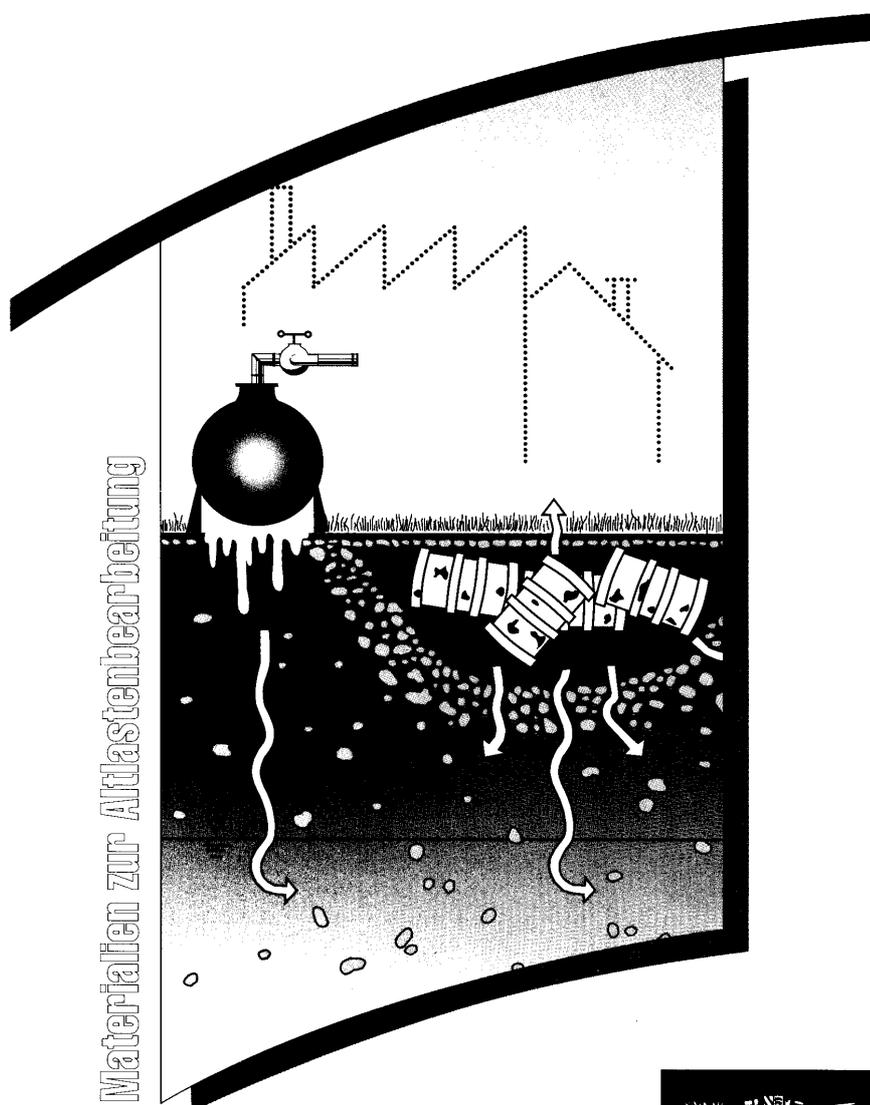
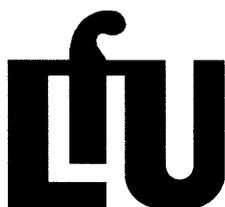


