgebungstemperatur, innerhalb weniger Stunden bis zu einigen Tagen aus. Die Prüfung der Endfestigkeit erfolgt in der Regel nach 28 Tagen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Mischung aus der Verfestigungsanlage zunächst als Formkörper (z. B. Würfel von 1 m³) aushärten zu lassen und anschließend einzubauen.

3.2 Chemische und physikalische Grundlagen von Immobilisierungsverfahren

Die Kenntnis chemisch-physikalischer Vorgänge spielt bei der Anwendung von Immobilisierungsverfahren eine entscheidende Rolle. Für die kurz- und langfristige Beurteilung in bezug auf den Schadstoffaustrag sind genaue Kenntnisse der Schadstoffeinbindung sowie der Umgebungsbedingungen wichtig. Immobilisierung ist das Ergebnis verschiedener Maßnahmen mit unterschiedlichen Wirkmechanismen, die im folgenden ausführlich dargestellt sind. Die Bindemittel werden in Kapitel 3.2.2 beschrieben.

Verfestigung beschreibt einen Prozeß, bei dem ein Bindemittel dem Ausgangsmaterial zuge-mischt wird, um ein mechanisch festes Produkt zu erhalten. Dabei können - müssen aber nicht - chemische Bindungen zwischen den Schadstoffen und dem Additiv entstehen [Lit:3.1]. Teilweise werden auch schadstofffreie Rückstände wie Schlämme oder Stäube verfestigt, um die Verbreitung durch Wind oder Wasser zu unterbinden; in diesem Fall handelt es sich um eine Konditionierung.

3.2.1 Wirkmechanismen

Physikalische Einkapselung

Bei der Einkapselung wird das Ausgangsmaterial durch Bindemittel und Additive umschlossen. Dabei unterscheidet man zwischen Mikro-einkapselung, d.h. dem Einschluß einzelner Partikeln, und Makro-einkapselung, d.h. dem Einschluß von Partikelagglomeraten oder des gesamten Materialkörpers.

Durch die Einkapselung werden die Porosität reduziert und Verbindungswege nach außen abgeschlossen, so daß eine Wasserinfiltration nicht mehr möglich sein soll (Bild 3.1). Die Auslaugung ist auf die Oberfläche bzw. Bruchflächen des Produktes beschränkt.

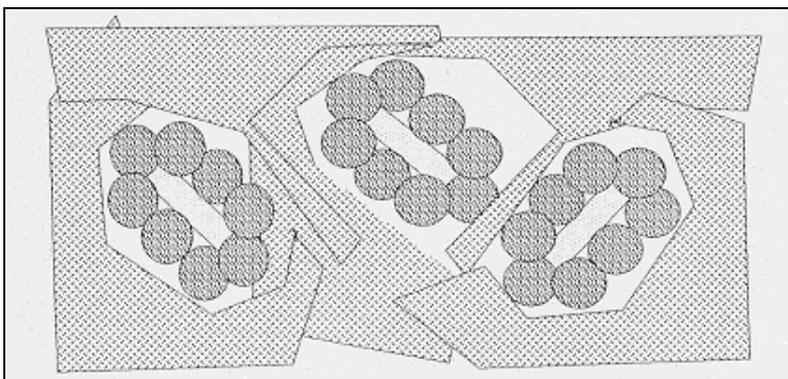


Bild 3.1: Einkapselung von Schadstoffen

Die meisten angebotenen Immobilisierungsverfahren beruhen mehr oder weniger auf der Einkapselung des Bodens oder Abfalls in eine feste Matrix. In der Regel werden dazu anorganische Bindemittel wie Zement, Kalk oder Gips verwendet. Möglich ist auch die Einbindung in Kunststoffe (Thermoplaste, Polymere).

Chemischer Einbau

Beim chemischen Einbau werden Schadstoffe als Ersatzatome in das Kristallgitter oder die Feststoffmatrix neu entstehender Verbindungen eingebaut. Dieser Vorgang ist in Bild 3.2 an einem Kristallgittermodell dargestellt.

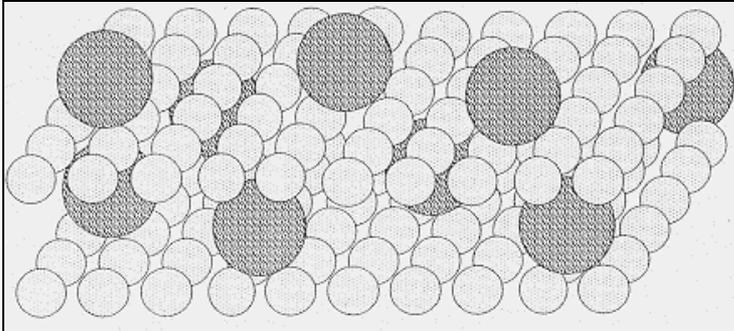


Bild 3.2: Chemischer Einbau von Schadstoffen

Fällung

Bei der Behandlung schwermetallhaltiger Materialien wird häufig die Fällung genutzt, um Schwermetalle zu immobilisieren (Bild 3.3). Die Basizität von Zement führt bei Anwesenheit bestimmter Schwermetalle zur Bildung von schwerlöslichen Hydroxiden oder Carbonaten [Lit:3.3]. Teilweise werden auch spezielle Fällungsmittel zugegeben, um Schwermetalle zu immobilisieren.

Sorption

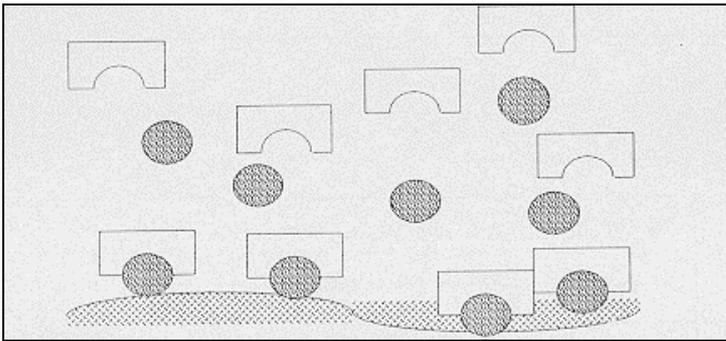
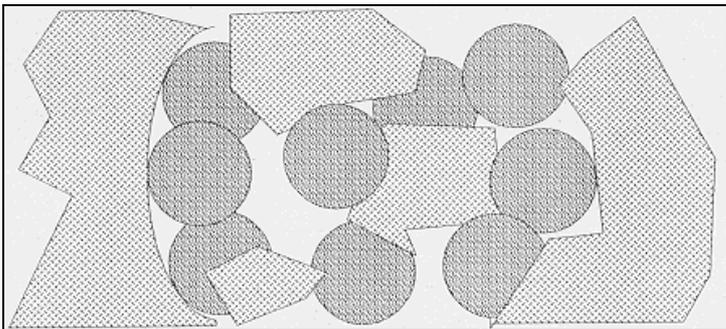
Die Sorption muß grundsätzlich in die Chemisorption und die physikalische Sorption unterschieden werden.

Die **Chemisorption** ist charakterisiert durch hohe Enthalpien von 60-200 kJ/mol. Als Bindungsmechanismen kommen kationische, anionische und koordinative Bindungen sowie Kationen-Dipolbindungen in Betracht. Die Desorption erfordert Aktivierungsenergien, welche die Sorptionsenthalpien überschreiten.

Die **physikalische Sorption** ist wesentlich schwächer; die Enthalpien liegen im Bereich von 4-8 kJ/mol. Sie ist das Ergebnis der Wirkung von van der Waals Kräften (elektrostatische und elektrokinetische Wechselwirkungen) [Lit:3.2].

Mit Sorption wird die Anlagerung von Metallen und teilweise organischen Molekülen an elektrisch geladene Oberflächen bestimmter Verbindungen wie z.B. Tonmineralen beschrieben (Bild 3.4). Auch der **Ionenaustausch** zählt zu den Sorptionsmechanismen und kann meist mit den gleichen physikalischen Gesetzen (Adsorptionsisothermen) beschrieben werden.

Zur Sorption von Schwermetallen werden entweder Ionenaustauscherharze oder Tone wie Bentonit und Vermiculit eingesetzt, die im gequollenen Zustand eine große Oberfläche und Austauschkapazität besitzen.

**Bild 3.3: Fällung****Bild 3.4: Sorption**

3.2.2 Bindemittel

Bei der Verfestigung werden Schadstoffe überwiegend durch physikalische Wirkungsmechanismen mit einzelnen chemischen Reaktionen zwischen Bindemittel und Schadstoff immobilisiert.

Man kann dabei zwischen Verfahren unterscheiden, die

- durch **Verfestigung** mit anorganischen Bindemitteln eine wasserundurchlässige oder homogene Matrix bilden, in der die Schadstoffe fein verteilt eingeschlossen werden,
- durch **Ummantelung** mit organischen Bindemitteln die Schadstoffe immobilisieren.

Darüber hinaus werden verschiedene Zusätze (Additive) zur Einbindung von Schadstoffen verwendet, die nicht durch die o.g. Bindemittel immobilisierbar sind. Solche Zusätze können sein:

- Zusätze zur Adsorbierung der Schadstoffe
- Zusätze zur Fällung der Schadstoffe
- Zusätze zur Beeinflussung der Zementmatrix, z.B. zur:
 - Beschleunigung der Abbindung
 - Verringerung der Porosität
 - Vergrößerung von Verformungswiderstand und Druckfestigkeit

Zusätze können auch ohne Bindemittel benutzt werden. In solchen Fällen tritt keine Verfestigung des Materials ein, sondern nur eine Fixierung der Schadstoffe.

Die wichtigsten Bindemittel und Zusätze sind in Bild 3.5 dargestellt:

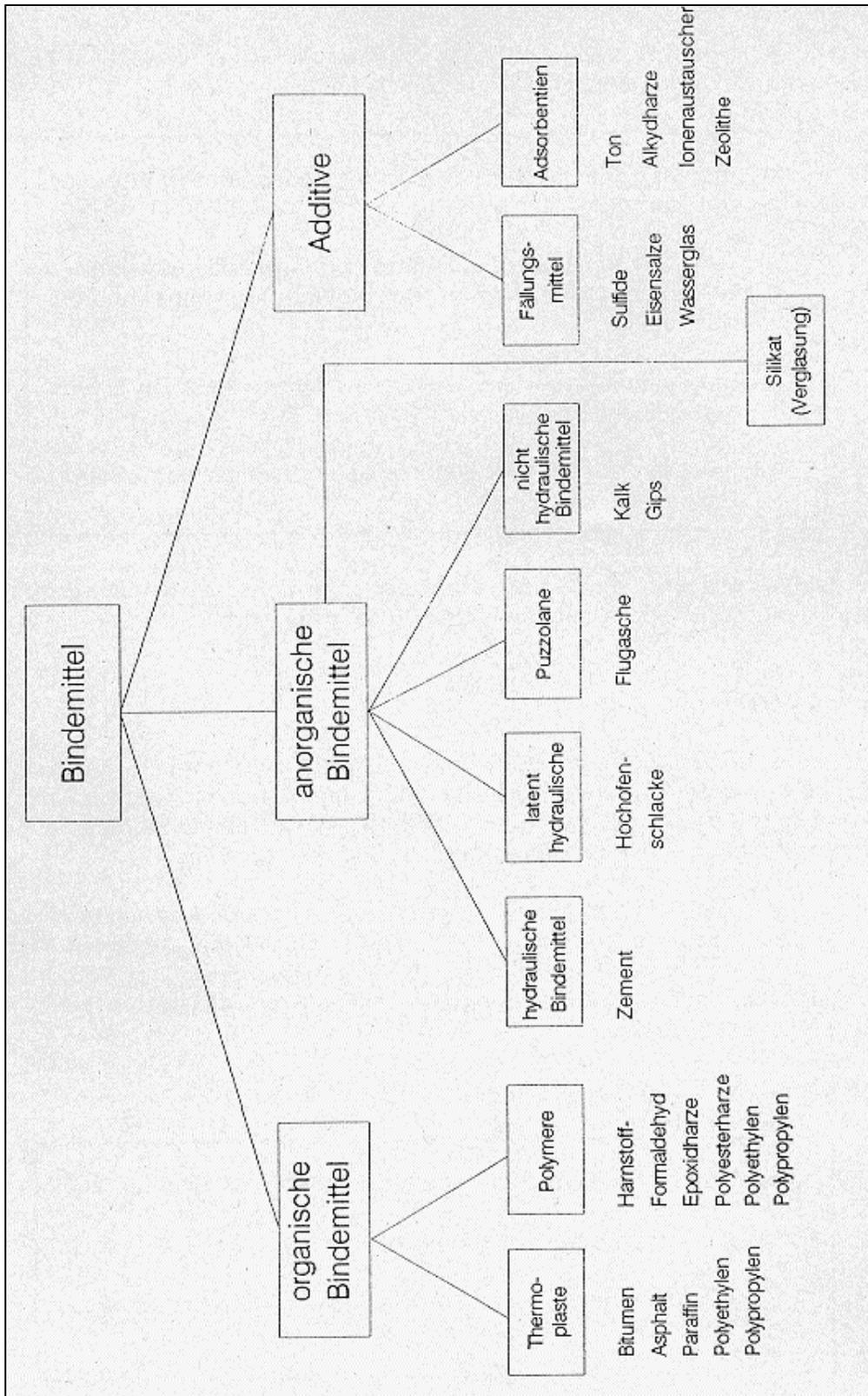


Bild 3.5: Bindemittel und Zusätze

3.2.2.1 Anorganische Bindemittel

Die **anorganischen Bindemittel** werden aufgrund ihrer Fähigkeit, eine Zementmatrix zu bilden, folgendermaßen unterschieden:

- **hydraulische Bindemittel**, die in Anwesenheit von Wasser spontan aushärten
- **latent hydraulische Bindemittel**, die Zementierungsreaktionen erst nach einer Vorbehandlung (z.B. mit Laugen) aufweisen
- **puzzolane Materialien**, welche in Anwesenheit von Wasser und freiem Kalk zu stabilen Produkten reagieren
- **nicht hydraulische Bindemittel**, die nur an der Luft erhärten

Bei der Verfestigung werden oft Kombinationen der oben genannten Bindemittel benutzt. Beispiele **anorganischer Bindemittel** sind:

Portlandzement

Zur Verfestigung wird in den meisten Fällen Portlandzement in Verbindung mit Additiven eingesetzt. Durch Zugabe von Wasser entsteht ein Gel; die Silikatbestandteile bilden einzelne Fasern aus, die beim Aushärten mit dem Zement vermischte Bestandteile (z.B. kontaminierten Boden) einbinden.

Der hohe pH-Wert (> 12), bei dem der Prozeß abläuft und der später im Produkt beibehalten wird, fördert die Immobilisierung der mehrwertigen Metalle durch die Bildung von schwerlöslichen Hydroxiden oder basischen Carbonaten. Dies gilt allerdings nicht für alle Schwermetalle, die stattdessen wasserlösliche Anionenkomplexe bilden.

Im Rahmen der Verfestigung laufen folgende Prozesse ab:

- Bildung von Hydroxiden durch pH-Wertänderung
- Mikroenkapselung der Hydroxide innerhalb der Matrix
- Sorption aufgrund der negativ geladenen Oberflächen der Silikate und Aluminate

Flugasche

Flugaschen aus thermischen Prozessen (vor allem aus Kohlekraftwerken) haben oft puzzolane Eigenschaften und werden zusammen mit calciumhaltigen Stoffen verwendet. In Anwesenheit von freiem Kalk und Wasser reagiert diese Flugasche zu einer harten Zementmatrix.

Häufig werden Flugaschen zusammen mit Portlandzement eingesetzt, um einen Teil des Zementes zu ersetzen. Bei der Zementierungsreaktion von Portlandzement entsteht Calciumhydroxid, welches mit den Flugaschen zu einer Zementmatrix reagiert. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Kombination mit Kalk oder Gips.

Das zu verfestigende Material (z.B. kontaminierter Boden) wird dabei in das aushärtende Umsetzungsprodukt, welches eine geringe Permeabilität aufweist, eingeschlossen. Weiterhin kann es aufgrund des alkalischen Milieus zu einer neutralisierenden Wirkung kommen, und gewis-

se Schwermetalle werden durch Überführung in schwerlösliche Hydroxide und Carbonate gefällt.

Schlacke aus thermischen Prozessen

Verschiedene Schlacken (z.B. Hochofenschlacke) aus thermischen Prozessen haben latent hydraulische Eigenschaften. Hochofenschlacke kann zusammen mit anderen Zusätzen bei der Zementproduktion verwendet werden; das Produkt ist Hochofenzement. Dieser Zement bindet nicht so schnell ab wie z.B. Portlandzement, weist aber eine gute Festigkeit auf.

Wasserglas

Wasserglas, ein Alkalisilikat, ist ein gebräuchliches Verfestigungsreagenz für Abfallschlämme [Lit:3.7]. Die Reaktion mit mehrwertigen Metallionen führt zu einem wäßrigen Kieselgel, z.B.:



Die Silikate polymerisieren zu einer Silikatmatrix, wobei Schwermetalle in der Polymerstruktur immobilisiert werden. Neben der Anlagerung von mehrwertigen Metallionen an die negativ geladene Silikatmasse können Metallhydroxide und Metallcarbonate sowie auch organische Moleküle physikalisch in die Gelstruktur eingebaut werden.

Nicht fixiert werden Chloridionen und einwertige Kationen. Dies ist durch die Reaktionsabläufe des Wasserglases bestimmt, die selbst zu einer Freisetzung von Alkaliionen führen und bei Einsatz von Chloridlösungen zur Freisetzung von Chlorid.

Gips

Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) entsteht aus Calciumsulfat durch Zugabe von Wasser. In das Gerüst der Gipskristalle können Schadstoffe eingebaut werden. Schwermetalle können in schwer lösliche Hydroxide oder Carbonate überführt werden [Lit:3.3].

Dieses Produkt ist allerdings nicht wasserbeständig, so daß Gips in der Regel nur zusammen mit anderen Bindemitteln eingesetzt wird.

Kalk

Ungelöschter Kalk (CaO) reagiert mit Wasser zu Calciumhydroxid (Ca(OH)_2). Auch dieses Material ist nicht wasserbeständig und reagiert mit Säuren. In einer Reaktion mit Kohlensäure entsteht das wasserbeständigere Calciumkarbonat. Wegen der schlechten Wasserbeständigkeit wird Kalk oft zusammen mit anderen Bindemitteln eingesetzt. Kalk kann als Additiv die Zementierungsreaktion beschleunigen und ein härteres Produkt liefern.

3.2.2.2 Organische Bindemittel

Die Anwendung von **organischen Bindemitteln** basiert in den meisten Fällen auf der Mischung des zu behandelnden Materials mit einem Thermoplasten oder organischen Polymeren.

Thermoplaste

Thermoplaste sind Stoffe, die beim Erhitzen fließfähig werden und beim Abkühlen wieder erstarren. Dazu gehören Bitumen, Asphalt, Paraffin, Polyethylen und Polypropylen.

Die dispergierten Bestandteile des Ausgangsmaterials (z.B. kontaminierter Boden) werden von den Thermoplasten umschlossen und innerhalb der Matrix eingeschlossen (Mikroinkapselung). Eine chemische Fixierung findet nicht statt, doch ist nicht ausgeschlossen, daß gewisse Organika in den Thermoplasten in Lösung gehen oder an diesen adsorbiert werden.

Organische Polymere

Bei der Verfestigung mit organischen Polymeren wird eine kleine Menge eines Monomers mit dem Ausgangsmaterial vermischt. Durch die anschließende Zugabe eines in der Regel sauren Katalysators bildet sich eine feste, schwammartige Masse, die die Schadstoffe einschließt. Organische Polymere (wie z.B. Harnstoffformaldehyde und Polyester) können zur Einbindung verwendet werden.

Eine chemische Bindung zwischen den Partikeln und dem Kunststoff tritt fast nicht auf.

3.2.2.3 Zusätze zur Adsorbierung und Fällung der Verunreinigungen

Die meisten Verunreinigungen können durch anorganische Bindemittel (z.B. in einer Zementmatrix) oder durch organische Bindemittel (z.B. in einer Kunststoffmatrix) eingeschlossen werden. Bei Verwendung von Zement führt die Erhöhung des pH-Wertes zusätzlich zur Immobilisierung von gewissen Schwermetallen.

Es ist jedoch nicht möglich, alle Schadstoffe auf diese Weise zu immobilisieren. Vor allem beim Einsatz von anorganischen Bindemitteln sind dazu in der Regel weitere Zusätze notwendig. Eine ausführliche Übersicht über mögliche Zuschlagstoffe geben Gerschler und Wille [Lit:3.12]. Hier seien nur die wichtigsten Additive aufgeführt, wobei man bei den Mechanismen grundsätzlich zwischen Adsorption und Fällung unterscheiden kann.

Adsorptiv wirkende Zuschlagstoffe:

- organophiler Ton
- präparierte Alkydharze
- Ionenaustauscherharze
- Zeolithe (Aluminiumsilikate mit sehr großer innerer Oberfläche, an die Verunreinigungen adsorbiert werden)

Durch Fällung wirkende Zuschlagstoffe:

- Wasserglas (Bildung von wasserunlöslichen Silikaten)
- Eisensalze (z.B. Bildung von Eisen-Arsenverbindungen, Chromatreduktion und Ausfällung)
- Sulfide (Bildung von wasserunlöslichen Sulfiden)

3.2.3 Verglasung

Bei der **Verglasung** wird das zu behandelnde Material bei sehr hohen Temperaturen ($> 1500^{\circ}\text{C}$) eingeschmolzen. Aufgrund dieser Tatsache nimmt die Verglasung eine Sonderstellung ein, da bei allen anderen Immobilisierungsverfahren bei Umgebungstemperatur gearbeitet wird. Organische Verunreinigungen im Material werden vollständig zerstört.

Die anorganischen Verunreinigungen werden in der Silikatmatrix, die nach Abkühlung des geschmolzenen Materials entsteht, stark eingebunden. Abhängig von der Abkühlungsgeschwindigkeit entsteht eine glasartige oder kristalline Schlacke, die auslaugungsresistent ist. Das Volumen der Schlacke ist wesentlich kleiner als das des Ausgangsmaterials.

Falls der Siliziumgehalt des Ausgangsmaterials nicht zur Bildung einer Silikatmatrix ausreicht, können bei der Verglasung eventuell Zusätze (z.B. Sand oder Altglas) zugegeben werden.

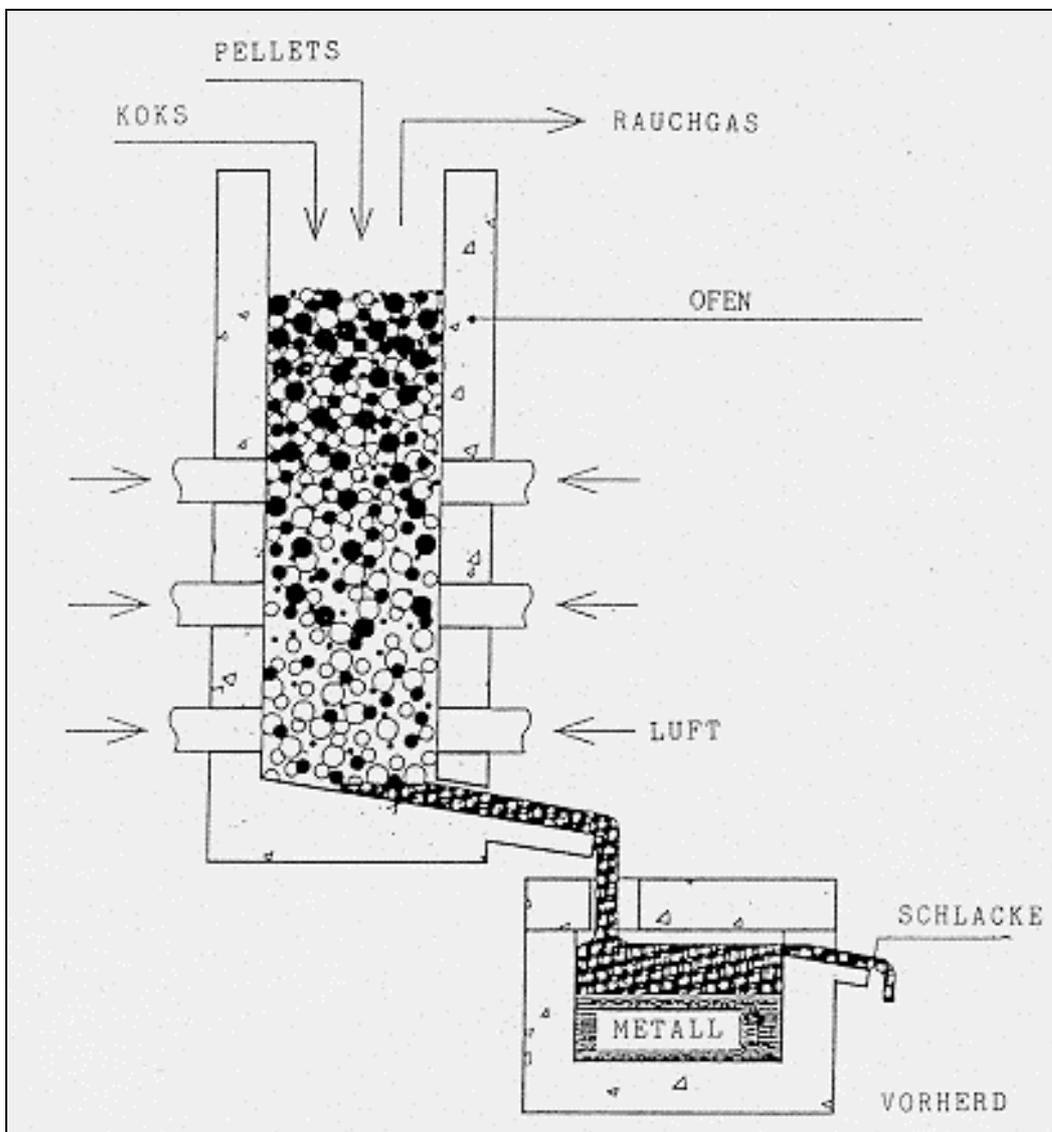


Bild 3.6: Verglasung im Koksbett

Eine Zwischenform der Verglasung ist die **Sinterung** des Materials. Die Sinterung erfolgt bei niedrigeren Temperaturen als die Verglasung (ca. 1000° C).

Die Silikate im Ausgangsmaterial schmelzen dabei z.T. zusammen. Es entsteht ein poröses, hartes Material. Aufgrund der Porosität und nicht vollständigen Einbindung in die Silikatmatrix ist die Auslaugungsresistenz geringer als bei verglastem Material. Das Endprodukt kann als Zuschlagstoff für Beton eingesetzt werden, falls darin enthaltene (anorganische) Schadstoffe eine derartige Verwertung nicht verhindern.

Zur Verglasung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- **Verglasung im Koksbett**

Das Ausgangsmaterial wird gemeinsam mit Zusätzen und Koks einem Ofen zugeführt. Der Koks liefert die zum Schmelzen notwendige Energie.

- **Verglasung im Schmelzzyklon**

Das Ausgangsmaterial wird zusammen mit Brennstoff einem feuerfesten Zyklon zugeführt. Die Verbrennungsluft wird abgestuft an verschiedenen Stellen in den Zyklon eingeblasen, wodurch eine Wirbel-Bewegung entsteht. Die geschmolzenen anorganischen Anteile sammeln sich im unteren Teil des Zyklons.

- **Verglasung im Plasmaschmelzofen**

Bei dieser Technik wird das Material in einen Plasmabogen geleitet. Im Lichtbogen werden Temperaturen über 2000° C erreicht, wodurch die Aufschmelzung des Materials sofort eintritt. Das geschmolzene Material wird in einem Schmelzbad gesammelt.

- **Verglasung in Schmelzöfen zur Glasherstellung**

Ein **in situ-Verfahren zur Verglasung** wurde vom Batelle Memorial Institute (USA) entwickelt, das sog. ISV-Verfahren (**In Situ Vitrification**). Bei diesem Verfahren wird der kontaminierte Boden über im Boden steckende Elektroden in situ geschmolzen. Ein Verfahren zur Sinterung (Ecogrind) stammt von der Fa. Ecotechniek (NL).

Anwendungen der Verglasung zur Altlastensanierung sind bisher nicht bekannt und dürften aufgrund des Entwicklungsstandes und der hohen Kosten in absehbarer Zukunft auch nicht in Frage kommen.

3.2.4 Schadstoffaustrag

Aus einem verfestigten Abfall oder kontaminierten Boden können die Schadstoffe prinzipiell über drei Stofftransportwege **ausgetragen** werden:

- Transport in Phase
- Verflüchtigung
- Auslaugung
 - Konvektion
 - Diffusion

Transport in Phase

Ein Transport in Phase läßt sich durch eine Immobilisierung in der Regel verhindern. Sowohl die Verwehung von kontaminiertem Staub als auch das Abfließen als Flüssigkeit können wirksam unterbunden werden. Mit der Zeit kann jedoch Erosion durch Wind und Wasser oder Gefrier- und Tauzyklen auftreten. Aus diesem Grunde müssen an ein Immobilisierungsprodukt auch Mindestanforderungen bezüglich der mechanischen Stabilität gestellt werden.

Verflüchtigung

Verfestigung ist im allgemeinen nicht zur Fixierung flüchtiger Verbindungen geeignet. Treten leicht flüchtige Bestandteile in größeren Mengen auf, müssen diese in der Regel vorher eliminiert werden. Zu beachten ist, daß bei vielen Verfestigungsverfahren exotherme Reaktionen ablaufen, die eine Verflüchtigung von Schadstoffen begünstigen. Deshalb muß eine Anlage zur Immobilisierung eventuell gekapselt sein. In Einzelfällen ist es jedoch möglich, flüchtige Verbindungen durch Zugabe von Adsorptionsmitteln zu binden. Im Falle von metallischem Quecksilber ist auch eine Fällung zu Quecksilbersulfid möglich.

Auslaugung

Die Auslaugung ist das maßgebende und langfristig auch wichtigste Kriterium bei der Beurteilung von Immobilisierungstechniken. Wie nachfolgend beschrieben, hängt die Auslaugung von einer ganzen Reihe von chemischen und physikalischen Faktoren ab. Die wichtigsten dabei relevanten Parameter sind in Kapitel 3.2.5 ausführlich erläutert.

Bei intensiver Durchspülung stellt der **konvektive Transport** die wesentliche Komponente für den Stoffaustausch dar. Da bei der Immobilisierung feste Matrizes mit beträchtlichen Schichtdicken gebildet werden, wird die Auslaugung dieser Materialien normalerweise diffusionslimitiert sein. Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f < 10^{-9}$ m/s begrenzen den Stofftransport [Lit:3.10].

Die **Diffusion** beschreibt das Bestreben einer Komponente, bei einem Konzentrationsgefälle einen Konzentrationsausgleich zu schaffen. Dies geschieht, indem sich die betreffende Komponente in Richtung geringerer Konzentration und die Lösemittelmoleküle in umgekehrter Richtung bewegen. Die Menge der diffundierenden Teilchen hängt ab von der Stoffaustauschfläche, dem Konzentrationsgradienten und der Temperatur, was durch den Diffusionskoeffizienten ausgedrückt wird.

Die **Mobilisierung von Schadstoffen aus Festkörpern** vollzieht sich in vier Schritten und ist in Bild 3.7 schematisch dargestellt.

- **Lösen der Schadstoffe in der Porenflüssigkeit**
Hierbei spielen chemische Gleichgewichte zwischen Feststoff und Porenflüssigkeit die entscheidende Rolle.
- **Transport durch die Poren**
Die Dauer dieses Vorganges hängt von der Länge und Form der Poren sowie den chemischen Eigenschaften der Porenwand ab. Bei adsorptiven Eigenschaften der Porenwand wird der Stofftransport verzögert.

- **Transport durch den Grenzbereich**
In einfachen Stofftransportmodellen kann dieser Grenzbereich vernachlässigt werden.
- **Transport in die Umgebung**
Der Konzentrationsgradient zwischen Poren- und Umgebungsflüssigkeit ist bei diffusionslimitiertem Stofftransport die treibende Kraft.

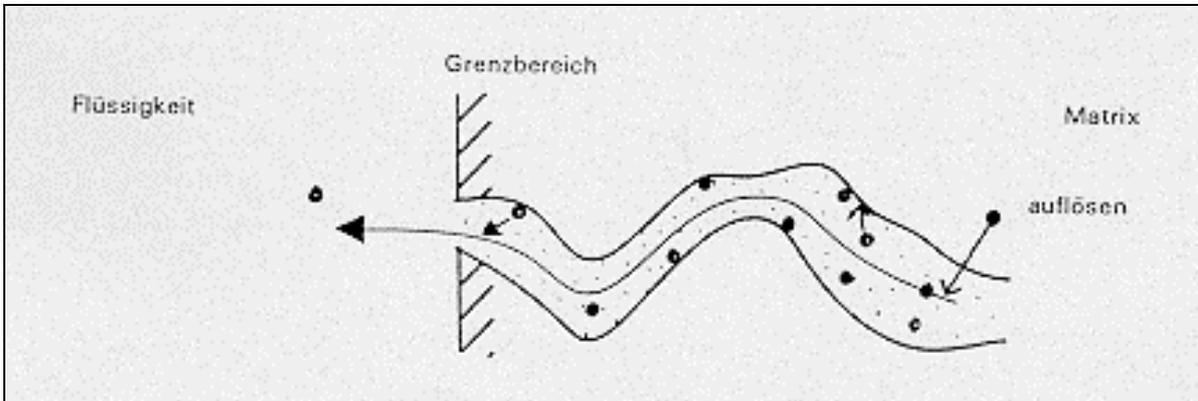


Bild 3.7: Auslaugung von Schadstoffen aus einer festen Matrix

3.2.5 Wichtige Parameter bei der Auslaugung von Schadstoffen

Bei der Abschätzung von Umweltgefahren ist insbesondere die Mobilität der Schadstoffe von Interesse, die sowohl von der chemischen Form als auch den Milieubedingungen abhängt. Eine wichtige Rolle bei der Mobilität von Schadstoffen wird von der jeweiligen Wasserphase übernommen. Selbst bei Materialien mit sehr geringem Wasseranteil ist die **Auslaugung** durch mikrobielle und chemische Reaktionen in der wässrigen Phase bestimmt. Deshalb wird an dieser Stelle auf die **Chemie der wässrigen Lösungen** gesondert eingegangen.

In wässrigen Lösungen können Schwermetalle und eingeschränkt auch organische Verbindungen in verschiedenen Formen auftreten: als freies Ion, anorganischer Komplex, organischer Komplex, echtes Kolloid oder gebunden an organische Makromoleküle, an Kolloide oder an Teilchen (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Übersicht der verschiedenen Metallformen in wässrigen Lösungen [Lit:3.4]

freies Metallion	anorganische Komplexe	organische Komplexe	gebunden an organische Makromoleküle	Kolloide	gebunden an Kolloide oder Teilchen
Cu^{2+}	$[\text{Cu}(\text{OH})_4]^{2-}$ $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^+$	EDTA-Cu	Cu-Huminsäuren	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ DDT/Tensid/ Wasser	$\text{Cu-Fe}(\text{OH})_x$ - Tonteilchen

Die Verteilung eines Metalls auf die in Tabelle 3.2 genannten Formen hängt von der Zusammensetzung der flüssigen und festen Phase ab bzw. von den verschiedenen Interaktionen untereinander, die die Gleichgewichtseinstellung beeinflussen können. Die dabei wichtigsten Parameter sollen im folgenden genauer erläutert werden.

pH-Wert

Der pH-Wert ist ein Maß für die Wasserstoffionenkonzentration (H_3O^+), wobei pH 7,0 als neutral gilt. Die Einstufung von Böden reicht von extrem sauer ($\text{pH} < 3,0$) bis extrem alkalisch ($\text{pH} > 11,0$). Der pH-Wert hat großen Einfluß auf die Löslichkeit von Schwermetallen. Wie Bild 3.8 zeigt, nimmt die Löslichkeit von amphoteren Metallen sowohl im sauren als auch basischen Bereich stark zu.

Gleichzeitig hat der pH-Wert auch einen Einfluß auf die Wertigkeit der Metalle und die Komplexbildung. Bei hohen pH-Werten können eine Reihe von Schwermetallen negativ geladene Komplexe ausbilden, z.B. Hydroxokomplexe wie $[\text{Cu}(\text{OH})_4]^{2-}$.

Der Bereich der hohen pH-Werte ist für die Immobilisierung von großer Bedeutung, da viele Zuschlagstoffe, wie z.B. Zement, stark basisch reagieren. Die Zunahme der Basizität im Verlauf einer Immobilisierung kann jedoch auch eine erhöhte Auslaugung zur Folge haben. Drei mit verschiedenen Verfahren verfestigte Proben aus der ehemaligen Sondermülldeponie "Eckenweiher Hof" wiesen im niederländischen Säulentest für Blei höhere Auslaugungsraten auf als im Originalmaterial (siehe auch Kap 6.5). Bei einem der geprüften Verfestigungsverfahren konnte im DEV S4 Test sogar die doppelte Menge an Kupfer im Vergleich zum unbehandelten Material eluiert werden.

Auch die Löslichkeit einer Reihe von organischen Verbindungen, hauptsächlich von solchen mit leicht protonierbaren funktionellen Gruppen (z.B. Carboxyl-gruppen), ist pH-abhängig. So ist die Löslichkeit von Phenolen im alkalischen Milieu ($\text{pH} > 7$) durch Bildung von Phenolat-Ionen erheblich gesteigert, während die Löslichkeit von Aminen durch Protonierung der Aminogruppe im sauren Bereich ($\text{pH} < 7$) gesteigert wird.

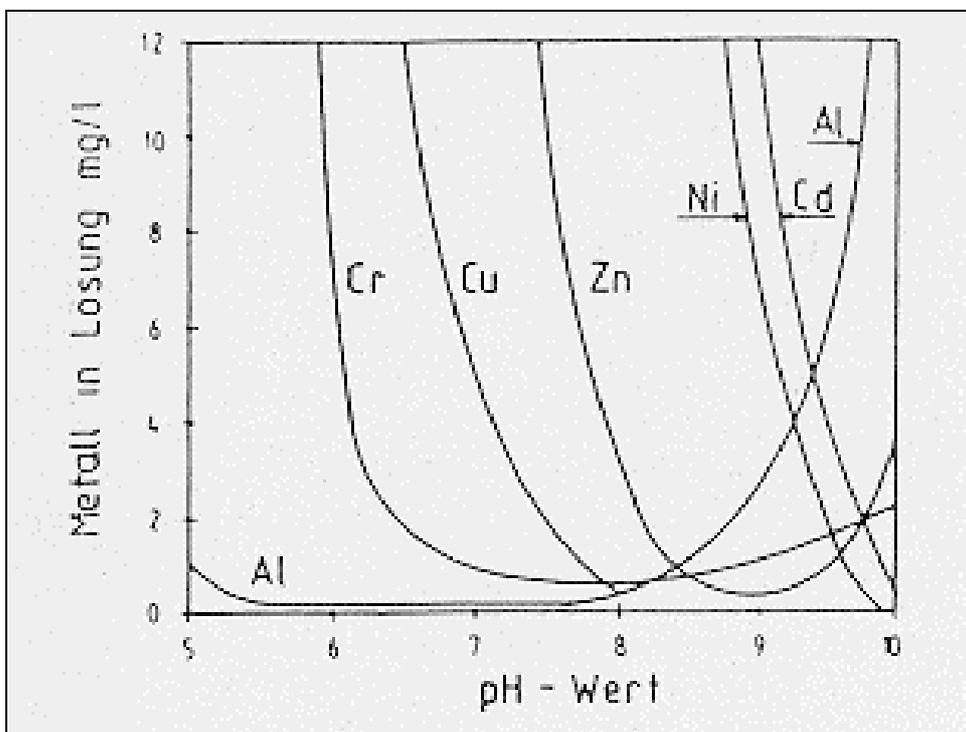


Bild 3.8: Fällungsbereich einiger Metalle [Lit:3.5]

Redoxpotential

Das Redoxpotential (E_h -Wert) beschreibt das Konzentrationsverhältnis von oxidierten und reduzierten Stoffen und damit die elektrochemischen Bedingungen im Wasser bzw. in der Bodenlösung. Das Redoxpotential ist abhängig von der Temperatur und dem pH-Wert und kann nur im Zusammenhang mit diesen Kenngrößen interpretiert werden. Ein höheres Redoxpotential deutet auf einen stärkeren Einfluß oxidierender Stoffe hin, bei einem niedrigeren überwiegt der Einfluß reduzierender Stoffe.

Gut durchlüftete, stark saure Böden weisen hohe positive Redoxpotentiale auf (bis +0,8 V), während unter anaeroben Bedingungen bei neutraler bis alkalischer Reaktion zum Teil sogar negative Werte bis -0,35 V auftreten können [Lit:3.6]. Das Redoxpotential beeinflusst die Wertigkeit und Stabilität von Metallen und Salzen. Allgemein gilt, daß ein niedriges oder negatives Redoxpotential mit der Bildung schwer löslicher Sulfide einhergeht.

Ionenstärke/Salze

Fremdionen, wie z.B. Alkali- oder Erdalkaliionen, können die Löslichkeit und chemischen Eigenschaften von Metallen und organischen Verbindungen stark beeinflussen. Phenole beispielsweise können sich bei hohen Calciumkonzentrationen als Calciumphenolate niederschlagen. Bei hohen Chloridkonzentrationen vermögen einige Metalle negative Chloridkomplexe zu bilden, z.B. $[\text{HgCl}_4]^{2-}$ [Lit:3.8]. Daneben haben Fremdionen über die Ionenstärke auch Einfluß auf das Adsorptionsverhalten und die Stabilität kolloidaler Teilchen.

Komplexbildner/Chelatbildner

Eine wichtige Rolle bei der Gleichgewichtseinstellung übernehmen häufig auch organische Komplexbildner. Diese Stoffe können biologischen Ursprungs sein, wie z.B. Essigsäure, Aminosäuren und Ammonium (z.B. $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$), oder auch synthetisch hergestellt sein, wie z.B. EDTA und NTA. Durch Komplexbildner können hohe Metallgehalte in Lösung gehalten werden oder schon gebundene bzw. adsorbierte Schwermetalle wieder in Lösung gelangen. In Bild 3.9 ist als Beispiel ein EDTA-Kupfer-Komplex schematisch dargestellt. Komplexbildner bilden häufig auch den aktiven Teil in Ionenaustauscherharzen, mit denen Schwermetalle aus wäßrigen Lösungen abgetrennt werden.

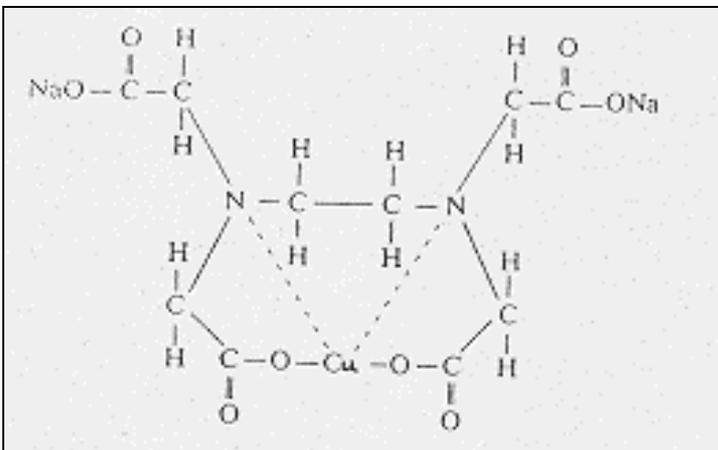


Bild 3.9: Cu-EDTA-Komplex [Lit:3.9]

Starke Komplexbildner wie EDTA wurden häufig in der Galvanotechnik eingesetzt und können mit Galvanikschlamm auf Abfalldeponien gelangen, wo sie Schwermetalle zu remobilisieren vermögen. Die Komplexbildung kann, je nach Konzentration und Bindungsstärke des Komplexbildners sowie in Abhängigkeit von den Milieubedingungen, die Löslichkeit mehr oder weniger stark erhöhen.

Makromoleküle/Kolloide

Metalle können mit organischen Makromolekülen Komplexe bilden. Die bekanntesten sind Huminstoffe, die praktisch überall im Boden vorkommen. Dabei handelt es sich meist um einen Ionenaustauschmechanismus, bei dem Alkali- und/oder Erdalkaliumionen gegen Schwermetallionen ausgetauscht werden.

Ähnlich wie durch Komplexbildner Metalle in Lösung gebracht werden, können durch oberflächenaktive Substanzen, sogenannte Tenside, unpolare oder hydrophobe organische Moleküle wasserlöslich werden. Die Moleküle der oberflächenaktiven Substanzen besitzen ein hydrophobes und ein hydrophiles (wasserlösliches) Ende. Es bilden sich Kolloide, bei denen die oberflächenaktiven Substanzen als "Hülle" fungieren und den wasserunlöslichen Schadstoff im Innern lösen, während das kolloidale Teilchen selbst im Wasser löslich ist. Als Beispiel ist in Bild 3.10 die scheinbare Löslichkeit von DDT in Wasser bei verschiedenen oberflächenaktiven Stoffen dargestellt.