**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

**Handbuch für die  
Einkapselung von  
Altablagerungen**



Materialien zur Altlastenbearbeitung

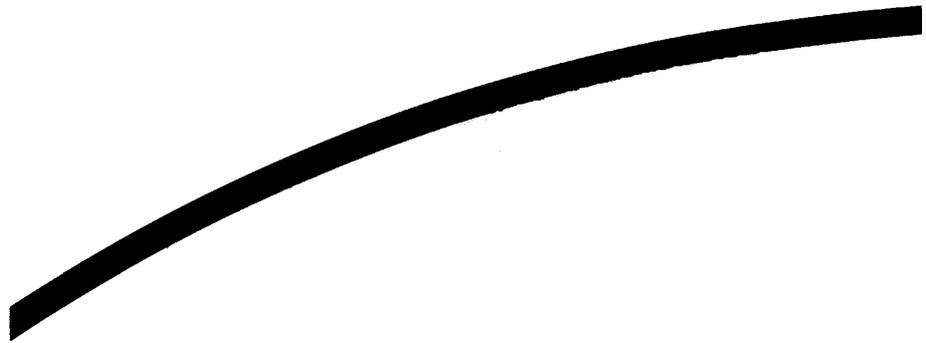


**BODEN  
ABFALL  
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

# **Handbuch für die Einkapselung von Altablagerungen**



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

Karlsruhe 1990



Altlastenfachinformation im WWW

## **Impressum**

**Herausgeber:** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Bearbeiter:** Ingenieurgemeinschaft für Grundbau,  
Spezialtiefbau, Umwelt- und Geotechnik  
Prof. Dr.-Ing. Jessberger und Partner, Bochum

Karlsruhe, November 1990

**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 ei-  
gene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT DES HERAUSGEBERS</b> .....	<b>1</b>
<b>VORWORT</b> .....	<b>2</b>
<b>1. EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b> .....	<b>3</b>
1.1 NOTWENDIGKEIT VON EINKAPSELUNGEN .....	3
1.2 DEFINITIONEN .....	5
1.3 WIRKUNGSWEISE EINER EINKAPSELUNG.....	6
1.4 ÜBERSICHT TYPISCHER ALTABLAGERUNGEN .....	8
1.4.1 Geologisch-hydrogeologische Verhältnisse der Standorttypen für Altdeponien.....	8
1.4.2 Inhaltsstoffe von Altdeponien .....	18
1.4.3 Bodenmechanische Kennwerte des Untergrundes.....	19
<b>2. MECHANISMUS DER SCHADSTOFFBEWEGUNG</b> .....	<b>22</b>
<b>3. OBERFLÄCHENABDICHTUNGSSYSTEME ANFORDERUNGEN - FUNKTIONSWEISE - BEMESSUNG - AUFBAU</b> .....	<b>24</b>
3.1 AUFGABE UND ANWENDUNGSBEREICH.....	24
3.2 AUFBAU UND BELASTUNG DES ABDICHTUNGSSYSTEMS .....	24
3.3 KOMPONENTEN UND MÖGLICHE MATERIALIEN.....	27
3.4 ANFORDERUNGEN UND EIGNUNGSPRÜFUNG FÜR DIE MATERIALIEN .....	29
3.4.1 Mineralische Dichtstoffe .....	29
3.4.2 Kunststoffdichtungen.....	39
3.4.3 Mineralische Dränstoffe.....	43
3.4.4 Kunststoffdränkörper .....	44
3.4.5 Entwässerungs- und Kontrollschächte .....	44
3.4.6 Abdeckschichten .....	45
3.4.7 Ausgleichsschicht.....	45
3.5 AUSGEWÄHLTE BEMESSUNGSBEISPIELE .....	46
3.5.1 Kunststoffdichtungen.....	46
3.5.2 Mineralische Dichtung.....	52
3.5.3 Oberflächenentwässerung mit Dränmatten.....	54
3.5.4 Überlegungen zur Rekultivierung.....	61
<b>4. BESCHREIBUNG VON DICHTWAND- UND SOHLABDICHTUNGSSYSTEMEN UND DEREN HERSTELLUNG</b> .....	<b>63</b>
4.1 ALLGEMEINES .....	63
4.2 DICHTWANDSYSTEME OHNE BODENAUSHUB .....	64
4.2.1 Schmalwand.....	64
4.2.2 Spundwand.....	64
4.2.3 Gerammte Schlitzwand.....	65
4.2.4 Hochdruckinjektionswand .....	65
4.2.5 Gefrierwand.....	66
4.3 DICHTWANDSYSTEME MIT BODENAUSHUB .....	68
4.3.1 Überblick.....	68
4.3.2 Einphasen-Schlitzwand.....	68
4.3.3 Zweiphasen-Schlitzwand.....	69
4.3.4 Kombinationsdichtwand .....	69
4.3.5 Injektionswände .....	74
4.3.6 Kombinierte Verfahren.....	76
4.3.7 Kostenüberblick .....	78

4.4 SYSTEME DER NACHTRÄGLICH HERGESTELLTEN HORIZONTALEN SOHLABDICHTUNGEN .....	79
4.4.1 Übersicht .....	79
4.4.2 Injektion von der Geländeoberfläche.....	80
4.4.3 Stollen mit Dichtungsteppich.....	82
4.4.4 Sohlabdichtungen aus Stollen.....	84
4.4.5 Verbindung der horizontalen und vertikalen Dichtungselemente .....	85
<b>5. ANFORDERUNGEN AN DICHTUNGSMATERIALIEN .....</b>	<b>88</b>
5.1 EINSETZBARE MATERIALIEN .....	88
5.2 FORDERUNGEN AN DIE DICHTUNGEN INFOLGE STANDORTBEDINGUNGEN.....	89
5.3 PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE BEANSPRUCHUNG DER MINERALISCHEN BAUSTOFFE.....	90
<b>6. EIGENSCHAFTEN DER ABDICHTUNGSMATERIALIEN .....</b>	<b>96</b>
6.1 ÜBERSICHT DER KOMPONENTEN.....	96
6.2 NOTWENDIGE ANGABEN UND UNTERSUCHUNGEN .....	97
6.2.1 Mineralische Komponenten.....	97
6.2.2 Kunststoffdichtungsbahnen.....	100
6.2.3 Stahl .....	100
6.3 PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN DER KOMPONENTEN .....	101
6.3.1 Mineralische Baustoffe.....	101
6.3.2 Kunststoffdichtungsbahnen.....	110
6.3.3 Stahl .....	111
<b>7. DICHTWÄNDE .....</b>	<b>116</b>
7.1 KONZEPTION .....	116
7.1.1 Dicken und erreichbare Tiefen.....	116
7.1.2 Einsetzbare Dichtwandmassen .....	117
7.2 ANFORDERUNGEN AN DICHTWANDMASSEN.....	120
7.2.1 Schlitzwände .....	120
7.2.2 Schmalwände .....	122
7.2.3 Injektionswände .....	122
7.3 EIGNUNGSPRÜFUNGEN .....	123
7.4 DICHTWANDMASSEN.....	125
7.4.1 Na-Bentonit-Zement-Suspension.....	128
7.4.2 Ca-Bentonit-Zement-Suspension.....	131
7.4.3 Schmalwandmassen.....	133
7.4.4 Neuentwicklungen .....	133
<b>8. SOHLABDICHTUNGEN .....</b>	<b>137</b>
8.1 KONZEPTION .....	137
8.2 ANFORDERUNGEN AN MATERIALIEN .....	138
8.3 EIGNUNGSPRÜFUNGEN .....	140
8.4 MATERIALIEN.....	140
8.4.1 Injektionsmischungen.....	140
8.4.2 Füllmassen für Stollen.....	143
<b>9. QUALITÄTSLENKUNG.....</b>	<b>145</b>
9.1 QUALITÄTSSICHERUNG DER SYSTEME .....	145
9.2 QUALITÄTSSICHERUNG DER MATERIALIEN .....	145
9.3 QUALITÄTSSICHERUNGSPROGRAMM BEI BAUAUSFÜHRUNG .....	146
<b>10. LANGZEITKONTROLLE.....</b>	<b>147</b>
<b>11. FALLBEISPIELE .....</b>	<b>149</b>
11.1 SONDERABFALLDEPONIE GEROLSHEIM IN RHEINLAND-PFALZ (DICHTWAND UND OBERFLÄCHENABDICHTUNG). .....	149
11.2 DEPONIE RAUTENWEG, WIEN (DICHTWANDKAMMERSYSTEM) .....	152
11.3 DEPONIE GEORGSWERDER, HAMBURG .....	153
11.4 ALTDEPONIE BREITE HILLE, BOCHUM-LANGENDREER.....	155

---

<b>12. VERZEICHNIS</b> .....	<b>158</b>
12.1 REGELWERKE, DIN-NORMEN.....	158
12.2 SCHRIFTTUM .....	159
12.3 ABKÜRZUNGEN.....	166
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>167</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>170</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS</b> .....	<b>171</b>

## Vorwort des Herausgebers

Die "Einkapselung" kann eine wirksame Methode sein, Schadstoffemissionen aus Altablagerungen zu unterbinden bzw. die Fracht pro Zeiteinheit zu verringern. Es ist zwar davon auszugehen, daß die bisher bekannten Technologien nur eine zeitlich begrenzte Wirksamkeit besitzen, was ihre Einsatzmöglichkeit in der Praxis einschränkt. Sie stellen deswegen insbesondere zu solchen Dekontaminationsverfahren, die zur Entfaltung ihrer vollen Wirksamkeit längere Zeit benötigen, eine sinnvolle Ergänzung dar.