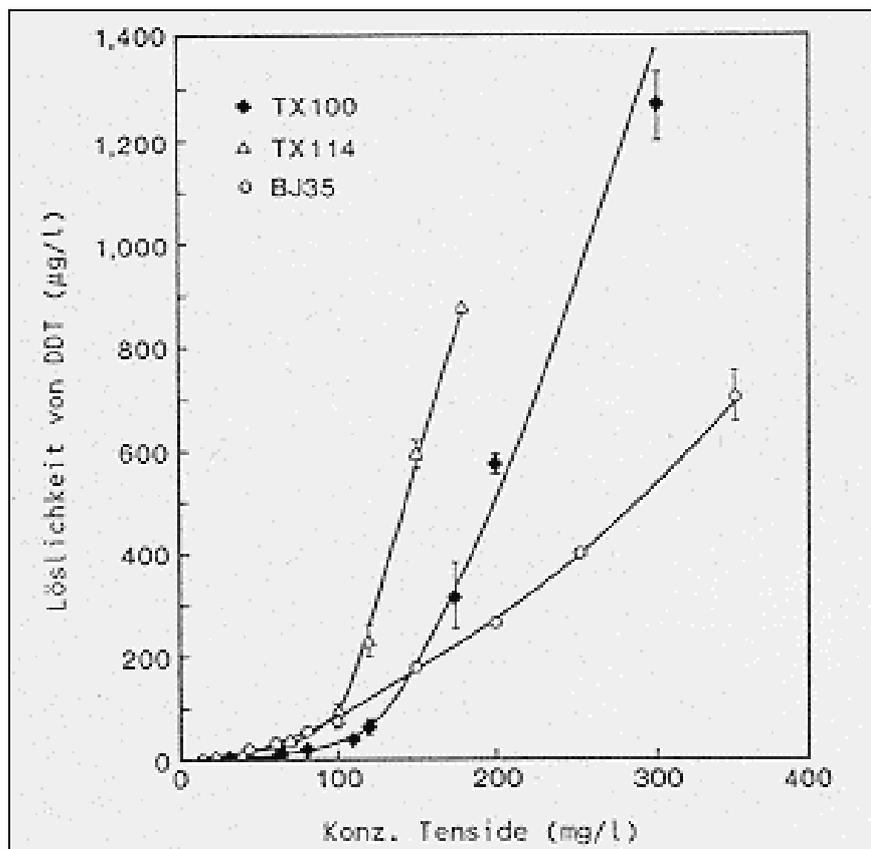


Bild 3.10: Scheinbare Löslichkeit von DDT in Abhängigkeit von der Konzentration verschiedener oberflächenaktiver Substanzen (Tenside) [Lit:3.9]

4 Prüfung

4.1 Übersicht der Prüfverfahren

Ziel einer Behandlung kontaminierten Materials bei Sicherungsmaßnahmen an Altlasten ist die Immobilisierung der Schadstoffe und damit Verringerung des Schadstoffaustrags in die Umwelt. Eine Eliminierung der Schadstoffe ist mit dieser Methode nicht verbunden. Eignung und Wirksamkeit solcher Maßnahmen müssen deshalb durch praktikable und verlässliche Prüfverfahren sichergestellt werden.

Grundsätzlich können bei den Prüfverfahren drei Kategorien unterschieden werden:

- **Chemische** Verfahren (z.B. Elutionstests)
- **Physikalische** Verfahren (z.B. Festigkeitstests)
- **Morphologische** Verfahren (z.B. Strukturaufklärung)

Die Menge an Schadstoffen, die nach einer Immobilisierung noch in die Umwelt gelangen kann, soll durch Elutionstests abgeschätzt werden. Dabei spielt für den Stofftransport die zur Verfügung stehende Austauschfläche eine große Rolle. Die Stoffaustauschfläche wird durch Zerfall oder Rißbildung des Immobilisierungsproduktes vergrößert. Dieser Einfluß soll durch Festigkeitstests ermittelt werden. In welcher Verteilung die Schadstoffe in der Matrix vorliegen und eventuell in welcher Struktur, kann mit morphologischen Testmethoden aufgeklärt werden.

Ein entscheidendes Kriterium zur Beurteilung von Immobilisierungsverfahren ist die Frage nach dem Langzeitverhalten. Es fehlt daher nicht an Versuchen, das Langzeitverhalten in sogenannten Zeitrafferversuchen zu simulieren oder durch die Aufklärung von Immobilisierungsmechanismen abzuschätzen.

Eine Übersicht der zahlreich angewandten und in der Literatur beschriebenen Elutionsverfahren gibt Beckefeld [Lit:4.2]. Hier seien nur die wichtigsten in Deutschland und im Ausland angewandten bzw. in der Einführung befindlichen Verfahren vorgestellt (Tabelle 4.1). Zusätzlich sind die wichtigsten physikalischen Testverfahren in Tabellenform dargestellt (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.1: Angewandte Elutionsverfahren für verfestigte Proben

Verfahren	Probe	L/S	Eluent	Durchführung	Dauer	Literatur
Elution nach DEV S4	Zylinder d=70 mm	10:1	Dest. Wasser	Schütteln oder Drehen	24 h	DIN 38414-S4
NLÖ-Verfahren	Zylinder d=70 mm h=120, 100, 70 mm	10:1	Dest. Wasser	Probe in Becher einhängen, Wasser langsam rühren	24 h	DIN 38414-S4 [Lit:4.18]
Aufschluß mit Königswasser	3 g trocken d < 0,1 mm	28 ml/ 3 g	Gemisch aus Salpeter- und Salzsäure	Extrahieren bei Siedetemperatur	2 h	DIN 38414-S7
Ammoniumnitratextraktion	20 g lufttrocken d < 2 mm	50 ml/ 20 g	1 mol/l Ammoniumnitratlösung	Schütteln mit ca. 20 U/min	2 h	DIN V 19730
TCLP	≥ 100 g, d < 9,5 mm oder O > 3,1 cm ² /g	20:1	Essigsäure bei pH 4,93 bzw. pH 2,88	Schütteln mit ca. 30 U/min, Probenahme über 0,6-0,8 µm Filter	18 h	US EPA (1986)
Niederländischer Säulentest	d < 4 mm	1:10- 10:1	angesäuertes Wasser mit pH 4	Getrocknetes Material in Säule packen und von unten nach oben durchströmen "up flow"	≈ 20 d	NEN 7343
Niederländischer Kaskadentest	d < 4 mm	5 mal 20:1	angesäuertes Wasser mit pH 4	Schütteln	5 mal 23 h	NEN 7343
Niederländischer Test Maximale Auslaugbarkeit	d < 0,125 mm	2 mal 50:1	Wasser pH ≤ 7 und Wasser pH ≤ 4	Verrühren	2 mal 3 h	NEN 7341
Niederländischer Diffusionstest	d ≥ 40 mm	8 mal 5:1	angesäuertes Wasser pH 4	Probe 8 mal mit frischen Eluenten auslaugen	64 d	NEN 7345
Schweizer TVA-Test	Zylinder 100-200 g	2 mal 10:1	CO ₂ -gesättigtes Wasser pH 4-4,5	kontinuierliches Einblasen von CO ₂ in Elutionsflüssigkeit	2 mal 24 h	TVA (1991)

Tabelle 4.2: Wichtige physikalische Testverfahren für Immobilisierungsprodukte

Verfahren	Information über	Probe	Durchführung	Literatur
Einaxiale Druckfestigkeit	Druckfestigkeit	Zylinder d=10cm, h=20cm	Belasten der Probe über Kopfplatte	DIN 18136
Triaxialversuch	Wasserdurchlässigkeit k_f -Wert	Zylinder	Beaufschlagung der Probe mit hydraulischem Gradienten in Triaxialzelle	DIN 18130 T1
Frost-Tau-Wechsel-Versuch	Verhalten bei Frost-Tau-Wechseln (Absplittern, Gewichtsverlust)	Zylinder, Würfel D=50 mm H=50 mm	Mindestens zehn Frost-Tau-Wechsel unter Wasser oder an der Luft	DIN 52104
Nadelpenetration	Oberflächenhärte		Messung der Eindringtiefe einer Prüfnadel	DIN 52010
Zerfallsziffer nach Endell	Zerfall unter Wasser	Zylinder h/d=2	Eintauchen der Probe unter Wasser für 24 h	Endell (1939) [Lit:4.16]

4.2 Chemische Testverfahren (Elutionstests)

Elutionstests können in statische und dynamische Verfahren eingeteilt werden. Bei einem **statischen oder Sättigungstest** wird die Elution des Probenmaterials in einer definierten Menge Flüssigkeit über einen bestimmten Zeitraum ohne Austausch der Elutionsflüssigkeit durchgeführt. Ziel ist es, die maximale Konzentration der zu untersuchenden Substanzen im Eluat zu erhalten. Dazu ist es auch möglich, unter Beibehaltung der Elutionsflüssigkeit das eluierte Probematerial durch neues zu ersetzen (Bild 4.1).

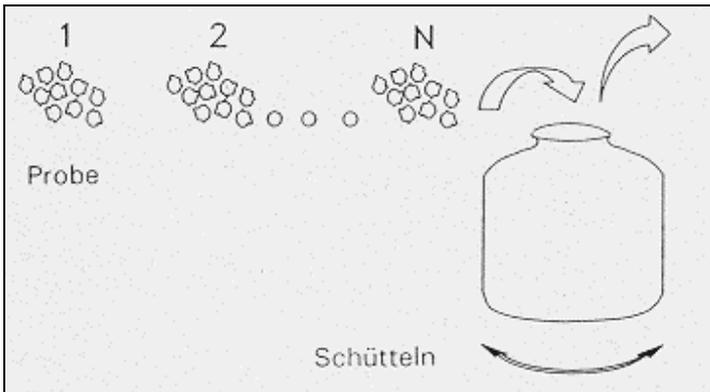


Bild 4.1: Bestimmung der maximalen Eluatkonzentration durch wiederholten Einsatz der Elutionsflüssigkeit mit jeweils frischem Probenmaterial [Lit:4.12]

Unter **dynamischen Tests** werden alle Verfahren zusammengefasst, bei denen die Elutionsflüssigkeit kontinuierlich oder in Intervallen erneuert wird (Bild 4.2). Der maximal auslaugbare Anteil für die benutzte Elutionsflüssigkeit wird über die Zeit bestimmt. Damit kann das Verhalten gegenüber fließendem Wasser simuliert werden. Im Gegensatz zu statischen Testverfahren erhält man hierbei kinetische Daten über die Mobilisierung von Schadstoffen [Lit:4.12].

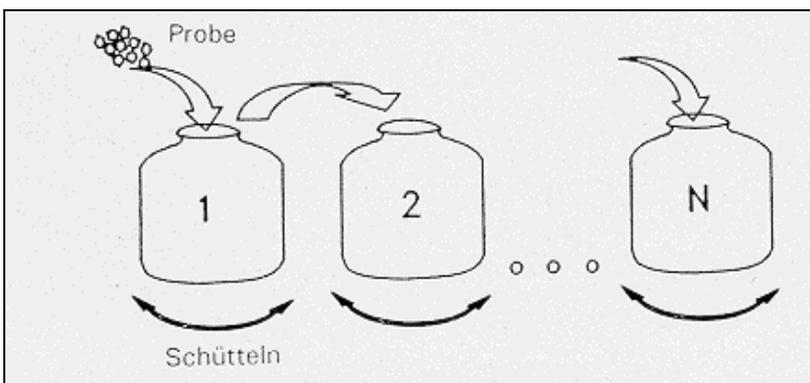


Bild 4.2: Bestimmung des maximal auslaugbaren Anteils durch wiederholte Extraktion einer Probe mit jeweils frischem Eluenten [Lit:4.12]

Möglich ist auch eine Einteilung in Säulen- und Flaschentests, die beide sowohl statisch als auch dynamisch durchgeführt werden können. Daneben gibt es noch einige Sonderverfahren, die sich durch ihren Aufbau von Säulen- bzw. Flaschentests unterscheiden. Hierzu zählen beispielsweise der Schweizer TVA-Test und die Soxhlet-Extraktion.

Die aus den Elutionstests erhaltenen Eluatkonzentrationen für die einzelnen Stoffe werden zur Bewertung mit den Prüfwertlisten verglichen, die den jeweiligen Tests zugeordnet sind .

4.2.1 Elution nach DIN 38414-S4 (DEV S4)

Dieser Test, ursprünglich Bestandteil der "Deutschen Einheitsverfahren zur Untersuchung von Schlamm und Sedimenten" (DEV S4), wurde auf die Beurteilung des Auslaugverhaltens von Feststoffen aller Art ausgedehnt. Er ist für den Fall der Ablagerung verfestigten Materials auf Deponien durch die TA Abfall, Teil 1 vorgeschrieben, bei Wiedereinbau am Standort oder bei Verwendung außerhalb von Standort und Deponien könnte er sinngemäß angewandt werden. Bei der Versuchsdurchführung müßten die Änderungen aus der TA Abfall, Teil 1, Anhang B berücksichtigt werden. Die Probe soll nicht zerkleinert und in einer Weithalsglasflasche 1 mal/min über Kopf geschüttelt werden; gemäß Anhang H sind zylinderförmige Probekörper mit 7 cm Durchmesser und 7 cm Höhe zu verwenden.

Beim Elutionstest nach DIN 38414-S4 werden die Probekörper 24 Stunden in destilliertem Wasser in Suspension gehalten, wobei das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis L/S=10 beträgt. In einer Anmerkung zum Testverfahren wird darauf hingewiesen, daß "zur Beantwortung besonderer Fragen es zweckmäßig sein kann, andere Elutionsflüssigkeiten als Wasser zu verwenden", so daß der S4 Test mehr Möglichkeiten bietet als in der Praxis üblicherweise angewandt werden. Das Eluat wird über 0,45 µm Filter abgezogen und auf die festgelegten Parameter hin analysiert. Bei organischen Schadstoffen (z.B. PAK) können durch die Filtration Meßfehler entstehen (Adsorption am Filtermaterial).

Mehrfachelution

Gegebenenfalls kann die Elution auch mehrmals wiederholt werden. Bei diesen sogenannten Kaskadentests gibt es zwei Verfahrensweisen:

1. Die Probe wird nach der ersten Elutionsphase in drei folgenden Stufen erneut mit destilliertem Wasser versetzt und eluiert. Das summarisch über die Einzelschritte berechnete Ergebnis beschreibt die maximale Eluierbarkeit des Feststoffes.
2. Dem jeweils abfiltrierten Eluat wird mehrmals hintereinander frischer Feststoff zugesetzt. Das heißt, daß mit der Elutionslösung aus dem vorangegangenen Versuch neues Material eluiert wird. Dadurch kann man im Eluat die maximal erreichbare Konzentration einer Komponente bestimmen.

NLÖ-Verfahren

Bei dem am Niedersächsischen Landesamt für Ökologie (NLÖ) seit 1975 angewandten Elutionsverfahren handelt es sich um einen modifizierten DEV S4-Test, der in einigen Punkten von der Modifikation gemäß TA Abfall, Teil 1, Anhang B abweicht [Lit:4.18]:

Verfestigte Proben werden in große Bechergläser mit den entsprechenden Wassermengen gemäß DIN 38414-S4 eingehängt. Mit Hilfe eines Glasstabrührers oder glasumhüllten (ggf. teflonumhüllten) Magnetstabes wird das Wasser 24 h in einer sehr langsamen Drehbewegung gehalten.

Sonstige Abfälle werden ähnlich schonend in Glasgefäßen mit 80-100 mm Öffnung (Teflonverschluß) bei der Frequenz von 1 Umdrehung pro Minute über Kopf in einer Schüttelmaschine gedreht. Nur durch Verwendung von spezialgereinigten Glasgefäßen kann organische und anorganische Spurenanalytik durchgeführt werden.

Zur Bestimmung von organischen Inhaltsstoffen im Eluat ist eine Filtration nicht zulässig (z.B. IR-KW, PAK, AOX und ähnliche Verbindungen).

Mit den vorgenannten Arbeitsanweisungen ist gewährleistet, daß konform zur LAGA-Richtlinie EW/77 "soweit praktisch möglich im Orginalzustand untersucht" und "unter schonendem Rühren ausgelaugt" wird. Nachfolgend werden häufig verwendete Probekörper (Zylinderform) aufgeführt:

Durchmesser [mm]	Höhe [mm]	Oberfläche [cm ²]
70	120	341
70	100	297
70	70	230 (TA Abfall, Teil1, Anhang H)
Prisma 4 · 4 · 8 cm		160

Trogverfahren

Eine besondere Variante des DEV S4-Tests stellt das sogenannte Trogverfahren dar. Dies soll zur Untersuchung der Auslaugung ungebundener oder gebundener industrieller Nebenprodukte dienen. Es können ungebundene Proben bis zu einer Korngröße von maximal 32 mm oder verfestigte Proben bis zu einem Gewicht von ca. 2,5 kg untersucht werden. Das Untersuchungsmaterial befindet sich in einem Siebeinsatz und wird in einem Trog ausgelaugt.

Entsprechend dem DEV S4-Test beträgt das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis L/S=10 und die Elutionszeit 24 Stunden. Das deionisierte Wasser wird durch einen Magnetrührer bewegt, wodurch eine mechanische Belastung durch die

Bewegung des gesamten Elutionsgefäßes wie beim DEV S4-Test vermieden wird. Bei feinkörnigen Stoffen hat die mechanische Belastung keine größeren Auswirkungen auf das Elutionsverhalten, so daß hierfür, wie bisher, das DEV S4-Verfahren angewandt werden kann [Lit:4.13]. Das Trogverfahren liegt zur Zeit nur als Entwurf des Arbeitskreises "Entwicklung von Elutionsverfahren für Mineralstoffe im Straßenbau" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in Köln vor.

4.2.2 Extraktion mit Königswasser nach DIN 38414-S7

Mit der **Extraktion durch Königswasser**, einer Mischung aus Salz- und Salpetersäure, kann der säurelösliche Anteil von Feststoffen bestimmt werden. Zur Beurteilung des Auslaugverhaltens von immobilisierten Schadstoffen ist dieser Test ungeeignet, da derart stark oxidierende Bedingungen in der Natur nicht vorkommen. Der Aufschluß mit Königswasser dient der Bestimmung des Gesamtgehaltes bestimmter Stoffe.

Die getrocknete Probe wird auf unter 0,1 mm Korngröße aufgemahlen und 3 g des Mahlgutes werden mit 21 ml Salzsäure und 7 ml Salpetersäure versetzt. Nach einigen Stunden Wartezeit

wird das Reaktionsgemisch für etwa 2 Stunden am Sieden gehalten. Die Probe wird vor der Analyse zentrifugiert oder über 0,45 µm Filter abgezogen.

4.2.3 Elution mit Ammoniumnitrat nach DIN V 19730

Diese Vornorm gilt für die Extraktion mobiler Spurenelemente in Mineralböden, soll aber auch auf die Beurteilung von Altlasten Anwendung finden. Ziel ist eine Beurteilung der **Pflanzenverfügbarkeit** bestimmter Elemente. In Verbindung mit Extraktionsverfahren zur Bestimmung des Elementvorrates in Böden (z.B. Königswasser-Aufschluß) kann der durch die Extraktion mit Ammoniumnitratlösung ermittelte Massenanteil als Grundlage für Standortbeurteilungen sowie Nutzungs- und Sanierungsempfehlungen von Böden mit Elementgehalten in kritischen Konzentrationen dienen.

Als Extraktionsmedium wird eine ungepufferte, 1-molare Ammoniumnitrat-lösung (NH_4NO_3) verwendet. Die Bodenprobe muß bis zur Gewichtskonstanz bei maximal 40 °C getrocknet und auf unter 2 mm zerkleinert werden.

20 g Probe werden in einer Schüttelflasche mit 50 ml Ammoniumnitratlösung versetzt und zwei Stunden über Kopf mit ca. 20 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. Der Überstand wird filtriert und mit Salpetersäure stabilisiert.

4.2.4 Elution im pH_{stat} -Versuch

Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Schwermetallen in Porenlösungen von Abfallablagerungen und belasteten Böden wurde von Obermann und Cremer [Lit:4.1] ein neuer Routine-Elutionsversuch entwickelt, der als pH_{stat} -Versuch bezeichnet wird. Es handelt sich um einen Schütteltest, bei dem die Probekörper bei pH 4 und pH 11 eluiert werden. Da keine Pufferlösungen zugegeben werden dürfen (Wechselwirkungen mit Schwermetallen), muß der pH-Wert ständig durch Titration eingestellt werden. Zur genauen Einstellung des pH-Wertes ist eine Titrierstation erforderlich; eine halbautomatische oder von-Hand-Titration ist ausgeschlossen.

Das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis wurde auf 10 festgelegt und die Versuchszeit auf 24 Stunden begrenzt, um eine Vergleichbarkeit mit dem bestehenden Elutionsversuch nach DIN 38414-S4 zu gewährleisten. Die Probe sollte nach Möglichkeit in unveränderter Körnung untersucht werden. Große Einzelpartikel müssen auf unter 6 mm gebrochen werden.

Inwieweit mit diesem Test auch Aussagen über organische Verunreinigungen gemacht werden können, ist noch nicht untersucht worden.

4.2.5 TCLP

In den USA und Kanada existiert bereits eine Fülle an Elutionsverfahren, die sowohl von den Behörden als auch der Industrie entwickelt wurden [Lit:4.14]. Allgemeine Bedeutung hat dabei die TCLP (**T**oxicity **C**haracteristic **L**eaching **P**rocedure) erlangt, die nachfolgend als einziges amerikanisches Testverfahren aufgeführt und beschrieben werden soll.

Mit der von der EPA 1986 bekannt gemachten TCLP soll die Mobilität von organischen und anorganischen Schadstoffen in flüssigen, festen und mehr-phasigen Abfällen bestimmt werden.

Bei Abfällen, die weniger als 0,5 % Feststoffe enthalten, wird nach einer Filtration die Flüssigkeit als TCLP-Extrakt definiert. Bei Abfällen mit mehr als 0,5 % Feststoff wird die flüssige Phase ebenfalls von der festen Phase für die spätere Analyse getrennt. Der feste Abfall muß unter 9,5 mm Durchmesser zerkleinert werden.

Die Auswahl des Elutionsmittels richtet sich nach dem pH-Wert, der sich bei einer Elution des zerkleinerten Abfalls mit destilliertem Wasser einstellt. Liegt der pH-Wert trotz Zugabe von Säure über 5, so wird für den Elutionsversuch Extraktionsflüssigkeit Nr. 2 verwendet. Bei einem gemessenen pH-Wert unter 5 wird Extraktionsflüssigkeit Nr. 1 verwendet.

Extraktionsflüssigkeit Nr. 1 besteht aus einer gepufferten Essigsäurelösung mit einem pH-Wert von 4,93.

Extraktionsflüssigkeit Nr. 2 besteht aus einer Essigsäurelösung mit einem pH-Wert von 2,88.

Eluiert wird mit einem Flüssigkeits/Feststoffverhältnis von L/S=20 über einen Zeitraum von 18 Stunden, wobei die Probe mit 30 Umdrehungen pro Minute über Kopf geschüttelt wird. Das über einen 0,6-0,8 µm Glasfiberfilter gesaugte Filtrat wird als TCLP-Extrakt definiert, falls der Abfall am Anfang keine flüssige Phase enthielt.

Wenn hingegen zu Beginn eine flüssige Phase abgetrennt wurde und diese mit dem Filtrat mischbar ist, werden beide Flüssigkeiten vereint und als TCLP-Extrakt definiert. Sind sie nicht mischbar, werden beide getrennt analysiert und die Ergebnisse rechnerisch kombiniert. Die Schadstoffkonzentrationen im TCLP-Extrakt werden mit den Grenzwerten in den betreffenden gesetzlichen Regelungen verglichen und bewertet.

4.2.6 Niederländische Testverfahren

In den Niederlanden beschäftigt man sich seit einigen Jahren mit Elutionsverfahren zur Beurteilung fester Abfälle. Dabei wurde besonderer Wert auf die mittel- und langfristige Vorhersage des Auslaugverhaltens gelegt. Ergebnis ist eine Testserie mit Säulen-, Schüttel- und Diffusionstest sowie einem Test zur maximalen Auslaugbarkeit, die zur Zeit noch als Vornorm existieren. In diesem Handbuch werden bereits die verbindlich werdenden Nummern der Niederländischen Einheitsnorm (NEN) angegeben.

Säulenversuch nach NEN 7343/7344

Dieser Test dient zur kurz- und mittelfristigen Abschätzung des Auslaugverhaltens von Verbrennungsrückständen und anderen Abfällen. Das Auslaugverhalten kann sowohl von anorganischen als auch organischen Komponenten bestimmt werden.

Das getrocknete und auf unter 3 mm zerkleinerte Probematerial wird als Festbett in eine Säule von 5 cm Durchmesser und einer Höhe von mindestens 20 cm gepackt. An Ober- und Unterseite der Säule werden Membranfilter mit einer Porenweite von 0,45 µm angebracht. Die

Säule wird von unten nach oben (up-flow) mit demineralisiertem und auf pH 4 angesäuertem Wasser durchströmt (Bild 4.3). Die Durchströmung wird fortgesetzt, bis ein L/S-Verhältnis von 10 erreicht wird. Das austretende Eluat wird in 7 Fraktionen aufgefangen und zwar mit einem kumulativen L/S-Verhältnis von 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5 und 10. Die einzelnen Proben werden bei Analyse auf Schwermetalle zur Konservierung auf pH 2 angesäuert und können dann mit den üblichen Verfahren analysiert werden.

Kaskadentest nach NEN 7343/7344

Von der getrockneten und unter 3 mm zerkleinerten Probe werden 40 g in 800 ml Wasser (L/S-Verhältnis = 20) gegeben. Das Wasser ist mit Salpetersäure auf pH 4 angesäuert. Das Ganze wird 23 Stunden geschüttelt, wobei die Gefäße verschlossen sein müssen, um zu verhindern, daß CO₂ aus der Luft aufgenommen wird. Der Überstand wird über 0,45 µm Membranfilter filtriert und für die Schwermetallanalyse auf pH 2 gebracht. Der Rückstand wird danach erneut mit frisch angesäuertem Wasser (pH 4) 23 Stunden lang bei einem L/S-Verhältnis von 20 extrahiert.

Diese Extraktionen werden insgesamt fünfmal wiederholt, so daß kumulative Auslaugungen mit einem L/S-Verhältnis von 20, 40, 60, 80 und 100 erreicht werden. Die fünf Eluate werden getrennt analysiert.

Außer dem vollständigen Kaskadentest gibt es auch einen einstufigen Schütteltest, bei dem nur die erste Stufe des Kaskadentests durchgeführt wird. Dieser verkürzte Test dient der schnellen Abschätzung des Auslaugverhaltens.

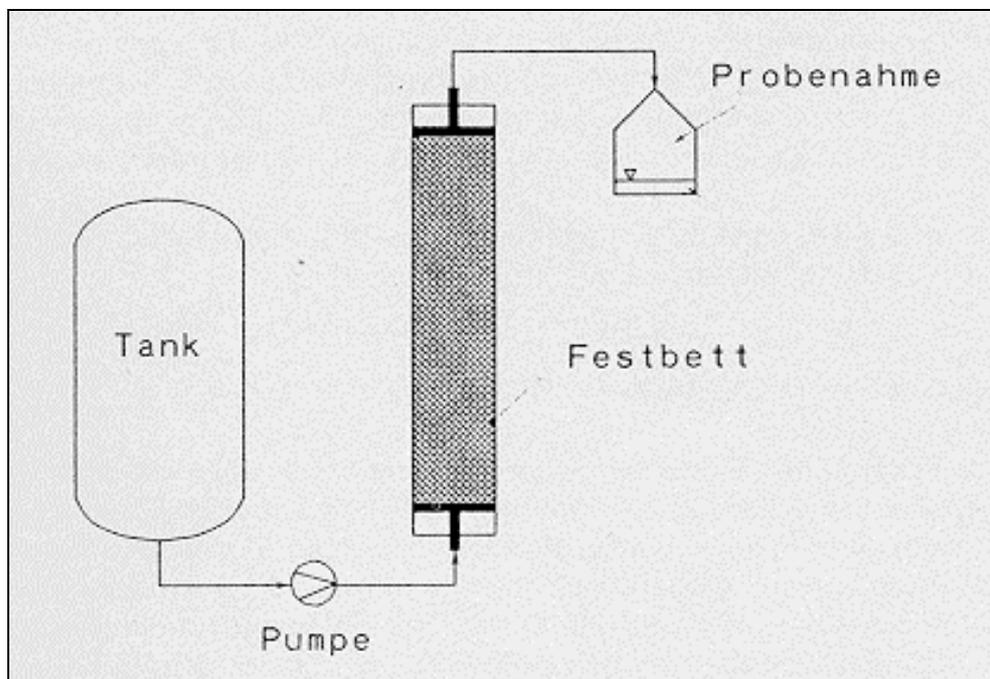


Bild 4.3: Schematischer Aufbau eines Säulenelutionsversuches [Lit:4.20]

Maximale Auslaugbarkeit nach NEN 7341/7342

Dieser Test dient zur Bestimmung der maximalen Auslaugbarkeit von anorganischen und organischen Komponenten. Dazu muß die Probe auf unter 125 µm zerkleinert werden. Danach werden 8 g getrockneter Probe mit 800 ml demineralisiertem Wasser (L/S-Verhältnis = 100) 3 Stunden verrührt. Bei basischen pH-Werten wird Säure bis zur Einstellung eines pH-Wertes von 7 hinzugefügt. Bei pH-Werten unter 7 erfolgt keine Korrektur.

Der Rückstand wird erneut mit deionisiertem Wasser auf ein L/S-Verhältnis von 100 verdünnt und 3 Stunden gerührt. Bei einem pH-Wert von über 4 wird dieser auf pH 4 zurückgebracht; bei einem pH-Wert unter 4 wird keine Veränderung vorgenommen. Die Flüssigkeiten werden ebenfalls über Membranfilter abgezogen, und beide Eluate werden zu gleichen Teilen vermischt und analysiert.

Diffusionstest nach NEN 7345/7346

Dieser Diffusions- oder Standtest dient zur Bestimmung der Auslaugbarkeit durch Diffusion. Ermittelt werden die Gesamtauslaugung (mg/kg TS), die auf die Oberfläche (mg/m²) bezogene Emission und die Diffusionskoeffizienten. In Zukunft soll dieser Test auch auf organische Komponenten ausgedehnt werden.

Das Probematerial mit einer Mindestkorngröße von 40 µm wird in ein Gefäß mit auf pH 4 angesäuertem deionisiertem Wasser gehängt. Das Flüssigkeits/Feststoffvolumenverhältnis L/V beträgt 10. Die Auslaugflüssigkeit wird nach 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 und 32 Tagen durch frisches Wasser (pH 4) erneuert. Die letzte Fraktion der Auslaugflüssigkeit wird nach 64 Tagen aufgefangen. Die acht Eluate werden abfiltriert, eventuell angesäuert und getrennt analysiert.

Auch von diesem Test gibt es eine verkürzte Durchführung, wobei der Versuch am vierten Tag abgebrochen wird.

4.2.7 Schweizer TVA-Test

Bei diesem Test handelt es sich um einen Elutionstest der Technischen Verordnung Abfall des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz. Als Prüfflüssigkeit wird deionisiertes Wasser verwendet, das mit Atmosphärendruck CO₂-gesättigt ist, wodurch sich ein pH-Wert von 4-4,5 einstellt. Das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis beträgt 10. Der Prüfkörper muß gleichmäßig von Prüfflüssigkeit umgeben sein und von unten kontinuierlich mit CO₂ begast werden (Bild 4.4). Die Gesamtversuchsdauer beträgt 48 Stunden, wobei nach 24 das Elutionsmittel erneuert wird. Beide Fraktionen werden über 0,45 µm Membranfilter filtriert und analysiert.

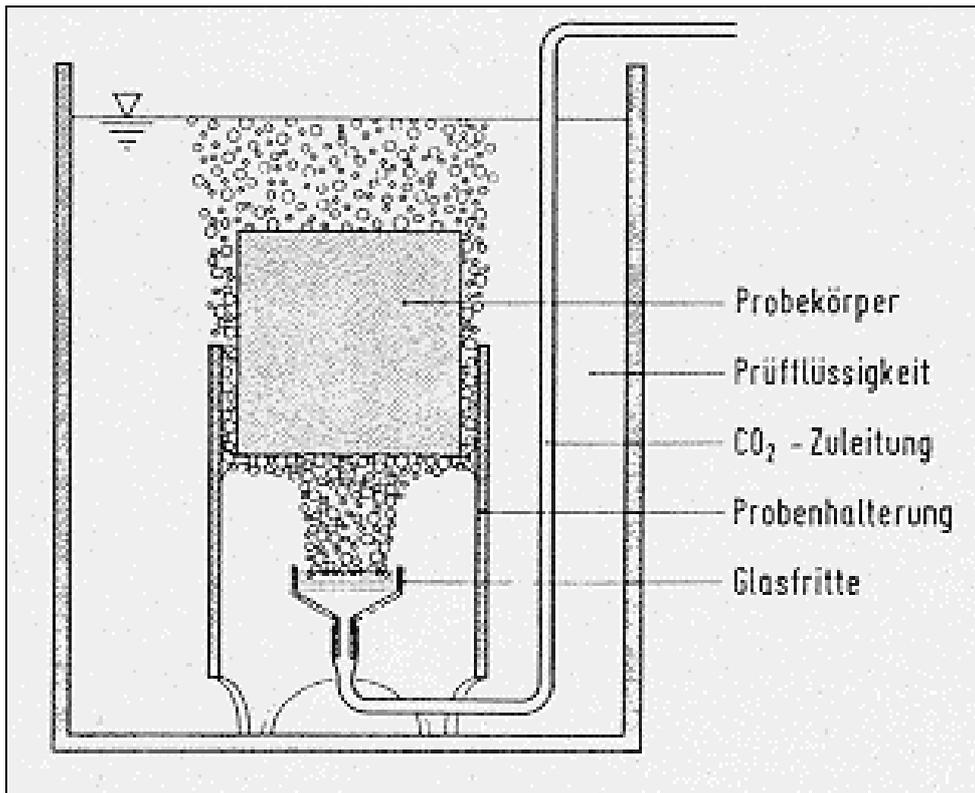


Bild 4.4: Versuchsaufbau Schweizer TVA-Test [Lit:4.2]

4.2.8 Soxhlet-Extraktion

Bei der **Soxhlet-Extraktion** wird das Probematerial kontinuierlich von der Elutionsflüssigkeit durch- oder umströmt. Die Elutionsflüssigkeit wird jedoch nicht erneuert, sondern durch Verdampfen und Kondensieren nach erfolgter Extraktion im Kreislauf geführt (Bild 4.5). Flüchtige Substanzen können nicht nachgewiesen werden, da sie bei der Verdampfung verloren gehen.

Ziel ist es, unter extremen Bedingungen in einer möglichst kurzen Zeit die maximale Menge an auslaugbaren Substanzen ins Eluat zu überführen. Durch die Kreislaufführung der Elutionsflüssigkeit werden sehr hohe Flüssigkeits/Feststoffverhältnisse ermöglicht und gleichzeitig eine Aufkonzentrierung im Eluat erreicht. Sehr weit verbreitet ist die Soxhlet-Extraktion deshalb in der analytischen Chemie, besonders bei der Vorbehandlung zur Analyse von Bodenproben.

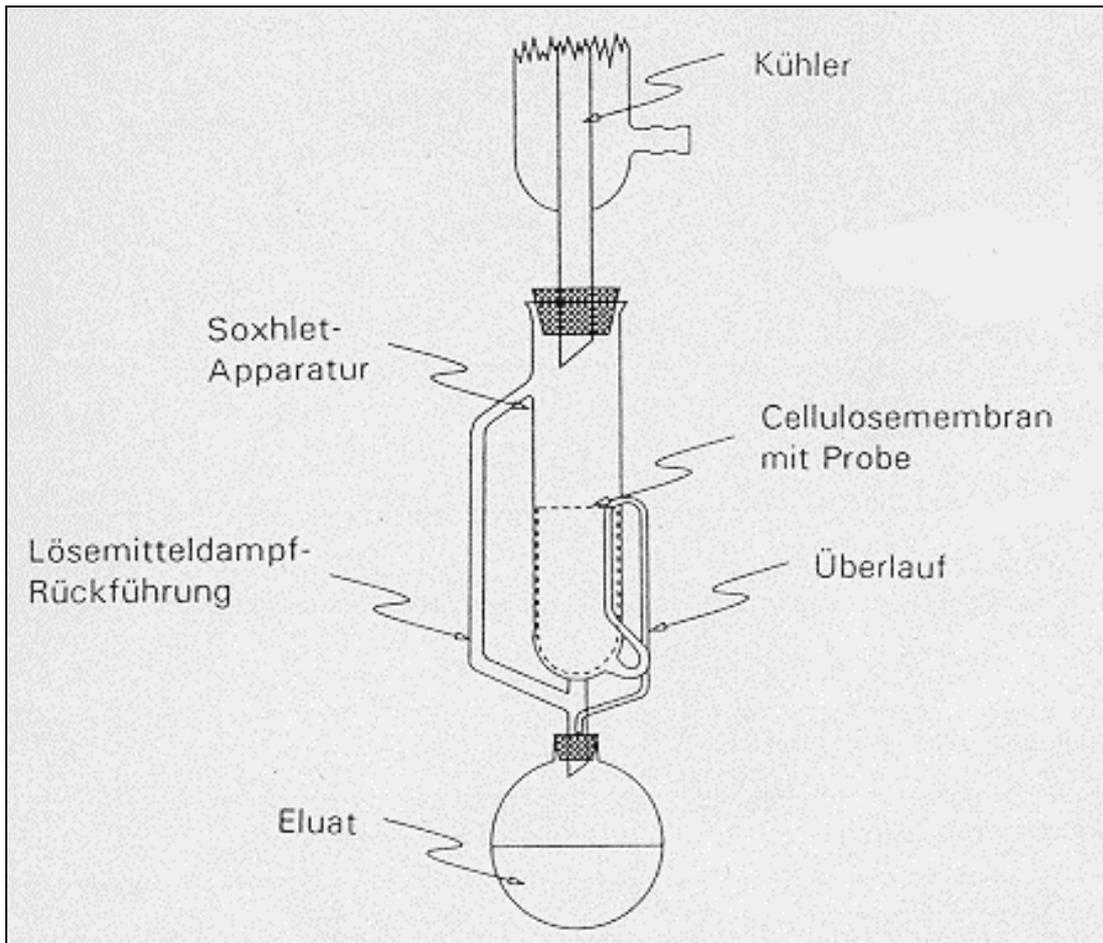


Bild 4.5: Soxhlet Extraktion [Lit:4.12]

4.2.9 Sequentielle Extraktion

Die **sequentielle Extraktion** ermöglicht eine Differenzierung der chemischen Bindungsformen im Untersuchungsprodukt. Bei dieser Methode wird die Probe mit verschiedenen Extraktionsmedien (A-E), die eine steigende Aggressivität aufweisen, behandelt, um so im Idealfall nacheinander spezifische Komponenten zu extrahieren (Bild 4.6). Diese Methode wurde ursprünglich für die Untersuchung von Böden und Sedimenten entwickelt. Neuerdings wird sie auch auf Abfälle angewandt [Lit:4.10, 4.14].

In der Literatur sind verschiedene Extraktionsschematata beschrieben; ein oft angewandtes ist in Tabelle 4.3 dargestellt. Die Selektivität der Extraktion beträgt jedoch nicht immer 100 %, was besonders auf Abfälle mit sehr unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen zutreffen wird [Lit:4.11]. Dadurch wird die Interpretation der Ergebnisse erschwert.

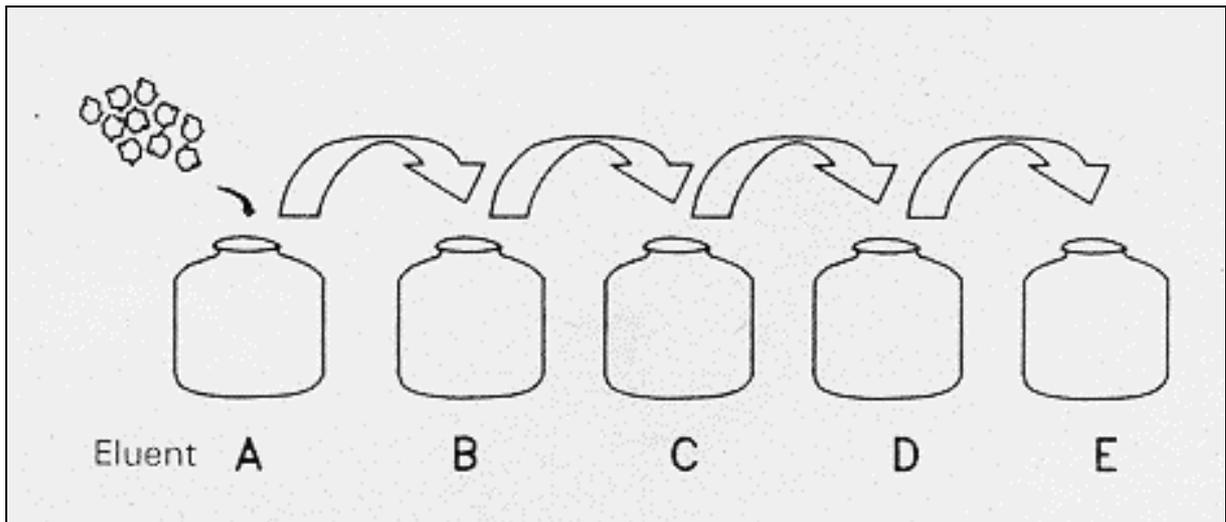


Bild 4.6: Sequentielle Extraktion mit steigender Aggressivität der Extraktionsmittel von A nach E [Lit:4.12]

Tabelle 4.3: Sequentielle Extraktion

Gewünschte Fraktion	Extraktionsmedium
Austauschbare Kationen	1 M Ammoniumazetat, pH = 7
Carbonatische Anteile	1 M Natriumazetat, pH = 5
Leicht reduzierbare Phasen (amorphe Eisen/Mangan-Oxyde) ¹⁾	0,1 M Hydroxylaminhydrochlorid + 0,01 M HNO ₃ , pH = 2
Mäßig reduzierbare Phasen (kristalline Eisen/Mangan-Oxyde) ¹⁾	0,2 M Ammoniumoxalat + 0,2 M Oxal-säure, pH = 3
Organische Fraktion, Sulfide ¹⁾	30 % H ₂ O ₂ + HNO ₃ , pH = 2
Residualfraktion (z.B. Kristallgitter von Silikaten)	konzentrierte HNO ₃ , 120°C

1) plus Schwermetalle, gebunden an diese Anteile

4.2.10 Elution in der Triaxialzelle

Das LWA Nordrhein-Westfalen empfiehlt, bei Monodeponien oder Verfestigungsmaßnahmen mit einer Bruttoabfallmenge von mehr als 10.000 t/a begleitende Langzeituntersuchungen hinsichtlich des Auslaugverhaltens durchzuführen [Lit:4.3]. Die **Triaxialzelle** wurde gewählt, da mit dieser Methode einerseits die Messung der Durchlässigkeit (DIN 18 130 T1) durchgeführt und andererseits simultan das Eluat gewonnen werden kann.

Dieser Elutionstest soll analog zum Triaxialversuch nach DIN 18130 Teil 1 (Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_f) durchgeführt werden.

Der zu durchströmende Probekörper wird in eine Prüfzelle eingespannt und mit einem hydraulischen Gradienten beaufschlagt. Ein Beispiel einer solchen Prüfapparatur ist in Bild 4.7 dargestellt.

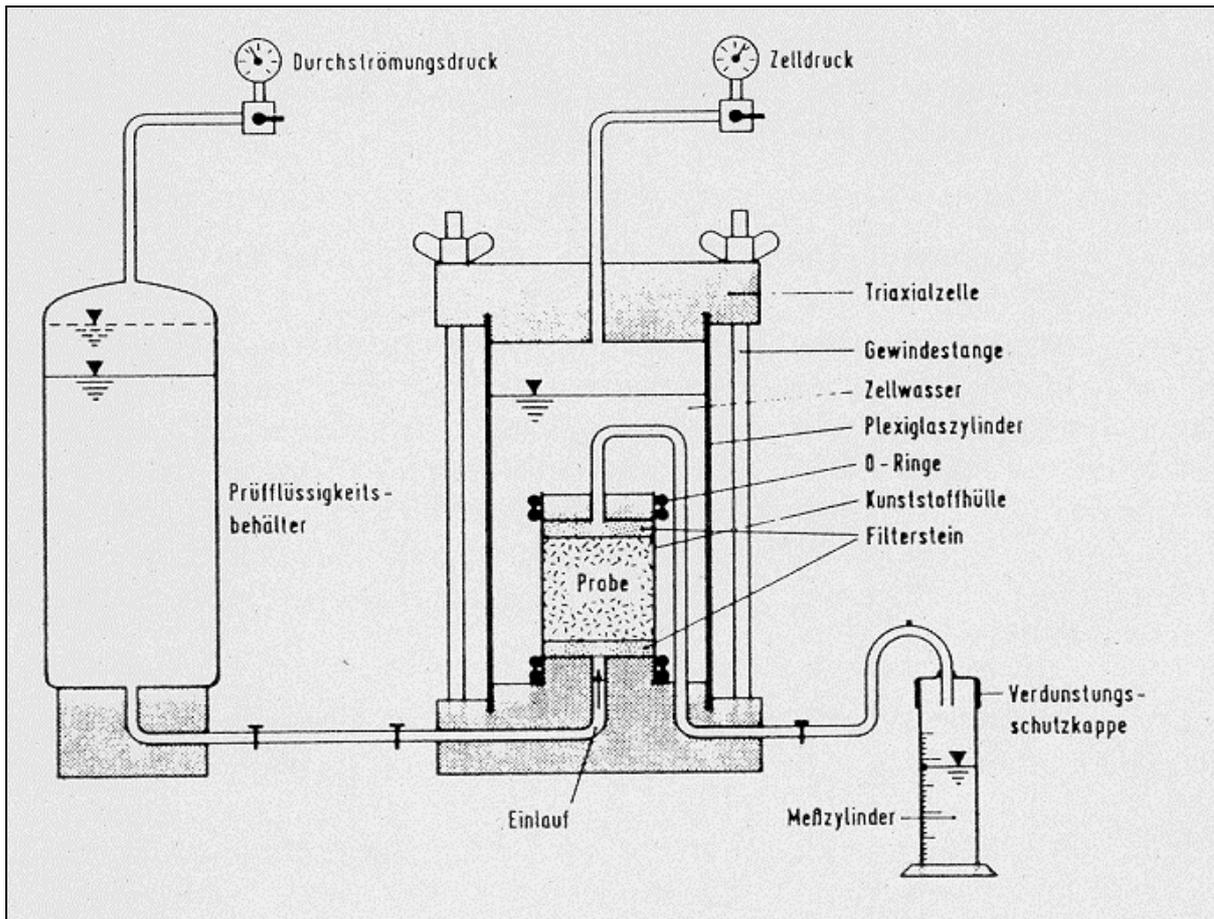


Bild 4.7: Elutionsversuch in der Triaxialzelle [Lit:4.2]

Mit Beginn der Verfestigungsmaßnahme sollen zwei gesonderte zylindrische Probekörper (Durchmesser 10 cm, Höhe 10 cm) des Verfestigungsproduktes einer Langzeitelution in Triaxial-Zellen unterworfen werden (Aushärtezeit min. 28 Tage). Der für die Proben eingesetzte Abfall soll repräsentativ für die Abfälle der gesamten Verfestigungsmaßnahme sein.