Da diese Technik bei der Altlastensanierung bisher noch wenig angewendet wurde und es außerdem speziell für diesen Anwendungsbereich keine einführende und umfassende Literatur gibt, wurde die Ingenieurgesellschaft für Grundbau, Spezialtiefbau, Umwelt- und Geotechnik Prof. Dr.-Ing. Jessberger und Partner GmbH, Bochum, vom Land Baden-Württemberg beauftragt, das vorliegende "Handbuch für die Einkapselung von Altablagerungen" zu erarbeiten.

Ziel dieses Handbuchs ist es vor allem, die Sanierungspflichtigen und die von ihnen beauftragten Planer alternativer Sanierungsvorschläge sowie die technischen Fachbehörden mit den Anwendungsmöglichkeiten dieser Methode und den dafür nötigen Standortvoraussetzungen vertraut zu machen. Sie richtet sich weniger an den Fachmann, der die ausführungsbereite Planung erstellt und die Ausführung der Maßnahme überwacht. Hierfür sind vertiefte Kenntnisse erforderlich. Ein großes Potential an Fachliteratur steht hierfür zur Verfügung. Teilweise wird darauf im vorliegenden Handbuch verwiesen.

Das Handbuch wurde im April 1989 vorgelegt und in einem Kreis von Fachleuten diskutiert. Es wurde dabei festgestellt, daß einzelne Kapitel detaillierter behandelt und neuere Erkenntnisse entsprechend der zwischenzeitlich fortgeschrittenen technischen Entwicklung auf diesem Gebiet eingearbeitet werden müßten. Zwangsläufig wäre es damit wesentlich umfangreicher geworden und der im Vorwort des Bearbeiters dargestellte Zweck des Handbuchs und seine Aktualität wären in Frage gestellt worden.

Wir weisen darauf hin, daß die in der Schrift enthaltenen Wertungen und Aussagen nicht notwendigerweise der Auffassung unseres Hauses entsprechen.

Die technische Entwicklung dürfte auch in diesem Bereich noch längst nicht abgeschlossen sein. Wir werden sie weiter beobachten und bei einer eventuellen künftigen Fortschreibung dieser Schrift berücksichtigen. Anregungen und Erfahrungen auch von anderen Stellen würden wir dabei gerne berücksichtigen.

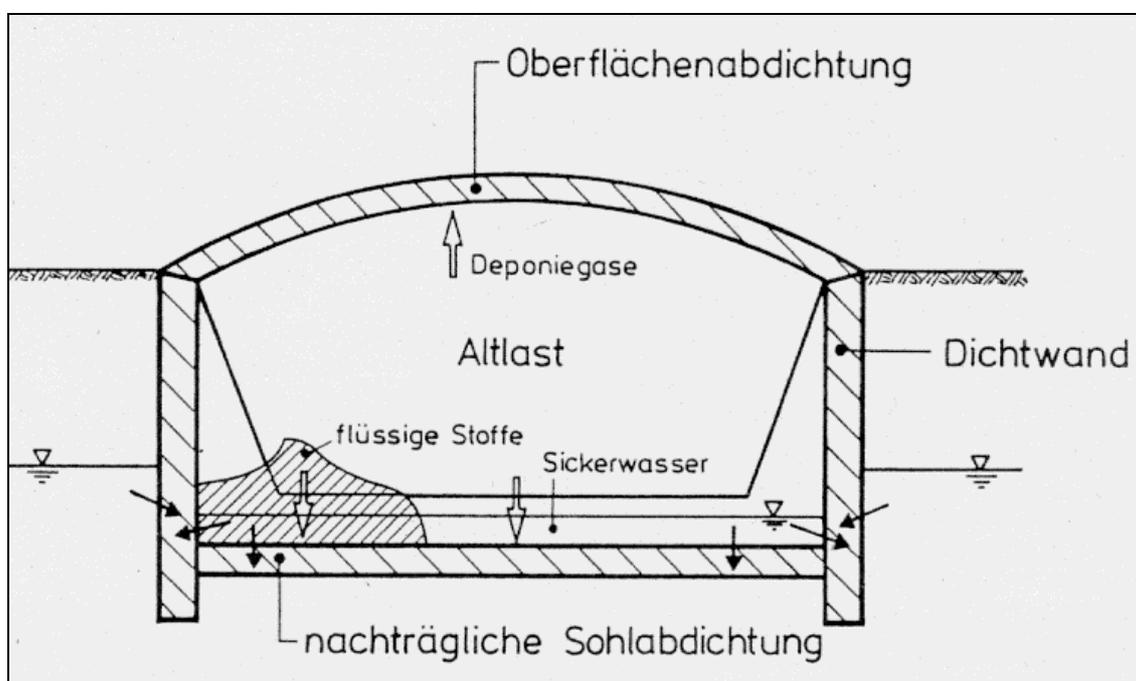
Karlsruhe, im November 1990

Dr.-Ing. Seng  
(Ltd. Baudirektor)