Der Untersuchungszeitraum beträgt mindestens fünf Jahre. Die im Triaxialversuch gewonnenen Eluate sind nach Anhang B auf die Eluatparameter des Anhangs D der TA Abfall, Teil 1 zu untersuchen.

Eine direkte Korrelation der Meßwerte aus dem Triaxialversuch mit den Meßwerten nach DEV S4 ist jedoch nicht gegeben [Lit:4.3].

Die anfallende Eluatmenge und die hierfür benötigte Zeit sind im Hinblick auf eine Frachtenberechnung zu erfassen. Bei der Auswertung ist auch auf die zeitliche Veränderung von Auslaugvermögen und k_f -Wert zu achten.

4.3 Physikalische Testverfahren

4.3.1 Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136

Dieser Test dient der Beurteilung der Festigkeit und Tragfähigkeit bindiger, verkitteter und verfestigter Böden. Der Probekörper wird in die Prüfmaschine eingespannt, und die Axialkraft wird über eine Kopfplatte mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit aufgebracht. Die Verformungsgeschwindigkeit beträgt jeweils 2% der Anfangshöhe pro Minute. Axialkraft und Stauchung werden kontinuierlich erfaßt. Mit Zement oder Wasserglas verfestigte Bodenproben werden nach 7 und 28 Tagen getestet. Aus dem Versuch erhält man Festigkeitskennwerte in MN/m^2 oder N/mm^2 .

4.3.2 Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 Teil 1

Die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_f für verfestigte Materialien erfolgt im Triaxialversuch nach DIN 18130 T1. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung sind identisch mit dem Triaxialversuch zur Elution, beschrieben in Kapitel 4.2.10. Der zu durchströmende Probekörper wird in eine Prüfzelle eingespannt und mit einem hydraulischen Gradienten beaufschlagt. Die in einem bestimmten Zeitintervall durchtretende Flüssigkeitsmenge dient zur Berechnung von k_f in m/s. Materialien mit einem k_f -Wert $< 10^{-9}$ m/s gelten als nicht durchlässig.

Das LWA Nordrhein-Westfalen fordert für verfestigte Abfälle einen hydraulischen Gradienten von $i = 50$. Die Durchlässigkeit ist an einem 28 Tage alten Probekörper des Verfestigungsproduktes zu prüfen. Der Versuch ist über einen Zeitraum von mindestens 28 Tagen durchzuführen. Am Versuchsende muß ein Durchlässigkeitsbeiwert von mindestens $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s erreicht werden. Im Prüfzeitraum darf der Durchlässigkeitsbeiwert nur konstante oder fallende Tendenz aufweisen [Lit:4.3].

4.3.3 Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN 52104

Dieses Verfahren gibt Auskunft darüber, wie sich eine Probe unter Frost-Tau-Wechseln verhält. Da die Beanspruchung durch Frost unter anderem vom Grad der Wassertränkung und der Abkühlgeschwindigkeit abhängt, sind mehrere Verfahren in der DIN-Norm beschrieben.

Die wassergetränkte Probe wird in der Regel mindestens zehn Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt, wobei sie an der Luft oder unter Wasser auf etwa -20 °C abgekühlt und danach bei Raumtemperatur aufgetaut wird.

Nach Versuchsende werden Rißbildung, Gewichtsverlust, Absplitterung und gegebenenfalls Festigkeitsveränderungen protokolliert.

4.3.4 Zerfallsziffer nach Endell

In dem von Endell entwickelten Versuch zur Bestimmung der Zerfallsziffer wird die Beständigkeit eines Probekörpers gegen Wasser geprüft [Lit:4.16]. Dazu werden die Prüfkörper in einen Glaskorb gestellt, der unter einem Aräometer mit Millimeterskala befestigt ist. Diese Apparatur wird in einen Glaszylinder mit destilliertem Wasser gestellt (Bild 4.8).

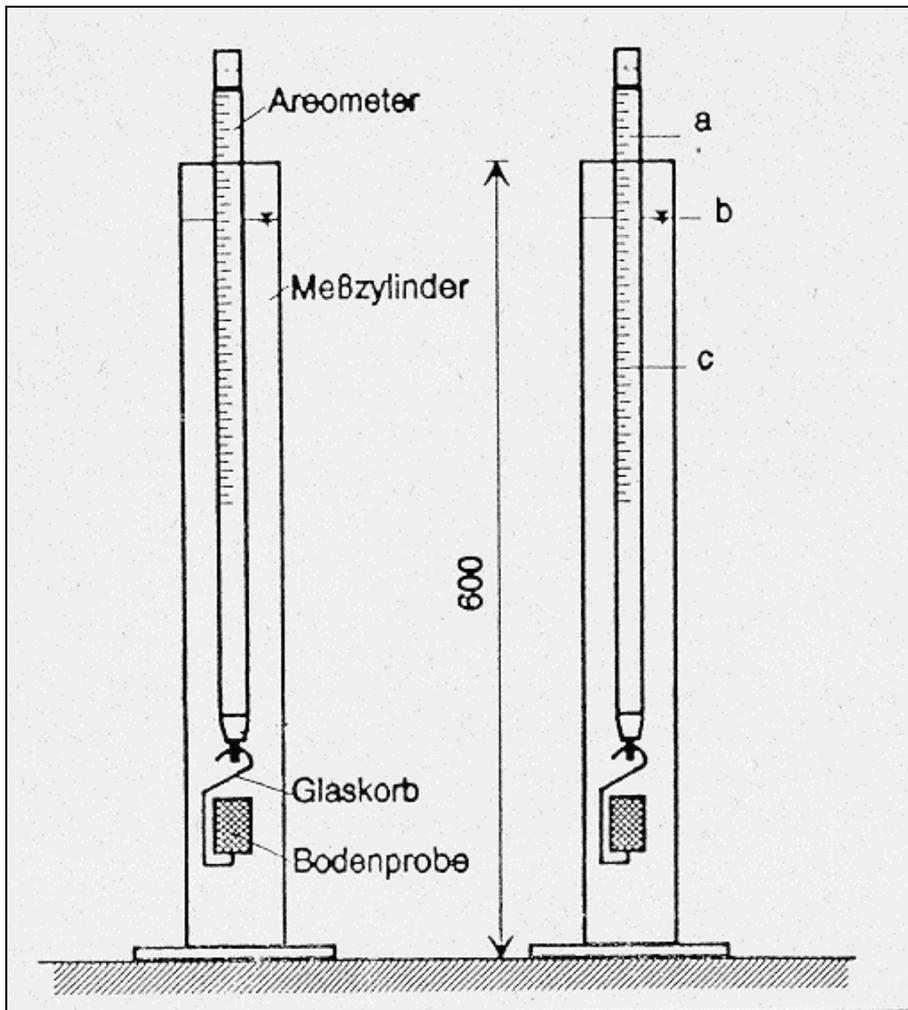


Bild 4.8: Gerät zur Bestimmung der Zerfallszahl nach Endell [Lit:4.3]

Mit beginnendem Zerfall steigt das Aräometer nach oben und verringert damit seine Eintauchtiefe in Abhängigkeit von der abnehmenden Materialmenge. Der Versuch wird bis zur Konstanz der Meßwerte, mindestens jedoch 24 Stunden, durchgeführt.

4.3.5 Nadelpenetration nach DIN 52010

Die Nadelpenetration diente ursprünglich zur Beurteilung von Bitumen. Diese Prüfung kann jedoch auch auf verfestigte Materialien Anwendung finden. Unter der Nadelpenetration wird die Einsinktiefe einer Prüfnadel unter Textkörperisierten Bedingungen verstanden. Die Probe wird dazu für 5 Sekunden mit einer 100 g schweren Prüfnadel belastet. Die Nadelpenetration wird in Zehntel-Millimeter angegeben.

4.4 Morphologische Untersuchungen

Die Untersuchung mikroskopischer Eigenschaften ermöglicht in vielen Fällen die Erklärung makroskopischer Effekte. So können z.B. eine hohe Durchlässigkeit und starkes Auslaugen eines Schwermetalles auf eine hohe Porosität und das Vorliegen einer leicht löslichen Schwermetallverbindung zurückgeführt werden. Es handelt sich jedoch um qualitative Nachweisverfahren, mit denen quantitative Aussagen nur eingeschränkt möglich sind. Daneben sind diese Verfahren sehr aufwendig, so daß ihr Einsatz bisher auf den Bereich der Forschung beschränkt blieb.

4.4.1 Lichtmikroskopie

Mit Hilfe von Dünnschliffen und einem Polarisationsmikroskop können auf einfachem Wege Minerale identifiziert und die grobe Verteilung verschiedener Materialphasen bestimmt werden. Auch Kornverwachsungen und Korngefüge lassen sich erkennen.

4.4.2 Rasterelektronenmikroskopie

Ein hochenergetischer Röntgenstrahl tastet den Probekörper ab, so daß es zu Wechselwirkungen der Elektronen in der äußeren Atomhülle der Probe kommt. Dadurch bilden sich Sekundärelektronen, die gesammelt und auf einem Bildschirm sichtbar gemacht werden können (bis zu 10.000-fache Vergrößerung).

Die Rasterelektronenmikroskopie vermittelt ein quasi dreidimensionales Bild der Probenoberfläche, so daß Mikrorisse und Porosität gut erkennbar sind. Möglich ist auch die Erkennung einzelner Phasen anhand ihrer Oberflächenstruktur.

4.4.3 EDX-Analyse

Die energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) wird in Verbindung mit dem Rasterelektronenmikroskop eingesetzt, um Informationen über die Elementverteilung einer Probe zu erhalten (Elementaranalyse). Neben der Emittierung von Elektronen wird durch den Röntgenstrahl auch für jedes Element ein charakteristisches Röntgenspektrum erzeugt, mit dem Elemente identifiziert werden können.

Da mit einer EDX-Analyse erst Elemente ab einer Ordnungszahl von 10 nachgewiesen werden können, bleiben Elemente wie Wasserstoff, Kohlenstoff oder Stickstoff unberücksichtigt; das bedeutet, daß organische Stoffe nicht erfaßt werden. Die Nachweisgrenze hängt stark vom Atomgewicht des untersuchten Elements ab; sie liegt bei ungefähr 0,5 Gewichtsprozent.

4.4.4 Röntgendiffraktometrie

Mit der Röntgendiffraktometrie können kristalline Phasen in einer Probe identifiziert werden. Dazu wird eine pulverisierte Probe auf einem Drehteller mit Röntgenstrahlen definierter Wellenlänge bestrahlt.

Die verschiedenen kristallinen Phasen beugen den Röntgenstrahl bei unterschiedlichen Rotationswinkeln. Dies wird als Signal aufgezeichnet und dient zur Berechnung des Abstandes verschiedener atomarer Ebenen. Anhand der Signale bekannter Proben kann die unbekannte Phase identifiziert werden. Man erhält somit Informationen über den Kristallaufbau und die Art der Verbindung.

Amorphe Phasen (Gläser, Gele) können mit diesem Verfahren nicht identifiziert werden.

4.5 Beurteilung der chemischen Testverfahren

4.5.1 Ziele der Testverfahren

Die Beurteilung der Testverfahren bezieht sich nur auf die Elutionstests, da diese für eine Gefährdungsabschätzung von maßgebender Bedeutung sind. Es können dabei drei verschiedene, teilweise gegensätzliche, Zielsetzungen unterschieden werden:

- Normenkontrolle
- Vorhersage des Auslaugverhaltens
- Information über Immobilisierungsmechanismen

Normenkontrolle

Normen sind im allgemeinen an bestimmte vorgeschriebene Testmethoden gekoppelt. Aus Gründen der praktischen Durchführbarkeit muß mit einheitlichen und relativ einfachen Testmethoden gearbeitet werden. Ein genau normiertes Vorgehen ist auch für die Vergleichbarkeit verschiedener Materialien wichtig. Vor diesem Hintergrund ist z.B. der Einsatz von standort-typischen Sickerwässern oder von Regenwasser als Elutionsflüssigkeit als fragwürdig zu bewerten.

Vorhersage des Auslaugverhaltens

Bei der Prognose des Auslaugverhaltens in der Praxis können folgende Aspekte unterschieden werden:

die Zeitspanne, über die eine Prognose erwünscht ist:

Es wird unterschieden zwischen kurzfristigen Prognosen (über einige Jahre), mittelfristigen (über Jahrzehnte), langfristigen (über Jahrhunderte) sowie Prognosen über eine größere Zeitspanne (max. 10.000 Jahre). Bei den Elutionstests wird die Zeitskala durch eine L/S-Skala ersetzt, d.h. mit der (kumulativen) Menge an Flüssigkeit (L), die im Laufe der Zeit mit dem Feststoff (S) in Berührung gekommen ist.**die Art der gewünschten Information:**

- **Sämtliche Emissionen (in mg/kg TS) innerhalb einer bestimmten Frist.** Zur Ermittlung dieses Parameters ist es ausreichend, beim zu erwartenden L/S-Wert eine einzige Analyse durchzuführen.

- Neben der Gesamtheit an Emissionen ist auch Einblick erwünscht in die **Emission-entwicklung im Zeitverlauf**. Zur Ermittlung dieser Information sind mehrere Analysen bei unterschiedlichen L/S Werten erforderlich.
- Um herausfinden zu können, welche Konzentrationen an Schadstoffen in die Umwelt gelangen können, sind ergänzende **Modellrechnungen** erforderlich. Die Höhe der Konzentrationen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zu nennen sind hier neben der Art der Verfestigung beispielsweise die hydrologischen Bedingungen oder die chemischen Eigenschaften des Schadstoffes. Viele Schadstoffe adsorbieren stark an festen Substratbestandteilen, andere sind in hohem Maße wasserlöslich und werden deshalb rascher ins Grundwasser gelangen.

Eine Vorhersage des Auslaugverhaltens unter praktischen Bedingungen kann nur abgegeben werden, wenn sich das Material im Laufe der Zeit nicht verändert und wenn die Laborbedingungen den Praxisbedingungen entsprechen. Dies wird, wenn überhaupt, nur in gewissen Grenzen der Fall sein [Lit:4.7].

Information über Immobilisierungsmechanismen

Bei der Immobilisierung kann im wesentlichen unterschieden werden zwischen der chemischen Bindung der Schadstoffe und der physikalischen Einkapselung. Die physikalische Einkapselung verliert die angestrebte Wirkung, sobald das Material eine Gefügauflockerung erfährt oder zerfällt. Folglich kann nach Zerkleinerung des Materials ermittelt werden, in welchem Maße der erreichte Immobilisierungseffekt auf chemische Bindung oder lediglich auf physikalische Einkapselung zurückzuführen ist. Eine andere Möglichkeit stellt die sequentielle Extraktion dar, mit der auch die Unterscheidung verschiedener Bindungsformen möglich ist.

Wichtige Hilfsmittel bei der Erforschung von Immobilisierungsmechanismen stellen sicherlich die morphologischen Verfahren dar (Kapitel 4.4). Mit diesen Verfahren lassen sich mikroskopische Strukturen erkennen und verschiedene Formen der Einbindung nachweisen.

4.5.2 Vergleich zwischen Labor- und Praxisbedingungen

Im folgenden wird eine Übersicht der für die Auslaugung relevanten Parameter gegeben und untersucht, inwiefern sich die Bedingungen im Labor von denjenigen in der Praxis unterscheiden.

Dauer

Die Dauer der Elutionstests variiert von einem Tag (Elution nach DIN 38414-S4) bis zu 64 Tagen (Diffusionstest gemäß NEN 7345/7346). Verglichen mit der Praxissituation ist die Dauer jedenfalls kurz. Das hat zur Folge, daß die Wirkung von langsam ablaufenden Umsetzungsprozessen wie etwa der Carbonatbildung oder anderer chemischer und physikalischer Umwandlungen nicht aus den Elutionstests ersehen werden.

Wenn zu erwarten ist, daß die Auslaugung durch solche Prozesse beeinflußt wird, müssen deshalb entweder langfristige Tests durchgeführt werden oder das Material muß im Laufe der Zeit mehrmals beprobt und untersucht werden.

L/S-Wert

Das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis (L/S) variiert zwischen 10 (Elution nach DIN 38414-S4) und 200 (maximale Auslaugbarkeit gemäß NEN 7341/7342).

In der Praxis hängt der L/S-Wert von der in Betracht gezogenen Dauer ab und von der Wassermenge, die pro Zeiteinheit mit dem Material in Berührung kommt. Dabei kann die Wasserzufuhr von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein, u.a. abhängig von der Schichtdicke des Materials und der Anwesenheit einer Oberflächenabdichtung. Daher ist bei der Auswahl eines Elutionstests dem L/S-Wert Rechnung zu tragen, der in der zu untersuchenden Situation und bei der gewünschten Prognosedauer zu erwarten ist.

Korngröße

Die Korngröße hat großen Einfluß auf das Verhältnis Oberfläche zu Volumen der Partikeln. Bei der Untersuchung unbehandelter Proben ist zu beachten, daß in der Regel der größte Teil der Schadstofffracht am Feinkorn haftet und somit der Korndurchmesser und die Kornverteilung einen Einfluß auf den Schadstoffaustrag haben.

Schüttel-, Säulen- und Rührtests sind mit bestimmten Anforderungen an die Korngröße von Materialien verbunden. Diese Anforderungen an den Korndurchmesser variieren von $d < 9,5$ mm (TCLP) bis $d < 0,125$ mm beim maximalen Auslaugbarkeitstest (NEN 7341/7342).

Um Säulentests und bestimmte andere Labortests durchführen zu können, ist es oft erforderlich, das Untersuchungsmaterial zu zerkleinern. Dadurch wird allerdings das Auslaugverhalten des Materials beeinflusst. Die Auslaugung kann aufgrund der vergrößerten Oberfläche stark zunehmen. Eine Immobilisierung durch Verfestigung beruht aber oft nur darauf, daß ein monolithischer Körper entsteht, dessen Stoffaustauschfläche auf ein Minimum beschränkt ist. Andererseits kann sich die Oberfläche eines Verfestigungsproduktes z.B. durch Verwitterung stark vergrößern, so daß ein Test mit zerkleinerter Probe realistischere Ergebnisse liefert.

Elutionsmedium

Die Menge an freigesetzten Schadstoffen im Elutionstest kann erheblich von der Art der Prüflüssigkeit beeinflusst werden. Meistens wird mit destilliertem Wasser oder einem damit vergleichbaren Medium gearbeitet. Da destilliertes Wasser kaum Fremdionen enthält und auch keine Pufferkapazität aufweist, werden die Zusammensetzung des Elutionsmediums und der pH-Wert praktisch durch das Material selbst bestimmt. In der Praxis gilt dies auch für Regenwasser.

Stammt das Material allerdings aus einer Mischung von verschiedenen Abfällen mit beispielsweise organischen Bestandteilen, dann entsteht ein völlig anderes Elutionsmedium. Diese Art von Sickerwasser kann hohe Konzentrationen an Salzen und organischen Komplexbildnern (Fettsäuren, Huminstoffen) enthalten. Deshalb kann die Auslaugung in der Praxis stark von den Resultaten der Labortests abweichen. Das Elutionsmedium des TCLP ist aufgrund der Zugabe von Essigsäure eine grobe Simulation von Sickerwasser aus Deponien.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Anwendung von demineralisiertem Wasser als Elutionsmedium angemessen ist, wenn wir es mit einer Monodeponie und der Infiltration von

Regenwasser oder einer damit vergleichbaren Situation zu tun haben. Sobald Abfälle aber gemischt abgelagert werden, muß das in dieser Situation entstehende Sickerwasser simuliert werden, damit eine realistische Prognose abgegeben werden kann.

Wichtige Parameter des Elutionsmediums sind der pH-Wert und das Redoxpotential.

pH-Wert

Bei den meisten Elutionstests wird der pH-Wert nicht gesteuert, sondern vom Untersuchungsmaterial bestimmt. Das wird auch in der Praxis der Fall sein, sofern das Elutionsmedium nicht stark von demineralisiertem Wasser abweicht. Für die Ermittlung der maximalen Auslaugbarkeit muß der pH-Wert gesteuert werden. Dabei ist von den pH-Extremwerten auszugehen, die längerfristig in der Umwelt zu erwarten sind. Als Extremwerte, die in Deponien auftreten können, gelten im allgemeinen pH 4 und pH 11, obwohl lokal noch extremere pH-Werte auftreten können [Lit:4.1]. Schwermetalle laugen in der Regel bei niedrigen pH-Werten stärker aus als bei höheren.

Verschiedene Elemente, die in Anionenform übergehen können, wie etwa As, Sb, Se, Mo, laugen aber unter Umständen bei basischen pH-Werten stärker aus als bei neutralen oder sauren pH-Werten [Lit:4.6].

Redoxpotential

Bei Textkörperelutionstests wird das Redoxpotential nicht gesteuert, da dies experimentell schwer durchführbar ist. Da praktisch alle Elutionsmedien einen gewissen Sauerstoffgehalt besitzen, besonders wenn sie mit Luft in Berührung kommen, liegen im allgemeinen aerobe Bedingungen vor (positives Redoxpotential).

Textkörperelutionstests können die Auslaugung unter praktischen Bedingungen überschätzen, wenn anaerobe Bedingungen auftreten, die die Bildung schwer löslicher Schwermetallsulfide begünstigen und oxidative Reaktionen weitgehend unterbinden. Hingegen kann die Auslaugung von Elementen wie As und Ba unterschätzt werden. Arsen ist in dreiwertiger Form (Arsenit) besser löslich als in fünfwertiger Form (Arsenat), und Bariumsulfid ist besser löslich als Bariumsulfat.

Kontakt mit der Flüssigkeit

Bei Elutionstests stehen Flüssigkeit und Feststoff kontinuierlich, intensiv und allseitig miteinander in Berührung. Dies gilt insbesondere für Schüttel- und Rührtests. In der Praxis ist der Flüssigkeitskontakt oft diskontinuierlich, weniger intensiv oder es kann sich zum Beispiel in einer Abfallablagerung ein bestimmter Wasserverlauf herausbilden, durch den das Sickerwasser hauptsächlich abfließt. Dies hat zur Folge, daß nur ein Teil des Materials mit der Flüssigkeit in Berührung steht.

Die in der Praxis häufig auftretende Bedingung der sich wiederholenden Erneuerung des Elutionsmediums (z.B. Regen) wird zwar bei Säulentests, Kaskadentests und Diffusionstests simuliert, nicht aber bei einfachen Schütteltests.

Die im Lauf der Zeit auftretenden Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Elutionsmediums werden sich auf die Löslichkeit der Stoffe auswirken. Eine Simulation derartiger Vorgänge ist jedoch wegen ihrer Komplexität im Labor nicht möglich.

In Bild 4.9 sind die Unterschiede des Flüssigkeitskontaktes im Schütteltest und in einer Abfallablagerung noch einmal übersichtlich gegenübergestellt.

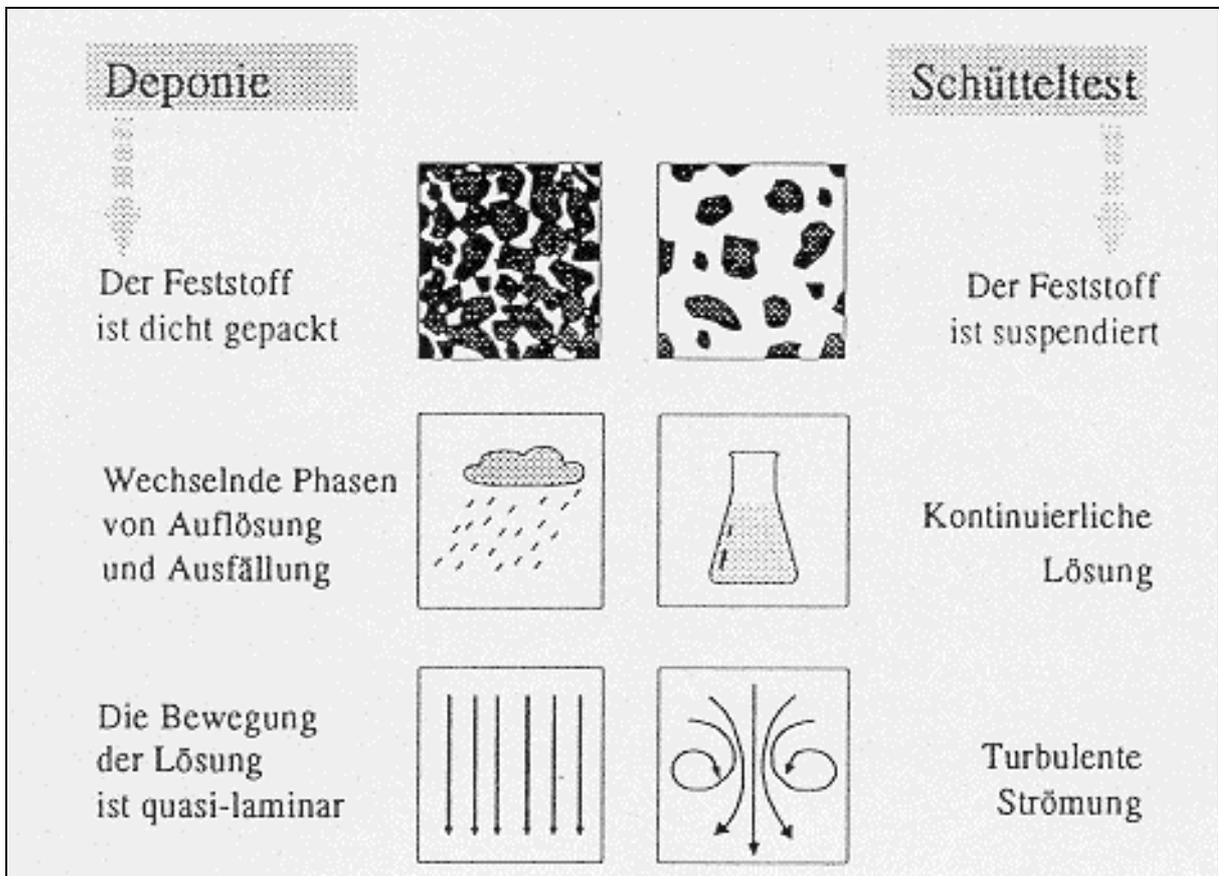


Bild 4.9: Unterschiede des Flüssigkeitskontaktes auf der Deponie und im Schütteltest [Lit:4.1]

4.5.3 Praktische Anwendung von Prüfverfahren

Immobilisierung tritt entweder als Folge einer physikalischen Einkapselung oder infolge chemischer Bindung ein. Worauf die Immobilisierung im Einzelfall zurückzuführen ist, kann mit den in diesem Handbuch beschriebenen Prüfverfahren ermittelt werden. Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Ausgangsmaterial und Immobilisierungsprodukt muß die Zerkleinerung so vorgenommen werden, daß die Korngrößenverteilung des zerkleinerten Immobilisates derjenigen des Originalmaterials entspricht. Daneben muß auch die Menge an Zuschlagsstoffen und gebundenem Wasser berücksichtigt und in die Massenbilanz einbezogen werden.

Einen Einblick in den Grad der chemischen Bindung erhält man, indem man die maximale Auslaugbarkeit des immobilisierten Materials mit derjenigen des Originalmaterials vergleicht. Die in Abschnitt 4.2.9 beschriebene sequentielle Extraktion kann einen Beitrag zum Wissen

über Art und Grad der chemischen Bindung im Immobilisat leisten. Ein Verfahren zur sequentiellen Extraktion muß jedoch erst noch Textkörperisiert werden.

Eine interessante Variante stellt die niederländische Testserie dar, mit der auch ein mittel- und langfristiges Auslaugverhalten simuliert werden soll. Nachteile der niederländischen Testserie sind einerseits der große Aufwand, da für einen Test bis zu 8 verschiedene Eluate hergestellt und analysiert werden müssen, andererseits die lange Versuchszeit, die beim Diffusionstest 64 Tage beträgt.

Zur Zeit stehen in Deutschland nur zwei Textkörperisierte Elutionsverfahren zur Verfügung, und zwar die Bestimmung des säurelöslichen Anteils an Schwermetallen mit Königswasser (DIN 38414-S7) und die Bestimmung der Eluierbarkeit mit reinem Wasser (DIN 38414-S4). Beide Bestimmungen stellen Bedingungen für das Verhalten von Schwermetallen dar, die in der Realität nicht auftreten [Lit:4.1].

Andererseits bietet die DIN 38414-S4 sowohl die Möglichkeit, andere Elutionsflüssigkeiten als deionisiertes Wasser zu verwenden, als auch eine mehrmalige Elution (Kaskadentest) durchzuführen.

Mit dem pH_{stat} -Versuch werden Auslaugvorgänge in abgelagerten Abfällen und belasteten Böden realitätsnah simuliert, ohne die Versuchsdurchführung zu kompliziert zu gestalten. Für diesen Test müssen allerdings die entsprechenden Titrierautomaten zur Verfügung stehen, mit denen mehrere Proben gleichzeitig auf einer Schüttelmaschine behandelt werden können.

Andere Alternativen wären die amerikanische TCLP oder der schweizer TVA-Test, die Auslaugvorgänge unter realitätsnahen Bedingungen durchzuführen versuchen.

4.6 Vorschriften zur Prüfung

Allgemeine Kriterien zur Bewertung von Immobilisierungsverfahren lassen sich nur bedingt formulieren. Altlasten sind aufgrund ihrer Heterogenität meistens als Einzelfälle zu betrachten, so daß die bei ihrer Sanierung gewonnenen Erkenntnisse nur bedingt auf ähnliche Fälle übertragbar sind.

Abhängig von den Sanierungszielen, die bei einer Sicherungsmaßnahme mittels Immobilisierungsverfahren erreicht werden sollen, kommt geeigneten Prüfverfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit eines Verfahrens sowie seines Langzeitverhaltens eine überragende Bedeutung zu.

Im sogenannten "**Mainhausen-Papier**" von 1986 (Gutachten der Sachverständigenkommission Sonderabfalldeponie Mainhausen, durch TA Abfall mittlerweile überholt) wurden erstmals **Grenzwerte für Verfestigungsprodukte** definiert bezüglich Durchlässigkeit, Festigkeit und Eluatwerten im DEV S4-Test (DIN 38414-S4).

Tabelle 4.4: "Mainhausen-Papier" [Lit:4.4]

Durchlässigkeit	$k_f < 5,0 \times 10^{-9}$ m/s, im modifizierten Proctorzylinder (mit Wassersäule von max. 10 m)
Druckfestigkeit	> 0,2 MN/m ² nach 28 Tagen
Nadelpenetration	< 5,0 PE nach DIN 52010
Eluatwerte gem DEV S4	Probekörper 100 - 300 cm ²
pH	≥ 7
Leitfähigkeit	5.000 µS/cm
CSB	400 mg/l
Cl	2.000 mg/l
SO ₄	2.000 mg/l
As, Se	0,1 - 0,2 mg/l
Cr	0,1 - 0,5 mg/l
Cu	0,1 - 1,0 mg/l
Ni	0,1 - 0,5 mg/l
Zn	0,1 - 2,0 mg/l
Pb	0,01 - 1,0 mg/l
Cd	0,01 - 0,5 mg/l
Hg	0,001 - 0,1 mg/l
KW	4,0 mg/l
AOX	3,0 mg/l
F ⁻	1,5 mg/l
NH ₄ ⁺ -N	10 mg/l

In Baden-Württemberg werden Sanierungsziele auf Grundlage der Informationsschrift "Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" vom 16.09.1993 ermittelt. Die Sanierungsziele sind danach einzelfallspezifisch, schutzgut- und nutzungsbezogen zu ermitteln.

In der Zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Teil 1 vom 12.03.1991 werden im Anhang H Prüfverfahren für Verfestigungsmittel und verfestigte Ab-

fälle vorgeschrieben sowie im Anhang D die entsprechenden Zuordnungskriterien bezogen auf die Deponie für besonders überwachungsbedürftige Abfälle angegeben. Zur Ermittlung der Eluatwerte ist im Anhang H ein modifizierter DEV S4-Test vorgeschrieben (siehe 4.2.1).

In Baden-Württemberg fordert die "Verwaltungsvorschrift über die vorläufigen Bedingungen zur Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch im Straßenbau" vom 4. Januar 1993 bei Wiederverwendung die Umhüllung des teerhaltigen Materials in kaltem Zustand mit einem hydraulischen oder bituminösen Bindemittel.

Zur Prüfung von Immobilisierungsprodukten, die als Recycling-Baustoffe wiederverwendet werden sollen, kann die Richtlinie RAL - RL 501/2 "Güte- und Prüfbestimmungen für die Aufbereitung zur Wiederverwendung von kontaminierten Böden und Bauteilen" herangezogen werden.

Als mögliches Prüfverfahren zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von verfestigten Abfällen ist z.Zt. die Langzeitelution in der Triaxialzelle in der Diskussion; Langzeitelutionsversuche (bis zu 5 Jahre) werden am LWA Nordrhein-Westfalen durchgeführt (siehe 4.6.2).

Prüfverfahren zur Vorab-Beurteilung des Langzeitverhaltens von Immobilisierungsprodukten sind bisher nicht bekannt, allenfalls können mit (nicht genormten) verschärften Prüfverfahren wie pH_{stat} oder sequentieller Extraktion die aktuelle Wirksamkeit eines Immobilisierungsverfahrens unter Laborbedingungen geprüft werden.

Praxiserfahrungen mit dem Verhalten von Immobilisierungsprodukten aus verschiedenen Verfestigungsverfahren konnten über jeweils zwei Jahre mit Hilfe von Ablagerungsversuchen auf der Deponie Schwabach und der Deponie Kornharpen in Bochum gesammelt werden.

4.6.1 Prüfung von Immobilisierungsprodukten bei Altlastensicherungen mit Wiedereinbau am Standort

Gemäß der Informationsschrift "Orientierungswerte bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" der LfU Baden-Württemberg (Anlage zur gemeinsamen Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums und des Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen vom 16.09.1993) ist das Ziel einer Sanierung grundsätzlich [Lit:4.5]:

Schaffung eines **Zustandes**, der nur noch Schadstoffkonzentrationen in den (ehemals) kontaminierten Umweltmedien aufweist, die den **natürlichen oder anthropogenen Hintergrundwerten** entsprechen oder diesen nahekommen.

In der Vielzahl von Fällen ist es jedoch nicht sinnvoll, dieses Ziel zu verfolgen, da es nur mit einem wirtschaftlich oder rechtlich unverhältnismäßigen Aufwand zu erreichen wäre und/oder dabei wegen der negativen Sekundärfolgen der Sanierung eine ungünstige Umweltbilanz entstehen würde.

Daher ist bei der Festlegung von Sanierungszielen eine Abwägung aller Umstände des jeweiligen **Einzelfalles** notwendig.

Ergibt eine solche Abwägung, daß Hintergrundwerte nicht als Sanierungsziel herangezogen werden können, sind zur Sicherstellung eines angemessenen Schutzes für den Menschen unter Beachtung seiner wichtigsten Umweltnutzungen und des Grundwassers zumindest die folgenden Schutzgüter zu berücksichtigen:

- Grundwasser
- Grundwassernutzungen
- Gesundheit von Menschen auf kontaminierten Flächen
- Boden, Schutzgut Pflanzen

Die vollständige Berücksichtigung dieser Schutzgüter vermeidet in der Regel gleichzeitig erhebliche Beeinträchtigungen des Öko-Systems durch Schadstoffe in Wasser und Boden.

Für die Entscheidung über die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen sind Sanierungszielwerte für den jeweiligen Einzelfall zu ermitteln und mit dem vorgefundenen Zustand zu vergleichen.

Bei der Festlegung von Sanierungszielwerten gilt folgende Rangfolge:

- **Grundsätzliche Anforderung:**
Einhaltung der Hintergrundwerte gemäß Anlage 1 und 2, H-W (Grundwasser) bzw. H-B (Boden).
- **Allgemeine Mindestanforderung:**
Ergibt die Einzelfallabwägung, daß die H-Werte nicht herangezogen werden können, sind als allgemeine Mindestanforderung die Prüfwerte P-W (Grundwasser) P-M (Menschen) und P-P (Boden, Schutzgut Pflanzen) einzuhalten.
- **Einzelfallbezogene Mindestanforderung:**
Ergibt die Einzelfallabwägung, daß die P-Werte nicht zu erreichen sind, können ausnahmsweise höhere Restbelastungen (gegebenenfalls gesichert und unter Hinnahme von Nutzungseinschränkungen) hingenommen werden.
Zum Schutz des Grundwassers gelten als Bedingungen:
die **Immissionsbegrenzung:**
(Einhaltung der P-W-Werte) und
die **Emissionsbegrenzung:**
(Tägliche Fracht nicht größer als E_{\max} -W-Werte, Anlage 4)
Bezüglich der übrigen relevanten Schutzgüter gilt, daß nur die P-Werte der Nutzungen, die künftig möglich sein sollen, einzuhalten sind.

Bezogen auf den Schutz des Grundwassers stehen weiterhin **P_{\max} -W-Werte** (Anlage 1) zur **Abgrenzung des sanierungsbedürftigen Teils einer Altlast** zur Verfügung.

Werden die P-W-Werte als Sanierungsziel herangezogen, können im Einzelfall lokale Bereiche mit geringfügiger Überschreitung der Sanierungsziele (P_{\max} -W) toleriert werden.

Damit wird vermieden, daß geringen Verbesserungen der Umwelt unangemessen aufwendige Maßnahmen, ggf. mit entsprechend nachteiligen Sekundärfolgen, gegenüberstehen.

Der **Wiedereinbau von Bodenmaterial** aus dem Bereich einer Altlast oder eines Schadensfalles am Ort der Entnahme ist außerhalb von geplanten oder festgesetzten Wasserschutzgebieten zulässig, wenn alle P-Werte eingehalten sind.

Um zu ermitteln, welche Sanierungsziele bei einer Immobilisierung mit Wiedereinbau am Standort erreicht werden müssen, können folgende Überlegungen hilfreich sein:

In allen Fällen, in denen die Einzelfallabwägung ergibt, daß die P-Werte nicht erreicht werden können (die Festlegung der P-Werte stellt auf ein weitgehendes Maß an Sanierung durch Dekontamination ab), sind durch eine Sicherungsmaßnahme mittels Immobilisierung und Wiedereinbau die **einzelfallbezogenen Mindestanforderungen** Immissionsbegrenzung, Emissionsbegrenzung und ggf. Nutzungseinschränkung einzuhalten.

Expositionspfade können durch ein Immobilisierungsverfahren zwar abgeschnitten werden, bei empfindlichen Nutzungen bleibt jedoch das potentielle Risiko der Schadstoffe im immobilisierten Material erhalten.

Sicherungsmaßnahmen mittels Immobilisierung können daher prinzipiell überall dort angewandt werden, wo

- keine empfindlichen Nutzungen vorliegen und
- die einzelfallbezogenen Mindestanforderungen eingehalten werden.

Demzufolge können für Sanierungsmaßnahmen mit Immobilisierung von Schadstoffen und Wiedereinbau am Standort keine generellen Werte vorgegeben werden, sondern diese sind einzelfallspezifisch nach der in der Informationsschrift der LfU Baden-Württemberg vorgegebenen Weise zu ermitteln.

Als Problem bleibt jedoch bestehen, daß zur Prüfung, ob durch eine Immobilisierung der Schadstoffe die Sanierungsziele erreicht werden können, als einziges genormtes Prüfverfahren z.Zt. nur der DEV S4-Test herangezogen werden kann, der für diese Aufgabenstellung nur unzureichend geeignet ist.

4.6.2 Prüfung von Immobilisierungsprodukten bei Einstufung als Abfall

4.6.2.1 TA Abfall

Sollen Immobilisierungsprodukte nicht wieder am Standort eingebaut, sondern auf eine Deponie verbracht werden, sind sie als Abfall zu betrachten und an ihren Einbau die Anforderungen der Zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz **TA Abfall**, Teil 1 vom 12.03.1991 (sog. TA Sonderabfall) zu stellen. Diese Anforderungen gelten allerdings nur im Rahmen der Übergangsvorschriften. Die Immobilisierung ist dort als zusätzliche Barriere gedacht. In Anhang H ist die **Eignungsprüfung für verfestigte Abfälle** beschrieben. Dort wird u.a. gefordert, daß

- das Verfestigungsmittel selbst die Zuordnungswerte aus Anhang D einhält,
- die Abfälle homogen sind,
- flüssige Abfälle ausgeschlossen sind,
- das verfestigte Produkt nach Anhang B, Nr. 2 zu untersuchen ist.

Bei der Eignungsprüfung steht das Auslaugverhalten im Vordergrund. Gemäß Anhang H muß die Menge an ausgelaugten Substanzen signifikant geringer sein als beim Originalabfall. Die Beurteilung bezieht sich auf den Originalabfall, d.h. die Zugabe von Zuschlagstoffen und Anmachwasser sind rechnerisch in Abzug zu bringen. Darüberhinaus sind auch zu bestimmen:

- die Festigkeit (nach DIN 18136, 9/87)
- die Durchlässigkeit (nach DIN 18130, T 1, 11/89)

Anhang B (Probenahme und Analyseverfahren) der TA Abfall verweist bezüglich der Probenahme auf die LAGA-Richtlinien, die unter bestimmten Einschränkungen, welche in Anhang B genannt werden, anzuwenden sind:

- PN 2/78 und PN 2/78 K: Richtlinie zur Entnahme und Vorbereitung von Proben aus festen, schlammigen und flüssigen Abfällen (Stand 5/79)
- Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen (Stand 12/83)

Ferner sind dort die Analyseverfahren genannt, nach denen die in Anhang D genannten Parameter zu ermitteln sind, die ihrerseits Grundlage zur Eignungsprüfung und Zulassung von Verfestigungsverfahren sind.

In Tabelle 4.5 sind Zuordnungswerte und Analyseverfahren gegenübergestellt.

Die in Anhang H und D beschriebenen Kriterien reichen in der Praxis bisweilen nicht aus, um alle sich bei der Anwendung von Verfestigungsverfahren ergebenden Fragen zu beantworten [Lit:4.2]:

- Es fehlen Hinweise, wie in der Eignungsprüfung die Mischung (mit oder ohne vorherige Zerkleinerung des Ausgangsmaterials) und wie die Verfestigung selbst durchgeführt werden muß.
- Es fehlen Vorgaben der Prüfkörpergeometrie für die Festigkeit- und Durchlässigkeitsprüfung.
- Es fehlen Angaben zu den Prüfterminen.
- Es werden keine Angaben gemacht, welche Anforderungen an die Durchlässigkeit des verfestigten Materials in Anlehnung an die DIN 18130 zu stellen sind.
- Es gibt keine Angaben, welche grundsätzlichen Kriterien zur Auswahl/Beurteilung einzelner Verfestigungsverfahren heranzuziehen sind.
- Es gibt keine Aussagen über eine Langzeitbewertung. *

* Fehlt mit Absicht, da auch nicht für die übrigen Abfälle vorgesehen

Der Grund für die Beschränkung der Anforderungen auf ein Minimum liegt darin, daß in der TA Abfall der Immobilisierung durch Abfallverfestigung lediglich die Funktion einer zusätzlichen Barriere zugeordnet ist.

Tabelle 4.5: TA Abfall, Teil1, Anhang H; Prüfvorschriften nach Anhang B Nr. 2 und Zuordnungskriterien nach Anhang D

Parameter	Verfahren	Zuordnungswert
Flügelscherfestigkeit	DIN 4096 (Mai 80)	$\geq 25 \text{ kN/m}^2$
Axiale Verformung	DIN 18127 (Mai 87)	$\leq 20 \text{ %}$
Bruchfestigkeit (Fließwert) Einaxiale Druckfestigkeit	DIN 18136 (März 87)	$\geq 0,05 \text{ MN/m}^2$
Durchlässigkeit	DIN 18130, Teil 1 (Nov. 89)	
Glühverlust des Trockenrückstandes der Originalsubstanz	DIN 38414-S3 (Nov. 85)	$\leq 10 \text{ Gew.-%}$
Extrahierbare lipophile Stoffe	DIN 38409-H17 (Mai 81) gravimetrische Bestimmung LAGA-Richtlinie KW 85 (Stand Febr. 1990) / Extraktion	$\leq 4 \text{ Gew.-%}$
Eluatherstellung	DIN 38414-S4 (Okt. 84) ^x	
pH-Wert des Eluates	DIN 38404-C5 (Jan. 84)	4-13
Leitfähigkeit des Eluates	DIN 38404-C8 (Sept. 85)	$\leq 100.000 \text{ }\mu\text{S/cm}$
TOC im Eluat	DIN 38409-H3-1 (Juni 83)	$\leq 200 \text{ mg/l}$
Phenole im Eluat	DIN 38409-H16-3 (Juni 84)	$\leq 100 \text{ mg/l}$
Arsen im Eluat	DIN 38405-D18 (Sept. 85)	$\leq 1 \text{ mg/l}$
Blei im Eluat	DIN 38406-E6-1 (Mai 81)	$\leq 2 \text{ mg/l}$
Cadmium im Eluat	DIN 38406-E19-1 (Mai 81)	$\leq 0,5 \text{ mg/l}$
Chrom-VI im Eluat	DIN 38405-D24 (Mai 87)	$\leq 0,5 \text{ mg/l}$
Kupfer im Eluat	DIN 38406-E21 (Sept. 89)	$\leq 10 \text{ mg/l}$
Nickel im Eluat	DIN 38406-E21 (Sept. 80)	$\leq 2 \text{ mg/l}$
Quecksilber im Eluat	DIN 38406-E12-3 (Juli 80)	$\leq 0,1 \text{ mg/l}$
Zink im Eluat	DIN 38406-E8-1 (Okt. 80)	$\leq 10 \text{ mg/l}$
Fluorid im Eluat	DIN 38405-D4-1 (Juli 85)	$\leq 50 \text{ mg/l}$
Ammonium im Eluat	DIN 38406-E5-1 (Okt. 83)	$\leq 1.000 \text{ mg/l}$
Chlorid im Eluat	DIN 38405-D1 (Dez. 85)	$\leq 10.000 \text{ mg/l}$
Cyanide, leicht freisetzbar, im Eluat	DIN 38405-D14-2 (Dez. 88) Bei sulfidhaltigen Abfällen erfolgt die Bestimmung nach DIN 38405-D13-2 (Feb. 81)	$\leq 1 \text{ mg/l}$
Sulfat im Eluat	DIN 38405-D5-2 (Jan. 85)	$\leq 5.000 \text{ mg/l}$
Nitrit im Eluat	DIN 38405-D10 (Feb. 81)	$\leq 30 \text{ mg/l}$
AOX im Eluat	DIN 38409-H14 (März 85)	$\leq 3 \text{ mg/l}$
Wasserlöslicher Anteil	DIN 38409-H1-2 (Jan. 87)	$\leq 10 \text{ Gew.-%}$
Heizwert	DIN 51900 T1, 2, 3 (Aug. 77) E DIN 51900, T1 (Mai 88)	

^x **Folgende Ergänzungen/Abweichungen sind zu beachten:**

- Die Originalstruktur der einzusetzenden Probe sollte weitestgehend erhalten bleiben
- Es soll eine Weithalsglasflasche (10 cm Durchmesser) verwendet werden
- 1 mal pro Minute über Kopf schütteln
- Zentrifugieren oder 250 ml Spritzen mit 0,45- μm -Filter verwenden
- Probekörper von 7 cm Durchmesser und 7 cm Höhe verwenden.

4.6.2.2 Informationsschrift "Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen"

Auf der Grundlage eines Fachgespräches zwischen Fachbehörden des Landes NRW und Anbietern von Verfestigungsverfahren hat das LWA Nordrhein-Westfalen eine Informationsschrift zur "Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen" (LWA-Materialien 1/94, November 1993) erstellt. In dieser Schrift wird die TA Abfall konkretisiert durch Formulierung von Prüf- und Beurteilungskriterien [Lit:4.3]:

Für die **Beurteilung der mechanischen Eigenschaften** sollen herangezogen werden:

- Zerfallsziffer nach Endell
- Druckfestigkeit nach DIN 18136
- Durchlässigkeit nach DIN 18130 Teil 1

Zerfallsziffer nach Endell

Die Wasserbeständigkeit eines Verfestigungsproduktes wird durch die Zerfallsziffer nach Endell bestimmt.

Die Zerfallsziffer darf einen Wert von $z = 2 \%$ nicht überschreiten.

Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit ist in Anlehnung an DIN 18136 an mindestens drei Probekörpern nach 14 und 28 Tagen zu prüfen. Die Probekörper sind zylindrisch mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 100 mm herzustellen. Die Prüfkraft ist mit annähernd konstanter Verformungsgeschwindigkeit von etwa 1 % der Anfangsprobenhöhe je Minute aufzubringen.

Nach Ende der Prüfzeit muß die einaxiale Druckfestigkeit mindestens $1,0 \text{ MN/m}^2$ betragen.

Durchlässigkeit

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f hat bei konstantem hydraulischem Gefälle in Anlehnung an DIN 18130 Teil 1 an einem gesonderten zylinderförmigen Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 100 mm in einer Triaxial-Zelle zu erfolgen. Es ist ein hydraulischer Gradient von $i = 50$ aufzubringen.

Die Durchlässigkeit ist an einem 28 Tage alten Probekörper zu prüfen. Der Versuch ist über einen Zeitraum von mindestens 28 Tagen durchzuführen.

Am Versuchsende muß ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ erreicht werden. Im Prüfzeitraum darf der Durchlässigkeitsbeiwert nur konstante oder fallende Tendenz aufweisen.

Bei Monodeponien oder bei Verfestigungsmaßnahmen, deren Brutto-Abfallmenge > 10.000 t/a ist, sollten begleitende Langzeituntersuchungen (Wirksamkeitskontrolle) hinsichtlich des Auslaugverhaltens durchgeführt werden.

D.h. mit Beginn der Verfestigungsmaßnahme werden zwei gesonderte zylindrische Probekörper (Durchmesser 100 mm, Höhe 100 mm) des Verfestigungsproduktes einer "Langzeitelution" in Triaxialzellen unterworfen. Der für die Proben eingesetzte Abfall soll repräsentativ für die Abfälle der gesamten Verfestigungsmaßnahme sein.

Der Untersuchungszeitraum beträgt mindestens 5 Jahre.

Die im Triaxial-Versuch gewonnenen Eluate sind nach Anhang B auf die Eluatparameter des Anhangs D der TA Abfall, Teil 1 zu untersuchen. Eine direkte Korrelation der Meßwerte aus dem Triaxial-Versuch mit den Werten aus der Elution nach DEV S4 ist nicht gegeben.

Die angefallene Eluatmenge und die hierfür benötigte Zeit sind im Hinblick auf eine Frachtenberechnung zu erfassen. Die erhaltenen Ergebnisse der Eluatuntersuchung sind für eine spätere, dem Verfahren angepaßte Bewertung zu dokumentieren. Bei der Auswertung ist auf die zeitliche Veränderung von Auslaugungsverhalten und k_f -Wert zu achten.

Neben dem Triaxialversuch können auch andere Verfahren angewendet werden, wenn sie zu vergleichbaren Erkenntnissen bei der Beurteilung des Langzeitverhaltens führen.

Die Verfestigung von organischen bzw. organisch belasteten Abfällen mittels mineralisch-hydraulischen Bindemitteln ist nach derzeitigem Kenntnisstand unsicher.

Aufgrund von pH-Wertverschiebungen kann die Löslichkeit einzelner organischer Verbindungen erhöht werden (z.B. Phenolatbildung).

Eine Verfestigung von organischen bzw. organisch belasteten Abfällen kann nur - solange keine entsprechenden Kapazitäten für eine thermische Behandlung zur Verfügung stehen - zeitlich befristet zugelassen werden. Infrage kommen nur Abfälle, bei denen das Verhalten der organischen Matrix hinreichend bekannt ist.

4.6.2.3 Deponieklassen Nordrhein-Westfalen

Der Entwurf einer Richtlinie über die Untersuchung und Beurteilung von Abfällen, Teil 2 des LWA vom Juni 1987 (allgemein als "Deponieklassen" bezeichnet) entspricht in einigen Teilen nicht den geltenden Forderungen der TA Abfall und wird z.Zt. vom LWA überarbeitet [Lit:4.19].

Obwohl nur als Entwurf (Gelbdruck) veröffentlicht, hat diese Richtlinie schnell Verbreitung gefunden. Auch die Ziele der in NRW durchgeführten Altlastensicherungen mittels Schadstoffeinbindung durch Verfestigung orientierten sich bisher an den Deponieklassen.

In der Deponieklassen-Richtlinie werden Anforderungen an das Ablagern von Abfällen bei Vorhandensein bestimmter Stoffkonzentrationen im Eluat unter Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Standortmerkmale und gewisser deponietechnischer Maßnahmen formuliert. Auf dieser Grundlage wurden sechs Deponieklassen vorgeschlagen.

Im Hinblick auf die Bedeutung der Wasserlöslichkeit von Inhaltstoffen als vorrangigem Gefährdungspotential bei der Ablagerung sind die Untersuchungen überwiegend im Eluat vorgesehen.

Die Deponieklassen wurden nach der Durchlässigkeit des Untergrundes unterschieden.

Deponieklasse 1:	Bodenablagerung
Deponieklasse 2:	Mineralstoffdeponie
Deponieklasse 3:	Deponie für Siedlungsabfälle
Deponieklasse 4:	Deponie für Gewerbe- und Industrieabfälle
Deponieklasse 5:	Deponie für Sonderabfälle
Deponieklasse 6:	Untertagedeponie für Sonderabfälle

Bei den Deponieklassen 1 und 2 liegen besondere Sicherheitsbedürfnisse vor. Für diese Klassen sind keine Basisdichtungen vorgesehen, so daß bei erhöhten Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser unmittelbare und irreparable Gewässerbeeinträchtigungen nicht auszuschließen wären.

Bei durchgeführten Altlastensicherungen mittels Verfestigung wurde in NRW in der Regel das Erreichen der Deponieklasse 2 als Ziel der Immobilisierung vorgegeben.

Zugelassene Abfälle für Klasse 2 sind: Bauschutt und Abfälle mit vergleichbaren Inhaltstoffen, die eine geringfügige und vorübergehende, im Ausmaß tolerierbare Veränderung der Gewässer herbeiführen können. Bei den Zulassungskriterien wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß bei Vermutung höherer Gehalte an Inhaltstoffen, die nicht im Eluat erfaßt werden, auf jeden Fall der Absolutgehalt der Inhaltstoffe zur Beurteilung mit herangezogen werden soll.

Die Werte der Deponieklasse 2 können Tabelle 4.6 entnommen werden.

Tabelle 4.6: Werte für Deponieklasse 2 aus dem Entwurf einer Richtlinie über die Untersuchung und Beurteilung von Abfällen, Teil 2 des LWA vom Juni 1987

1. pH-Wert	5,5 – 12
2. Leitfähigkeit	< 300 mS/m
3. CSB	< 50 mg O ₂ /l
4. Fischttest	Eluat unverdünnt negativ

5. Polycyclische Aromaten (PAK)	0,003 mg/l	0,03 mg/kg
6. Gesamtphenol (Phenolindex)	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
7. Kohlenwasserstoffe	1,0 mg/l	10,0 mg/kg
8. EOX (Cl)	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
9. Antimon	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
10. Arsen	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
11. Barium	1,0 mg/l	10,0 mg/kg
12. Beryllium	0,005 mg/l	0,05 mg/kg
13. Blei	0,5 mg/l	5,0 mg/kg
14. Bor	1,0 mg/l	10,0 mg/kg
15. Cadmium	0,05 mg/l	0,5 mg/kg
16. Chrom gesamt	1,0 mg/l	10,0 mg/kg
17. Chrom VI	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
18. Eisen (gelöst)	2,0 mg/l	20,0 mg/kg
19. Kobalt	0,5 mg/l	0,5 mg/kg
20. Kupfer	1,0 mg/l	10,0 mg/kg
21. Mangan	1,0 mg/l	10,0 mg/kg
22. Nickel	0,5 mg/l	5,0 mg/kg
23. Quecksilber	0,005 mg/l	0,05 mg/kg
24. Selen	0,05 mg/l	0,5 mg/kg
25. Silber	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
26. Thallium	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
27. Vanadium	0,2 mg/l	2,0 mg/kg
28. Zink	5,0 mg/l	50,0 mg/kg
29. Zinn	0,5 mg/l	5,0 mg/kg
30. Fluorid (F ⁻)	5,0 mg/l	50,0 mg/kg
31. Ammoniak (N)	4,1 mg/l	41,0 mg/kg
32. Chlorid (Cl ⁻)		*)
33. Cyanide gesamt (CN ⁻)	0,5 mg/l	5,0 mg/kg
34. Cyanide leicht freisetzbar (CN ⁻)	0,1 mg/l	1,0 mg/kg
35. Nitrat (N)	22,6 mg/l	226,0 mg/kg
36. Nitrit (N)	0,3 mg/l	3,0 mg/kg
37. Phosphat (P)	3,3 mg/l	33,0 mg/kg
38. Sulfat (SO ₄ ²⁻)		*)

*) wird durch Leitfähigkeit begrenzt

4.6.3 Prüfung von Immobilisierungsprodukten bei Wiederverwendung

Die Verwendung von Immobilisierungsprodukten aus Altlasten als Baumaterial im Straßen- oder Landschaftsbau sollte aufgrund der rechtlichen und ökologischen Problematik nach Möglichkeit vermieden werden oder besonderen Anforderungen unterliegen. Geeignete Prüfverfahren zur Vorabbeurteilung des Langzeitverhaltens von Produkten mit immobilisierten Schadstoffen liegen nicht vor.

Prinzipiell sollten Immobilisierungsprodukte, die als Baumaterial verwendet werden, mindestens die Prüfkriterien erfüllen, die an Immobilisierungsprodukte bei Wiedereinbau am Standort gestellt werden und zusätzlich einer speziellen Umweltverträglichkeitsprüfung unterzogen werden.

Insbesondere ist hierbei der Schadstoffart und ihrem Gefährdungspotential unabhängig vom Auslaugverhalten Rechnung zu tragen. Die Einsatzmöglichkeiten werden überdies durch Verstärkung des Bauschuttrecycling eingeschränkt.

Richtlinien, die darüberhinaus zu einer Bewertung herangezogen werden können, sind:

- Verwaltungsvorschrift des Verkehrsministeriums und des Umweltministeriums über die "Vorläufigen Bedingungen zur Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch im Straßenbau Baden-Württemberg"
- RAL-Richtlinie RG 501/2 "Aufbereitung zur Wiederverwendung von kontaminierten Böden und Bauteilen"

4.6.3.1 VwV "Vorläufige Bedingungen zur Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch im Straßenbau Baden-Württemberg"

Die "VwV Vorläufige Bedingungen zur Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch im Straßenbau" vom 04.01.1993 konkretisiert die bereits in der "Informationsschrift des Ministeriums für Umwelt zur Entsorgung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt" vom 13.07.1988 vorgesehene Verwertungsmöglichkeit von teerhaltigem Straßenaufbruch. Danach eignet sich teerhaltiger Straßenaufbruch für die Wiederverwendung, wenn besondere Maßnahmen das Austreten schädlicher Stoffe unmöglich machen. Nach Ziffer 4 dieser VwV ist das Ziel der Verwertung:

das durch Fräsen gewonnene und zerkleinerte **Material** mit einem hydraulischen oder bituminösen Bindemittel in kaltem Zustand so zu **umhüllen und beim Einbau so zu verdichten**, daß eine **Elution schädlicher Stoffe ausgeschlossen** werden kann.

Die Vorschrift enthält nur allgemeine Angaben darüber, ob und mit welchen Verfahren und nach welchen Kriterien das Ziel "Ausschluß der Elution schädlicher Stoffe" zu prüfen ist. Danach ist:

- um eine größtmögliche Dichte der eingebauten Schicht zu erreichen, im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung die optimale Zusammensetzung des Gemisches zu bestimmen,
- für die Durchführung ein auf diesem Gebiet erfahrendes und vom Verkehrsministerium anerkanntes Institut heranzuziehen.

Als Einschränkung für die Anwendung werden genannt:

- Einbau nur außerhalb einer Schutzzone von Wasser-schutzgebieten. Ausnahme: teerhaltiges Material, das in Schutzzone III bereits angetroffen wird, kann in verfestigter Form wiederverwendet werden, da eine Verbesserung gegenüber dem vorherigen Zustand vorliegt.
- Der höchste zu erwartende Grundwasserstand darf nicht höher als 1 m unterhalb der verfestigten Schicht aufsteigen.
- Der Einbau verfestigter teerhaltiger Materialien sollte in Innerortsstraßen aufgrund der Gefahr häufiger Aufgrabungen unterbleiben.
- Die fertiggestellte, verfestigte Schicht ist gegen seitlich eindringendes Wasser mit einem geeigneten Material abzudichten.

In einer weiteren Verwaltungsvorschrift, den "Vorläufigen Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg" vom 15.11.1991, werden Anforderungen und Prüfverfahren für das Recyclingmaterial beschrieben. Die Vorschrift bezieht sich jedoch auf die Verwertung von unbelastetem Straßenaufbruch und Bauschutt für eine Verwendung in Tragschichten ohne Bindemittel. Die dort beschriebene Methode der Eluatherstellung in Anlehnung an DEV S4 ist für verfestigte Produkte nicht geeignet.

4.6.3.2 RAL RG 501/2

Unter dem Dach des Deutschen Institutes für Gütesicherung e.V. (RAL) hat die Gütegemeinschaft Recycling-Baustoffe e.V. die Richtlinie "Güte- und Prüfbestimmungen für die Aufbereitung zur Wiederverwendung von kontaminierten Böden und Bauteilen **RAL - RG 501/2** (Ausgabe August 1991)" erarbeitet. Diese regelt Art, Umfang und Häufigkeit der Prüfungen für die Aufbereitung kontaminierter Böden und Bauteile [Lit:4.17].

In Anlage 1, Tabelle 1 werden in einer Parameterliste drei Güteklassen nach zulässigen Schadstoffgehalten in der Trockensubstanz oder im Eluat unterschieden. Die Prüfungen sollen analog DIN-Normen und DEV-Methoden erfolgen. Den einzelnen Parametern sind Sicherheitsstufen zugeordnet. Die Güteklassen sind wie folgt definiert:

- Güteklasse 1: Die Werte für Schwermetalle liegen im Bereich der geogenen Grundlast. Die Materialien sind generell einsetzbar, wenn dem keine standortspezifischen Bedingungen entgegenstehen.
- Güteklasse 2: Das Material ist grundsätzlich zur Verwendung als Unterboden geeignet. Es ist abzustimmen, ob eine Analyse der relevanten Parameter in der Trockensubstanz, im Eluat oder in beiden durchzuführen ist.
- Güteklasse 3: Das Material ist grundsätzlich zur Verwendung geeignet für die Verfüllung von Gruben und Aufschüttungen mit abgedeckter Oberfläche unter Beachtung der Grundwasserverhältnisse, wenn dem keine standortspezifischen Bedingungen entgegenstehen.

Die Sicherheitsstufen orientieren sich an der Einteilung der Schadstoffe nach der Gefahrstoffverordnung und dienen als Orientierung für die beim Umgang mit diesen Baumaterialien zu ergreifenden organisatorischen und personenbezogenen Arbeitsschutzmaßnahmen.

Für die Anwendung von Immobilisierungsverfahren sind insbesondere die unter Nr 3.3 aufgestellten Forderungen relevant, da dort Grenzen für die Zugabe von Zuschlagstoffen genannt werden. Unter Nummer 3.3 heißt es:

- Die Zugabe von Zuschlagstoffen zur Verfahrensverbesserung bei der Aufbereitung in einer Gesamtmenge von > 5 Gew. % ist unzulässig, wenn ein Schluffanteil ($< 0,063$ mm) des aufzubereitenden Gutes von < 20 Gew.-% vorliegt.
- Die Zugabe von Zuschlagstoffen zur Verfahrensaufbesserung bei der Aufbereitung in einer Gesamtmenge von bis zu < 30 Gew.-% ist nur zulässig bei einem Schluffanteil > 20 Gew.-% im aufzubereitenden Gut.
- Zugaben von Zuschlagstoffen bei der Aufbereitung in einer Gesamtmenge > 30 Gew.-% sind grundsätzlich unzulässig.

Erfahrungen aus dem Altlastenbereich über die Anwendung der Richtlinie liegen bisher nicht vor.

5 Stand der Technik bei Immobilisierungsverfahren

Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten werden z. Zt. in Deutschland von einer begrenzten Zahl von Firmen angeboten. In der diesem Kapitel zugrundeliegenden Firmenumfrage wurden national 45 Unternehmen und international zusätzlich 24 Unternehmen angefragt, die in Publikationen oder nach eigenen Angaben Verfahren zur Immobilisierung bzw. Verfestigung von Schadstoffen anbieten.

Nach Auswertung der Fragebögen und Rücksprachen mit den Unternehmen entstand die folgende Übersicht, in der nur Unternehmen enthalten sein sollen, die über tatsächliche Kapazitäten verfügen; die Übersicht erhebt jedoch keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Die aufgeführten Unternehmen kommen aus den Branchen: Bauindustrie, Zementindustrie, Abfallbehandlung und Dienstleistung.

Die Auswahl der im Anschluß an die Firmenübersicht vorgestellten Anbieter erfolgte unter den Gesichtspunkten:

- Erfahrung in der Altlastenbearbeitung
- Unterschiedlichkeit der angebotenen Verfahren

Mit Aufnahme in die Einzelbeschreibung ist keine Bewertung seitens der Autoren verbunden.

Eine vollständige Übersicht mit allen von den Anbietern gelieferten Informationen befindet sich im Anhang des Handbuches. Dort sind neben Anbietern für Verfahren zur Behandlung von Materialien aus Altlasten auch Anbieter aufgeführt mit Referenzen aus dem Bereich der Sonderabfälle (Schlämme, Stäube). Die Referenzen ausländischer Anbieter beziehen sich fast ausschließlich auf den Bereich Sonderabfälle.

Die zu den einzelnen Verfahren von den Anbietern genannten Kennwerte (Durchlässigkeit, Druckfestigkeit) sind nur bedingt vergleichbar. Die Kennwerte beziehen sich auf unterschiedliche Ausgangsmaterialien und Verfahren und werden z.T. in Technikumsversuchen ermittelt oder sind Durchschnittswerte mehrerer durchgeführter Maßnahmen.

Weiterhin ist anzumerken, daß eine Reihe der eingesetzten Bindemittel und Additive unter bestimmten Produktnamen angeboten werden, wobei die Zusammensetzung dieser Zuschlagstoffe von den Anbietern nicht bekannt gegeben wird.

Tabelle 5.1: Übersicht Verfahrensanbieter (Teil 1)

Firma	Anschrift Telefonnummer	Verfahrens- name	Prinzip	Behandelbare Materialien	Schadstoffe	Bemerkungen
Heinrich Beker GmbH	Braker 74 46238 Bottrop 02041-6906-0	HEIDE- WERNER (Lizenz)	Verfestigung	Materialien jeglicher Konsistenz	Organische und anor- ganische Schadstoffe	Bindemittel: ausge- wählte Braunkohlenflu- gaschen, ggf. in Verbin- dung mit hydraulischen Bindemitteln
Bilfinger + Ber- ger Umweltver- fahrenstechnik GmbH	Bessel 9 68219 Mannheim 0621-87599-20		Verfestigung	Böden, Schlämme, Aschen	Organische und anor- ganische Schadstoffe	Zusätzlich Anbieter von in situ-Verfestigung durch Injektion
Biodec GmbH	Am Alten Bhf. 5 38122 Braun- schweig 0531-804-0		Fixierung	Böden, Schlämme	Schwermetalle	Das behandelte Material wird nicht verfestigt
Dyckerhoff AG	Biebricher 69 65203 Wiesbaden 0611-676-0	LIPIDUR	Verfestigung	Ölrückstände, Benzinrückstände	Schwermetalle, Mischkontaminationen	Eigene Bindemittelher- stellung
G.A.A. Ges. für Abfallaufberei- tung GmbH	Berliner 87 27232 Sulingen 04271-6060	HDT	Verfestigung	mineralische Ab- fallstoffe, Böden, Schlämme, Aschen	Schwermetalle, schwerflüchtige KW, MKW	HDT steht für Hydro- phobierung durch Trä- gerstoffe
GEODUR GmbH	Wildenbruch 15 07745 Jena 03641-675520	GEODUR	Verfestigung	Böden, Aschen, Schlacken, Bauschutt, Rückstandsmaterialien u.a.	Organische und anor- ganische Schadstoffe	Eigene Entwicklung
Heidelberger Zement AG	Im Breitspiel 19 69126 Heidelberg 06221-347-171	DEPOCRETE	Verfestigung	Rauchgasreini- gungsstäube, MVA- Stäube, Schlämme, Böden, teerhaltiger Straßenaufbruch, z.T. Salze	Schwermetalle, Koh- lenwasserstoffe	Eigene Bindemittelher- stellung
Heitkamp Um- welttechnik GmbH	Heinrich 67 44805 Bochum 0234-87905-0	HEITKAMP- Kombiverfah- ren	Verfestigung	Böden, Schlämme, Bauschutt, Aschen	organische und anor- ganische Schadstoffe	Patentiertes Kombiver- fahren

Tabelle 5.1: Übersicht Verfahrensanbieter (Teil 2)

Firma	Anschrift Telefonnummer	Verfahrens- name	Prinzip	Behandelbare Materialien	Schadstoffe	Bemerkungen
Hochtief Umwelt AG	Huyssenallee 86-88 45128 Essen 0201-1753-5		Verfestigung	Böden, Schlämme, Aschen	Schwermetalle, orga- nische Schadstoffe, Cyanide	Eigene Entwicklung
IFUWA GmbH	Lindbergh 9-13 85051 Ingolstadt 0841-973930		Verfestigung	Böden, Bauschutt	Schwermetalle	Eigene Entwicklung
INCA Baustoff- technik GmbH	Waffenschmidt 4 50767 Köln 0221-5905754	INCA	Verfestigung	MVA-, SAV- Filterstäube, Gicht- gasstäube, Böden	Schwermetalle	Verfestigung durch Brikettierung
Keller Grundbau GmbH	Becklinger 21 29683 Fallingbo- stel 05163-299-0	SOILCRETE	in situ- Verfestigung	Böden	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe	Soilcrete-Verfahren auch in Kombination mit anderen Verfahren an- wendbar (Bodenwäsche, biologische Verfahren)
Leo Consult GmbH	Weser 84 28757 Bremen 0421-650550	HDT- Verfahren, DCR- Verfahren	Verfestigung	Öl-, Bohr-, Lack-, Klär- schlämme; Flußsedi- mente, Säureharze	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe	
Pokker Bodensa- nierung GmbH	Eibacher Haupt 121 90451 Nürnberg 0911-96379-0	PBS-Verfahren	Verfestigung	Böden	Schwermetalle, PAK, PCB, Cyanide und andere	Patentiertes Verfahren, Dosierung der Binde- mittel im Niedrigbereich
Rethmann Sanie- rungsdienste GmbH	Diesel 3 44805 Bochum 0234-850133		Verfestigung	Schlämme, Böden	Schwermetalle, Koh- lenwasserstoffe, Cya- nide	
E. Schwenk Zementwerke KG Hauptverwaltung	Hindenburggr. 15 89077 Ulm/Donau 0731-33-0	Schwenk Re- cyclingbinder, Deponiebinder	Verfestigung	MVA-Rostaschen, Ausbauasphalt, Bau- schutt, Boden, Stäube, Schlämme	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe	Anbieter von Spezial- bindemittel

Tabelle 5.1: Übersicht Verfahrensanbieter (Teil 3)

Firma	Anschrift Telefonnummer	Verfahrens- name	Prinzip	Behandelbare Materialien	Schadstoffe	Bemerkungen
Leonard Weiss GmbH & Co	Postfach 1565 74564 Crailsheim 07951-33-0	PETRIFIZIE- RUNG	Verfestigung	Boden, Bauschutt	Schwermetalle	Technikumsversuche, Großanlage in Planung
Ed. Züblin AG	Albstadtweg 3 70567 Stuttgart 0711-7883-0		Verfestigung	Boden, Bauschutt	Schwermetalle, PAK	Technikumsversuche, Großanlage vorhanden
Chemfix Interna- tional Inc.	3838 Causeway Blvd. Suite 2500 Metairie, LA 70002, USA	CHEMFIX	Verfestigung	verschiedene Schläm- me, feste und flüssige Abfälle	Schwermetalle, Petrochemikalien (geringe Konzentra- tionen)	Anbieter seit 17 Jahren
De Ruyter Mi- lieutechniek B.V.	Postfach 14 NL-1160 AA Zwanenburg 0031-2907-8011	DRM / GFS	Verfestigung	Industrielle Abfall- schlacken	Schwermetalle, Öl, Cyanide, PCB, HCH	Behandlung von Schlämmen in mobiler Anlage
Elkem Technolo- gy	PO Box 4376 Torshov N-0402 Oslo 4 47 2 45 06 00		Verglasung	Schlacken, Flugaschen	Schwermetalle	Technikumsversuche
Esdex B.V.	Postfach 8447 NL-3503 RK Utrecht	SOLIROC	Verfestigung	anorganische Abfälle	Schwermetalle	Stationäre Anlagen in Schweiz, Italien, Belgi- en, Spanien
Solidiwaste Inc.	830 Lee Street Manhattan KS 66502, USA	URRICHEM	Verfestigung	verschiedene mit max. 10 % organischem Schadstoffgehalt	Schwermetalle, Öl, Fette	
Techform Engi- neering A.G.	Hardhofstr. 15 CH-8424 Em- brach 01-8656586	IVR	Verfestigung	Rauchgasreinigungs- rückstände von MVA, Metallhydroxid- schlämme, Abwasser- schlämme	Schwermetalle	7 großtechnische Anla- gen in Deutschland und Schweiz

5.1 On site/off site-Verfahren mit Schadstoffeinbindung

5.1.1 Verfestigung mittels HDT-Verfahren

(Quelle: Firmenangaben)

Das **HDT-Verfahren** (Hydrophobierung durch Trägerstoffe) ist eine gemeinsame Entwicklung der Herren R. Leo, Bremen und H. Tober, Sulingen.

Die Fa. **G.A.A. mbH** (Gesellschaft für Abfallaufbereitung), Sulingen, führt als Verfahrensanbieter Verfestigungen nach dem HDT-Verfahren durch.

Anwendung

Das HDT-Verfahren wird in erster Linie angewandt zur Verfestigung von mineralischen Abfällen, Böden, Schlämmen und Aschen, welche mit organischen und anorganischen Schadstoffen belastet sind.

Das Verfahren kann on site sowie off site durchgeführt werden.

Verfahrensbeschreibung

Die Verfestigung wird nach entsprechenden Vorversuchen in einer mobilen Mischanlage durchgeführt.

Recyclingbinder, hydraulische und organische Bindemittel sowie Additive werden bis zu 30 Gew.-% dem zu behandelnden Material in einem intensiven Homogenisierungsprozeß zugegeben. Als Additive kommen u.a. hydrophobierende Stoffe zur Anwendung.

Die Volumenänderung ist abhängig vom Ausgangsmaterial, der Rezeptur und einer eventuellen Verdichtung.

Die Aushärtezeit ist abhängig von den eingesetzten Zuschlagstoffen.

Die Festigkeit des Endproduktes beträgt 2,5 - 150 MN/m² bei Durchlässigkeiten bis zu 10⁻¹¹ m/s.

Die Kapazität des Verfahrens beträgt je nach Anlage und Material 2 - 70 t/h.

Die Vorbereitungszeit (Eignungsprüfung) dauert bis 3 Monate, die Genehmigung je nach Verfahren 3 bis 12 Monate, die Aufstellung je nach Anlage und Objekt 2 Tage bis mehrere Wochen. Aussagen zur Wirtschaftlichkeit können nur im konkreten Einzelfall gemacht werden.

Prüfung

Elutionsversuche, die Prüfung der Festigkeit, Durchlässigkeit und Frostbeständigkeit werden gemäß der jeweils gültigen geforderten Vorschriften (Land, Bundesland) durchgeführt.

Die Zerfallsbeständigkeit des Verfestigungsprodukts bei Unterwasserlagerung wird nach Endell geprüft.

Entsorgung

Das Verfestigungsprodukt kann als monolithischer Körper auf einer Deponie abgelagert werden.

Im Bauwesen kann das Verfestigungsprodukt als Schüttgut, Zuschlagstoff und als gebundene Tragschicht verwendet werden.

Durchgeführte Maßnahmen

- Aufbereitung von über 100.000 t ölverunreinigter Böden zur Wiederverwendung im Bauwesen
- Aufbereitung von 2.000 t durch Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle belastetem Boden auf einem Schrottplatz, Verwendung als Unterbau am Standort, 1988
- Inseln Nordseeküste, Behandlung von 150 t durch Rohöl verunreinigtem Sand/Schlamm, Verwendung als Unterbau für Lagerplatz auf Deponie, Mai 1990
- Behandlung von 600 t durch Kohlenwasserstoffe und PAK belastetem Boden einer Gerberei, Verwendung als Unterbau für Lagerplatz auf Deponie, Dezember 1990
- Behandlung von 900 t mit PAK und Teerölen belasteten Schlammes aus Bodenwäsche, Gaswerk, Deponierung des Materials, April 1991
- Behandlung von 3.800 t durch Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle belasteten Bodens eines Gewerbestandes, Wiedereinbau als gebundene Tragschicht bei einer Baumaßnahme, Juni 1991
- Behandlung von ca. 10.000 t mit Rohöl belasteten Bohrschlamms einer Bohrschlamm-lagune, Wiedereinbau, Begrünung, Mai 1992
- Behandlung von ca. 30.000 t mit Roherdöl verunreinigtem Boden und Kies aus ehemaliger Ölaufbereitung, Verwendung auf diversen Baustellen und Wiedereinbau auf dem Grundstück, seit Juni 1992

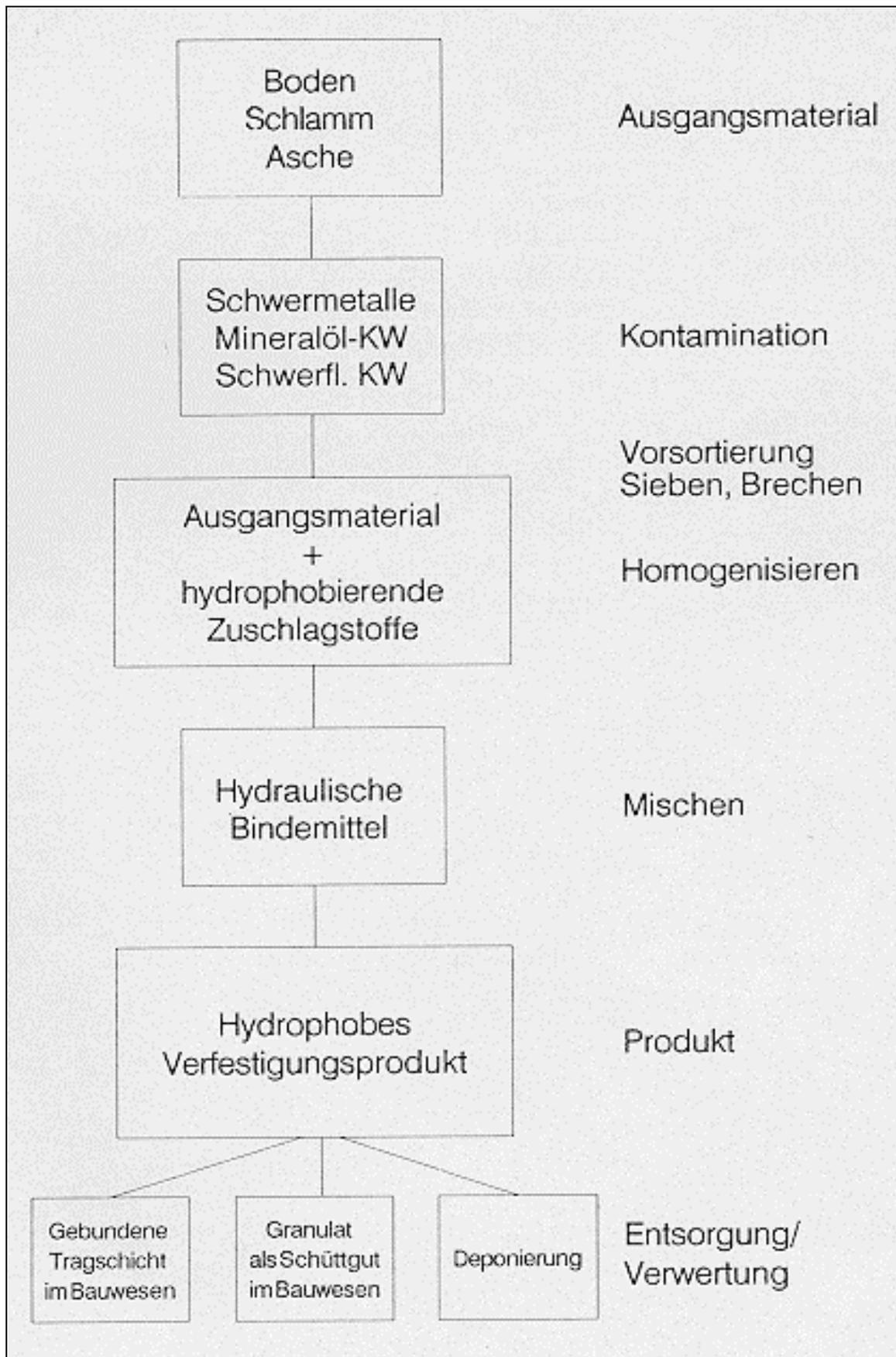


Bild 5.1: Verfestigung mit HDT-Verfahren

Zusammenfassung Verfestigung mittels HDT-Verfahren

Firma	G.A.A. Gesellschaft für Abfallaufbereitung mbH Berliner Str. 87 27323 Sulingen
Verfahren	HDT-Verfahren (Hydrophobierung durch Trägerstoffe)
Zuschlagstoffe	Recyclingbinder, hydraulische und organische Bindemittel, Additive
Schadstoffgruppen	Schwermetalle, schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe, MKW
Gewichtszunahme	max. 30 %
Volumenvergrößerung	abhängig vom Ausgangsmaterial und der Rezeptur
Aushärtezeit	abhängig vom Bindemittel
Festigkeit	2,5 - 150 MN/m ²
Durchlässigkeit	bis 10 ⁻¹¹ m/s
Prüfung	Elutionsversuche, Festigkeit, Durchlässigkeit, Frostbeständigkeit gemäß der jeweils gültigen geforderten Vorschriften; Zerfallsbeständigkeit nach Endell
Kapazität	je nach Anlage und Material 2 - 70 t/h
Wirtschaftlichkeit	abhängig vom Einzelfall

5.1.2 Verfestigungsverfahren nach Heide/Werner

(Quelle: Firmenangaben)

Das von Heide und Werner patentierte Verfestigungsverfahren ist gekennzeichnet durch die Verwendung von ausgewählten Braunkohleflugaschen als Bindemittel.

Das Verfahren wird von der Fa. **Heinrich Becker GmbH**, Bottrop, angeboten.

Anwendung

Das Verfahren wird am Altlastenstandort mit einer semi-mobilen Anlage betrieben.

Das Verfahren wird angewandt zur Verfestigung von organisch und/oder anorganisch kontaminierten Materialien. Die kontaminierten Materialien können in fester, staubförmiger und flüssiger Form vorliegen.

Neben der Verfestigung von kontaminierten Böden sind weitere Anwendungsgebiete z.B. das Einbinden von Säureteeren und Gasreinigungsmassen.

Verfahrensbeschreibung

Die Verfestigung des kontaminierten Materials erfolgt mit ausgewählten Braunkohleflugaschen ggf. in Verbindung mit hydraulischen Bindemitteln.

Der kontaminierte Boden wird mit einem homogenen Aschebrei in einem Zwangsmischer intensiv vermischt. Dabei wird das einzelne Bodenkorn allseitig von der Asche umhüllt und

eingebunden. Die Braunkohlenasche adsorbiert hydrophobe Substanzen und fixiert lösliche Schwermetallsalze.

Die Wasserdurchlässigkeit reduziert sich auf Werte zwischen 10^{-8} und 10^{-9} m/s. Die abnehmende Wasserdurchlässigkeit des Verfestigungsproduktes resultiert u.a. aus der Neubildung von Calcit- und Ettringitmineralen im Restporenraum.

Bei einer maximalen Zugabe von 100 Gew.-% Bindemittel ergeben sich Volumenvergrößerungen von 20 bis 25 %.

Es sind Topfzeiten zwischen 20 und 60 Minuten einstellbar, die Befahrbarkeit mit schwerem Gerät ist in der Regel nach 24 h möglich.

Die Druckfestigkeit des Verfestigungsproduktes ist $> 0,05 \text{ MN/m}^2$.

Die Kapazität des Verfahrens beträgt 10 - 30 t/h.

Aussagen zur Wirtschaftlichkeit sind nur im konkreten Einzelfall möglich.

Prüfung

Die Prüfung des Verfestigungsproduktes erfolgt durch:

- Elutionsversuche nach DEV S4
- Druckfestigkeit nach DIN 18136
- Durchlässigkeit nach DIN 18130
- Zerfallsziffer nach Endell

Entsorgung

Das Verfestigungsprodukt ist uneingeschränkt deponiefähig. In Abhängigkeit von Standort und Projekt ist das verfestigte Material zum Wiedereinbau am Standort geeignet.

Desweiteren ist eine Verwendung als Baumaterial, z.B. in Unterbauten von Straßen und Parkplätzen sowie in Lärmschutzwällen, möglich.

Durchgeführte Maßnahmen

- Sanierung der ehem. Kokerei "Consolidation" Gelsenkirchen an Ort und Stelle, ca. 20.000 m^3 zu behandelnder stark kontaminierter Boden
- Einkapselung von ca. 8.000 m^3 Säureharz der ehem. Benzolfabrik "Hansemann" in Dortmund an Ort und Stelle
- Einbindung von ca. 7.000 m^3 stahlwerkspezifisch kontaminierter Bodenmassen der "Henrichshütte", Hattingen am Ort
- Fixierung von ca. 60.000 l "Teersäuren" zum Zwecke der Deponierung, Duisburg
- Einbinden von ca. 16.000 t problematischer "Gasreinigungsmassen" aus Kokereien und schadlose Ablagerung auf einer Bergehalde
- Einkapselung von 500 t PCB kontaminierter Brandrückstände der Versuchsgrubengesellschaft "Tremonia" in Dortmund, unter Tage

- Einbindung von jährlich 24.000 t Mn-Wäsche-Stäube aus Hochofenbetrieb zum Zwecke der Deponierung (Dauerauftrag)

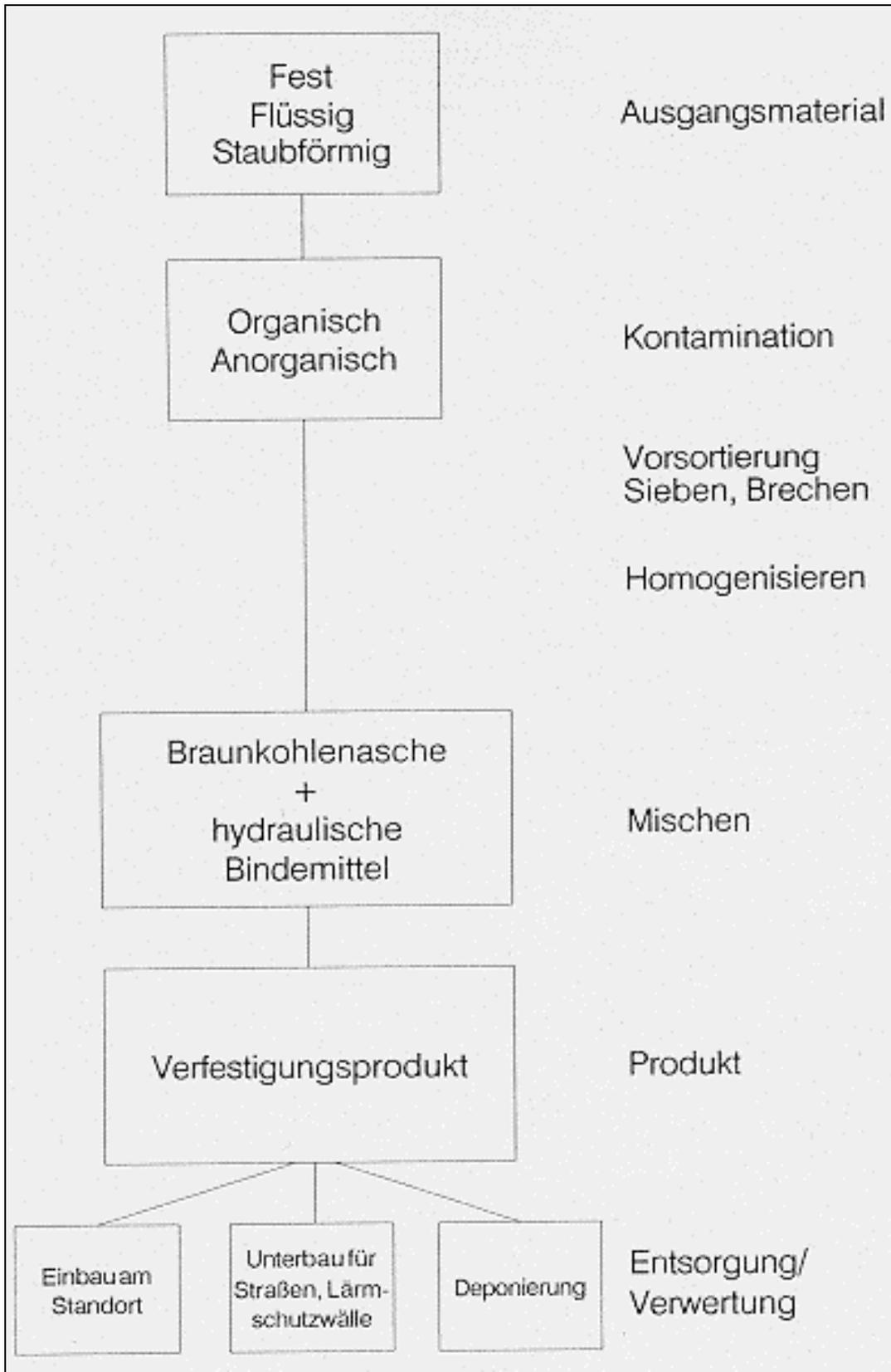


Bild 5.2: Verfahrensschema Heide/Werner-Verfahren

Zusammenfassung Verfestigungsverfahren nach Heide/Werner

Firma	Heinrich Becker GmbH Brakerstr. 74 46238 Bottrop
Verfahren	Heide/Werner-Verfahren, Lizenz Heinrich Beker GmbH
Zuschlagstoffe	Ausgewählte Braunkohleaschen, ggfls. in Verbindung mit hydraulischen Bindemitteln
Schadstoffgruppen	organisch und/oder anorganisch
Gewichtszunahme	max. 100 %
Volumenvergrößerung	20 - 25 %
Aushärtezeit	Topfzeiten einstellbar zwischen 20 und 60 min, Befahrbarkeit mit schwerem Gerät in der Regel nach 24 h
Festigkeit	$> 0,05 \text{ MN/m}^2$
Durchlässigkeit	$K_f = 10^{-8} - 10^{-9} \text{ m/s}$
Prüfung	Elutionsversuche nach DEV S4 Druckfestigkeit nach DIN 18136 Durchlässigkeit nach DIN 18130 Zerfallsziffer nach Endell
Kapazität	10 bis 30 m ³ /h
Wirtschaftlichkeit	abhängig vom Einzelfall

5.1.3 Das Spezialbindemittel-System von Heidelberger Zement

(Quelle: Firmenangaben)

Die Heidelberger Zement AG ist Entwickler und Anbieter für eine Reihe von hydraulisch erhärtenden Spezialbindemitteln zur Konditionierung und Verfestigung von Abfällen, industriellen Nebenprodukten und kontaminierten Böden. Sitz der Gesellschaft ist Heidelberg.