## Vorwort

Im Umweltbereich tätige Fachleute in Verwaltungen, Ingenieurbüros und Firmen sind heute in zunehmendem Maße gefordert, im Rahmen der Sanierung von Altablagerungen Projekte zur Einkapselung zu planen, auszuführen und abzuwickeln. Es gibt z.Zt. eine Reihe von Einkapselungssystemen. Dieses Handbuch vermittelt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Bau- und Verfahrenstechnik und über die zur Verfügung stehenden mineralischen und künstlichen Dichtungsmaterialien.

Damit ist dem in der Verwaltung (Umweltbehörden, Landesbehörden, Gewerbeaufsichtsämtern, technischen Fachbehörden, etc.) tätigen Ingenieur ein Hilfsmittel in die Hand gegeben, sich umfassend über Verfahrenstechnik und Einsatz der Dichtstoffe zu informieren.



**Schemaskizze: Einkapselung von Altablagerungen**

Um den Umfang des Handbuches zu begrenzen, sind die einzelnen Abschnitte möglichst kurz gefaßt. Die umfangreiche Literaturliste am Schluß des Handbuchs und das Stichwortverzeichnis sollen dem Leser, soweit wie möglich, Hinweise auf spezielle Literatur geben und die Vertiefung in die Problematik ermöglichen.

Das Handbuch ist so gegliedert, daß zunächst nach einem Überblick die Komponente Oberflächenabdichtung vollständig behandelt wird, da der Aufbau und die Herstellung von Oberflächenabdichtungssystemen von der Wahl der Baumaterialien abhängig ist. Für Dichtwand- und Sohlabdichtungssysteme gilt, daß die Baustoffe für alle Varianten im wesentlichen identisch sind, Unterschiede bestehen in der Art der Herstellung und des Bauablaufs. Dieser Teil ist deshalb so aufgebaut, daß zunächst ein Überblick über die Bauverfahren gegeben wird und anschließend die Materialien und deren Eigenschaften erläutert werden.

# 1. Einführung und Problemstellung

## 1.1 Notwendigkeit von Einkapselungen

Die Notwendigkeit der Einkapselung von Altablagerungen entwickelt sich in der Regel erst dadurch, daß von ihnen mehr oder weniger stark belastete Emissionsströme ausgehen. Das Gefährdungspotential einer Altablagerung hängt davon ab, ob entlang von Belastungspfaden gefährliche Stoffe von der Quelle zu einem Schutzgut gelangen können. Über das Transportmittel Wasser sind folgende Pfade möglich /59/.

a) Altlast befindet sich unter Gelände

- Sickerwasser ----<sup>Versickerung</sup>----> Grundwasser ----<sup>Austritt</sup>----> Oberflächengewässer

b) Altlast befindet sich über Gelände

- Sickerwasser ----<sup>Versickerung</sup>----> Grundwasser ----<sup>Austritt</sup>----> Oberflächengewässer
- Sickerwasser ----<sup>Austritt</sup>----> Grundwasser ----<sup>Versickerung</sup>----> Oberflächengewässer

Über das Transportmittel Luft sind folgende Pfade möglich:

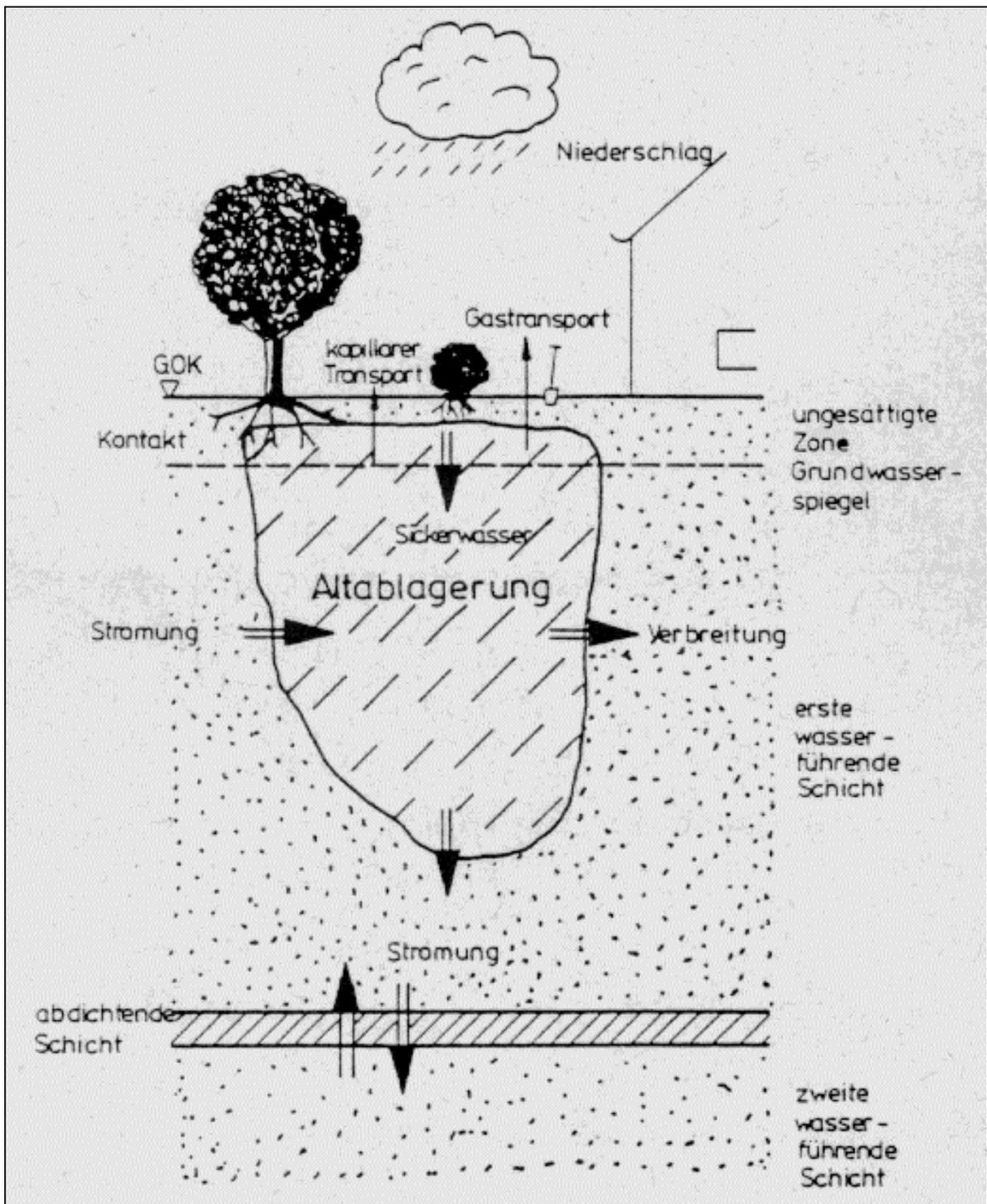
c) Altlast befindet sich unter Gelände

- direkter senkrechter Austritt in die Atmosphäre und Transport mit vorherrschender Luftströmung,
- seitlicher Austritt in die Atmosphäre, da horizontale Sperrschichten/Abdichtung vorliegen und Transport mit vorherrschender Luftströmung.

d) Altlast befindet sich über Gelände

- direkter Austritt in die Atmosphäre und Transport mit vorherrschender Luftströmung,
- Verfrachtung von kontaminiertem Staub durch Winderosion.

Eine Einkapselung hat zum Ziel, diese Emissionsströme (s. Bild 1.1) zu unterbinden.



**Bild 1.1: Prozesse bei Altablagerungen**

## 1.2 Definitionen

Einkapselungen sind

- Oberflächenabdichtung
- vertikale Dichtungswände
- nachträgliche horizontale Sohlen

oder Kombinationen daraus sowie aus schrägen seitlichen Dichtungselementen, die die Sohlabdichtung mit einschließen. Die häufigsten Einkapselungen sind die Oberflächenabdichtung und die Herstellung vertikaler Dichtungswände, die in eine undurchlässige Schicht einbinden. Mehrere Sanierungsmaßnahmen wurden so in den zurückliegenden Jahren durchgeführt.