Anwendung

Die Spezialbindemittel sind konzipiert zur Verfestigung von organisch und/oder anorganisch kontaminierten Böden, Schlämmen, Stäuben sowie zur Verfestigung von Recycling- und Sekundärbaustoffen wie z.B. Straßenaufbruch und Bauschutt.

Die Rezepturen der Verfestigungsmittel variieren in Abhängigkeit vom zu immobilisierenden Schadstoff, vom Zustand des kontaminierten Materials und vom Ziel der Maßnahme (Verwertung, Ablagerung).

Die Spezialbindemittel werden unter dem Produktnamen Depocrete angeboten.

Depocrete SM wird angewandt zur Verfestigung von schwermetallbelasteten Böden, Schlämmen und Stäuben. Die Mobilität anderer Schadstoffe wie Salze und organische Schadstoffe wird reduziert.

Depocrete MF dient der Verfestigung von schadstoffbelasteten Stäuben aus der Müllverbrennung oder von Böden, die mit Schwermetallen belastet sind.

Durch die Einbindung in einem hochdichten und natursteinartigen Gefüge werden Schwermetalle und auch lösliche Salze immobilisiert.

Depocrete OS wurde zur Einbindung von Kohlenwasserstoffen in belasteten Schlämmen und Böden konzipiert. Es handelt sich hierbei um ein hydraulisch erhärtendes Bindemittel mit mineralischen Zusätzen hoher Adsorptionsfähigkeit.

Behandeln lassen sich ölhaltige Hafenschlicke und Bohrschlämme, Ölabscheiderrückstände und mit Kohlenwasserstoffen belastete Böden von Altstandorten.

Für andere Schadstoffgruppen lassen sich Spezialmodifikationen von Depocrete auf gezielte Anforderungen hin entwickeln.

Heidelberger Recyclingbinder wurden zur Verfestigung von Sekundärbaustoffen für den Einsatz im Straßenbau konzipiert. Spezielle Recyclingbinder zur Verfestigung von teerhaltigem Ausbaupasphalt und Müllverbrennungsrostaschen werden angeboten [Lit:5.4, 5.5].

Das Einsatzgebiet umfaßt auch die Verfestigung von anderen Reststoffen wie Ausbaubeton, Bauschutt, Kraftwerksflugaschen, Schmelzkammergranulat und Überschußsanden.

Die Verfestigung wird je nach Schadstoffproblem und behördlichen Vorgaben on site oder off site durchgeführt.

Verfahrensbeschreibung

Die Homogenisierung des Mischguts erfolgt in Durchlauf- oder Trogmischern und ist am Standort möglich.

Das Verfestigungsprodukt erreicht bei einer durchschnittlichen Gewichtszunahme von 20 % und einer Volumenzunahme von durchschnittlich 10 % seine Endfestigkeit bei einem Zielwert von $> 5 \text{ MN/m}^2$ nach 28 Tagen.

Der Zielwert der Durchlässigkeit des Verfestigungsproduktes ist $< 10^{-8} \text{ m/s}$.

Die Kapazitäten der Verfestigungsanlagen liegen zwischen 1 und 30 t/h.

Die Verfügbarkeit bzw. Vorbereitungszeit der Verfestigungsanlagen beträgt je nach Größe und behördlicher Genehmigung eine Woche bis zu mehreren Monaten.

Für on site Maßnahmen und großtechnische Versuche stehen mobile Mischanlagen mit einem Durchsatz von 8 t/h zur Verfügung.

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird bedingt durch andere Sanierungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten und ist u.U. ab 10 t gegeben.

Prüfung

Die Kontrolle des Verfestigungserfolges erfolgt mit einem gemäß TA-Abfall modifizierten DEV S4-Verfahren, dem schweizer TVA-Test oder bei Bedarf mit anderen Elutionsversuchen.

Die Festigkeitsuntersuchungen umfassen die Prüfung der einaxialen Druck-festigkeit, der Durchlässigkeit und der Zerfallsziffer nach Endell.

Verfestigungsprodukte, die im Straßenbau verwertet werden, werden zusätzlich auf Frost/Tau-Verhalten geprüft.

Entsorgung

Das Endprodukt wird gemäß TA Abfall, Anhang H bzw. gemäß der TA Siedlungsabfall abgelagert oder erfährt eine Verwendung z.B. im Straßenbau als hydraulisch gebundene Trag-schicht oder beim Bau von Lärmschutzwänden, soweit das zulässig ist.

Durchgeführte Maßnahmen

Auszug aus der Referenzliste für Depocrete-Anpassungen:

- Ölhaltige Schlämme, Consultant, Salach, 1989
- kontaminierte Gießereisande, Industriebetrieb, Geislingen, 1990
- zinkhaltige Aufbereitungsschlämme, Industriebetrieb, Goslar, 1991
- kontaminiertes ehemaliges Hüttengelände, Materialverfestigung, Neunkirchen, 1991
- salzhaltige Filterstäube, Entsorger, Rosenheim, 1991
- verunreinigtes Talkum, Industriebetrieb, Lindau, 1991
- magnesiumhaltige Asbestplatten, Bau-Beratungsstelle, Weimar ,1991
- schwermetall- und salzhaltige Filterstäube, Unternehmer, Kempten, 1992
- Verwertung von teerhaltigen Strahlsanden im Straßenbau, Behörde, Heidelberg, 1992
- zinkkontaminierter Boden, Baufirma, Frankfurt/M., 1992
- Asche aus Klärschlammverbrennung (Industrie), Baufirma, Mannheim, 1992
- hochreaktive Schleifschlämme, Entsorger, Dossenheim, 1992
- Neutralisationsschlämme (Schwermetalle), Industriebetrieb, Netzschkau, 1992

Zusammenfassung Spezialbindemittel-System von Heidelberger Zement

Firma	Heidelberger Zement AG Umwelttechnik Im Breitspiel 19 69126 Heidelberg
Verfahren	Verfestigungsverfahren, Spezialbindemittel, on-site und off-site
Zuschlagstoffe	Mineralische Bindemittel, ggf. Compounds
Schadstoffgruppen	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe, z.T. Salze (RauchgasreinigungsfILTERSTÄUBE)
Gewichtszunahme	durchschnittlich ca. 20 %
Volumenvergrößerung	durchschnittlich ca. 10 %
Aushärtezeit	schadstoffabhängig, Endfestigkeit nach 28 Tagen
Festigkeit	> 5 MN/m ²
Durchlässigkeit	Zielwert < 10 ⁻⁸ m/s
Prüfung	gemäß TA Abfall modifiziertes DEV S4-Verfahren; Schweizer TVA Test Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Zerfallsziffer nach Endell, Frost/Tau-Versuche
Kapazität	1 - 30 t/h
Wirtschaftlichkeit	abhängig von anderen Sanierungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten, u.U. ab 10 t
Verwertung und Entsorgung	Deponierung gemäß TA Abfall Anhang H; Wiederverwertung im Straßenbau als HGT (hydraulisch gebundene Tragschicht), Lärmschutzwand etc.

5.1.4 Das Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp Umwelttechnik

(Quelle: Firmenangaben)

Die Fa. Heitkamp Umwelttechnik GmbH setzt bei Mischkontaminationen oder rein organischen Kontaminationen neben hydraulischen auch organische Bindemittel ein.

Sitz der Gesellschaft ist Bochum.

Anwendung

Das Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp wird in der Regel on site am Altlastenstandort durchgeführt. Angewandt wird das Verfahren zur Verfestigung von Materialien, welche mit anorganischen und/oder organischen Schadstoffen belastet sind. Dies sind:

- pastöse/flüssige Materialien (z.B. Altöle, Farb- und Lackschlamm, Galvanikschlamm, Klärschlamm, Ölschlamm, Teerschlamm, Produktlauge, Säureharz)
- staubförmige Materialien (z.B. Flugaschen, Flugstäube aus MVA und Steinkohlekraftwerken)
- stichfeste/körnige Materialien (z.B. Böden unterschiedlichster Art und Zusammensetzung mit Schadstoffgehalten wie PAK, PCB, CKW, MKW, BTX, Phenole, Kresole, Schwermetalle)

Verfahrensbeschreibung

Zur Verfestigung von schwermetallkontaminierten Böden kommen hydraulische Bindemittel zur Anwendung. Eventuell vorhandene geringe organische Verunreinigungen werden mit diesen Additiven ebenfalls immobilisiert.

Bei höheren organischen Stoffanteilen und Mischkontaminationen werden organische Dispersionen zusätzlich zu den hydraulischen Bindemitteln verwendet (KOMBI-Verfahren).

Da die hydraulischen Bindemittel ein basisches Milieu schaffen, können die organischen Bindemittel nicht abgebaut werden, und ihre dichtende Funktion bleibt erhalten.

Das Kernstück der Verfestigungsanlage bildet ein Zwangsmischer, der in Chargen beschickt wird. Das nach mehrstufigem Mischen entstehende Endprodukt ist im frischen Zustand stichfest und leicht weiter zu verarbeiten.

Das Mischungsverhältnis zwischen kontaminiertem Material und Additiven wird abgestimmt auf die Konsistenz, das Schadstoffinventar und die Anforderungen an das Verfestigungsprodukt.

In der Regel erfolgt die Zugabe sog. latent hydraulischer Bindemittel (z.B. Steinkohleflugaschen) sowie Anmachwasser. Als Anmachwasser kann auch kontaminiertes Sickerwasser aus der Baugrube verwendet werden.

Durch die Zugabe von Additiven ergibt sich eine maximale Volumenzunahme von durchschnittlich 5 %.

Beim Misch- und Abbindeprozeß treten nur geringe Wärmeentwicklungen auf, so daß leichtflüchtige Stoffe kaum mobilisiert werden. Die Aushärtezeit des Verfestigungsproduktes hängt im wesentlichen von der eingesetzten Rezeptur und der Umgebungstemperatur ab.

Neben der Immobilisierung der Schadstoffe erfolgt ein erheblicher Anstieg der Druckfestigkeit sowie eine deutliche Abnahme der Durchlässigkeit des verfestigten Materials.

Die einaxiale Druckfestigkeit ist an Proben und in situ entnommenen Bohrkernen im Mittel $> 2,5 \text{ MN/m}^2$.

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist im Mittel $< 10^{-10} \text{ m/s}$.

Eine Zerfallsneigung bei Unterwasserlagerung nach Endell ist nicht nachweisbar.

Prüfung

Der Nachweis der Einbindung der Schadstoffe erfolgt in der Regel in Anlehnung an den nach TA Abfall modifizierten Auslaugtest nach DEV S4. Berücksichtigt wird u.a. die Parameterliste der TA Abfall, Anhang D.

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN 18136, die Prüfung der Durchlässigkeit erfolgt nach DIN 18130, Teil 1 in der Triaxialzelle.

Die Zerfallsneigung bei Unterwasserlagerung wird nach Endell bestimmt.

Die praktische Wirksamkeit einer Immobilisierung wurde im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der Versuchsdeponie verfestigter kontaminierter Böden in Bochum-Kornharpen zwei Jahre lang untersucht und für diesen Zeitraum nachgewiesen.

Die gewonnenen Ergebnisse lassen dabei überwiegend die Einstufung der verfestigten Probekörper in die Deponieklasse 2, Bauschuttdeponie (gemäß Richtlinienentwurf LWA des Landes Nordrhein-Westfalen, "Untersuchung und Beurteilung von Abfällen, Teil 2" von 1987) zu.

Entsorgung

Der Einbau des frischen Verfestigungsproduktes z.B. in Deponien erfolgt flächig in Lagen als monolithischer Körper und wird anschließend durch Erdbautechniken verdichtet.

Das verfestigte Material eignet sich aufgrund seiner Dichte und Festigkeit auch für die Herstellung von Unterbauten, Tragschichten oder auch Wällen.

Nach 2 bis 24 h ist der Abbindeprozeß soweit abgeschlossen, daß eine Befahrbarkeit durch schweres Gerät gegeben ist.

Durchgeführte Maßnahmen

- Versuchsdeponie zur Verfestigung, Sanierung einer ehemaligen Teerpappenfabrik, Verfestigung von 17.000 t Boden und Bauschutt, kontaminiert mit PAK, Schwermetallen, PCB, Phenolen, Mineralöl, Teeröl, Ablagerung auf Deponie. Bochum, Dezember 1987 bis Mai 1989
- Verfestigung von 7.700 t ölhaltiger Bleicherde, kontaminiert mit PCB und Mineralölen. Lengerich, Dezember 1988 bis Februar 1989
- Off site Verfestigung zur Sanierung eines ehemaligen Gaswerkgeländes (Innenstadtbereich, Fußgängerzone), Verfestigung von 2.400 t Boden kontaminiert u.a. mit PAK, Phenol, Naphtalin, Cyanid. Nienburg, Oktober bis November 1989
- Konditionierung von 25.500 t Klärschlämmen (Verfestigung), kontaminiert mit Schwermetallen. Solingen, Juni 1990 bis Juli 1991
- On site Verfestigung eines ehemaligen Kokereigeländes, 45.000 t Bauschutt, Schlamm kontaminiert mit PAK, Arsen, Phenol, BTX. Oer-Erkenschwick, Oktober 1990 bis Mai 1992
- On site Verfestigung zur Sanierung eines ehemaligen Kokereistandortes, Verfestigung von 2.500 t Boden und Bauschutt kontaminiert mit Quecksilber, Cyaniden, PAK, Produktverwertung im Lärmschutzwall. Essen, Oktober 1991 bis Februar 1992
- On site Verfestigung eines ehemaligen Stahlwerksgeländes, Entgasung und Verfestigung von 20.000 t Boden und Bauschutt, kontaminiert mit PAK, Schwermetallen und BTX. Dortmund, Juni 1993 bis Februar 1994

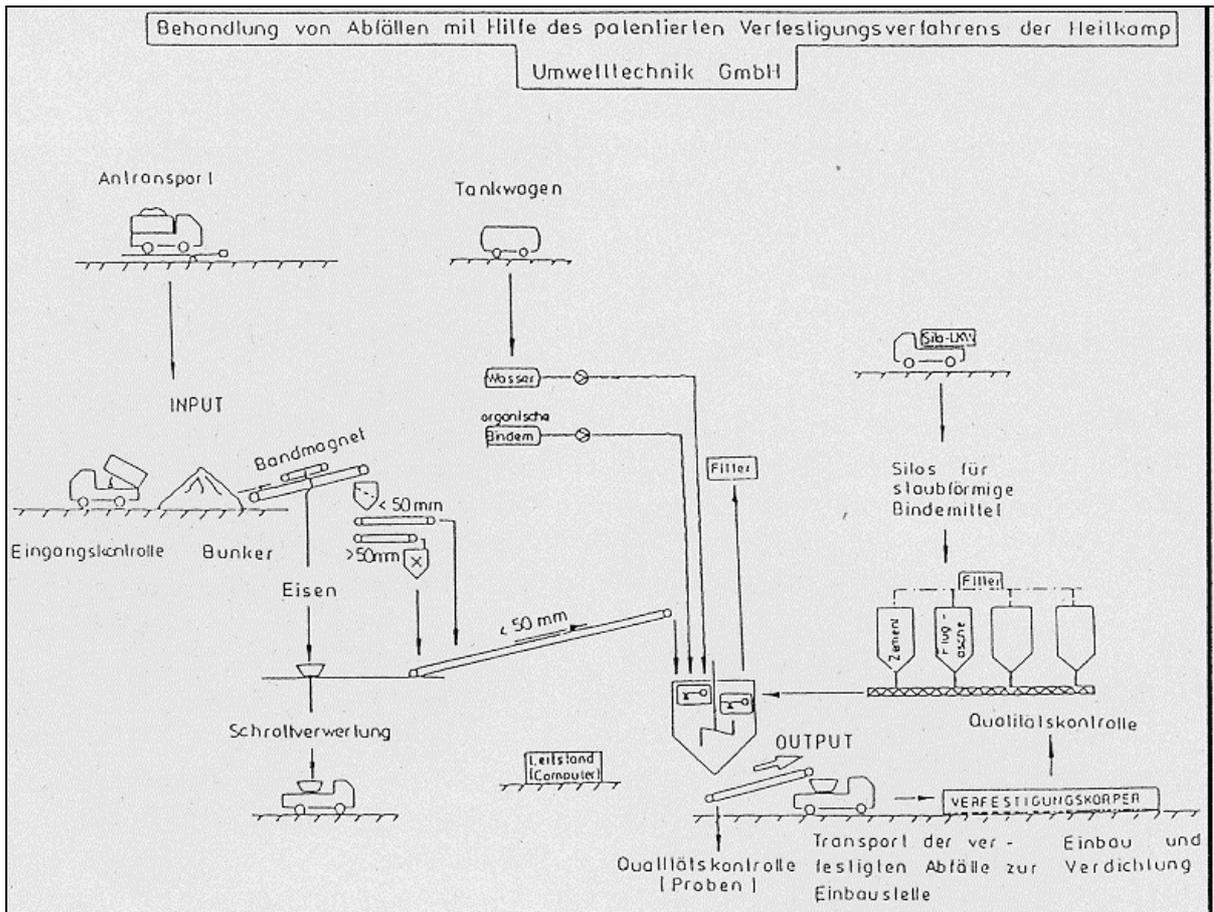


Bild 5.3: Fließschema Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp (Quelle: Fa. Heitkamp)

Zusammenfassung Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp Umwelttechnik

Firma	Heitkamp Umwelttechnik GmbH Heinrichstraße 67 44805 Bochum
Verfahren	Verfestigungsverfahren, on-site, off-site
Zuschlagstoffe	hydraulische Bindemittel ggf. in Kombination mit organischen Bindemitteln
Schadstoffgruppen	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe
Gewichtszunahme	-
Volumenvergrößerung	durchschnittlich 5 %
Aushärtezeit	2 - 24 h, Endfestigkeit nach 28 Tagen
Festigkeit	durchschnittlich $> 2,5 \text{ MN/m}^2$
Durchlässigkeit	durchschnittlich $< 10^{-10} \text{ m/s}$
Prüfung	Elutionsversuch nach DEV S4; Druckfestigkeit nach DIN 18136; Durchlässigkeit nach DIN 18130, Teil 1 in der Triaxialzelle; Zerfallsneigung bei Unterwasserlagerung nach Endell
Kapazität	-
Wirtschaftlichkeit	-

5.1.5 Das Verfestigungsverfahren der Fa. Pokker

(Quelle: Firmenangaben)

Das Bodensanierungsverfahren (**PBS-Verfahren**) der Pokker GmbH ist ein Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen in kontaminierten Böden sowie zur Vorbereitung von Bauwerksgründungen.

Sitz der Gesellschaft ist Nürnberg.

Anwendung

Das PBS-Verfahren wird on site am Altlastenstandort ausgeführt. Der ausgekofferte und behandelte Boden wird am Standort wieder eingebaut und für eine spätere Bebauung vorbereitet.

Das Verfahren wird ausschließlich angewandt zur Verfestigung von kontaminierten Böden. Das Schadstoffspektrum umfaßt Schwermetalle, PAK, PCB.

Verfahrensbeschreibung

Die kontaminierte Fläche wird in Abstimmung auf die Verfahrensweise bei der Auskoffierung in Feldgrößen eingeteilt und beprobt. Die Bodenproben werden auf vorbestimmte Schadstoffparameter hin analysiert.

Anhand der Analyseergebnisse und anhand organoleptischer Auffälligkeiten beim Aushub erfolgt die Festlegung zur Zwischenlagerung. Die Zwischenlagerung erfolgt in Abhängigkeit des Kontaminationsgrades in 3 getrennten Bereichen:

- Zwischenlager der Homogenisierung; Mechanische Aufbereitung des ausgebauten verwertbaren Bodens, Abtrennung der nicht unmittelbar verwertbaren Anteile, Zugabe der Zuschlagstoffe
- Zwischenlager für kontaminierten Boden, der aufgrund weiterer Beprobung reduziert werden kann oder mit zusätzlicher Behandlung in die Homogenisierung zurückgeführt werden kann
- Zwischenlager für kontaminierten Boden, der als Haus- oder Sondermüll entsorgt werden muß

Nach der Homogenisierung und der Kontrolle des Homogenisierungserfolges wird das Material am Standort wieder eingebaut und verdichtet.

Bei dem Verfahren können ca. 95 % des ausgekofferten und behandelten Bodens wiederverwendet werden.

Vor dem Wiederverfüllen wird eine Trennschicht an der Aushubsohle und an den Seitenwänden zur Abgrenzung der unbelasteten Bodenbereiche verlegt.

An den Tiefpunkten können Beobachtungsbrunnen zur Kontrolle von Sickerwässern errichtet werden.

Die Zuschlagstoffe (hydraulische Bindemittel, organische Additive, Fällungsmittel) werden im Niedrigbereich (ca. 1 - 3 Gew.-%) zudosiert. Entsprechend gering sind Volumen- und Gewichtszunahme.

Die Aushärtezeit beträgt in Abhängigkeit vom Zuschlagstoff 5 bis 30 Tage. Nach 28 Tagen werden Festigkeiten von 0,5 - 2 MN/m² und Durchlässigkeitsbeiwerte von 10⁻⁸ - 10⁻¹⁰ m/s erreicht.

Die Kapazität des Verfahrens beträgt 100 - 150 t/h. Die Wirtschaftlichkeit ist ab einer Menge von ca. 2.000 t kontaminierten Materials gegeben.

Prüfung

Das Verfestigungsprodukt wird geprüft auf Druckfestigkeit, Durchlässigkeit und Auslaugverhalten.

Neben Untersuchungen nach DEV S4 wird ein interner Elutionsversuch zur Abschätzung des Langzeitverhaltens durchgeführt. Ein Prüfkörper mit 27 x 20 x 20 cm Kantenlänge wird je 24 h lang (insgesamt 72 h) drei Medien unterschiedlicher Aggressivität ausgesetzt (pH-Werte von 6,5 - 5,5 - 2) und auf seine Eluatgehalte hin untersucht. Dabei werden mit Absicht eine höherbelastete Probe und eine wesentlich größere Oberfläche als in natura gewählt.

Entsorgung

Das Verfestigungsprodukt wird am Standort wieder eingebaut und ist geeignet zur Bauwerksgründung, z.B. als Ersatz für eine Pfahlgründung und entspricht der Bodenklasse 6 nach DIN 18300.

Durchgeführte Maßnahmen

- BMW AG, Niederlassung Nürnberg, 50.000 t
- Stadt Nürnberg, Klärwerk I, 8.000 t, Bodensanierung und Bauwerksgründung

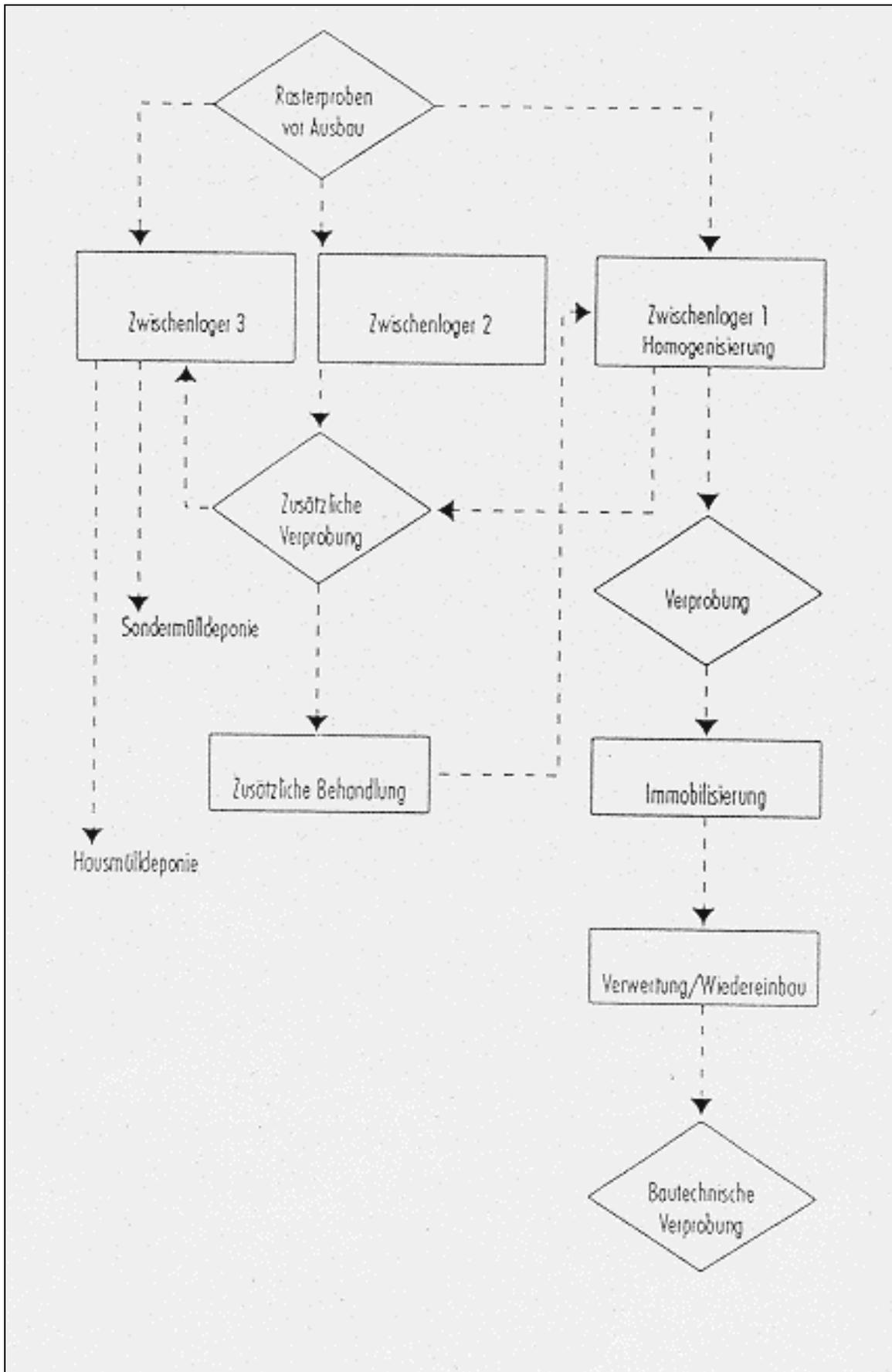


Bild 5.4: Fließschema PBS-Verfahren (Quelle: Pokker Bodensanierung GmbH)

Zusammenfassung Verfestigungsverfahren der Fa. Pokker

Firma	Pokker Bodensanierung GmbH Eibacher Hauptstraße 121 90451 Nürnberg 60
Verfahren	Pokker-Bodensanierungsverfahren (PBS-Verfahren)
Zuschlagstoffe	Hydraulische Bindemittel, organische Additive, Fällungsmittel
Schadstoffgruppen	Schwermetalle, PAK, PCB
Gewichtszunahme	max. 3 %
Volumenvergrößerung	kaum nachweisbar
Aushärtezeit	abhängig von Zuschlagstoffen: 5 - 30 Tage
Festigkeit	0,5 - 2 MN/m ²
Durchlässigkeit	10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹⁰ m/s
Prüfung	Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Elutionsversuche (DEV S4 sowie interner Elutionsversuch)
Kapazität	100 bis 150 t/h
Wirtschaftlichkeit	ab etwa 2.000 t

5.2 Immobilisierung in Kombination mit anderen Sanierungsverfahren

5.2.1 Das Soilcrete Verfahren der Fa. Keller Grundbau GmbH

(Quelle: Firmenangaben)

Die Fa. Keller Grundbau GmbH hat das zur Baugrundverbesserung angewandte Soilcrete-Verfahren zu einem in situ Verfestigungsverfahren entwickelt, das mit anderen Sanierungsverfahren kombiniert werden kann [Lit:5.1, 5.2].

Hauptsitz der Gesellschaft ist Offenbach.

Anwendung

Das Soilcrete-Verfahren wird angewandt zur in-situ-Verfestigung von kontaminierten Böden. Es können organische und/oder anorganische Verunreinigungen eingebunden werden.

Das Soilcrete-Verfahren kann weitgehend in allen Bodenformationen angewendet werden und ist unabhängig von Schichtwechselln. Ursprünglich wurde das Verfahren entwickelt zur Baugrundverbesserung sowie zum Erstellen von Dichtungssohlen und Dichtwänden bei Baugruben und kann somit ebenso zur Sicherung von Altstandorten und Altablagerungen eingesetzt werden.

Dichtwände, die mit dem Soilcrete-Verfahren hergestellt werden, bestehen aus überschnittenen Soilcrete-Säulenreihen sowie Soilcrete-Lamellen und werden aus senkrechten oder geneigten Bohrungen hergestellt. Dies ermöglicht beispielsweise das Herstellen von Dichtungs-wänden u.a. unterhalb von Gebäuden, Verkehrsanlagen und Versorgungsleitungen.

Das Soilcrete-Verfahren kann zusätzlich in Kombination mit anderen Verfahren angewandt werden. Nach der üblichen Vorgehensweise wird der in situ mit dem Düsenstrahlverfahren aufgelöste und gewaschene Boden an der Austrittsstelle der Bohrung in einem geschlossenen System aufgefangen.

Direkt anschließend an die Förderung wird ein der vorhandenen Verunreinigung entsprechendes Reinigungsverfahren angeschlossen (Bodenwäsche, biologische Behandlung etc.). Nach der Reinigung wird das Material separiert und filtriert und kann anschließend in die Entnahmestelle wieder eingebracht werden.

Durch die Behandlung des kontaminierten Materials in einem geschlossenen System sind Arbeits- und Emissionsschutz gewährleistet.

Verfahrensbeschreibung

Bei dem Soilcrete-Verfahren wird nach dem Abteufen einer Bohrung bis zur gewünschten Tiefe mit einem oder mehreren Flüssigkeitsstrahlen innerhalb einer definierten Reichweite der

anstehende Boden, vom tiefsten Punkt dieser Bohrung ausgehend, in seiner Struktur aufgelöst und mit einer Suspension vermischt.

Die Austrittsgeschwindigkeit der Flüssigkeitsstrahlen beträgt bei Pumpendrücken von 300 - 500 bar ca. 150 - 300 m/s.

Durch die freie Wahl des Suspensionsmittels ist die Abstimmung auf Randbedingungen gegeben (z.B. Art der Kontamination). Überschüssiges Material, bedingt durch die Suspensionszugabe, steigt über den Bohrlochringraum nach oben und kann in einem geschlossenen System abgeführt werden.

Das verfestigte Material liegt in Form einer Säule vor. Um einen durchgehenden Verfestigungskörper zu erhalten, werden die Bohrungen in einem Dreieckraster so angeordnet, daß es zu Überschneidungen der verfestigten Säulen kommt.

Entnommene in situ-Bohrkerne zeigten Druckfestigkeiten von ca. 1 - 2 MN/m² bei Durchlässigkeiten von ca. 10⁻⁸ m/s.

Prüfung

Zur Prüfung werden aus dem verfestigten Bereich in situ-Bohrkerne entnommen und auf Druckfestigkeit, Durchlässigkeit und Auslaugverhalten untersucht.

Durchgeführte Maßnahmen

- Erprobung des Sanierungsverfahrens, phenolkontaminierter Standort, Hamburg, 1988 [Lit:5.1]

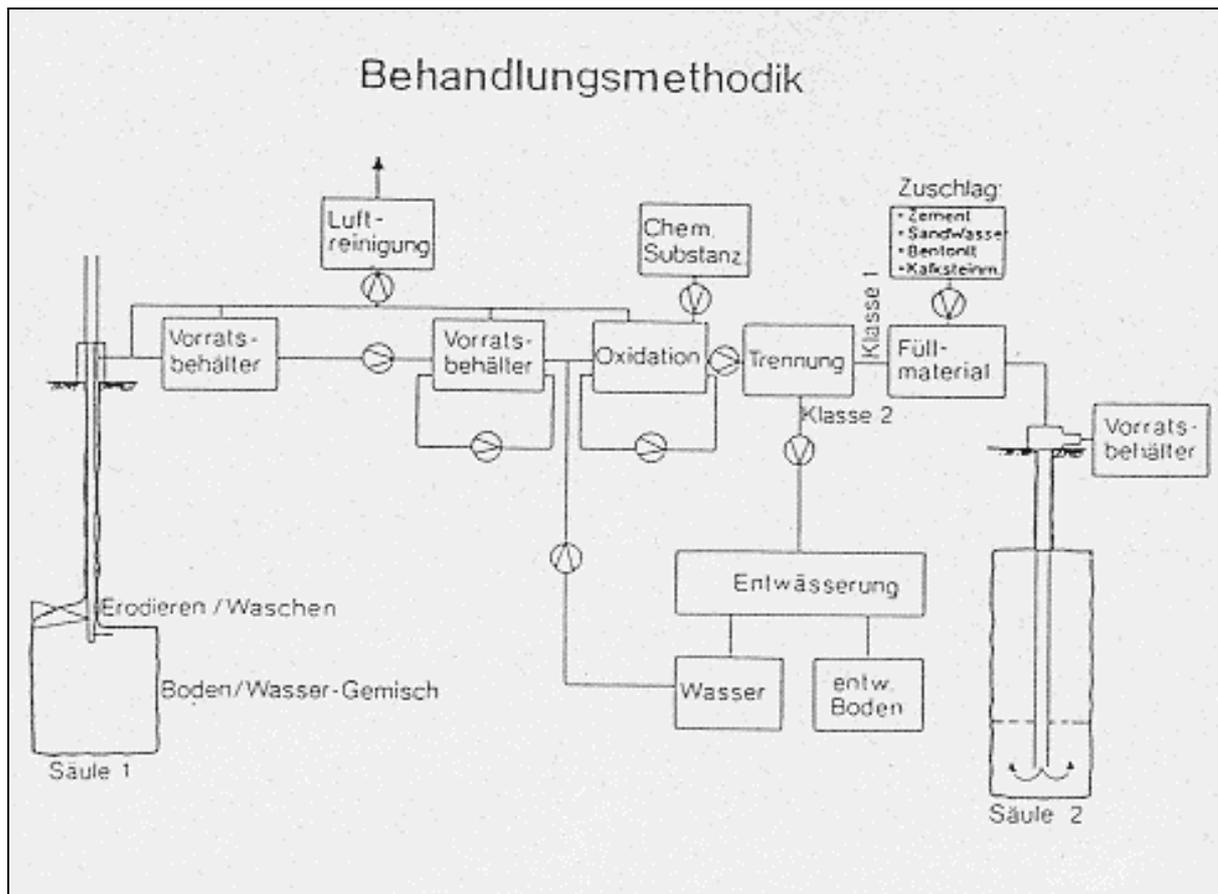


Bild 5.5: Fließschema - Sanierung eines phenolkontaminierten Standorts [Lit:5.1]

Zusammenfassung Soilcrete Verfahren der Fa. Keller Grundbau GmbH

Firma	Keller Grundbau GmbH Bereich Nord Becklinger Str. 21 29683 Fallingbostal-Dorfmark
Verfahren	Soilcrete-Verfahren; in situ, on site; Kombination mit Bodenwäsche und biologischen Verfahren möglich
Zuschlagstoffe	Beliebig
Schadstoffgruppen	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe
Gewichtszunahme	-
Volumenvergrößerung	entfällt, da überschüssiges Material über die Bohrlochöffnung weggeführt wird
Aushärtezeit	-
Festigkeit	ca. 1 - 2 MN/m ²
Durchlässigkeit	ca. 10 ⁻⁸ m/s
Prüfung	Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Elutionsversuche an in-situ-Bohrkernen
Kapazität	-
Wirtschaftlichkeit	-

5.3 Immobilisierung durch Fixierung

5.3.1 Das Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec GmbH

(Quelle: Firmenangaben)

Die Fa. Biodec GmbH - Gesellschaft für biologische Reinigungsverfahren - ist ein Unternehmen der BMA-Gruppe und der IMA. Sitz der Gesellschaft ist Braunschweig.

Anwendung

Das Verfahren wird zur Immobilisierung von Schwermetallen wie Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink in Böden und Schlämmen angewandt und kann in situ sowie on site/off site durchgeführt werden.

Eine Verfestigung des behandelten Materials findet nicht statt.

Großflächige, wenig in die Tiefe gehende Bodenkontaminationen können in situ durch einfaches Vermischen mit dem Sorptionsmittel unter Einsatz von Landwirtschaftsmaschinen behandelt werden.

Ausgekoffertes schwermetallkontaminiertes Bodenmaterial wird on site nach Konditionierung (Korngröße, pH-Wert, Feuchtegehalt) in einem Intensivrieseler behandelt.

Das Verfahren kann auch in Kombination mit anderen Sanierungsverfahren (z.B. Bodenwäsche) eingesetzt werden. Kontaminiertes Feinkornmaterial, wie es z.B. als Rückstand bei der Bodenwäsche anfällt, wird je nach Bedarf konditioniert und in einem Intensivzwangsmischer unter Zugabe des Sorptionsmittels off site behandelt.

Verfahrensbeschreibung

Das Immobilisierungsverfahren basiert auf Zugabe, Konditionierung und intensiver Vermischung von modifizierten Aluminiumsilikaten hoher Sorptionsfähigkeit mit dem kontaminierten Boden.

Die Dosiermenge des Sorptionsmittels liegt je nach Bodentyp, Schwermetallgehalt und Sanierungsziel bei etwa 4 - 10 Massen-%.

Nach der Behandlung ergibt sich eine Gewichtserhöhung bis ca. 10 %. Die Durchlässigkeit ist gleich dem Ausgangsmaterial, bzw. leicht verbessert.

Die Kapazität des Verfahrens beträgt bei einer on-site-Anwendung mit Mischanlage bis zu 200 t/h. Dabei ist eine Wirtschaftlichkeit ab etwa 5.000 t gegeben.

Die Anlage ist mobil und benötigt zur Aufstellung eine Vorbereitungszeit von ca. einer Woche.

Prüfung

Zur Überwachung des Sanierungserfolges werden Perkolations- und Elutionsversuche, pH-abhängig mit Wasser oder anderen Lösemitteln, durchgeführt.

Entsorgung

Großflächig in situ behandelte Areale können uneingeschränkt oder eingeschränkt landwirtschaftlich genutzt werden. Ausgekoffertes Material kann nach der Behandlung wieder verfüllt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den behandelten Boden als Baumaterial für Erdwälle, Straßenunterbauten und Deponieabdeckungen zu verwenden oder auf einer geeigneten Deponie abzulagern.

Durchgeführte Maßnahmen

- Großflächige Bodenbehandlung einer Zinkschmelzerei in Hasselt, Belgien.
- Fluß- und Hafenschlammbehandlung in Hasselt, Belgien.

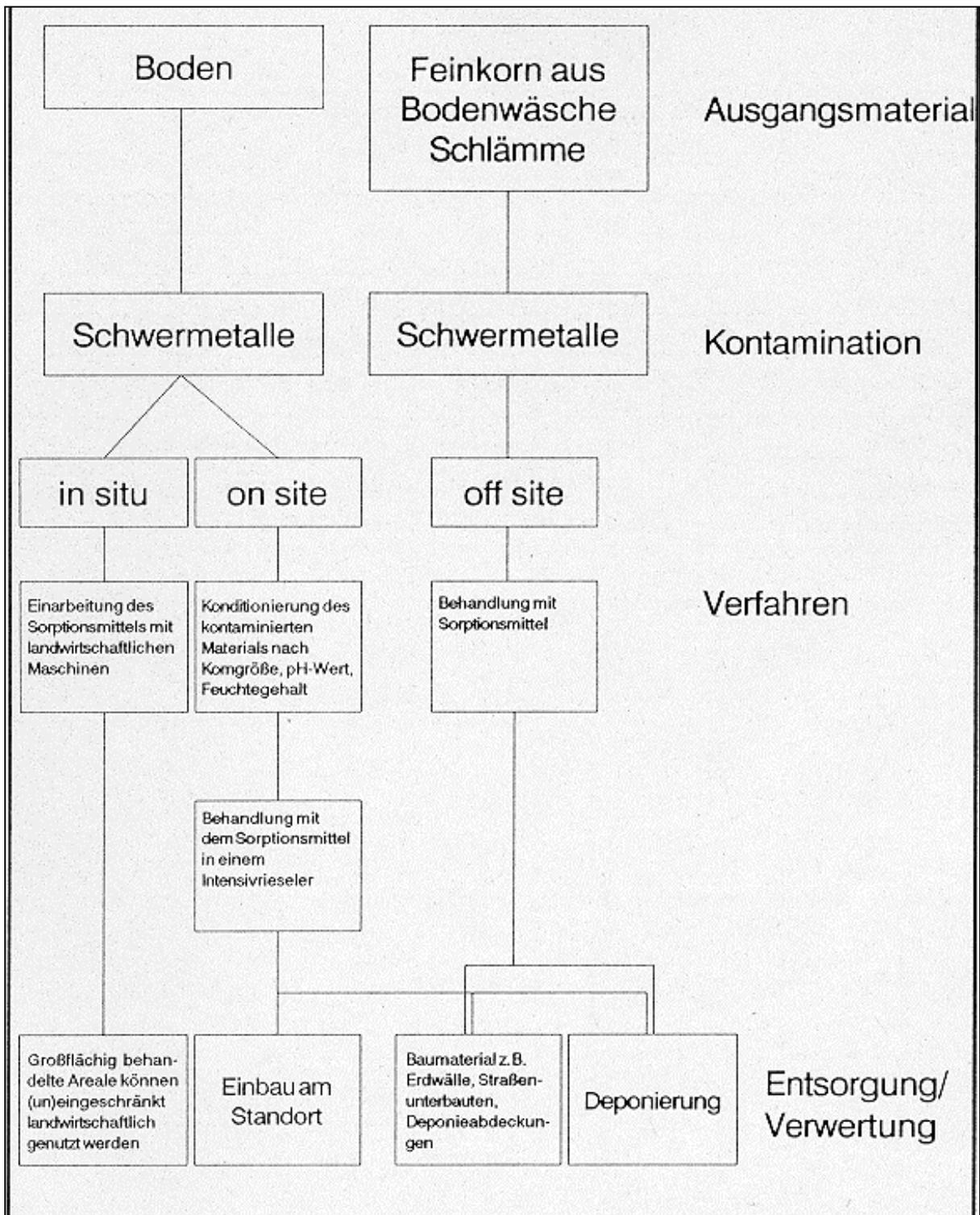


Bild 5.6: Fließschema Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec

Zusammenfassung Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec GmbH

Firma	Biodec GmbH Gesellschaft für biologische Reinigungsverfahren Postfach 3225 Am Alten Bahnhof 5 38122 Braunschweig
Verfahren	Immobilisierungsverfahren (in situ, on-site, off-site)
Zuschlagstoffe	modifizierte Aluminiumsilikate hoher Sorptionsfähigkeit
Schadstoffgruppen	Schwermetalle
Gewichtszunahme	bis 10 %
Volumenvergrößerung	-
Aushärtezeit	es findet keine Verfestigung statt
Festigkeit	entspricht dem Ausgangsmaterial
Durchlässigkeit	gleichbleibend bzw. leichte Erhöhung gegenüber Ausgangsmaterial
Prüfung	Perkolationsversuche, Elutionsversuche nach DEV S4
Kapazität	bis 200 t/h beim Einsatz einer Mischanlage
Wirtschaftlichkeit	ca. ab 5.000 t bei Einsatz einer Mischanlage

5.4 Forschung und Entwicklung

Universitätsnahe Forschungsaktivitäten im Bereich Immobilisierung sind in den letzten Jahren stark eingeschränkt worden oder finden nur noch am Rande statt. Zur Zeit sind nur Aktivitäten am Institut für Grundbau und Bodenmechanik sowie am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, beide Technische Universität Braunschweig, bekannt. Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit EDX (Elementaranalyse) und der Röntgendiffraktometrie wird versucht, genauen Einblick in die Verbindungen zwischen Schwermetallen und hydraulischen Bindemitteln zu gewinnen. Grundlegende Mechanismen und Reaktionsabläufe bei der Verfestigung sollen an einem Modellsystem mit isolierten Zementklinkerphasen und bestimmten Schwermetallen aufgeklärt werden [Lit:5.6, 5.7].

Verwertung industrieller Rückstände im Bergbau

Das BMFT finanziert derzeit zwei Forschungsvorhaben, in denen die Möglichkeiten und Risiken der Verwertung von schadstoffhaltigen Industrierückständen in Kombination mit Bergbaumörtel zu Versatzzwecken im untertägigen Bergbau untersucht werden [Lit:5.8]:

- Untersuchung zum Langzeitverhalten chemisch immobilisierter Abfallstoffe in untertägigen Hohlräumen am Institut für Bergbaukunde der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld.
- Untersuchung des Langzeitverhaltens in situ verfestigter Abfallstoffe in untertägigen Hohlräumen am Institut für Bergbaukunde II der Technischen Universität Berlin.

Den Forschungsvorhaben liegt die Tatsache zugrunde, daß im untertägigen Bergbau auf Anordnung der Bergbehörden zur Gewährleistung der Bergsicherheit im laufenden Betrieb oder auch im Zuge der Verwahrung von Grubenräumen häufig umfangreiche Versatzmaßnahmen durchzuführen sind.

An vielen Grubenstandorten werden für Versatzzwecke bergbaueigene Aufbereitungsrückstände mit bergbaufremden Industrierückständen vermischt. Am häufigsten wird der sogenannte Bergbaumörtel eingesetzt. Er besteht im einfachsten Fall zu rd. 70 % aus Kohleflugasche aus Großfeuerungsanlagen und zu 30 % aus Zement. Zu den Filteraschen können noch Wirbelschichtaschen und spezielle Additive hinzugegeben werden. Auch der Zement läßt sich teilweise durch andere Bindemittel ersetzen.

In Deutschland werden jährlich rd. 2 Mio. t Bergbaumörtel hergestellt. Im Zusammenhang mit Stilllegung und Verwahrung von zahlreichen Bergwerken werden in absehbarer Zeit noch beträchtliche Mengen an Versatzmaterialien benötigt. An bergbaufremden Rückständen sind dabei mengenmäßig derzeit nur die Rückstände aus der Kohleverstromung bedeutend. Dieser Vorgang fällt nicht in den Geltungsbereich des Abfallrechts, sondern unterliegt dem Bergrecht in Verbindung mit dem Immissionsschutzrecht [Lit:5.8].

Forschungen in den Niederlanden

Forschungen in den Niederlanden richten sich vor allem auf die Anwendung von Verfestigung von Hafenschlämmen und Sonderabfällen.

In den Niederlanden fällt jährlich bei der Instandhaltung von Wasserwegen und bei der Sanierung von subaquatischen Sedimenten eine Menge von 50 Millionen m³ Schlamm an. Etwa 7 Millionen m³ sind schwer oder sehr schwer verunreinigt und können deswegen nicht durch Verbreitung (z.B. im Meer) beseitigt werden; das Material wird in Monodeponien abgelagert.

Bis jetzt fehlt eine kostengünstige Verwertungsweise für diese Schlämme. Zur Entwicklung von Techniken zur Verwertung von Hafenschlämmen wurde 1989 das POSW-Programm gestartet. POSW steht für "Programm zur Entwicklung von Sanierungstechnologien für Wasserböden". Im Rahmen dieses Programms wird auch die Möglichkeit der Immobilisierung (mit eventueller Wiederverwendung) untersucht.

Bis jetzt ist die Immobilisierung von Abfällen in den Niederlanden rechtlich nicht gestattet. Von Seiten des niederländischen Umweltministeriums (VROM) werden Verfahren zur Immobilisierung von Sonderabfällen z.Zt. allerdings wieder mit Interesse betrachtet. Die hohen Anforderungen, die unbehandelte Sonderabfälle aufgrund ihrer Emissionen an eine Deponie stellen, verursachen ein Kosten- und Kapazitätsproblem.

Zur Untersuchung der Eignung der Immobilisierung für Abfälle ist ein Untersuchungsprogramm begonnen worden. In diesem Programm untersuchen Forschungsinstitute, Ingenieurgemeinschaften und Anbieter die Effektivität der Immobilisierung sowie die Tests und Kriterien zur Bewertung. Das niederländische Institut TNO macht zur Zeit eine Bestandsaufnahme von Anbietern und Abfällen.

6 Praxisbeispiele

6.1 Verfestigungsdeponie Bochum Kornharpen

Ausgangssituation

Beim Aushub auf dem Gelände einer ehemaligen Teerpappenfabrik fielen 12.000 m³ kontaminierten Bodens an. Der Boden war stark bindig mit einem Schluffanteil von mehr als 60 % und enthielt Bauschutt. An Kontaminationen wurden PAK, BTX, Phenole und Schwermetalle festgestellt.

Aufgrund der PAK-Gehalte (bis zu 895 mg/kg) hätten die kontaminierten Massen auf eine Sonderdeponie verbracht werden müssen. Bodenwäsche und mikrobiologische Verfahren waren aufgrund der Bodenstruktur und des Schadstoffinventars nicht anwendbar, thermische Verfahren aus Kostengründen nicht durchführbar. In Abstimmung mit den Behörden wurde beschlossen, die kontaminierten Massen zu verfestigen und auf einer kontrollfähigen Versuchsdeponie abzulagern. Die Maßnahme wurde ausgeführt von Heitkamp Umwelttechnik GmbH, Bochum [Lit:6.1 u. 6.5].

Sanierungsvorbereitung

Vor Beginn der Sanierung wurde eine Eignungsprüfung bez. folgender Punkte durchgeführt:

- Auslaugverhalten (gemäß DEV S4 sowie aus Durchströmungsversuch)
- Mechanische Eigenschaften des Verfestigungsprodukts (Zerfallsziffer, einaxiale Druckfestigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert)
- Erstarrungsverhalten
- Verarbeitbarkeit des Mischguts

Sanierungsdurchführung

Die Errichtung der Versuchsdeponie auf der Zentraldeponie Kornharpen wurde in zwei Bauabschnitten ausgeführt. Beide Bauabschnitte waren durch eigene Abdichtungssysteme mit getrennter Sickerwasser- und Oberflächenwassersammlung vom restlichen Deponiegelände getrennt.

Im ersten Bauabschnitt wurde der kontaminierte Boden durch Zugabe von insgesamt 30 Gew.-% hydraulischen Bindemitteln und Flugaschen verfestigt.

Im zweiten Bauabschnitt wurde die Verfestigung mit dem Kombi-Verfahren (Zugabe von 25 Gew.-% hydraulischer und organischer Bindemittel) durchgeführt.

Die Verfestigungsanlage wurde in der Nähe der Einbaustelle auf einer zu diesem Zweck verlegten Asphaltdecke plaziert. Die Asphaltdecke diente zum einen als Oberflächenabdichtung, zum anderen wurde in diesem Bereich anfallendes Regenwasser gesammelt und als Anmachwasser benutzt.

Kernstück der Anlage war ein 2250 l fassender Zwangsmischer als Ringtrommischer. Der Einbau des frisch gemischten, erdfeuchten Materials erfolgte lagenweise mit anschließender Verdichtung auf einer mineralischen Untergrundabdichtung ($k_f < 10^{-9}$ m/s).

Zur Kontrolle von Sickerwässern wurde oberhalb der Untergrundabdichtung eine Drainageschicht eingebaut. Die fertiggestellte Verfestigungsdeponie hatte eine Grundfläche von ca. 70 x 80 m bei einer Höhe von 4 bis 6 m.

Die abgeböschten Seitenflächen wurden mit Folie bedeckt und zur Trennung von ablaufendem Wasser und Sickerwasser mit einem separaten Drainagesystem versehen. Auf die Oberfläche wurde kulturfähiger Boden aufgetragen.

Die Arbeiten zur Erstellung der Verfestigungsdeponie dauerten von 1987 bis 1989.

Sanierungsüberwachung

Begleitend zur Sanierung wurde eine Güteüberwachung durchgeführt, die die Kontrolle folgender Parameter umfaßte:

- Rezeptur
- Mischzeiten
- Verarbeitungszeitraum
- Verdichtung
- Elutionsversuche am Mischgut

Dabei wurden folgende Stoffdaten und Erfahrungen gewonnen:

- Volumenzunahme nach Einbau und Verdichtung $< 7 \%$
- Befahrbarkeit durch schweres Gerät nach 1 Tag Abbindedauer
- Druckfestigkeit nach 28 Tagen $> 5 \text{ MN/m}^2$ (Mindestwert) und $> 9 \text{ MN/m}^2$ (Mittelwert)
- Eluatanalysen ließen eine Einstufung des Verfestigungsproduktes zur Ablagerung auf Deponien der Klasse 2 bzw. 3 zu (NRW-Deponieklassen)
- eine Setzung des monolithischen Körpers wurde nicht festgestellt

Kontrolle des Sanierungserfolges

Die Beobachtungsdauer der Sickerwässer der Verfestigungsdeponie wurde auf drei Jahre festgelegt. Während der Aufbauphase wurde praktisch kein Sickerwasser sondern nur umlaufendes Hangwasser festgestellt. Im 2. Bericht des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig wurde für den Zeitraum von Juni 1989 bis Mai 1990 folgendes festgestellt:

- Inhaltsstoffe in Oberflächen- und Sickerwässern sind erheblich geringer als im Eluat des Mischguts bei der Güteüberwachung.
- Alle Grenzwerte für die Deponieklasse 3 wurden teilweise 200-fach unterschritten.
- Die geringen registrierten Sickerwassermengen und die geringen Schadstoffbelastungen wiesen auf eine weitgehende Schadstoffeinbindung im Deponiekörper hin.

Tabelle 6.1: Einbindung von PAK, Verfestigungsdeponie Kornharpen, Eluate nach DEV S4 [Lit:6.5]

	PAK [$\mu\text{g/l}$]
Ausgangsmaterial	53,30 (Eluat) im Mittel
Verfestigtes Material	1,89 (Eluat) im Mittel
Oberflächen- und Umlaufwasser	0,90 (Maximalwert)

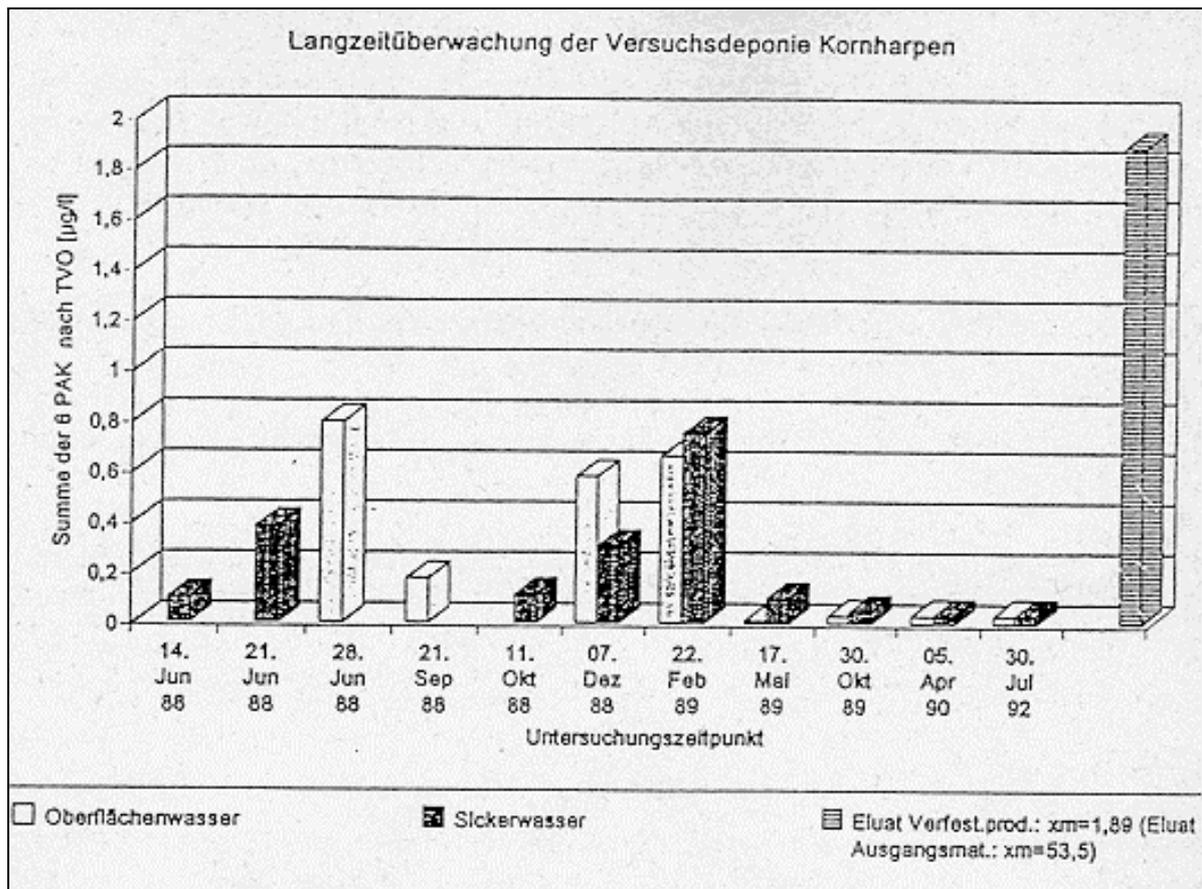


Bild 6.1: Ergebnisse von Wasseranalysen im Rahmen der Güteüberwachung und Langzeitkontrolle der Versuchsdeponie Kornharpen (Quelle: Fa. Heitkamp)

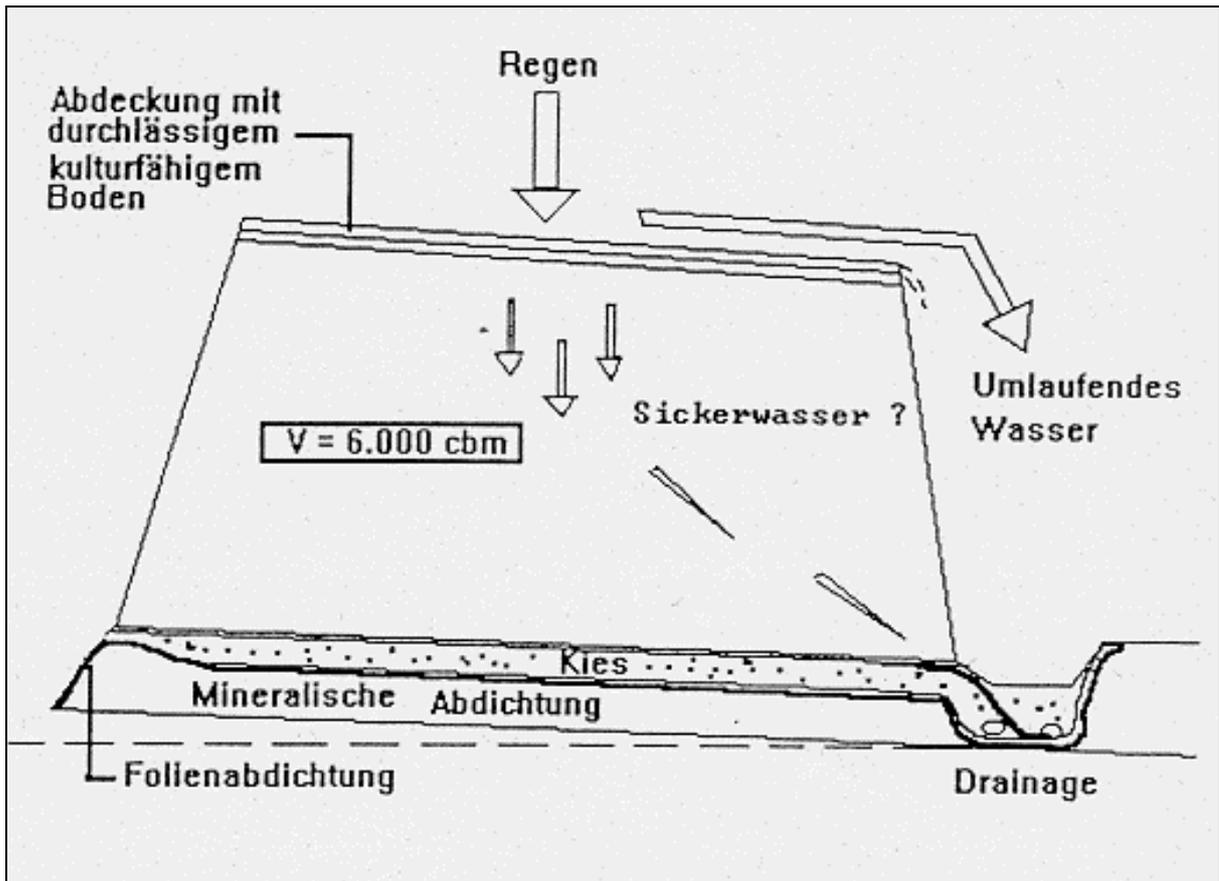


Bild 6.2: Prinzipskizze der Verfestigungsdeponie (Quelle: Fa. Heitkamp)

6.2 Lärmschutzwall aus verfestigten Böden

Ausgangssituation

Bei der Erschließung eines Gewerbegebietes in Essen auf dem Gelände einer ehemaligen Kokerei fielen 2.500 t kontaminierter Bodenaushub an. Der hauptsächlich aus bindigen Fraktionen bestehende Boden zeigte hohe Gehalte an PAK, Cyaniden und Quecksilber. Die Eluatgehalte der o.g. Kontaminanten lagen z.T. über den Grenzwerten der Deponieklasse 4 NRW. Die Maßnahme wurde ausgeführt von Heitkamp Umwelttechnik GmbH [Lit:6.1, 6.5].

Sanierungsvorbereitung

Zur Prüfung der Durchführbarkeit der Verfestigung wurden vor Sanierungsbeginn Eignungsprüfungen durchgeführt. Ermittelt wurden Zerfallsziffer, einaxiale Druckfestigkeit und Durchlässigkeitsbeiwert sowie Eluatgehalte nach DEV S4.

Sanierungsdurchführung

Die Verfestigung wurde on site am Altlastenstandort durchgeführt. Das Verfestigungsprodukt wurde, zur Trennung der benachbarten Wohnbebauung vom Gewerbegebiet, als Kern eines Lärmschutzwalls eingebaut.

Das Sanierungsziel, die Einhaltung der Grenzwerte der Deponieklasse 2 NRW, wurde erreicht.

Zusätzlich wurde der Verfestigungskörper gemäß behördlicher Auflagen allseitig mit einer PEHD-Folie umschlossen.

Sanierungsüberwachung

Während der Sanierungsdurchführung wurden im Rahmen der Güteüberwachung je 600 m³ Ausgangsmaterial repräsentative Referenzmischungen hergestellt. Aus diesen Mischungen wurden Rückstellproben hergestellt und auf die gleichen Parameter wie in der Eignungsprüfung untersucht.

(Ergebnisse der Eignungsprüfung und der Güteüberwachung siehe Tab. 6.2)

Kontrolle des Sanierungserfolges

Die Kontrolle zur Einhaltung des Sanierungszieles erfolgte während der Durchführung durch die Güteüberwachung. Eine weitere Kontrolle oder Beobachtung fand nicht statt.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Eignungsprüfung und Güteüberwachung

	Zerfalls- ziffer (%)	Einaxiale Druckfestig- keit q_u (MN/m ²)		Durchlässig- keitsbeiwert kf (m/s)
		28 d	56 d	
Anforderung	< 2	2,5	≥ 2,5	< 1 x 10 ⁻⁹
Eignungsprüfung	< 2	8,7	9,1	< 1 x 10 ⁻¹²
Güteüberwachung:				
1. Referenzmischung	< 2	8,1	13,0	< 1 x 10 ⁻¹²
2. Referenzmischung	< 2	10,9	16,4	< 1 x 10 ⁻¹²
3. Referenzmischung	< 2	12,1	14,1	< 1 x 10 ⁻¹²
4. Referenzmischung	< 2	8,6	11,5	< 1 x 10 ⁻¹²

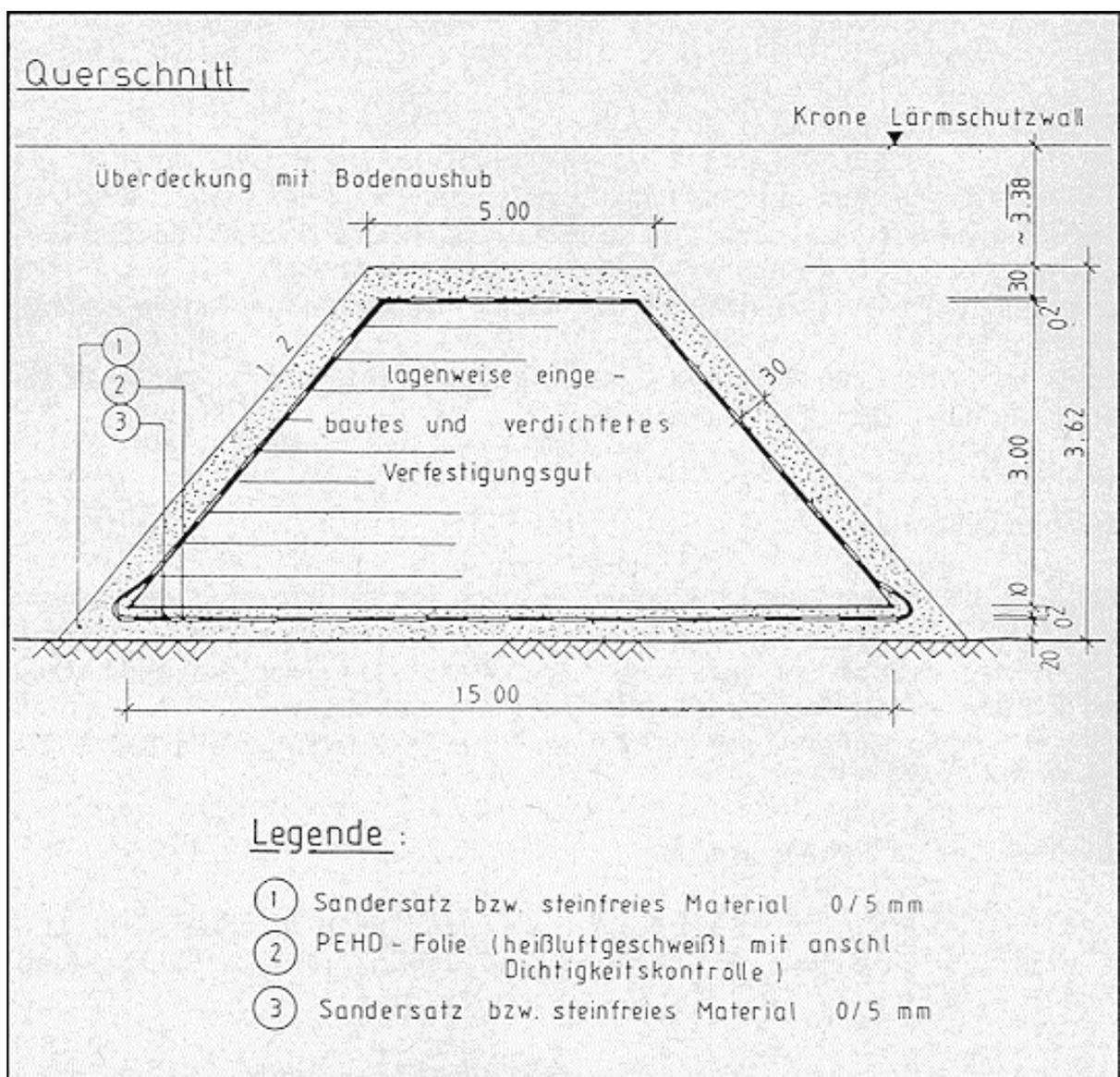


Bild 6.3: Schnitt durch den Lärmschutzwall (Quelle: Fa. Heitkamp)

6.3 Sanierung eines Schrottplatzes mittels HDT-Verfahren

Ausgangssituation

Auf dem Gelände eines Schrottplatzes in Ludwigshafen wurden in einer 1986 durchgeführten Gefährdungsabschätzung kontaminierte Bereiche lokalisiert, deren maximale Schadstoffkonzentrationen wie folgt ermittelt wurden:

Kohlenwasserstoffe	:	24.800 mg/kg
Trichlorethan	:	4.337 µg/kg
Trichlorethen	:	66.022 µg/kg
Tetrachlorethen	:	12.353 µg/kg
PCB	:	87.998 µg/kg
Blei	:	423 mg/kg
Cadmium	:	10 mg/kg

Die durchschnittliche Schadstofftiefe lag bei ca. 1,5 m unter GOK.

Die ursprüngliche Vorgehensweise für 1987 sah vor:

- Aushub von zunächst ermittelten ca. 1.100 t kontaminierten Bodens
- Entsorgung auf einer dafür zugelassenen Deponie
- Verfüllen der Aushubstelle mit unbelastetem Schüttgut
- Herstellen eines Unterbaus für eine zu erstellende Oberflächenversiegelung
- Installation einer Entwässerungs- und Abscheideanlage
- Oberflächenversiegelung für die Flächen mit zukünftiger Nutzung für Lagerung, Umschlag und Bearbeitung von wassergefährdenden Stoffen

Nach Erteilung der Genehmigung im Oktober 1987 widerrief die Deponie die frühere Abnahmezusage, so daß alternative Sanierungslösungen notwendig wurden. Ziel sollte sein, den Boden an Ort und Stelle zu entsorgen und/oder zu behandeln, damit dieser als Verfüllmaterial wieder eingebaut werden kann.

Im Vergleich mit Bodenwäsche bzw. thermischer Behandlung erwies sich die Verfestigung mittels HDT-Verfahren (Hydrophobierung durch Trägerstoffe) als durchführbar.

Die Maßnahme wurde ausgeführt von der G.A.A. mbH und dem Büro Willer [Lit:6.3].

Sanierungsvorbereitung

Die Anforderungen der Behörden an das Verfestigungsprodukt wurden mit Baustoffuntersuchungen und Elutionsversuchen an labortechnisch hergestellten Prüfkörpern nachgewiesen:

- Die durchschnittliche Druckfestigkeit betrug 7,86 MN/m².
- Der Sulfatgehalt im Eluat mit destilliertem Wasser betrug 22 mg/l,
- der AOX-Gehalt im Eluat mit CO₂-gesättigtem Wasser betrug 0,19 mg/l,
- der KW-Gehalt im Eluat mit CO₂-gesättigtem Wasser betrug 0,022 mg/l.

Sanierungsdurchführung

Bei der durchgeführten Verfestigungsmaßnahme wurde die Bodensanierung mit einer Betriebsflächenneugestaltung kombiniert. Der kontaminierte Boden wurde während des Aushubs mischend vorbehandelt und auf ein Zwischenlager verbracht. Die Verfestigung selbst wurde on site in einer mobilen Mischanlage durchgeführt.

Nach Installation von Erdleitung, Entwässerung und Abscheider wurde das verfestigte Material in Lagen von 40 cm Dicke flächendeckend in der ausgehobenen Grube wieder eingebaut und verdichtet.

Nach dem Wiedereinbau wurde eine 15 cm starke Betonschicht mit einer flächenmittigen Entwässerungsrinne als Oberflächenversiegelung aufgebracht.

Insgesamt wurden 2.024 t kontaminiertes Material mit dem HDT-Verfahren eingebunden.

Kontrolle des Sanierungserfolges

Aus der großtechnischen Durchführung wurden Bohrkernentnahmen und auf Auslaugbarkeit, Durchlässigkeit und Druckfestigkeit geprüft. Die durchgeführten Elutionsversuche ergaben, daß:

- die elektrische Leitfähigkeit im für Trinkwasser üblichen Bereich lag
- Phenole nur in Spuren nachweisbar waren
- Schwermetalle nicht nachweisbar waren
- der CSB im Normalbereich lag
- AOX im für Trinkwasser üblichen Bereich lag
- halogenisierte Lösungsmittel nicht nachweisbar waren
- PCB und PAK vereinzelt in Spuren vorkamen und überwiegend unterhalb der Nachweisgrenzen lagen

Die Druckfestigkeit lag im Mittel bei 5,8 MN/m². Die Durchlässigkeit der Bohrkernentnahmen war kleiner als 10⁻¹⁰ m/s.

Die Untersuchungen der Bohrkernentnahmen nach durchgeführter Verfestigungsmaßnahme führten im wesentlichen zu den gleichen Ergebnissen wie die Voruntersuchungen.

6.4 Tragschicht aus Verfestigungsprodukten nach dem HDT-Verfahren

Ausgangssituation

Auf mehreren gewerblich genutzten Grundstücken in einer norddeutschen Landeshauptstadt sollte ein Containeranlage errichtet werden. Die betreffenden Grundstücke waren in unterschiedlichen Bereichen durch verschiedene Kontaminationen verunreinigt. Die Stadt als Auftraggeber sowie das die Maßnahme leitende Ingenieurbüro und ein Gutachter entwickelten ein Konzept zur Verwertung und Entsorgung des anfallenden belasteten und unbelasteten Ausbaus. Je nach Zusammensetzung wurde das Material

- als Füllmaterial am Standort verwendet
- in einer Bauschuttdeponie abgelagert
- in einer Hausmülldeponie abgelagert
- in einer Sonderabfalldeponie abgelagert
- in einer stationären Bodenwaschanlage gereinigt
- nach dem HDT-Verfahren in einer mobilen Anlage behandelt und als hydraulisch gebundene Tragschicht verwendet.

Die Maßnahme wurde ausgeführt von der G.A.A. mbH [Lit:6.2].

Sanierungsvorbereitung

In Vorversuchen wurde das mit Mineralölkohlenwasserstoffen und Schwermetallen (Blei und Zink) verunreinigte Erdreich mittels HDT-Verfahren verfestigt.

Aufgrund der geplanten Nutzung als hydraulisch gebundene Tragschicht unter einer Betondecke wurden folgende Anforderungen an das Verfestigungsprodukt festgelegt:

- max. Eluatgehalte nach DEV S4 in Anlehnung an TA Abfall, Anhang H

Kohlenwasserstoffe H 18	0,5 mg/l
Blei	0,5 mg/l
Cadmium	0,05 mg/l
Chrom	0,5 mg/l
Kupfer	1,0 mg/l
Nickel	0,5 mg/l
Quecksilber	0,005 mg/l
Zink	1,0 mg/l
- Festigkeit laut ZTVT-StB 86 für hydraulisch gebundene Tragschicht unter Betondecken nach 28 Tagen: 9 bis 12 MN/m²
Frostsicherheit nach TP-HGT 86
- Durchlässigkeit
Durchlässigkeitsbeiwert k_f kleiner 1×10^{-8} m/s, ermittelt bei 5 m Druckhöhe in Anlehnung an DIN 18130 an 28 Tagen alten Proben

Die durchgeführte Eignungsprüfung zeigte, daß die vorgegebenen Anforderungen eingehalten werden konnten. Die Aufbereitung mußte in den Bauzeitenplan der Gesamtmaßnahme eingefügt werden. Das Material mußte termingerecht für den Einbau als hydraulisch gebundene

Tragschicht (HGT) angeliefert werden. Verlangt wurde eine Leistung von bis zu 800 t/Tag. Die Genehmigung der Maßnahme erfolgte nach dem Abfallrecht unter Beteiligung der entsprechenden Fachbehörden (Städtische Fachbehörden, Staatliches Gewerbeaufsichtsamt, Staatliches Amt für Wasser und Abfall).

Sanierungsdurchführung

Die Aufbereitung des kontaminierten Materials wurde in Baustellennähe auf einem Grundstück des Auftraggebers durchgeführt. Die mobile Aufbereitungsanlage wurde auf einer zu diesem Zweck verlegten Asphaltdecke errichtet. Niederschlagswasser wurde erfaßt und als Anmachwasser verwendet.

Das angelieferte Material wurde vorsortiert und von Fremdstoffen befreit. Das bei der Siebung anfallende Überkorn wurde in einer Brechanlage auf die erforderliche Größe zerkleinert.

Danach wurde das vorsortierte Material in einer ersten Stufe in einer Mischanlage mit hydrophobierend wirkenden Mitteln vermischt. In einer zweiten Stufe wurden hydraulische Additive zugegeben. Das Produkt wurde zur Einbaustelle gefahren und mit geeigneten Geräten eingebaut und verdichtet.

Insgesamt wurden 3.700 t Material behandelt und wieder eingebaut.

Sanierungsüberwachung und Kontrolle des Sanierungserfolges

Die im Rahmen der Fremdüberwachung durchgeführten Kontrolluntersuchungen ergaben, daß die Qualitätsanforderungen hinsichtlich Festigkeit, Frostbeständigkeit, Wasserdurchlässigkeit und Elutionsverhalten erfüllt wurden.

6.5 Vorversuche bei der Verfahrensvorauswahl am Modellstandort Mühlacker

Am **Modellstandort Mühlacker** (Modellstandortprogramm der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) wurden im Rahmen der Verfahrensvorauswahl Versuche mit Verfestigungsverfahren von vier ausgewählten Anbietern durchgeführt.

Ausgangssituation

In der Zeit von 1968 bis 1976 wurden auf der Altablagerung "Eckenweiher Hof" in Mühlacker ca. 5400 m³ Sonderabfälle abgelagert. Im einzelnen handelte es sich um folgende Abfälle:

- Abscheidegut aus Leichtstoff-Fängern, Ölbinder, Bohr- und Schleifemulsionen
- Lösemittelhaltige Stoffe, Lacke und Farben
- Galvanikschlamm, Metallhydroxidschlamm, Wasserentgiftungsabfälle

Die Altablagerung ist aufgebaut aus 4 Einzelbecken mit einer Tiefe von ca.

6 m und einer Kantenlänge von ca. 25 m. Die Becken sind in einer Verwitterungsschicht aus Mergeln angelegt. Die Oberflächenabdeckung der Altablagerung besteht aus einer 1 - 2 m mächtigen Lehmschicht und einer provisorischen Folienabdeckung. 1980 wurden erstmals emittierende Schwermetalle festgestellt, 1983 leichtflüchtige CKW.

Die Vorversuche wurden betreut von TAUW Infra Consult [Lit:6.4].

Versuchsdurchführung

Der Vorversuch wurde mit thermisch desorbiertem Abfall durchgeführt. Die umweltrelevanten Parameter in diesem Material waren Schwermetalle und ölartige Kohlenwasserstoffe.

Das Testprogramm, mit dem die von vier ausgewählten Anbietern angefertigten Probekörper untersucht wurden, umfaßte die:

- Eignungsprüfung gemäß TA Abfall sowie
- Auslaugtests nach den niederländischen Normen:
NEN 7343/7344 (Säulentest)
NEN 7345/7346 (Diffusionstest).

Weiterhin wurden physikalische Parameter untersucht wie

- Druckfestigkeit
- Zerfallsziffer
- Wasserdurchlässigkeit

Zum Vergleich wurde das unbehandelte Material dem gleichen Untersuchungsprogramm unterzogen.

Versuchsergebnisse

Die Rezepturen, mit denen die beteiligten Firmen die Probekörper herstellten, waren unterschiedlich. Die Menge der Zusatzstoffe variierte von 15 bis 50 %.

Die Produkte der Verfestigung waren hell- bis dunkelbraune, ziemlich harte Materialien.

Eine Volumenzunahme trat bei der Verfestigung nicht auf. Das verfestigte Material besaß eine bedeutend höhere Dichte als das unbehandelte Material. Die Probekörper des Anbieters #4 fielen in allen Tests auseinander.

Die Untersuchung des Schadstoffinventars ergab im Ausgangsmaterial hohe Gehalte an Schwermetallen (vor allem Chrom, Kupfer, Blei, Zink) sowie an ölartigen Kohlenwasserstoffen.

In den verfestigten Produkten wurden nur noch 60 bis 95 % der Schwermetalle und 30 bis 60 % des ursprünglichen Gehaltes an Kohlenwasserstoffen festgestellt.

Physikalische Parameter

Die physikalischen Tests wiesen eine Zerfallsziffer (nach Endell) bei den verfestigten Körpern von etwa 2 bis 5 % auf.

Die Probekörper der Firma #4 waren so weich, daß Druckfestigkeit und Durchlässigkeit nicht ermittelt werden konnten.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit ergab Werte von etwa

1,0	MN/m ²	(Firma #3)
1,3	MN/m ²	(Firma #1)
13,0	MN/m ²	(Firma #2)

Die Werte entsprechen den Anforderungen der TA Abfall.

Die Elastizitätsmodule betragen:

107	MN/m ²	(Firma #3)
190	MN/m ²	(Firma #1)
1521	MN/m ²	(Firma #2)

Die Durchlässigkeit der Probekörper lag je nach Firma bei

$6 \cdot 10^{-9}$	m/s	(Firma #3)
$1 \cdot 10^{-9}$	m/s	(Firma #1)
$1,9 \cdot 10^{-11}$	m/s	(Firma #2)

Ergebnisse der Prüfung im DEV S4-Test

Gemäß TA Abfall wurde die Auslaugung mit dem modifizierten DEV S4 Test (DIN 38414-S4) untersucht.

Es konnte festgestellt werden, daß die meisten Eluatwerte in den verfestigten Materialien viel geringer waren als im Ausgangsmaterial. Bei einem Anbieter waren die Eluatwerte allerdings höher. Es handelt sich um den Anbieter, der das weichere Material lieferte. Möglicherweise ist

die Auslaugung durch das Auseinanderfallen des Probekörpers und einer eventuellen Komplexbildung mit Additiven stärker.

Bei Prüfung anhand der Zuordnungswerte der TA Abfall wurde festgestellt, daß der Zuordnungswert von hexavalentem Chrom im Material von zwei Anbietern überschritten wird. Die Eluate der Probekörper der beiden anderen Anbieter wiesen viel niedrigere Konzentrationen an Chrom (VI) auf.

Ergebnisse der Säulentests

Beim Säulentest (s.a. Kap. 4.2.6) zeigte sich, daß es nahezu unmöglich ist, im zerkleinerten Material alle Komponenten gleich stark zu binden. Der Vergleich der Eluatwerte von unbehandelten und verfestigten Materialien zeigt eine sehr starke Zunahme der Auslaugung für Blei. Bei den anderen Komponenten sind die Eluatwerte des behandelten Materials vergleichbar mit denjenigen des unbehandelten Materials. Nur Nickel und Chrom waren stärker gebunden.

Ergebnisse der Diffusionstests

Die Eluatwerte beim Standtest (s.a. Kap. 4.2.6) wurden mit den Zuordnungswerten des niederländischen Entwurfs der Baustoffverordnung verglichen. Dabei zeigte nur das Material des Anbieters #2 niedrige Eluatwerte. Die anderen Verfestigungsprodukte zeigten höhere Eluatwerte.

Auffallend schlecht waren die Eluatwerte bei Sulfat und Cyanid (Anbieter #1),

Cyanid (Anbieter #3) sowie Chrom, Kupfer, Sulfat und Cyanid (Anbieter #4).

Beurteilung des Vorversuchs Verfestigung

Bei der Verfestigung des Abfalls entsteht ein Material, das den Anforderungen der TA Abfall entsprechen kann. Der Anbieter #2 erzielte bezüglich der Elution im DEV S4 Test und bezüglich der physikalischen Parameter das beste Ergebnis.

Die Immobilisierung der Schadstoffe bei der Verfestigung erfolgt in unterschiedlichem Maße durch physikalische und chemische Einbindung.

Sowohl die chemische wie die physikalische Einbindung halten dem Standtest und dem DEV S4 Test stand. Beim Säulentest wird das Material zerkleinert, wodurch die physikalische Einbindung der Schadstoffe (teilweise) aufgehoben wird.

Die Ergebnisse des DEV S4 Tests und des Standtests zeigten relativ niedrige Eluatwerte. Beim Säulentest hingegen zeigte sich, daß nach der Zerkleinerung des Materials die Eluatwerte deutlich höher waren.

Dieses Ergebnis weist darauf hin, daß die Einbindung der Schadstoffe im Material vor allem durch die physikalischen Parameter bestimmt wird.

Die Probekörper des Anbieters #4 fielen bei allen Tests auseinander. Die Eluatwerte waren dementsprechend fast immer viel höher als bei den anderen Firmen.

Es ist schwierig, Aussagen über die Praxisrelevanz der Säulentests und Prognosen über das Langzeitverhalten des geprüften Materials zu machen.

In der Praxis wird verfestigtes Material in der Regel in monolither Form in eine Deponie eingebaut und wahrscheinlich nie so zerkleinert, wie dies beim Säulentest der Fall ist. Dennoch zeigte der Säulentest Schwächen bei der Verfestigung auf.

Die Anbieter #2 und #3 teilten mit, daß mit einer optimierten Rezeptur bessere Ergebnisse erreicht werden könnten. Sie hatten sich das Ziel gesetzt, eine möglichst kostengünstige Verfestigung zu erreichen. Anbieter #4 teilte mit, daß die schlechten physikalischen Eigenschaften seiner Probekörper auf die Verwendung von Zement mit schlechter Qualität zurückgeführt werden könne. Anbieter #2 teilte mit, daß der Säulentest zu hohe Anforderungen an verfestigte Produkte stelle. Allerdings sollen solche Tests auch den "worst case" darstellen.

6.6 Einbau von schwermetallverunreinigtem Erdaushub als Unterbau eines Lagerplatzes

Ausgangssituation

Auf dem Betriebsgelände eines Produktionsstandortes in Bayern fielen im Zuge von Neubau-maßnahmen insgesamt ca. 40.000 t schwermetallkontaminierter Erdaushub und Bauschutt an, der auf ein ordnungsgemäßes Zwischenlager innerhalb des Geländes verbracht wurde. Das Schadstoffinventar und die räumliche Ausdehnung der Verunreinigungen wurde durch Erkundungen von 1988 bis 1991 festgestellt. Hauptkontaminanten waren Arsen, Blei und Zink.

Eine Verbringung des Materials auf eine Deponie bzw. eine Dekontamination mit Hilfe von Bodenwaschverfahren wurde aus ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten als nicht durchführbar betrachtet. Man entschied sich, das kontaminierte Material zu verfestigen und am Standort wieder als Unterbau eines Lagerplatzes einzubauen.

Die Maßnahme wurde ausgeführt von der Fa. IFUWA, Ingolstadt [Lit:6.6].

Sanierungsvorbereitung

Zur Untersuchung der Verfestigungsmöglichkeiten sowie des Elutionsverhaltens wurden aus dem kontaminierten Material je 4 Proben unterschiedlicher Zusammensetzung (Probe 1: Schlacke, Probe 2: Grobsand und Kies, Probe 3: Boden mit ca. 70 % Schluff und Ton, Probe 4: Mischprobe aus Proben 1-3) hergestellt und mit 10 und 20 Gew.-% Zement verfestigt. Die zylindrischen Proben wurden in einem Elutionsversuch nach DEV S4 auf die Parameter Blei, Arsen, Zink, CSB, KMnO_4 -Verbrauch und Sulfat hin untersucht.

Nach der Eluatherstellung wurden die Probenkörper im Labor einem mehrmaligen simulierten Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt und wiederum auf ihre Eluatgehalte hin untersucht. Dabei zeigte sich, daß schon bei einer Zementzugabe von 10 Gew.-% die Schwermetallauswaschung nahezu vollständig gemindert wurde. Außerdem wurde nur ein geringer Abrieb am Probenzylinder der Mischprobe festgestellt.

Zusammengefaßt ergaben die Voruntersuchungen, daß das kontaminierte, zwischengelagerte Material nach Sortierung, Aufbereitung und Zementzugabe als begrenzt tragfähiger Unterbau innerhalb des Betriebsgeländes geeignet war.

Sanierungsdurchführung

Das kontaminierte Material des Zwischenlagers, bestehend aus Erdreich, Beton-Kalksteinbrocken und Mauerwerksfragmenten ehemaliger Produktionsgebäude, wurde in einem Brecher homogenisiert und auf ein Größtkorn von 31,5 mm gebrochen. Anschließend wurde das Material in einem Mischer mit

10 Gew.-% Zement vermengt und in 6 Lagen von 30 cm Dicke eingebaut und verdichtet. In der 4. Lage wurde versuchsweise das Einbauverfahren geändert. Nach Aufbringung einer Lage Erdreich wurde der Zementzusatz eingefräst. Es zeigte sich, daß mit diesem Verfahren die Vermischung von kontaminiertem Material und Zement nicht intensiv genug erfolgte und eine

nicht ausreichende Einbindung der Schwermetalle in Elutionsversuchen festgestellt wurde. Der Einbau der 5. und 6. Lage erfolgte deshalb wieder erst nach der Behandlung im Mischer.

Sanierungsüberwachung

Während der Ausführung wurden aus dem hydraulisch verbesserten Material Proctor-Probekörper hergestellt und auf Druckfestigkeit und Verdichtungsgrad überprüft.

Die Druckfestigkeiten erreichten nach 7 Tagen Werte von 3 bis 7 MN/m² (Mittelwert: 4,3 MN/m²), nach 28 Tagen Werte von 4 bis 9 MN/m² (Mittelwert: 6,2 MN/m²).

Der Verdichtungsgrad der einzelnen Lagen betrug zwischen 91 und 99 %. Zur Untersuchung der Schadstoffeinbindung wurden aus den 6 Lagen insgesamt 14 Probekörper entnommen.

Die Beurteilung der Analyseergebnisse und die Festlegung des Sanierungszieles erfolgte auf der Grundlage des "Altlastenleitfadens Bayern" von 1991.

Die Untersuchung umfaßte die Analyse des Originalmaterials und des Eluatgehaltes auf Blei, Arsen, Zink und stichpunktartig auf organische Parameter (CSB, KMnO₄-Verbrauch) und auf Sulfat.

Die Untersuchung des Originalmaterials ergab für alle Proben Gehalte an Arsen von > 30 mg/kg (Stufe 1 des Altlastenleitfadens Bayern) und bei 10 Proben Gehalte von > 50 mg/kg (Stufe 2). Die Maximalgehalte betragen 320 mg/kg für Arsen, 533 mg/kg für Blei und 1.750 mg/kg für Zink.

Die Eluatgehalte der Proben aus den Lagen 1 bis 3 sowie 5 und 6 zeigten keine signifikanten Schwermetallgehalte. Nur eine Probe aus der Lage 4 (Lage mit versuchsweise geändertem Einbauverfahren) zeigte einen Eluatgehalt an Arsen, der mit 14 µg/l geringfügig über dem Stufe-1-Wert von 10 µg/l lag.

Kontrolle des Sanierungserfolges

Die Baumaßnahme wurde Mitte 1992 abgeschlossen. Regelmäßige Kontrollen der Grundwasserqualität im Bereich der Ablagerungsfläche an 4 eigens hierfür installierten Pegeln haben in der Kürze der Zeit keine negativen Auswirkungen auf das Grundwasser ergeben.

6.7 Wiederverwertung von teerhaltigem Ausbauasphalt

Ausgangssituation

Aufgrund intensiver Straßenbautätigkeit im Rahmen einer Flurbereinigung fielen größere Mengen teerhaltigen Ausbauasphalts an. Beim Ausbau einer Verbindungsstraße sollte der in diesem Raum angefallene teerhaltige Straßenaufbruch wiederverwertet werden. Das zu behandelnde Material sollte nach der Verfestigung als HVT (oberste, hydraulisch verfestigte Lage der Frostschuttschicht) in einer Dicke von ca. 20 cm im verdichteten Zustand eingebaut werden.

Die durchgeführte Versuchsmaßnahme wurde in Abstimmung mit dem Strassenbauamt Reutlingen sowie den zuständigen Stellen im Regierungspräsidium Stuttgart von Heidelberger Zement AG ausgeführt.

Sanierungsvorbereitung

In einer Eignungsprüfung wurde der teerhaltige Straßenaufbruch zu einem Granulat verarbeitet und unter Verwendung des Heidelberger Recyclingbinders verfestigt.

Die Phenolauslaugung (ermittelt im Trogverfahren, Massenverhältnis Feststoff / Wasser 1:10) wurde von 120 µg/l im Eluat am unbehandelten Material auf < 10 µg/l im Eluat am verfestigten Material reduziert.

Sanierungsdurchführung

Die teerbelasteten Verkehrsflächen wurden in Schollen ausgebaut und auf das Gelände eines Schotterwerkes transportiert. Dort war für die Zwischenlagerung eine mit einer bituminösen Wanne ausgestattete Halle errichtet worden.

An die entsprechende Vorbereitung des Planums schloß sich der Einbau des Materials an.

Die Herstellung des Verfestigungsprodukts wurde im mixed-in-plant Verfahren durchgeführt. Das Aufbruchmaterial wurde in einem Brecher auf eine Körnung von 0/32 gebrochen und anschließend mit Sand, Bindemittel und Wasser in einer Mischanlage vermengt.

Des Mischgut wurde mittels LKW zur Einbaustelle transportiert, der Einbau wurde mit einem konventionellen Straßenfertiger durchgeführt. Die Verdichtung erfolgte mit einer Glattmantel- bzw. Gummiradwalze. Die verdichtete Schicht war sofort, auch mit schwerem Baustellengerät, befahrbar.

Die später nicht bituminös überbauten Schulterbereiche der Schicht wurden abgeschrägt und durch Abspritzen mit Bitumenemulsion versiegelt. Nach Abschluß des Einbaus wurde eine Asphaltdeckschicht als Überbauung verlegt.

Sanierungsüberwachung und Kontrolle des Sanierungserfolges

Aus dem auf der Baustelle entnommenen Probematerial wurden Proctor-Prüfkörper hergestellt. Die einaxiale Druckfestigkeit der Prüfkörper aus dem Baustellenmaterial lag im Mittel

etwas höher als bei der Eignungsprüfung. Dies dürfte in erster Linie auf die bessere Durchmischung im eingesetzten Durchlaufmischer zurückzuführen sein.

Zum Zeitpunkt des Baus der Strecke lagen für das Land Baden-Württemberg noch keine Richtlinien für die Wiederverwertung von teerhaltigem Ausbauasphalt vor. Der zum damaligen Zeitpunkt geltende Grenzwert für Straßenbau-Recyclingstoffe hinsichtlich des Phenolindex von 100 µg/l Eluat wurde weit unterschritten.

Es handelte sich bei dem Gebiet, auf dem der Streckenbau stattfand, um keine Wasserschutz- oder Mineralquellenschutzzone. Die Entnahme sowie der Einbau des behandelten Straßenaufbruchs wurde in einem Kataster dokumentiert.

7 Rechtliche Betrachtung

In den nachfolgenden Ausführungen wird beim Hinweis auf Ländergesetze in der Regel auf die in Baden-Württemberg geltenden Vorschriften eingegangen, da vergleichende Betrachtungen über die in anderen Bundesländern geltenden Vorschriften den Rahmen dieses Handbuchs sprengen würden.

Bei der Sanierung von Altlasten werden eine ganze Reihe von Rechtsgebieten je nach Situation mehr oder weniger stark berührt:

- Abfallrecht
- Immissionsschutzrecht
- Wasserrecht
- Bodenschutzgesetz
- Naturschutzrecht
- Gefahrgutverordnung
- Arbeitsschutzrecht

Die Behörde regelt die Art der Genehmigung und legt die Zuständigkeit fest. Bei unsachgemäßer Anwendung und Ausführung von Immobilisierungsverfahren können Nachteile für die Allgemeinheit entstehen, beispielsweise durch:

- Schadstoff-Emissionen während des Bearbeitungsprozesses infolge Wärmeentwicklung oder chemischer Reaktion
- Schadstoff-Emissionen nach Abschluß des Bearbeitungsprozesses aus dem immobilisierten Produkt infolge:
 - mangelhafter technischer Ausführung
 - Oberflächenabrasion bei unzureichendem Oberflächen schutz
 - Lösung der Schadstoffbindung bei unsachgemäßer Lagerung durch Sicker- oder Niederschlagswasser
- Schadstoffaufnahme durch direkten Kontakt oder Nutzpflanzen
- unkontrollierbare Schadstoffverfrachtung auf andere Standorte, wenn das Produkt in den Stoffkreislauf gelangt

Im Genehmigungsverfahren gilt es solche Nachteile durch entsprechende Kontrollen, Auflagen und Bedingungen zu verhindern, beispielsweise durch:

- sachverständige Planung und Durchführung der Maßnahme
- Eigen- und Fremdkontrolle während der Bauausführung mit nachvollziehbarer, lückenloser Dokumentation aller Tätigkeiten und Feststellungen
- Maßnahmen zum Arbeits- und Emissionsschutz während der Bauausführung
- besondere Anforderungen an die sichere Verwendung oder Lagerung des Produktes
- Langzeitkontrolle
- Verbot der unkontrollierten Verlagerung oder Verwertung der erzeugten Produkte

Ein Verbot muß sorgfältig überwacht werden, da durch Immobilisierung das äußere Erscheinungsbild von Bodenkontaminationen so stark verändert werden kann, daß danach die Altlastherkunft nicht mehr ohne weiteres erkennbar ist und gutgläubigen Abnehmern als ein Produkt aus unkontaminierter Rohware angedient werden könnte. Im Einzelfall kann es sinnvoll sein, seitens der Behörden eine Nachweisführung über den Verbleib des immobilisierten Produktes zu fordern.

7.1 Abfallrecht

Landesabfallgesetz Baden-Württemberg

Die systematische Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg wird geregelt durch die Vorschriften des Landesabfallgesetzes (**LABfG**) vom 8.1.1990, zuletzt geändert durch Gesetz vom 12.12.1991, in den Paragraphen 22 - 27.

Gemäß **LABfG § 22** sind altlastverdächtige Flächen "Altablagerungen und Altstandorte, soweit die Besorgnis besteht, daß durch sie das Wohl der Allgemeinheit beeinträchtigt ist oder künftig beeinträchtigt wird". Zu Altlasten werden diese Flächen, wenn von ihnen Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit ausgehen. Was unter dem Wohl der Allgemeinheit zu verstehen ist, wird im Abfallgesetz des Bundes (**AbfG**) vom 27.8.1986, zuletzt geändert durch Gesetz vom 23.9.1990, geregelt (**AbfG § 2**, Abs. 1).

Für die Definition von Abfall kennt das **AbfG** den subjektiven und objektiven **Abfallbegriff**:

- subjektiv: Abfälle sind bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will.
- objektiv: Abfälle sind bewegliche Sachen, deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohles der Allgemeinheit insbesondere des Schutzes der Umwelt geboten ist.

Nach **LABfG § 25** kann die Wasserbehörde Maßnahmen zur Sanierung und Überwachung von Altlasten anordnen. Hinsichtlich des Sanierungszieles wird dabei zwischen Altablagerungen und Altstandorten unterschieden. Ziel der Sanierung ist bei:

- Altablagerungen: Herstellung eines dem Wohl der Allgemeinheit entsprechenden Zustandes
- Altstandorten: Herstellung eines dem Wohl der Allgemeinheit entsprechenden Zustandes und darüber hinaus:
die Beseitigung der Besorgnis der Verunreinigung des Grundwassers

Nach **LABfG § 26** soll die bei der unteren Wasserbehörde gebildete Bewertungskommission die Ergebnisse der Erkundung bewerten, Empfehlungen für die Sanierung erteilen und die Wasserbehörde bei der Sanierungsentscheidung beraten.

LABfG § 27 schließlich gibt der Wasserbehörde das Recht, die Erstellung eines Sanierungsplanes zu fordern.

TA Abfall

Unter einer Sanierung versteht man nach aktuellem Gebrauch des Begriffes sowohl Sicherungs- als auch Dekontaminationsmaßnahmen. Ausgekoffeter Boden wird zwar zur bewegli-

chen Sache, ist aber, solange sein Wiedereinbau z.B. als Produkt eines Immobilisierungsverfahrens on site vorgesehen ist, kein Abfall im Sinne des AbfG. Die Durchführung einer Sicherungsmaßnahme mittels Immobilisierung durch Schadstoffeinbindung müßte sonst u.U. über ein Planfeststellungsverfahren genehmigt werden, was vom Zeitaufwand her kaum mit dem beabsichtigten Zweck einer Sicherungsmaßnahme zu vereinbaren ist.

Die Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (**TA Abfall**), Teil 1, vom 12.03.1991 gilt für die dort in Anhang C aufgeführten besonders überwachungsbedürftige Abfälle. Dazu gehören u.a.:

- 31423 Ölverunreinigter Boden
- 31424 sonstige Böden mit schädlichen Verunreinigungen
- 31441 Bauschutt und Erdaushub mit schädlichen Verunreinigungen

Werden solche Materialien einer Behandlung zur Immobilisierung von Schadstoffen unterzogen und sollen anschließend oder später den Standort der Entnahme und Behandlung verlassen und nicht wiederverwendet werden, unterfallen sie dem Abfallrecht und sind als besonders überwachungsbedürftige Abfälle anzusehen.

Nach den Vorgaben der **TA Abfall Teil 1** darf im Rahmen von Übergangsfristen seit dem 01.04.1992 eine Ablagerung bestimmter Abfälle auf Altdeponien bis zum 01.04.1997 und auf Übergangs-Monodeponien bis zum 01.04.1999 nur noch erfolgen, wenn durch besondere **Maßnahmen für eine verminderte Mobilisierung** der in den abzulagernden Abfällen enthaltenen Schadstoffe gesorgt wird.

Die Kriterien für die Möglichkeit einer Immobilisierung von Schadstoffen in Abfällen bzw. Verfestigung von Abfällen für die oberirdische Ablagerung werden in den Nr. 4.1, 4.4.3.1, 12.2 und im Anhang H unter Bezug auf Nr. 12.2 der TA Abfall, Teil 1 vorgegeben.

Ausgehend von den zuvor genannten Kriterien kommen Verfahren zur Abfallverfestigung in zweierlei Hinsicht zum Einsatz:

1. zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von oberirdisch abzulagernden Abfällen durch Erreichen des Zuordnungswertes D 1 (Festigkeit) des Anhangs D:
Flügelscherfestigkeit $\geq 25 \text{ kN/m}^2$
Axiale Verformung $\leq 20 \%$
Einaxiale Druckfestigkeit $\geq 50 \text{ kN/m}^2$
2. zur Ablagerung von Abfällen auf Altdeponien im Rahmen der Übergangsfrist

In Baden-Württemberg werden Sonderabfälle ausschließlich auf der Sonderabfalldeponie Billigheim abgelagert.

7.2 Immissionsrecht

Als Gesetzesgrundlage dienen das **Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)** vom 11.5.1990, zuletzt geändert durch Gesetz vom 10.12.1990, und die nachgeschalteten Verordnungen.

In der **4. BImSchV** (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) sind unter Ziffer 8.7 **Anlagen zur Behandlung von verunreinigtem Boden** als genehmigungsbedürftig aufgeführt; die Genehmigungsbedürftigkeit erstreckt sich dabei ausdrücklich auch auf Anlagen, die weniger als sechs Monate betrieben werden (im Unterschied zur sonstigen Regelung der 4. BImSchV). Es wird dabei nach Anlagen unterschieden, die

- Boden behandeln, der nicht ausschließlich am Anlagenstandort entnommen wird (Spalte 1).
- Boden behandeln, der ausschließlich am Anlagenstandort entnommen wird (Spalte 2).

Eine **off site** installierte Anlage zur Behandlung (z.B. Immobilisierung) kontaminierten Materials erfordert gemäß Zuordnung durch die 4. BImSchV ein **förmliches Genehmigungsverfahren (mit Beteiligung der Öffentlichkeit) nach § 10 BImSchG**.

Eine **on site** installierte Anlage, in der nur das on site entnommene Material behandelt wird, kann im **vereinfachten Verfahren (ohne Beteiligung der Öffentlichkeit) nach § 19 BImSchG** genehmigt werden.

Üblicherweise erfolgt die Behandlung kontaminierten Materials zur Immobilisierung von Schadstoffen on site in mobilen Anlagen.

Nach **§ 13 BImSchG** schließt eine Genehmigung andere, die Anlage betreffende behördliche Entscheidungen ein (Konzentrationswirkung) mit Ausnahme von

- Planfeststellungen
- bergrechtlichen Betriebsplänen
- atomrechtlichen Genehmigungen
- wasserrechtlichen Vorschriften, soweit es sich nicht um eine Eignungsfeststellung nach § 19 h WHG handelt.

7.3 Wasserrecht

Im Falle von Sicherungsmaßnahmen an einer Altlast sind fast immer auch **wasserrechtliche** Fragen berührt.

Von Bedeutung sind Regelungen aus dem:

- **Wasserhaushaltsgesetz (WHG)** vom 23.9.1986, zuletzt geändert durch Gesetz vom 12.2.1990.
- **Wassergesetz (WG)** für Baden-Württemberg vom 1.7.1988, zuletzt geändert durch Gesetz vom 12.12.1991.

Im **WHG § 3** und **WG § 13** sind Benutzungen definiert, die einer wasserrechtlichen Erlaubnis oder Bewilligung bedürfen.

Dazu gehören u.a.:

- das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser
- das Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser
- alle Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen.

Unter den letzten Punkt fallen in situ-Maßnahmen oder das Auskoffern kontaminierten Materials z.B. innerhalb von Wasserschutzgebieten.

WHG § 19 g fordert, daß Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen und Behandeln wassergefährdender Stoffe keine Verunreinigung von Gewässern oder sonstige nachteilige Veränderungen ihrer Eigenschaften erzeugen dürfen.

WHG § 19 h fordert eine Eignungsfeststellung und Bauartzulassung von Anlagen nach § 19 g, die nicht einfacher oder herkömmlicher Art sind.

7.4 Bodenschutzgesetz und Naturschutzrecht

In Baden-Württemberg gilt das Bodenschutzgesetz (BodSchG) vom

24.06.1991. Nach **BodSchG § 8** sollen die Bodenschutzbehörden

- vom einzelnen und dem Gemeinwesen Gefahren abwehren, die von Bodenbelastungen ausgehen und durch die die öffentliche Sicherheit oder die Ordnung bedroht wird
- von Bodenbelastungen ausgehende Störungen der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung beseitigen, soweit es im öffentlichen Interesse geboten ist.

Zum Schutz und zur Sanierung des Bodens kann die Bodenschutzbehörde u.a. gemäß **BodSchG § 9 Abs. 1 Nr. 6:**

- die zur Überwachung und Sicherung erforderlichen Maßnahmen anordnen, wenn die Beseitigung der Bodenbelastung nicht möglich oder unzumutbar ist.

Als mögliche Sicherungsmaßnahme käme demnach auch eine Immobilisierung von Schadstoffen in Frage.

Die Belange des Naturschutzrechtes werden berührt, wenn die Sanierung in einem besonders schutzwürdigen Bereich liegt oder nachteilige Auswirkungen auf einen solchen Bereich zu erwarten sind.

7.5 Gefahrgutverordnung Straße

Beim Transport kontaminierten Materials zu einer Behandlungsanlage (off site) ist vorab zu klären, ob es sich um Transportgut im Sinne der Gefahrgutverordnung Straße (GGVS) vom 13.11.1990, zuletzt geändert durch Verordnung vom 24.7.1991, handelt.

In Anlage A der GGVS werden gefährliche Transportgüter in Klassen eingeteilt und zur Beförderung zugelassen oder nicht zugelassen. Unter Randnummer 2002 Abs. 1 der Anlage A zur GGVS werden Gefahrgüter in 13 Klassen eingeteilt.

Diese 13 Klassen unterteilen sich in sog. *Nur-Klassen* und *Freie Klassen*. Bei Nur-Klassen sind nur die in der Aufzählung enthaltenen Stoffe zum Transport zugelassen. Bei den freien Klassen sind die in der Aufzählung enthaltenen Stoffe zugelassen; die nicht genannten sind keine gefährlichen Güter und ebenfalls zugelassen.

Die Ergebnisse der jeder Sanierung vorangehenden Erkundung sollten ausreichend genau Schadstoffart und Schadstoffkonzentration beschreiben, um eine Zulässigkeit nach GGVS für den Transport prüfen zu können, ohne das Material erneut beproben zu müssen.

7.6 Arbeitsschutzrecht

Bei allen vorgenannten Teilschritten kann es zum Kontakt der Beschäftigten mit dem kontaminierten Material und den Zusatzstoffen zur Immobilisierung kommen.

Für die Planung und kostenmäßige Berücksichtigung von technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen, der Bereitstellung persönlicher Schutzausrüstung, der arbeitsmedizinischen Vor- und Nachuntersuchung sowie der meßtechnischen Überwachung der Arbeitsplatzgrenz- und -richtwerte (MAK, TRK, BAT, Auslöseschwelle) sind eine Vielzahl von Vorschriften zu berücksichtigen.

In der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 26.10.1993 in der Fassung der Änderung vom 10.10.1993 werden u.a. gefordert:

- **Beschäftigungsbeschränkungen (§ 15b):**
Beschränkungen für Jugendliche, gebärfähige Arbeitnehmerinnen, werdende und stillende Mütter.
- **Ermittlungspflicht (§ 16):**
der Arbeitgeber hat zu ermitteln, ob mit Gefahrstoffen umgegangen wird und ob diese durch minder gefährliche Stoffe ersetzt werden können (z.B. Additive).
- **Überwachungspflicht (§ 18):**
ist das Auftreten gefährlicher Stoffe in der Luft am Arbeitsplatz nicht auszuschließen, so

ist zu ermitteln, ob die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK), die Technische Richtkonzentration (TRK), der Biologische Arbeitsplatztoleranzwert (BAT) unterschritten oder die Auslöseschwelle überschritten wird.

- **Betriebsanweisung (§ 20):**

Der Arbeitgeber hat eine Betriebsanweisung zu erstellen, in der die beim Umgang mit Gefahrstoffen auftretenden Gefahren für Mensch und Umwelt sowie die erforderlichen Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln festgelegt werden; Arbeitnehmer sind anhand der Betriebsanweisung zu unterweisen.

Darüber hinaus sind zahlreiche Einzelfragen in den Technischen Regeln zur Gefahrstoffverordnung (TRGS) und den Unfallverhütungsvorschriften (UVV) der Berufsgenossenschaften geregelt; in diesem Zusammenhang ist besonders auf die Richtlinie **ZH 1/183** der Tiefbau-BG (**Richtlinie für Arbeiten in kontaminierten Bereichen**) hinzuweisen.

Die im Vorfeld einer Sanierungsmaßnahme mit Immobilisierungsverfahren notwendigen Analysen und Vorversuche liefern Aussagen über Schadstoffinventar und Schadstoffverhalten, mit deren Hilfe Arbeitsschutzmaßnahmen konzipiert werden können.

8 Anhang: Anbieterübersicht

Heinrich Becker GmbH

1.) Anschrift der Firma	Brakerstr. 74 46238 Bottrop
2.) Name des Verfahrens	Heide-Werner-Verfahren / Lizenz Heinrich Becker GmbH
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Anorganisch und organisch kontaminierte Materialien jeglicher Konsistenz
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site-Verfahren, Zwangsmischer
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Ausgewählte Braunkohlenaschen, ggfls. in Verbindung mit hydraulischen Bindemitteln
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Eine Zugabe von max. 100 Gew.-% Bindemittel ist mit einer Volumenzunahme von 20-25 % verbunden
8.) Aushärtezeit	Es sind Topfzeiten zwischen 20 und 60 Minuten einstellbar. Die Befahrbarkeit mit schwerem Gerät ist in der Regel nach 24 h möglich
9.) Festigkeit	$> 0,05 \text{ MN/m}^2$
10.) Durchlässigkeit (k_f -Wert)	$< 10^{-9} \text{ m/s}$
11.) Kapazität	Die Kapazität bei Einsatz einer semimobilen Anlage beträgt 10 - 30 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Verfestigtes Material, daß a) in Abhängigkeit vom Standort und Projekt für den Einbau vor Ort geeignet ist, b) als Unterbau für Straßen und Parkplätze, als Lärmschutzwall oder für ähnliche Zwecke uneingeschränkt verwendbar ist, c) uneingeschränkt deponiefähig ist.
13.) Testverfahren	Auslaugtest nach DEV S4 Druckfestigkeit nach DIN 18136 Durchlässigkeit nach DIN 18130 Zerfallsziffer nach Endell
14.) Anlagenmobilität	Semimobil
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	ca. 3 Wochen nach Auftragserteilung (incl. Optimierungsphase)
16.) Wirtschaftlichkeit	Abhängig u.a. von Standort, Umfang der Sanierungsmaßnahme, eventuelle Deponiekosten

17.) Referenzen

Sanierung der ehem. Kokerei "Consolidation" Gelsenkirchen an Ort und Stelle, ca. 20.000 m³ zu behandelnder stark kontaminierter Boden

Einkapselung von ca. 8.000 m³ Säureharz der ehem. Benzolfabrik "Hansemann" in Dortmund an Ort und Stelle

Einbindung von ca. 7.000 m³ stahlwerkspezifisch kontaminierter Bodenmassen der "Henrichshütte", Hattingen an Ort

Fixierung von ca. 60.000 l "Teersäuren" zum Zwecke der Deponierung, Duisburg

Einbinden von ca. 16.000 t problematischer "Gasreinigungsmassen" aus Kokereien und schadlose Anlagerung auf einer Bergehalde

Einkapselung von 500 t PCB kontaminierter Brandrückstände der Versuchsgrubengesellschaft "Tremonia" in Dortmund, unter Tage

Einbindung von jährlich 24.000 t Mn-Wäsche-Stäube aus Hochofenbetrieb zum Zwecke der Deponierung (Dauer-auftrag)

Bilfinger + Berger Umweltverfahrenstechnik GmbH

1.) Anschrift der Firma	Besselstr. 9 68219 Mannheim
2.) Name des Verfahrens	Verfestigungsverfahren, B+B Hochleistungsvermörtelungsanlage
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Organische und anorganische Schadstoffe
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site in voll-mobiler Mischanlage, in-situ-Verfestigung über Injektionen
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Spezialbindemittel mit rein mineralischen Additiven, ca. 10 % Spezialbindemittel pro Tonne kontaminiertem Bodenmaterial
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Je nach Art und Güte des Wiedereinbaus mindestens 5% bis max. 15%
8.) Aushärtezeit	Abhängig von Rezeptur
9.) Festigkeit	1 MN/ m ² nach 7 Tagen, höhere Druckfestigkeit ist je nach Bindemittelanteil jederzeit zu erzielen
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	10 ⁻⁹ m/s
11.) Kapazität	15 - 20 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Betongüte entspricht mindestens B 10, ist jederzeit verbesserbar. Das verfestigte Produkt kann z.B. wieder eingebaut werden.
13.) Testverfahren	Elutionsversuche: gemäß DEV S4, Schweizer Test. Die Schadstoffgehalte im Eluat gemäß DEV S4 liegen unter den Richtlinien für die Deponieklasse 2 (Bauschuttdeponie der NRW-Richtlinie)
14.) Anlagenmobilität	Mobile Anlage
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Anlagenaufbau: 2 Tage, Vorlaufzeit: ca. 14 Tage
16.) Wirtschaftlichkeit	Ab ca. 100 t
17.) Referenzen	1990; Ratherbroich; Branche: Energieversorger; in-situ-Verfestigung von KW belastetem Material mittels Zementinjektion. 1991; Düsseldorf; Branche: Energieversorger; in-situ-Verfestigung von PCB und KW-belastetem Material 1991; Ilseburg; Branche: Metall; Verfestigung von Galvanikschlamm 1992; Ludwigshafen; Branche: Chemie; Verfestigung von Asche aus Klärschlammverbrennung 1992; Freisen; Branche: Metall; Verfestigung von Strahlstäuben 1992; Villingen-Schwenningen; Branche: Metall; Verfestigung von Chrom-belastetem Boden 1993; Chemnitz; Branche: Automobilindustrie; Verfestigung von Chrom-belastetem Boden 1992; Völpke; Branche: Metall; Verfestigung von Chrom-belastetem Boden 1992; Jena; Ärztehaus; Asbestverfestigung

Biodec GmbH Gesellschaft für biologische Reinigungsverfahren

1.) Anschrift der Firma	Am Alten Bahnhof 5 38122 Braunschweig
2.) Name des Verfahrens	Immobilisierungsverfahren für schwermetallkontaminierte Böden auf Basis der Zugabe von modifizierten Aluminium-Silikaten hoher Sorptionsfähigkeit
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Stand der Technik, Verfahren basiert auf Zugabe, Konditionierung und intensiver Vermischung des Zuschlagstoffes mit dem kontaminierten Boden, Feinkornmaterial, Schlamm
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle wie Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber, Zink
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	Insbesondere großflächige, wenig in die Tiefe gehende Bodenkontaminationen können in-situ durch einfaches Vermischen mit dem Sorptionsmaterial unter Einsatz von Landwirtschaftsmaschinen behandelt werden Ausgekoftertes schwermetallkontaminiertes Bodenmaterial wird on-site nach Konditionierung (Korngröße, pH-Wert, Feuchtegehalt) in einem Intensivrieseler behandelt; auf Basis der Gesamt- und Eluatgehalte des behandelten Bodens wird über Nutzung/Verbleib entschieden Hochkontaminierte Feinkornfraktionen aus Bodenwaschanlagen werden off-site behandelt und, wenn möglich, weiter verwertet oder deponiert
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Die Dosiermenge des Sorptionsmaterials liegt je nach Bodentyp, Schwermetallgehalt und Sanierungsziel bei etwa 4-10 Gew.-%. Nach gegebenenfalls erforderlicher Konditionierung (Siebung, pH-Wert Einstellung, FeuchteEinstellung) erfolgt eine Intensivvermischung des Sorptionsmaterials mit dem kontaminierten Boden
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Bis 10 % Gewichtsänderung
8.) Aushärtezeit	Es findet keine Verfestigung statt
9.) Festigkeit	Entspricht dem Ausgangsmaterial
10.) Durchlässigkeit (k_f -Wert)	Gleichbleibend bzw. leichte Verbesserung gegenüber Ausgangsmaterial
11.) Kapazität	Bis 200 t/h bei Einsatz einer Mischanlage
12.) Endprodukt/Verwertung	eingeschränkte bis uneingeschränkte landwirtschaftliche Nutzung bei in-situ-Anwendung Wiederverfüllung Verbleib des behandelten Bodens in Erdwällen, Straßenerunterbauten, Deponieabdeckungen oder Deponierung
13.) Testverfahren	Perkolations- und Elutionsversuche, pH-abhängig mit Wasser oder anderen Lösungsmitteln
14.) Anlagenmobilität	Mobile Anlage
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Vorbereitungszeit bis zur Aufstellung ca. 1 Woche
16.) Wirtschaftlichkeit	Sofern eine Mischanlage eingesetzt wird, lohnt der Einsatz ab etwa 5.000 t
17.) Referenzen	Großflächige Bodenbehandlung einer Zinkschmelzerei, Hasselt, Belgien Fluß-/Hafenschlammbehandlung, Hasselt, Belgien

Dyckerhoff AG

- | | |
|---|---|
| 1.) Anschrift der Firma | Biebricher Str. 69
65203 Wiesbaden |
| 2.) Name des Verfahrens | Immobilisierung mit Dyckerhoff LIPIDUR
(=Produktgruppe), Verarbeitung mit Textkörper-Misch-
und Einarbeitungsverfahren |
| 3.) Entwicklungsstadium der Anlage | Serienanlage, tatsächliche Ausführung von Verfestigungs-
/Immobilisierungsprojekten seit einigen Jahren |
| 4.) Schadstoffart/Abfallstoffe | Schwermetalle, Ölrückstände, Benzinrückstände, Misch-
kontaminationen |
| 5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik | Zentralmischverfahren oder Einfräsverfahren, on-site oder
off-site |
| 6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe | Herstellung von mörtelähnlichen Produkten lediglich unter
Zugabe von Dyckerhoff LIPIDUR. Im Einzelfall zur Aus-
steuerung der Kornverteilung Zugabe von Inertstoffen.
Zugabe von Dyckerhoff LIPIDUR zwischen 5 und 35 %. |
| 7.) Gewicht- / Volumenänderung | Gewichtsänderung je nach Mengenzugabe zwischen 5 und
35 %, Volumenänderung gering, da eine Verdichtung er-
folgt |
| 8.) Aushärtezeit | Je nach Mengenzugabe 1-7/28 Tage |
| 9.) Festigkeit | Steuerbar je nach Mengenzugabe und Verdichtung in der
Größenordnung von ca. 1-25 MN/m ² |
| 10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert) | Zwischen 10 ⁻⁸ und 10 ⁻¹¹ m/s nach 28 Tagen |
| 11.) Kapazität | Abhängig vom Anlagentyp |
| 12.) Endprodukt/Verwertung | Verfestigter Körper, zur Nutzung als Planum, Unterbau,
Fundationsschicht o.ä. |
| 13.) Testverfahren | Elutionsversuch nach DEV S4, Trogverfahren, Frost/Tau-
Widerstandversuch, Soxleth-Verfahren |
| 14.) Anlagenmobilität | In der Regel mobile Anlagen, jedoch auch stationäre Anla-
gen eingesetzt |
| 15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit | Vorbereitungszeit nur wenige Stunden oder Tage für Auf-
stellung der Anlage. Dabei muß Rezeptur jedoch aufgrund
einer Eignungsprüfung bereits feststehen. |
| 16.) Wirtschaftlichkeit | Da mit Kleinanlagen ebenfalls Einsatz von Dyckerhoff
LIPIDUR möglich ist, schon wirtschaftlicher Einsatz ab
einigen 100 m ³ kontaminiertem Boden. |
| 17.) Referenzen | Vorhanden, Sanierungen wurden mobil oder stationär
durchgeführt. Kombination auch mit anderen Verfahren |

G.A.A. Gesellschaft für Abfallaufbereitung mbH

1.) Anschrift der Firma	Berliner Straße 87 27232 Sulingen
2.) Name des Verfahrens	HDT-Verfahren (Hydrophobierung durch Trägerstoffe)
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Verschiedene Anlagen
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Verschiedene, in erster Linie mineralische Abfallstoffe, Böden, Schlämme, Aschen Geeignet für Schwermetalle, schwerflüchtige KW, MKW
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site, off-site
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Recyclingbinder, hydraulische und organische Bindemittel, Additive
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Volumenänderung abhängig von Ausgangsmaterial und der Rezeptur, Zugabe von bis zu 30 Gew.-% Additivgemisch
8.) Aushärtezeit	Abhängig vom Bindemittel
9.) Festigkeit	2,5 - 150 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	Bis 10 ⁻¹¹ m/s
11.) Kapazität	Je nach Anlage und Material 2 - 70 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Gebundene Tragschicht im Bauwesen Granulat als Schüttgut im Bauwesen Körper zur Ablagerung auf Deponien Zuschlagstoff im Bauwesen
13.) Testverfahren	Elutionsversuche, Festigkeit, Wasserdurchlässigkeit, Frostbeständigkeit gemäß der jeweils gültigen geforderten Vorschriften (Land, Bundesland)
14.) Anlagenmobilität	Mobile Anlage, die auch an Standorten eingesetzt werden kann
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Vorbereitungszeit (Eignungsprüfung) bis 3 Monate Genehmigung (je nach Verfahren) 3 bis 12 Monate Aufstellung (je nach Anlage/Objekt) 2 Tage bis mehrere Wochen
16.) Wirtschaftlichkeit	Abhängig vom Einzelfall

17.) Referenzen

Aufbereitung über 100.000 t ölverunreinigter Böden zur Wiederverwendung im Bauwesen
Aufbereitung von 2.000 t durch Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle belastetem Boden auf einem Schrottplatz, Verwendung als Unterbau vor Ort, 1988
Behandlung von 600 t durch Kohlenwasserstoffe und PAK belastetem Boden einer Gerberei, Verwendung als Unterbau für Lagerplatz auf Deponie, Dezember 1990
Behandlung von 900 t mit PAK und Teerölen belasteten Schlammes aus Bodenwäsche, Gaswerk, Deponierung des Materials, April 1991
Behandlung von 3.800 t durch Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle belasteten Bodens eines Gewerbestandortes, Wiedereinbau als gebundene Tragschicht bei einer Baumaßnahme, Juni 1991
Behandlung von ca. 10.000 t mit Roherdölbelasteten Bohrschlammes einer Bohrschlammdeponie, Wiedereinbau, Unterbau für Biotop, Mai 1992
Behandlung von ca. 30.000 t mit Roherdöl verunreinigtem Boden und Kies aus ehemaliger Ölaufbereitung, Verwendung auf diversen Baustellen und Wiedereinbau auf dem Grundstück, seit Juni 1992

Geodur GmbH

- | | |
|---|---|
| 1.) Anschrift der Firma | Wildenbruchstr. 15
07745 Jena |
| 2.) Name des Verfahrens | Geodur Immobilisierungs- und Verfestigungstechnologie (eigene Entwicklung) |
| 3.) Entwicklungsstadium der Anlage | Die Geodur-Produkte, die Technologie sind entwickelt und werden eingesetzt. Zur Mischung werden handelsübliche Baumaschinen wie in der Betonindustrie eingesetzt. |
| 4.) Schadstoffart/Abfallstoffe | Kontaminierte Böden/Erddreich, Aschen, Schlacken, Bau-schutt, Rückstandsmaterialien u.a. |
| 5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik | Anwendungen: in situ, on-site oder off-site |
| 6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe | Rezepturen werden individuell nach Schadstoffinhalten entwickelt, mit und/oder ohne Zuschlagstoffe. Textkörper-rezepturen beinhalten geringe Mengen Zement. Weitere mögliche Zuschlagstoffe z.B.: Flugaschen, Schlacken, Sand, Kalk u.a. |
| 7.) Gewicht- / Volumenänderung | ca. 5 - 12 % |
| 8.) Aushärtezeit | wie Beton |
| 9.) Festigkeit | 2 - 15 MN/m ² |
| 10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert) | Variabel - Basismaterial-abhängig |
| 11.) Kapazität | Abhängig von der Maschinenkonfiguration - bis zu 120 t/h |
| 12.) Endprodukt/Verwertung | Das Endprodukt ist ein betonartig verfestigtes Material in dem die Schadstoffe chemisch und physikalisch eingebunden sind.
Verwendungsmöglichkeiten: Tiefbau, Straßen-, Wege-/Flächenbau, Deponiebau/-sanierung, Böschungsbau, Schallschutzwände u.a., oder gesicherte Deponierung kontaminierter Materialien. |
| 13.) Testverfahren | Reihen von Eluat-, Druckfestigkeit- und anderen Technisch-Biochemischen Werten liegen vor. |
| 14.) Anlagenmobilität | Einsetzbar sind mobile oder stationäre Mischanlagen. |
| 15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit | Keine eigenen Anlagen. Geodur liefert das Produkt und die notwendige Technologie. |
| 16.) Wirtschaftlichkeit | Mit kleineren Mischanlagen oder in-situ Technik ab ca. 200 t. |
| 17.) Referenzen | Torshavn, Färöer Inseln, Hafen, Containerterminal
Dänemark, Straßenbauten
Schweiz, Wege- und Industrieflächenbauten
Tansania, Unterbau für Industrieflächen |

Heidelberger Zement AG

1.) Anschrift der Firma	Im Breitspiel 19 69126 Heidelberg
2.) Name des Verfahrens	Depocrete System, Recyclingbinder
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Mobile Mischanlagen u.a. für Kleinmengen (8 t/h) bzw. für großtechnische Versuche
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe, z.T. Salze (Rauchgasreinigungsfiterstäube); Böden, Schlämme, Stäube, Sekundärbaustoffe (z.B. Straßenaufbruch)
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On site und off site je nach Schadstoffproblematik und behördlichen Vorgaben
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Mineralische Bindemittel sowie ggf. Compounds.
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Abhängig von Schadstoff und Anforderung: durchschnittlich 20 % Gewichts- und 10 % Volumenzunahme
8.) Aushärtezeit	Variiert von Schadstoff zu Schadstoff, Endfestigkeit nach 28 Tagen
9.) Festigkeit	Abhängig von Anforderung an das zu verfestigende Material, Zielwert: $> 5 \text{ MN/m}^2$
10.) Durchlässigkeit (k_f -Wert)	Abhängig von Anforderung an das zu verfestigende Material, Zielwert: $< 10^{-8} \text{ m/s}$
11.) Kapazität	1 - 30 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Deponierung gemäß TA Abfall Anhang H; TA Siedlungsabfall. Wiederverwertung im Straßenbau als HGT (hydraulisch gebundene Tragschicht, Lärmschutzwand etc.)
13.) Testverfahren	Gemäß TA Abfall modifiziertes DEV S4-Verfahren, Schweizer TVA-Test oder auf Wunsch des Kunden. Prüfung der Druckfestigkeit, Durchlässigkeit und des Frost-Tau-Verhaltens
14.) Anlagenmobilität	Mobil
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Abhängig von der Größe der Anlage sowie behördlicher Genehmigung: 1 Woche bis mehrere Monate
16.) Wirtschaftlichkeit	Abhängig von anderen Sanierungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten: u.U. ab 10 t
17.) Referenzen	1990, kontaminierte Gießereisande, Industriebetrieb, Geislingen 1991, zinkhaltige Aufbereitungsschlämme, Industriebetrieb, Goslar 1991, kontaminiertes ehemaliges Hüttengelände, Materialverfestigung, Neunkirchen 1991, salzhaltige Filterstäube, Entsorger, Rosenheim 1991, verunreinigtes Talkum, Industriebetrieb, Lindau 1992, schwermetall- und salzhaltige Filterstäube, Unternehmer, Kempten 1992, Verwertung von teerhaltigen Strahlsanden im Straßenbau, Behörde, Heidelberg 1992, zinkkontaminierter Boden, Baufirma, Frankfurt/M. 1992, Asche aus Klärschlammverbrennung (Industrie), Baufirma, Mannheim 1992, hochreaktive Schleifschlämme, Entsorger, Dossenheim 1992, Neutralisationsschlämme (Schwermetalle), Industriebetrieb, Netzschkau

Heitkamp Umwelttechnik GmbH

1.) Anschrift der Firma	Heinrichstraße 67 44805 Bochum
2.) Name des Verfahrens	Verfestigungsverfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Stand der Technik, Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On site, off site
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Hydraulische Bindemittel ggf. in Kombination mit organischen Bindemitteln
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Durchschnittlich 5 % Volumenzunahme
8.) Aushärtezeit	Befahrbarkeit mit schwerem Gerät nach 2 bis 24 h
9.) Festigkeit	Durchschnittlich > 2,5 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	Durchschnittlich < 10 ⁻¹⁰ m/s
11.) Kapazität	-
12.) Endprodukt/Verwertung	Verfestigungsprodukt Einbau in Deponie als monolithischer Körper Herstellung von Unterbauten, Tragschichten, Wällen
13.) Testverfahren	Elutionsversuch nach DEV S4 Druckfestigkeit nach DIN 18136 Durchlässigkeit nach DIN 18130, Teil 1, in der Triaxialzelle Zerfallsneigung bei Unterwasserlagerung nach Endell
14.) Anlagenmobilität	Mobile und stationäre Anlagen
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-

17.) Referenzen

Versuchsdeponie zur Verfestigung, Sanierung einer ehemaligen Teerpappenfabrik, Verfestigung von 17.000 t Boden und Bauschutt, kontaminiert mit PAK, Schwermetallen, PCB, Phenole, Mineralöl, Teeröl, Bochum, Dezember 1987 bis Mai 1989

Verfestigung von 7.700 t ölhaltiger Bleicherde, kontaminiert mit PCB, Mineralölen, Lengerich, Dezember 1988 bis Februar 1989

Off site-Verfestigung zur Sanierung eines ehemaligen Gaswerkgeländes (Innenstadtbereich, Fußgängerzone), Verfestigung von 2.400 t Boden kontaminiert u.a. mit PAK, Phenol, Naphtalin, Cyanid, Nienburg, Oktober bis November 1989

Konditionierung von 25.500 t Klärschlämmen (Verfestigung), kontaminiert mit Schwermetallen, Solingen, Juni 1990 bis Juli 1991

On site-Verfestigung eines ehemaligen Kokereigeländes, 45.000 t Bauschutt, Schlamm kontaminiert mit PAK, Arsen, Phenol, BTX, Oer-Erkenschwick, Oktober 1990 bis Mai 1992

On site-Verfestigung zur Sanierung des ehemaligen Koke-reistandortes, Produktverwertung im Lärmschutzwahl, Verfestigung von 2.500 t Boden und Bauschutt kontaminiert mit Quecksilber, Cyanide, PAK, Essen, Oktober 1991 bis Februar 1992

On site-Verfestigung eines ehemaligen Stahlwerksgeländes, Entgasung und Verfestigung von 20.000 t Boden und Bauschutt, kontaminiert mit PAK, Schwermetallen und BTX. Dortmund, Juni 1993 bis Februar 1994

Hochtief Umwelt GmbH

1.) Anschrift der Firma	Huyssenallee 86-88 45128 Essen
2.) Name des Verfahrens	Eigene Entwicklung auf der Basis von handelsüblichen Maschinenkomponenten
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Großmaßstab
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, organische Schadstoffe, Cyanide
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site, off-site
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Hochofenzement, Flugasche, organische Polymerbinder, Wasserglas
7.) Gewicht- / Volumenänderung	5 - 7 Gew.-% / Volumenänderung gering
8.) Aushärtezeit	28 Tage
9.) Festigkeit	> 2,5 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	< 10 ⁻⁸ m/s
11.) Kapazität	Variabel
12.) Endprodukt/Verwertung	Straßenunterbau, Wiedereinbau vor Ort, Lärmschutz
13.) Testverfahren	Trogversuche mit Proctorkörpern, Kantenlänge 10 cm, 14 Tage im Wasser gelagert (pH 6,5), Untersuchung des Eluats auf Leitfähigkeit, pH-Wert und Schadstoffe, zu- sätzlich: Druckfestigkeit (einaxial nach DIN 18136, nach 7 und 28 Tagen), Bestimmung des k _f -Wertes, Feuchtebe- ständigkeit (Zerfallsziffer nach Endell)
14.) Anlagenmobilität	Mobil, versetzbar
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	ca. 1 - 2 Monate für Eignungsversuche, Einführungs- und Optimierungsphase kurz
16.) Wirtschaftlichkeit	Ab ca. 2.000 m ³ bei Verfestigung Ab ca. 500 m ³ bei Komplexierung
17.) Referenzen	Rheine, 750 m ³ cyanidhaltiger Boden, Komplexierung Hamburg, ca. 50.000 m ³ steinkohleteerhaltige Straßenbe- läge, Verfestigung

IFUWA GmbH

1.) Anschrift der Firma	Lindberghstr. 9-13 85051 Ingolstadt
2.) Name des Verfahrens	Verfestigungsverfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Zement
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Gewichtsänderung 10 %
8.) Aushärtezeit	6-9 Tage
9.) Festigkeit	6-7 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	10 ⁻⁹ bis 10 ⁻¹⁰ m/s
11.) Kapazität	30 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Verfestigungsprodukt Basisfundament für Lagerplatz
13.) Testverfahren	Elutionsversuch gemäß DEV S4 an verfestigten, ungestörten Probekörpern Beurteilung des Zerfallgrades Schwermetallanalysen im Original und Eluat
14.) Anlagenmobilität	Mobile Anlage
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	ca. 4 bis 8 Wochen
16.) Wirtschaftlichkeit	ca. ab 10.000 t
17.) Referenzen	Verfestigung von ca. 40.000 m ² schwermetallverunreinigtem Erdaushub und Verwertung als Unterbau eines Lagerplatzes

INCA Baustofftechnik GmbH

1.) Anschrift der Firma	Waffenschmidtstr. 4 50767 Köln
2.) Name des Verfahrens	INCA-Verfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Technikumsanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	MVA- und SAV-Filterstäube, Gichtgasstäube, kontaminierte Böden (max. Korngröße < 3mm)
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site und off-site möglich
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	85 % Abfallstoffe, 15 % Zement, 15 % Wasser (7 % Zugabe zur Mischung, 8 % Aufnahme während des Härtens)
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Gewichtszunahme bezogen auf Reststoffe, trocken: 35 % (einschließlich Wasser), Gewichtszunahme ohne Berücksichtigung des Wassers: 18 %
8.) Aushärtezeit	1 + 4 + 1 (eine Stunde Aufheizen, 4 Stunden Halten bei 203° C, 1 Stunde Abkühlen)
9.) Festigkeit	25 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	10 ⁻¹⁰ m/s Mittelwert
11.) Kapazität	12 t/h mit einer Walzenpresse
12.) Endprodukt/Verwertung	Brikettförmige Kompaktate mit einer Länge von ca. 35 mm; Verwendungsmöglichkeiten: als Zwischenabdeckmaterial auf Deponien anstelle von Sand und Kies, als Zuschlagstoff zur Herstellung von Bergbaumörtel
13.) Testverfahren	Elution in Anlehnung an DEV S4 bei pH-Werten von 4 bis 11; Säulentest, Durchlässigkeitsbeiwerte
14.) Anlagenmobilität	Standortgebunden
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Von Planung bis Inbetriebnahme ca. 18 Monate
16.) Wirtschaftlichkeit	Ab 8 t/h
17.) Referenzen	-

Keller Grundbau GmbH

1.) Anschrift der Firma	Bereich Nord Becklinger Str. 21 29683 Fallingbostal
2.) Name des Verfahrens	Soilcrete-Verfahren Injektionsverfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Stand der Technik
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	In-situ, on-site; auch in Kombination mit anderen Verfahren (z.B. Bodenwäsche, biologische Verfahren)
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Beliebige Wahl des Bindemittels
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Gewichtszunahme abhängig von Bindemittel, in der Regel keine Volumenzunahme
8.) Aushärtezeit	Abhängig von Bindemittel
9.) Festigkeit	ca. 1 - 2 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	ca. 10 ⁻⁸ m/s
11.) Kapazität	-
12.) Endprodukt/Verwertung	In-situ-Verfestigungskörper
13.) Testverfahren	Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Elutionsversuche
14.) Anlagenmobilität	Mobil
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-
17.) Referenzen	Erprobung des Sanierungsverfahrens, phenolkontaminierter Standort, Hamburg, 1988

Leo Consult GmbH

1.) Anschrift der Firma	Weserstr. 84 28757 Bremen
2.) Name des Verfahrens	HDT-Verfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Stand der Technik (Leco-Neu-Anlage)
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site, off-site
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Erdalkalioxide, ggf. Erdwachse, Parafine, Alkalisulfide, hydraulische Bindemittel
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Bis zu 30 % Gewichtszunahme durch Zugabe des Bindemittels
8.) Aushärtezeit	Abhängig von Bindemittel und Ausgangsmaterial, Endfestigkeit nach 28 Tagen
9.) Festigkeit	Bis ca. 10 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	ca. 10 ⁻⁹ bis 10 ⁻¹² m/s
11.) Kapazität	Ausgelegt auf 10 m ³ /h
12.) Endprodukt/Verwertung	Deponierung, Verwendung als Straßenunterbau, Verwendung in Dämmen
13.) Testverfahren	Elutionsversuche gemäß DEV S4, bzw. nach behördlich vorgegebenen Analyseverfahren Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Zerfallsziffer nach Endell
14.) Anlagenmobilität	Mobil
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Dauer der Eignungsprüfung ca. 1 Monat
16.) Wirtschaftlichkeit	Bei on-site Maßnahmen ab ca. 2.000 - 3.000 t

17.) Referenzen

Planung und technische Leitung bei der Sanierung kontaminierter Standorte durch Verfestigungsverfahren (Auszüge aus der Referenzliste):

DCR:

1975, Privater AG, Bremen, ölverunreinigtes Erdreich

1977, Privater AG, Bremen, mit Dieseldieselkraftstoff verunreinigtes Erd- und Schottermaterial

1978, Behörde, Brest, ölverunreinigtes Erdreich ("AMO-CO-CADIZ")

1979, Privater AG, Marchegg, ölverunreinigtes Erdreich und Gletscherschotter

1980, Privater AG, Lübeck, mit Steinkohleteer verunreinigtes Erdreich

1981, Privater AG, Bremen, ölverunreinigtes Erdreich

1982, Öffentlicher AG, Hannover, ölverunreinigtes Schottermaterial

1983, Privater AG, Dubová (CSFR), Säureteere

1984, Privater AG, Kassel, Öl- und Lackschlämme

HDT:

1985, Behörde, Sanierungsarbeiten auf der Deponie Münchehagen

1986, Northeim, Privater AG, ölverunreinigtes Erdreich

1987, SAD Münchehagen, Verfestigung von Schlämmen aus der Sickerwasserbehandlung

1988, Privater AG, Verfestigung von kontaminiertem Boden (PCB, CKW, Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle) nach dem HDT-Verfahren

1989-91, Jaroslavl, UdSSR, Behandlung Säureharze

Pokker Bodensanierung GmbH

- | | |
|---|---|
| 1.) Anschrift der Firma | Eibacher Hauptstraße 121
90451 Nürnberg |
| 2.) Name des Verfahrens | Pokker Bodensanierungsverfahren (PBS-Verfahren) |
| 3.) Entwicklungsstadium der Anlage | Die Anlagen sind praxiserprobt und haben ca. 100.000 t kontaminierten Boden behandelt |
| 4.) Schadstoffart/Abfallstoffe | Schwermetalle, PAK, PCB, Cyanide und andere |
| 5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik | Behandlung ausschließlich on-site, Erstellung eines kontrollfähigen Systems mit Errichtung von Beobachtungsbrunnen |
| 6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe | Hydraulische Bindemittel, organische Additive, Fällungsmittel |
| 7.) Gewicht- / Volumenänderung | Gewicht- und Volumenänderung in % kaum nachweisbar, da Dosierung im Niedrigbereich (1 bis 3 %) |
| 8.) Aushärtezeit | Aushärtezeit abhängig vom Zuschlagstoff in 5 - 30 Tagen |
| 9.) Festigkeit | 0,5 - 2 MN/m ² , Festigkeit abhängig vom Zuschlagstoff |
| 10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert) | 10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹⁰ m/s |
| 11.) Kapazität | 100 - 150 t/h |
| 12.) Endprodukt/Verwertung | Verfestigtes Produkt geeignet für Bauwerksgründung, Material entspricht Bodenklasse 6 |
| 13.) Testverfahren | Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Elutionsversuche nach DEV S4, Elutionsversuche mit 3 Medien unterschiedlicher Aggressivität (pH von 6,5 - 5,5 - 2) an einem Prüfkörper (27 x 27 x 20 cm) über 3 x 24 h zur Abschätzung des Langzeitverhaltens. Dabei wird eine höherbelastete Probe und eine wesentlich größere Oberfläche als in natura gewählt. |
| 14.) Anlagenmobilität | Ausschließlich mobil |
| 15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit | Kurzfristig nach Vorliegen der BimSch-Genehmigung |
| 16.) Wirtschaftlichkeit | Ab etwa 2.000 t |
| 17.) Referenzen | BMW AG, Niederlassung Nürnberg, 50.000 t
Stadt Nürnberg, Klärwerk I, 8.000 t, Bodensanierung und Bauwerksgründung |

Rethmann Sanierungsdienste GmbH

1.) Anschrift der Firma	Dieselstr. 3 44805 Bochum-Gerthe
2.) Name des Verfahrens	Kein spez. Markenname, Weiterentwicklung
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Modifizierte Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, Organik (Teere, Kohlenwasserstoffe, CN) anorganisch und organisch belastete Schlämme
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site, off-site in Verbindung mit nachgeschaltetem Deponiebetrieb
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Bindemittel mit hydraulischen und latent hydraulischen Eigenschaften, Additive auf Polymerbasis
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Volumenänderung von 5 - 20 % Gewichtsänderung 2 - 15 %
8.) Aushärtezeit	28 Tage Endhärte, nach 3 Tagen Befahrbarkeit
9.) Festigkeit	> 2,5 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	< 10 ⁻¹⁰ m/s
11.) Kapazität	ca. 10 t/h, je nach Größe der Anlage
12.) Endprodukt/Verwertung	Deponietechnische Zwecke, Verfüll- und Untergrundmaterial (Parkplatz, etc.)
13.) Testverfahren	Zerfallsziffer nach Endell Einaxiale Druckfestigkeit DIN 18136 Wasserundurchlässigkeit DIN 18130 Elutionsversuche nach DEV S4 Bestimmung nach TA Abfall, Anhang D 4.01 - 20
14.) Anlagenmobilität	Mobil
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Verfügbarkeit ca. 2 - 3 Wochen, Vorbereitungszeit ca. 1 Woche
16.) Wirtschaftlichkeit	Ab ca. 1.000 t
17.) Referenzen	Auf Anfrage

E. Schwenk Zementwerke KG

1.) Anschrift der Firma	Hauptverwaltung Hindenburgring 15 89077 Ulm/Donau
2.) Name des Verfahrens	Schwenk Recyclingbinder Schwenk Deponiebinder
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Die Fa. E. Schwenk bietet keine Verfahrenstechnik an, sondern ausschließlich Spezialbindemittel
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Recyclingbinder: Müllverbrennungsroostaschen, teerhaltiger Ausbauasphalt, Asphalt, Bauschutt, kontaminiertes Bodenmaterial Deponiebinder: Stäube aus Verbrennungs- und Filteranlagen, Klärschlämme, Farben- und Lackschlämme, ölkontaminiertes Bodenmaterial, schwermetallhaltiges Bodenmaterial, Asbestfasern
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	-
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Hydraulische Bindemittel, ggf. hydrophobierende Additive
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Recyclingbinder: i.d.R. Zugabe von ca. 5 - 9 Gew.-% Deponiebinder: i.d.R. Zugabe von ca. 24 - 36 Gew.-%
8.) Aushärtezeit	Abhängig von Rezeptur, Endfestigkeit nach 28 Tagen
9.) Festigkeit	Recyclingbinder: nach 7 Tagen bis ca. 9 MN/m ² , nach 28 Tagen bis ca. 11 MN/m ² Deponiebinder: Endfestigkeit ca. 1,4 bis ca. 6 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	Deponiebinder: ca. 10 ⁻⁹ m/s (abhängig von Zugabemenge)
11.) Kapazität	-
12.) Endprodukt/Verwertung	Recyclingbinder: Bodenverbesserung des Untergrundes nach ZTVE-Stb Bodenverfestigung der Frostschutzschicht nach ZTVV-Stb Hydraulisch gebundene Tragschicht nach ZTVT-Stb statische Bodenverbesserung als Baugrund von ruhenden Bauwerken Deponiebinder: Deponierung
13.) Testverfahren	Elutionsversuche nach DEV S4, Trogverfahren, Schweizer Eluattest, Druckfestigkeit, Durchlässigkeit
14.) Anlagenmobilität	-
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-
17.) Referenzen	-

Leonard Weiss GmbH & Co

1.) Anschrift der Firma	Postfach 1565 74564 Crailsheim
2.) Name des Verfahrens	Petrifizierung
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Versuchsanlage Großanlage in Planung
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Kontaminierter Boden und Bauschutt, insbesondere Schwermetallkontaminationen
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site oder off-site, diskontinuierliches Verfahren, Behandlung im Zwangsmischer
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Hydraulisches Bindemittel auf Zementbasis
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Gewichtszunahme ca. 10 - 20 % durch Wasser- und Bindemittelzugabe
8.) Aushärtezeit	ca. 1 bis 2 Stunden
9.) Festigkeit	Entsprechend Beton B 10 oder höher
10.) Durchlässigkeit (k_f -Wert)	$< 10^{-10}$ m/s
11.) Kapazität	Geplant 20 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Verfestigungsprodukt, auf Bauschutt-/Erddeponie ablagerbar oder Verfüllung vor Ort
13.) Testverfahren	Elutionsversuche in Anlehnung an DEV S4, Durchströmungsversuch, Umströmung definierter Probekörper unter definierten Bedingungen (interner Vergleichstest); Durchlässigkeit, Druckfestigkeit
14.) Anlagenmobilität	Mobil
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Vorbereitung innerhalb der Laufzeit der behördlichen Genehmigung
16.) Wirtschaftlichkeit	Ab ca. 1.000 t je nach Schadstoffart und Randbedingungen
17.) Referenzen	Technikumsversuche

Ed. Züblin AG

1.) Anschrift der Firma	Albstadtweg 3 70567 Stuttgart
2.) Name des Verfahrens	Verfestigungsverfahren, eigene Entwicklung
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, PAKs
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On-site-Verfahren
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Hydraulische Bindemittel
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Aufgrund der Verdichtung erfolgt keine nennenswerte Volumenvergrößerung
8.) Aushärtezeit	Von der Rezeptur abhängig
9.) Festigkeit	Einaxiale Druckfestigkeit > 2,5 N/mm ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	Abhängig vom Ausgangsmaterial, zeitabhängig, 10 ⁻⁸ bis 10 ⁻¹⁰ m/s
11.) Kapazität	10 bis 30 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Verfestigungsprodukt; Einlagerung in untergeordneten Deponien, Wiedereinbau vor Ort, Unterbau für Lärm- schutzwälle, Abdeckmaterial für Deponien
13.) Testverfahren	Elutionsversuche gemäß DEV S4, Auslaugtest nach dem Trogverfahren, Zerfallbeständigkeit nach Endell, einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18130, Durchlässigkeit nach DIN 18136
14.) Anlagenmobilität	Mobile Anlage
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	Ab ca. 1.000 t
17.) Referenzen	Technikumsversuche

Chemfix International Incorporated

1.) Anschrift der Firma	3838 N Causeway Blvd, Suite 2500 Metairie, CA 70002 USA
2.) Name des Verfahrens	Chemfix-Verfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Demonstrations- und großtechnische Anlagen
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, petrochemische Verunreinigungen; Flugaschen, Schlämme, verschiedene chemische Abfallstoffe, Böden
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On site, off site
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Chemset pozzolanic calcium (feste Reaktionszusätze, puzzolanicische Beschleuniger, Fällungsmittel, Sorptionsmittel)
7.) Gewicht- / Volumenänderung	ca. 15 - 20 % Volumenzunahme
8.) Aushärtezeit	1 - 78 h
9.) Festigkeit	ca. 0,5 N/mm ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	ca. 10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹⁰ m/s
11.) Kapazität	1 - 20 t/h bei Verarbeitung in Chargen, 400 - 600 t/d bei kontinuierlichen Verfahren
12.) Endprodukt/Verwertung	Wiederverwendung als Abdeckmaterial auf Deponien, Deponierung
13.) Testverfahren	TCLP, STLC, US EP Tox sowie Elutionsversuche nach Vorgabe des Auftraggebers
14.) Anlagenmobilität	Mobile und stationäre Anlagen
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-
17.) Referenzen	Chemfix Inc. führt seit 17 Jahren Verfestigungen von Abfallstoffen durch. Projekte aus den Gebieten Boden und Altlasten wurden ebenfalls durchgeführt. Behandlung von 29.000 t kontaminierter Flugasche und Boden (Cr VI), Metallurgiebetrieb Ohio, Verwendung des Endproduktes ("Naturfil") als Abdeckmaterial auf einer Deponie für leicht radioaktive Abfälle Behandlung von 150.000 m ³ kontaminierter Schlämme aus verschiedenen industriellen Verfahren und Verwendung des Endproduktes als Abdeckmaterial für eine Sondermülldeponie

De Ruiter Milieutechniek

- | | |
|---|---|
| 1.) Anschrift der Firma | Postfach 14
NL-1066 AA Zwanenburg
Niederlande |
| 2.) Name des Verfahrens | DRM/GFS-Verfahren |
| 3.) Entwicklungsstadium der Anlage | Serienanlage |
| 4.) Schadstoffart/Abfallstoffe | Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle, Cyanide; Böden, Schlämme, Aschen, Stäube |
| 5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik | Mobile Anlage, bei der Behandlung von Schlämmen muß der Gehalt an organischen Bestandteilen < 30 % sein |
| 6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe | Bindemittel (Lutaforte), Katalysatoren, Flugaschen |
| 7.) Gewicht- / Volumenänderung | Abhängig von Bindemittelzugabe und Ausgangsmaterial |
| 8.) Aushärtezeit | - |
| 9.) Festigkeit | ca. 1 MN/m ² bei Schlämmen nach 30 Tagen |
| 10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert) | - |
| 11.) Kapazität | 100 m ³ Schlamm/Tag |
| 12.) Endprodukt/Verwertung | Deponierung, Stabilisationsschicht im Straßenbau, Kernmaterial von Deichkörpern, Material zur Geländeauffüllung, Anwendung in künstlichen Dünen, Abdeckschicht auf Deponien |
| 13.) Testverfahren | Elution nach DEV S4, Druckfestigkeit |
| 14.) Anlagenmobilität | Mobil |
| 15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit | - |
| 16.) Wirtschaftlichkeit | - |
| 17.) Referenzen | - |

Elkem Technology

1.) Anschrift der Firma	Postfach 4376 Torshov N-0402 Oslo 4 Norwegen
2.) Name des Verfahrens	Verglasung
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Pilotanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Schwermetalle, PAK, Cyanide, Fluoride, Böden, Schlämme, Flugaschen
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	Verglasen des Materials bei ca. 1.400° C in elektrischen Schmelzöfen, Sintern bei Temperaturen bis 900° C
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	-
7.) Gewicht- / Volumenänderung	-
8.) Aushärtezeit	-
9.) Festigkeit	-
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	-
11.) Kapazität	-
12.) Endprodukt/Verwertung	-
13.) Testverfahren	TCLP-Test, USEPA
14.) Anlagenmobilität	-
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-
17.) Referenzen	Technikumsversuche

Esdex BV

1.) Anschrift der Firma	Postfach 8447 NL-3503 RK Utrecht Niederlande
2.) Name des Verfahrens	Soliroc
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Serienanlagen, Verfahren wird seit 1975 angewandt
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	anorganische Abfälle, flüssige chemische Abfälle (z.B. Abfallsäure)
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	Zentrale Behandlungsanlagen, Bildung von Silikatpolymeren
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Abfallstoffe (fest, flüssig), silikathaltige Materialien ggfls. Kalk, Zement
7.) Gewicht- / Volumenänderung	0 - 80 %
8.) Aushärtezeit	-
9.) Festigkeit	10 - 30 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	2,3 - 8,6 x 10 ⁻¹⁰ m/s
11.) Kapazität	2 - 5 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Deponierung
13.) Testverfahren	Auslaugung: gemäß Normen des entsprechenden Landes, Kompression: ASTM C109-64, Permeabilität: BS (1881:1970)
14.) Anlagenmobilität	Stationär
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-
17.) Referenzen	Modena/Italien, Behandlungsanlage, Behandlung von jährlich 45.000 t Schlämmen und 25.000 t flüssiger Abfälle Huelva/Spanien, Behandlungsanlage, Behandlung von jährlich 25.000 t Schlämmen und flüssigen Abfällen Antwerpen/Belgien, Behandlungsanlage, Behandlung von jährlich 15.000 t Schlämmen Monthey/Schweiz, Behandlungsanlage, Behandlung von jährlich 6.000 t Flugaschen

Solidiwaste Inc.

1.) Anschrift der Firma	830 Lee Street Manhattan KS, 66502 USA
2.) Name des Verfahrens	Verfestigungsverfahren
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	Serienanlage
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Böden, Schlämme; Schwermetalle, organische Schadstoffe (wenn < 15 %)
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	On site, mobile Anlagen mit Kapazitäten von 10 bis 100 t/h
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Urrichem (patentiertes chemisches Mittel), Flugasche, Zement
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Bis 35 % Gewichtszunahme, bis 25 % Volumenzunahme
8.) Aushärtezeit	ca. 1 Tag
9.) Festigkeit	8,3 - 172,4 MN/m ² , bei Vorhandensein von Ölrückständen 2,7 - 11 MN/m ²
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	ca. 10 ⁻⁷ m/s
11.) Kapazität	10 - 100 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Gründungsmaterial im Straßenbau, Deponierung
13.) Testverfahren	TCLP (Auslaugtest), ASTM (Druckstärke und Frost- /Tauempfindlichkeit)
14.) Anlagenmobilität	Mobile Anlagen
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	-
16.) Wirtschaftlichkeit	-
17.) Referenzen	Solidiwaste Inc. führt seit ca. 9 Jahren Verfestigungen von Abfällen durch z.B. 1988, Verfestigung von mit Öl, Ölschlamm, PCBs und Schwermetallen kontaminierten Böden, New Jersey

Techform Engineering AG

1.) Anschrift der Firma	Hardhofstrasse 15 CH-8424 Embrach Schweiz
2.) Name des Verfahrens	IVR-Verfahren (Inertisierung von Rauchgasrückständen)
3.) Entwicklungsstadium der Anlage	In der Schweiz und in Deutschland wird die Technologie in 7 Anlagen im großtechnischen Maßstab angewendet. Pro Jahr werden ca. 25.000 - 30.000 t Reststoffe nach diesem Verfahren verfestigt.
4.) Schadstoffart/Abfallstoffe	Rückstände aus der Rauchgasreinigung von Müll- und Industrieverbrennungsanlagen; Metallhydroxidschlämme; Schlamm aus industrieller Abwasseraufbereitung
5.) Merkmale des Verfahrens/der Technik	Je nach Reststoffanfall kann das Verfahren on site mit einer Festinstallation oder mit einer mobilen Verfestigungsanlage angewendet werden.
6.) Globalrezeptur und Zuschlagstoffe	Mineralische Zusätze, Bindemittel
7.) Gewicht- / Volumenänderung	Gewichtszunahme ca. 25 %, Volumenänderung 0 - 5 % je nach Verdichtungsqualität resp. Eigenschaft des Reststoffes
8.) Aushärtezeit	Wird normalerweise auf spezifische Bedürfnisse angepaßt, 12 - 48 h
9.) Festigkeit	4 - 12 MN/ m ² , je nach Reststoffqualität
10.) Durchlässigkeit (k _f -Wert)	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻¹³ m/s je nach Reststoff- und Verdichtungsqualität
11.) Kapazität	ca. 8 - 12 t/h
12.) Endprodukt/Verwertung	Das Produkt entspricht den schweizer Normen der Technischen Verordnung für Abfall (TVA-Verordnung)
13.) Testverfahren	TVA CO ₂ -Laugungstest (CH-Norm mit saurem Laugungs-Medium), Säulentest, DEV S4, Interne Perkulationsversuche
14.) Anlagenmobilität	Standortgebundene Anlage: ca. 12 m ³ /h Mobile Verfestigungsanlage: ca. 8 - 19 m ³ /h
15.) Verfügbarkeit/Vorbereitungszeit	Standortgebundene Anlage: ca. 9 Monate Mobile Anlage: ca. 2 Monate
16.) Wirtschaftlichkeit	Mobile Anlage: ab ca. 50-100 t/Jahr Festinstallation: ab ca. 800-1.000 t/Jahr
17.) Referenzen	EVS Ulm; EVS Heilbronn; MHKW-Coburg; Kehrichtverbrennungsanlagen Bazenheid, Gamsen, Basel, Turgi, Trimmis; Deponien Riet-Winterthur, Elbisland sowie private Auftraggeber aus den Bereichen Chemie und Maschinenbau

9 Literaturverzeichnis

9.1 Literatur zu Kapitel 2

- [2.1] ITVA, Fachausschuß FA-H1 Technologien und Verfahren (1993):
Entwurf der Arbeitshilfe "Schadstoffeinbindung durch Verfestigung als Möglichkeit der Immobilisierung", Stand 5/93, Altlastenspektrum 3/93, S. 170
- [2.2] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1993):
Handbuch Bodenwäsche
- [2.3] Beckefeld, P. (1992):
Schadstoffeinbindung durch Verfestigung - Praxisergebnisse des Heitkamp-Verfahrens, Vortrag, 8. Symposium Recycling-Baustoffe 15.-17.11.1992, Nürnberg
- [2.4] Entwurf Anhang H, TA Abfall, Teil 1, Eignungsprüfung für verfestigte Abfälle
- [2.5] Landesamt für Wasser und Abfall NRW (1993):
Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen, LWA-Materialien 1/94, Düsseldorf, November 1993
- [2.6] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:
Informationsschrift "Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E₃₋₄), Stand 8/92

9.2 Literatur zu Kapitel 3

- [3.1] Casper, H.-G. (1992):
Untersuchungen zur Schadstoffimmobilisierung an schwermetallkontaminierten Böden, Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum
- [3.2] Wienberg, R., Calmano, W. (1989):
Grundlagen der Schadstoffbindung bei Verfestigungsverfahren, In: Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 5.4.2.0.2, Juni 1989
- [3.3] Thies, A. (1986):
Verfestigung von Sonderabfällen, Bauforschungsberichte des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, IRB-Verlag, Stuttgart
- [3.4] Stumm, W., Morgan, J. J. (1981):
Aquatic Chemistry. John Wiley & Sons, New York.
- [3.5] A. Plinke & Söhne (1983):
Firmenprospekt Sauberes Industrie-Abwasser. Bad Homburg
- [3.6] Scheffer/Schachtschabel (1992):
Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- [3.7] Calmano, W. (1989):
Schwermetalle in kontaminierten Feststoffen, Verlag TÜV Rheinland
- [3.8] Hahne, H.C.H. (1974):
Significance of pH and pCl in heavy metal ion reactions and mercury (II) adsorption by soil materials. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

- [3.9] Kile, D.E., Chiou, C. T. (1989):
Water solubility enhancements of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration. Environ. Sci. Technol. Vol. 23, no. 7, pp. 832
- [3.10] Wastewater Technology Centre Environment Canada (1991):
Proposed evaluation protocol for cement-based solidified wastes, Report EPS 3/HA/9, Canada
- [3.11] Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1989):
Altlasten, Sondergutachten Dezember 1989, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart
- [3.12] Gerschler, L. J., Willer, D. (1989):
Sanierungserfolg durch Einbindeverfahren. In: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 33, Sanierung kontaminierter Standorte. Franzius (Hrsg.), S. 159-192
- [3.13] Gerschler, L. J. (1988):
Neue Entwicklungen bei der Verfestigung von Sonderabfällen, Müll und Abfall Nr.7, S. 307-319

9.3 Literatur zu Kapitel 4

- [4.1] Obermann, P., Cremer, S. (1992):
Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens, In: Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Band 6, Landesamt für Wasser und Abfall NRW
- [4.2] Beckefeld, P. (1991):
Schadstoffaustrag aus abgeordneten Reststoffen der Rauchgasreinigung von Kraftwerken - Entwicklung eines Testverfahrens -, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Heft Nr. 33, Technische Universität Braunschweig
- [4.3] Landesamt für Wasser und Abfall NRW (1993):
Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen, LWA-Materialien 1/94, Düsseldorf, November 1993
- [4.4] Gerschler, L. J. (1988):
Neue Entwicklungen bei der Verfestigung von Sonderabfällen, Müll und Abfall Nr.7, S. 307-319
- [4.5] Umweltministerium Baden-Württemberg (1993):
Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums und des Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen vom 16.09.1993, Gemeinsames Amtsblatt Nr. 33, S. 1115
- [4.6] KEMA/ECN (1988):
Milieu-implicaties van vliegias in de wegenbouw. Rapportnummer 71811-SBA-1, KEMA, Arnhem, NL.
- [4.7] Steketee, J.J. , et al. (1993):
Leachate of waste in Textkörper laboratory tests, in tests under landfill conditions and in a landfill. In: Proceedings Fourth International KfK/TNO Conference on Contaminated Soil, Berlin.
- [4.10] Jakob, G., Brassler, T. (1992):
Schwermetallverbindungsformen in ausgewählten Abfallarten. Müll und Abfall, Nr.1/92, S. 17-22

- [4.11] Salomons, W., Förstner, U. (1984):
Metals in the hydrocircle. Springer Verlag Berlin
- [4.12] Wastewater Technology Centre, Environment Canada (1990):
Compendium of waste leaching tests, Report EPS 3/HA/7
- [4.13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln (1992):
Trogverfahren zur Auslaugung ungebundener und gebundener industrieller Nebenprodukte (Entwurf)
- [4.14] Wastewater Technology Centre, Environment Canada (1991):
Investigation of test methods for solidified waste evaluation, Report EPS 3/HA/8
- [4.15] Prinz H. (1991):
Abriß der Ingenieurgeologie, Kap. 2.4.2, 2. Auflage, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart
- [4.16] Endell, K., Loos, W., Breth, H. (1939):
Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Band 16, Volk und Reich Verlag, Berlin
- [4.17] Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.:
Aufbereitung zur Wiederverwendung von kontaminierten Böden und Bauteilen, Gütesicherung, RAL-RG 501/2, Ausgabe August 1991
- [4.18] Gerschler, L. J. (1993):
Beschreibung des am NLÖ angewandten Elutionsverfahrens für verfestigte Proben, persönliche Mitteilung
- [4.19] Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen (1987):
Entwurf einer Richtlinie über die Untersuchung und Beurteilung von Abfällen Teil 2: Empfehlungen zur Beurteilung von Abfalluntersuchungen
- [4.20] Röhricht, M. (1993):
Mikrobielle Verfahren zur Entfernung von Schwermetallen aus wäßrigen Lösungen im Vergleich zu Ionenaustauschern, VDI Fortschrittsbericht Nr. 101, VDI-Verlag, Düsseldorf

9.4 Literatur zu Kapitel 5

- [5.1] Sondermann, W. (1989):
Sanierung einer phenolkontaminierten Altlast. Wasser, Luft und Boden, Heft 6/1989, S. 58-60
- [5.2] Sondermann, W. (1991):
In-situ/on-site-Sanierungsverfahren zur Reinigung kontaminierter Böden. Entsorgungspraxis, Heft 3/1991, S. 76-82
- [5.3] Umweltbundesamt (1982):
Berichte 1/82, Verfahren zur Verfestigung von Sonderabfällen und Stabilisierung von verunreinigten Böden - Stand der Erkenntnisse und Anwendungsmöglichkeiten. Erich Schmidt Verlag Berlin
- [5.4] Vogel, P. (1991):
Verwertung von Müllverbrennungsaschen. Sonderdruck aus Straße und Autobahn, Heft 9/1991
- [5.5] Vogel, P. (1992):
Entwicklung bei der Verfestigung von Müllverbrennungsaschen mit hydraulischen Bindemitteln im Straßenbau. Sonderdruck aus Straße und Autobahn, Heft 4/1992

- [5.6] Großkurth K. P., Malorny W. (1990):
Verfestigung schwermetallhaltiger Abfallstoffe mit hydraulischen Bindemitteln - Mechanismen der Immobilisierung. In: Standsicherheiten im Deponiebau; Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 31, S. 223-232
- [5.7] Großkurth K. P., Malorny W. (1992):
Technologien zur Verfestigung von Abfällen. In: Neue Technologien im Bauwesen, Braunschweiger Bauseminar, Heft 97, S. 43-54
- [5.8] Wiedemann, H. U. (1993):
Immobilisierung als Abfall- und Altlastenbehandlung, Vortrag Heidelberger Umweltforum, 4. März 1993

9.5 Literatur zu Kapitel 6

- [6.1] Beckefeld, P. (1992):
Schadstoffeinbindung durch Verfestigung - Praxisergebnisse des Heitkamp-Verfahrens. Vortrag im Rahmen des 8. Symposiums Recycling-Baustoffe, 15.-17.11.1992, Nürnberg
- [6.2] Gesellschaft für Abfall-Aufbereitung mbH (1993):
Aufbereitung von verunreinigtem Erdreich nach dem HDT-Verfahren und Nutzung beim Bau einer Containerumschlaganlage. Firmenmitteilung
- [6.3] Gerschler, L. J.; Willer, D. (1989):
Sanierungserfolg durch Einbindeverfahren. In: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 33, Sanierung kontaminierter Standorte. Franzius (Hrsg.), S. 159-192
- [6.4] Ingenieurgemeinschaft IFU, TAUW Infra Consult, Weber Ingenieure (1992):
Modellstandort Mühlacker, Vorversuch Verfestigung, Abschlußbericht, Deventer, Juli 1992
- [6.5] Heitkamp Umwelttechnik GmbH (1992):
Altlastensanierung - Das patentierte Verfestigungsverfahren der Heitkamp Umwelttechnik GmbH. Firmenschrift
- [6.6] IFUWA GmbH (1993):
Verwertung von schwermetallverunreinigtem Erdaushub als Unterbau eines Lagerplatzes. Firmenmitteilung

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Ablaufschema einer Sanierung	4
Bild 2.2: Schematische Darstellung der Immobilisierung	6
Bild 3.1: Einkapselung von Schadstoffen.....	22
Bild 3.2: Chemischer Einbau von Schadstoffen	23
Bild 3.3: Fällung	24
Bild 3.4: Sorption	24
Bild 3.5: Bindemittel und Zusätze	25
Bild 3.6: Verglasung im Koksbett	29
Bild 3.7: Auslaugung von Schadstoffen aus einer festen Matrix	32
Bild 3.8: Fällungsbereich einiger Metalle [Lit:3.5]	33
Bild 3.9: Cu-EDTA-Komplex [Lit:3.9].....	34
Bild 3.10: Scheinbare Löslichkeit von DDT in Abhängigkeit von der Konzentration verschiedener oberflächenaktiver Substanzen (Tenside) [Lit:3.9].....	35
Bild 4.1: Bestimmung der maximalen Eluatkonzentration durch wiederholten Einsatz der Elutionsflüssigkeit mit jeweils frischem Probenmaterial [Lit:4.12]	39
Bild 4.2: Bestimmung des maximal auslaugbaren Anteils durch wiederholte Extraktion einer Probe mit jeweils frischem Eluenten [Lit:4.12]	39
Bild 4.3: Schematischer Aufbau eines Säulenelutionsversuches [Lit:4.20]	44
Bild 4.4: Versuchsaufbau Schweizer TVA-Test [Lit:4.2]	46
Bild 4.5: Soxhlet Extraktion [Lit:4.12].....	47
Bild 4.6: Sequentielle Extraktion mit steigender Aggressivität der Extraktionsmittel von A nach E [Lit:4.12]	48
Bild 4.7: Elutionsversuch in der Triaxialzelle [Lit:4.2].....	49
Bild 4.8: Gerät zur Bestimmung der Zerfallszahl nach Endell [Lit:4.3]	51
Bild 4.9: Unterschiede des Flüssigkeitskontaktes auf der Deponie und im Schütteltest [Lit:4.1]	57
Bild 5.1: Verfestigung mit HDT-Verfahren	78
Bild 5.2: Verfahrensschema Heide/Werner-Verfahren	81
Bild 5.3: Fließschema Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp (Quelle: Fa. Heitkamp).....	88
Bild 5.4: Fließschema PBS-Verfahren (Quelle: Pokker Bodensanierung GmbH).....	91
Bild 5.5: Fließschema - Sanierung eines phenolkontaminierten Standorts [Lit:5.1].....	95
Bild 5.6: Fließschema Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec	98
Bild 6.1: Ergebnisse von Wasseranalysen im Rahmen der Güteüberwachung und Langzeitkontrolle der Versuchsdeponie Kornharpen (Quelle: Fa. Heitkamp).....	104
Bild 6.2: Prinzipskizze der Verfestigungsdeponie (Quelle: Fa. Heitkamp)	105
Bild 6.3: Schnitt durch den Lärmschutzwall (Quelle: Fa. Heitkamp)	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Verfahren zur Behandlung von Schlämmen [Lit:3.13]	20
Tabelle 3.2: Übersicht der verschiedenen Metallformen in wäßrigen Lösungen [Lit:3.4].....	32
Tabelle 4.1: Angewandte Elutionsverfahren für verfestigte Proben.....	37
Tabelle 4.2: Wichtige physikalische Testverfahren für Immobilisierungsprodukte.....	38
Tabelle 4.3: Sequentielle Extraktion	48
Tabelle 4.4: "Mainhausen-Papier" [Lit:4.4]	59
Tabelle 4.5: TA Abfall, Teil1, Anhang H; Prüfvorschriften nach Anhang B Nr. 2 und Zuordnungskriterien nach Anhang D	64
Tabelle 4.6: Werte für Deponieklasse 2 aus dem Entwurf einer Richtlinie über die Untersuchung und Beurteilung von Abfällen, Teil 2 des LWA vom Juni 1987 ...	68
Tabelle 5.1: Übersicht Verfahrensanbieter (Teil 1)	73
Tabelle 5.1: Übersicht Verfahrensanbieter (Teil 2)	74
Tabelle 5.1: Übersicht Verfahrensanbieter (Teil 3)	75
Zusammenfassung Verfestigung mittels HDT-Verfahren	79
Zusammenfassung Verfestigungsverfahren nach Heide/Werner.....	82
Zusammenfassung Spezialbindemittel-System von Heidelberger Zement	85
Zusammenfassung Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp Umwelttechnik	88
Zusammenfassung Verfestigungsverfahren der Fa. Pokker	92
Zusammenfassung Soilcrete Verfahren der Fa. Keller Grundbau GmbH.....	95
Zusammenfassung Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec GmbH.....	99
Tabelle 6.1: Einbindung von PAK, Verfestigungsdeponie Kornharpen, Eluate nach DEV S4 [Lit:6.5].....	104
Tabelle 6.2: Ergebnisse der Eignungsprüfung und Güteüberwachung.....	107

Indexverzeichnis

A

Abfallrecht	121
Altlastensanierung	
Abfallrecht	121
Ablaufschema	4
Arbeitsschutzrecht	125
Ausführungsplanung	11
Ausschreibung	12
Bodenschutzgesetz.....	124
Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG).....	123
Firmenanfragen.....	9
Gefahrgutverordnung Straße	125
Genehmigungsplanung	11
Immissionsrecht.....	123
Kostenwirksamkeitsabschätzung	10
Landesabfallgesetz Baden-Württemberg	121
Naturschutzrecht.....	124
nicht-monetäre Beurteilung	10
organisatorische Kriterien.....	11
rechtliche Betrachtung	120
Sanierungshauptplanung.....	11
Sanierungsvorplanung	8
TA Abfall.....	121
technische Kriterien	11
Umweltverträglichkeit	10
Verfahrensvorauswahl	9
Wassergesetz (WG)	124
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	124
Wasserrecht	124
Arbeitsschutzrecht	125
Auslaugung von Schadstoffen	32

B

BImSchG	
Allgemeines	123
BImSchV	123
Bindemittel	
Allgemeines	24, 25
anorganisches Bindemittel.....	26
Flugasche	26
Gips.....	27
Kalk	27
organische Polymere.....	28
organisches Bindemittel	27
Portlandzement.....	26

Schlacke aus thermischen Prozessen ..	27
Thermoplaste.....	28
Wasserglas	27
Zusätze	28
Bodenschutzgesetz.....	124
Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG).....	123
D	
Deponieklassen Nordrhein-Westfalen ...	66
Diffusionstest nach NEN 7345/7346	45
Durchlässigkeit	
Allgemeines	65
E	
EDX-Analyse	52
einaxiale Druckfestigkeit	65
einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136	50
Elution im pHstat-Versuch	42
Elution in der Triaxialzelle	48
Elution mit Ammoniumnitrat nach DIN V 19730.....	42
Elution nach DIN 38414-S4 (DEV S4)....	40
Elutionsverfahren	
Allgemeines	39
Diffusionstest nach NEN 7345/7346 ..	45
Elution im pHstat-Versuch	42
Elution in der Triaxialzelle	48
Elution mit Ammoniumnitrat nach DIN V 19730.....	42
Elution nach DIN 38414-S4 (DEV S4)	40
Extraktion mit Königswasser nach DIN 38414-S7	41
Kaskadentest nach NEN 7343/7344 ...	44
maximale Auslaugbarkeit nach NEN 7341/7342	45
Mehrfachelution.....	40
Niederlande	43
NLÖ-Verfahren	40
Säulentest (NEN 7343/7344)	43
Säulentest allgemein	44
Schweizer TVA-Test.....	45
sequentielle Extraktion.....	47
Soxhlet-Test	46
TCLP	42
Troglverfahren.....	41

Extraktion mit Königswasser nach DIN 38414-S7.....	41	Fallbeispiele102, 106, 108, 110, 112, 116, 118	
F		Fällung	23
Fallbeispiele		Firmenanfrage	9
Immobilisierung102, 106, 108, 110, 112, 116, 118		Fixierung	14
Fixierung.....	14	Flugasche	26
Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN 52104	50	Forschung und Entwicklung	100
G		Forschungen in den Niederlanden....	100
Gefahrgutverordnung Straße	125	Fragen.....	9
Grenzwerte für Verfestigungsprodukte ..	59	Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN 52104.....	50
I		Gefahrgutverordnung Straße.....	125
Immobilisierung		Genehmigungsplanung.....	11
Abfallrecht	121	Gips	27
Allgemeines	3	Grenzwerte für Verfestigungsprodukte	59
anorganisches Bindemittel.....	26	Gütekontrolle	15
Anwendung.....	7, 18	Immissionsrecht	123
Anwendungsbereiche.....	7	Informationsschrift Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen	65
Anwendungsgrenzen.....	7	Kalk	27
Arbeitsschutzrecht	125	Kombination mit anderen Sanierungsverfahren.....	93
Ausführung	21	Konzepte	11
Ausführungsplanung.....	11	Kostenwirksamkeitsabschätzung	10
Ausschreibung	12	Landesabfallgesetz Baden-Württemberg	121
Begleitmaßnahmen	11	Langzeitkontrolle	15
Begriffe	5	Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm bei Ausschreibung.....	12
Berechnungen	11	Lichtmikroskopie	52
Betriebstagebuch.....	15	Mainhausen-Papier.....	59
Beurteilung der mechanischen Eigenschaften.....	65	morphologische Untersuchungen.....	52
Bindemittel	24	Nadelpenetration nach DIN 52010.....	51
Bindemittel und Zusätze.....	25	Naturschutzrecht	124
Bodenschutzgesetz.....	124	nicht-monetäre Beurteilung.....	10
Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG).....	123	Normenkontrolle	53
chemische Testverfahren	39	organisatorische Kriterien	11
chemische und physikalische Grundlagen	22	organische Polymere	28
chemischer Einbau.....	23	organisches Bindemittel.....	27
Chemisorption	23	physikalische Einkapselung	22
Deponieklassen Nordrhein-Westfalen	66	physikalische Sorption	23
Durchlässigkeit	65	physikalische Testverfahren.....	38
EDX-Analyse.....	52	Portlandzement	26
Eignungsprüfung.....	13	praktische Anwendung von Prüfverfahren	57
einaxiale Druckfestigkeit	65		
einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136	50		
Einbaukontrolle	14		
Einkapselung	22		
Elutionsverfahren.....	37, 39		

Prüfung von Immobilisierungsprodukten 60, 69	Anbieter..... 73
Prüfverfahren 36	Immobilisierungsverfahren der Fa. Biodec GmbH 96
Prüfvorschriften 59	Kombination mit anderen Sanierungsverfahren..... 93
Qualitätssicherung 14	PBS-Verfahren 89
RAL RG 501/2..... 70	Soilcrete Verfahren 93
Rasterelektronenmikroskopie 52	Soilcrete Verfahren der Fa. Keller Grundbau GmbH..... 93
rechtliche Betrachtung 120	Spezialbindemittel-System von Heidelberger Zement..... 82
Röntgendiffraktometrie 52	Stand der Technik 72
Sanierungshauptplanung..... 11	Verfestigung mit HDT-Verfahren..... 76
Sanierungsvorplanung 8	Verfestigung nach Heide / Werner..... 79
Schadstoffaustrag..... 30	Verfestigungsverfahren der Fa. Heitkamp Umwelttechnik 85
schematische Darstellung 5	Verfestigungsverfahren der Fa. Pokker 89
Schlacke aus thermischen Prozessen .. 27	Informationsschrift Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen 65
Sinterung..... 30	Ionenstärke / Salze 34
Sorption 23, 24	K
TA Abfall..... 62, 121	Kaskaden-Schütteltest (NEN 7343) 44
technische Kriterien 11	Komplexbildner / Chelatbildner 34
Thermoplaste 28	L
Ummantelung 24	Landesabfallgesetz Baden-Württemberg 121
Umweltverträglichkeit 10	Lichtmikroskopie 52
Verfahren allgemein 5, 8, 19	M
Verfahren zur Behandlung von Schlämmen 20	Mainhausen-Papier..... 59
Verfahrensvorauswahl 9	Makromoleküle / Kolloide..... 35
Verfestigung 13, 24	maximale Auslaugbarkeit nach NEN 7341/7342 45
Verglasung 29	Mehrfachelution 40
Verwertung industrieller Rückstände im Bergbau..... 100	N
Vorhersage des Auslaugverhaltens..... 53	Nadelpenetration nach DIN 52010..... 51
Vorversuche..... 21	Naturschutzrecht 124
VwV Vorläufige Bedingungen zur Verwertung von teerhaltigem Straßenabruch im Straßenbau Baden-Württemberg 69	Niederlande Elutionsverfahren 43
Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 Teil 1..... 50	NLÖ-Verfahren 40
Wassergesetz (WG) 124	P
Wasserglas 27	PBS-Verfahren 89
Wasserhaushaltsgesetz (WHG) 124	pH-Wert 33
Wasserrecht 124	R
Wiedereinbau am Standort 60	RAL RG 501/2..... 70
Wiederverwendung..... 69	Rasterelektronenmikroskopie..... 52
Wirkmechanismen 5, 22	Redoxpotential 34
Zerfallsziffer nach Endell 51, 65	Röntgendiffraktometrie 52
Ziele 5, 17	
Zusätze..... 28	
Immobilisierungsmechanismen 54	
Immobilisierungsverfahren Allgemeines 72	

S		Allgemeines	13, 24
Sanierungshauptplanung.....	11	anorganisches Bindemittel	26
Sanierungsvorplanung		Flugasche	26
Allgemeines	8	Gips	27
Säulentest		Kalk.....	27
Allgemeines	44	organische Polymere	28
NEN 7343	43	organisches Bindemittel.....	27
Schweizer TVA-Test	45	Portlandzement	26
sequentielle Extraktion	47	Schlacke aus thermischen Prozessen ..	27
Sicherung und Sanierung von Altlasten		Thermoplaste.....	28
Abfallrecht	121	Wasserglas	27
Arbeitsschutzrecht	125	Verfestigungsverfahren	
Bodenschutzgesetz.....	124	Fa. Pokker	89
Bundesimmissionsschutzgesetz		HDT-Verfahren.....	76
(BImSchG).....	123	Heide / Werner.....	79
Gefahrgutverordnung Straße	125	Heitkamp Umwelttechnik	85
Immissionsrecht.....	123	Verglasung	
Landesabfallgesetz Baden-Württemberg		Allgemeines	29
.....	121	in-situ	30
Naturschutzrecht.....	124	in-situ Vitrification.....	30
Prüfung von Immobilisierungsprodukten		Koksbett	30
.....	60	Plasmaschmelzöfen.....	30
rechtliche Betrachtung	120	Schmelzöfen.....	30
TA Abfall.....	121	Schmelzzyklon.....	30
Wassergesetz (WG)	124	Verwertung industrieller Rückstände im	
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	124	Bergbau	100
Wasserrecht	124	VwV Vorläufige Bedingungen zur	
Wiedereinbau am Standort	60	Verwertung von teerhaltigem	
Soilcrete Verfahren		Straßenaufbruch im Straßenbau Baden-	
System Keller.....	93	Württemberg	69
Soxhlet-Extraktion.....	46	W	
Spezialbindemittel-System von		Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130	
Heidelberger Zement	82	Teil 1	50
T		Wassergesetz (WG).....	124
TA Abfall.....	121	Wasserhaushaltsgesetz (WHG).....	124
TCLP	42	Wasserrecht.....	124
Trogverfahren	41	Z	
V		Zerfallsziffer nach Endell.....	51, 65
Verfestigung			