Die Abdichtung der Oberfläche einer Altlast dient vornehmlich der Behinderung des Zutritts von Oberflächenwasser in den kontaminierten Bereich bzw. in den Deponiekörper. Ferner soll sie eine kontrollierte Gasabführung gewährleisten.

Dichtwände sollen die Ausbreitung von kontaminierten Sickerwässern in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone unterbinden. Voraussetzung sind undurchlässige Schichten im Untergrund, in die Dichtwände zuverlässig eingebunden werden können.

Nachträgliche Sohlabdichtungen sollen den vertikalen Austritt von Sickerwässern und z.B. Lösungsmitteln, die schwerer sind als Wasser, verhindern.

## 1.3 Wirkungsweise einer Einkapselung

Überlegungen zur Sanierung von Altlasten orientieren sich an dem Wirkungssystem

Quelle - Weg - Objekt

bzw.

Emission - Transmission - Immission

Eine Gefährdung ist dann gegeben, wenn ein Schutzgut (Objekt) unzulässigen Einwirkungen eines Schadstoffes (Immission) ausgesetzt ist, der an einer Schadstoffquelle frei wird (Emission) und sich über einen oder mehrere Gefährdungspfade (Weg) zum Schutzgut hin ausbreitet (Transmission).

Die Beseitigung der Gefährdung erfordert die Ausschaltung eines der Wirkungsmechanismen.

Je nach Ansatzpunkt der Gefahrenabwehr wird unterschieden:

Beseitigung der Emission: **Sanierung**

Hierbei wird der Schadstoff an der Quelle beseitigt bzw. unschädlich gemacht.

Beseitigung der Transmission: **Sicherung**

Durch solche Maßnahmen wird der Schadstoff an der Ausbreitung gehindert, so daß er sich nicht schädlich auswirken kann. Der Schadstoff selbst bleibt aber noch erhalten.

Beseitigung der Immission: **Ordnungsmaßnahme**

Dies bedeutet Nutzungseinschränkungen und Kontrollmaßnahmen. Der Schadstoff ist weiterhin vorhanden und kann sich ausbreiten.

Für eine Altablagerung ist eine Sanierung nach der o.g. Definition beim derzeitigen Stand der Technik nur in Ausnahmefällen möglich. Die Regel ist derzeit eine Sicherung in Form einer Einkapselung. Je nach Art und Alter der Altablagerung muß die Einkapselung mit Deponieentgasungsmaßnahmen verbunden werden, je nach Grundwasserverhältnissen können auch hydraulische Maßnahmen erforderlich sein. Hierbei sollte beachtet werden, daß durch biologische Abbauvorgänge im Deponiekörper das Schadstoffpotential verringert wird und daher diese Vorgänge gezielt unterstützt werden sollten. Diese begleitenden Maßnahmen sind aber nicht Gegenstand dieses Handbuches, es bezieht sich ausschließlich auf die bautechnischen Komponenten der Einkapselung zur Sicherung von Altablagerungen.

Eine Einkapselung verringert das Gefährdungspotential teilweise beträchtlich, beseitigt es aber ohne Sanierungsmaßnahmen nicht (Bild 1.2). Einkapselungsmaßnahmen bei Altdeponien werden seit nahezu 10 Jahren in der Bundesrepublik eingesetzt. Erfahrungen mit Oberflächenabdichtungen gibt es seit Jahren. Die in Abschnitt 11 dargestellten Fallbeispiele verdeutlichen, daß die jeweils nach Stand der Technik durchgeführten Maßnahmen das gestellte Ziel erreichen, einen Austritt von Sickerwässern bzw. Eintritt von Niederschlagswasser bei Oberflächenabdichtungen zu verringern bzw. zu verhindern (Tab. 1.1).

Tabelle 1.1: Wirkungsweise von Einkapselungen zur Verringerung des Gefährdungspotentials

ABDICHTUNG	WIRKUNGSWEISE
Oberflächenabdichtung	Ableiten des Oberflächenwassers, Vermeiden von Oberflächenwasserzutritt zum Deponiekörper, Fassen von Deponiegas, Verhindern von Gasaustritt
Dichtungswand	Vermeidung von Sickerwasseraustritt Reduzierung / Vermeidung des Grundwasserdurchflusses
Dichtungssohle	Vermeidung vertikaler Sickerwasseraustritte Reduzierung/Vermeidung von Grundwasserzufluß

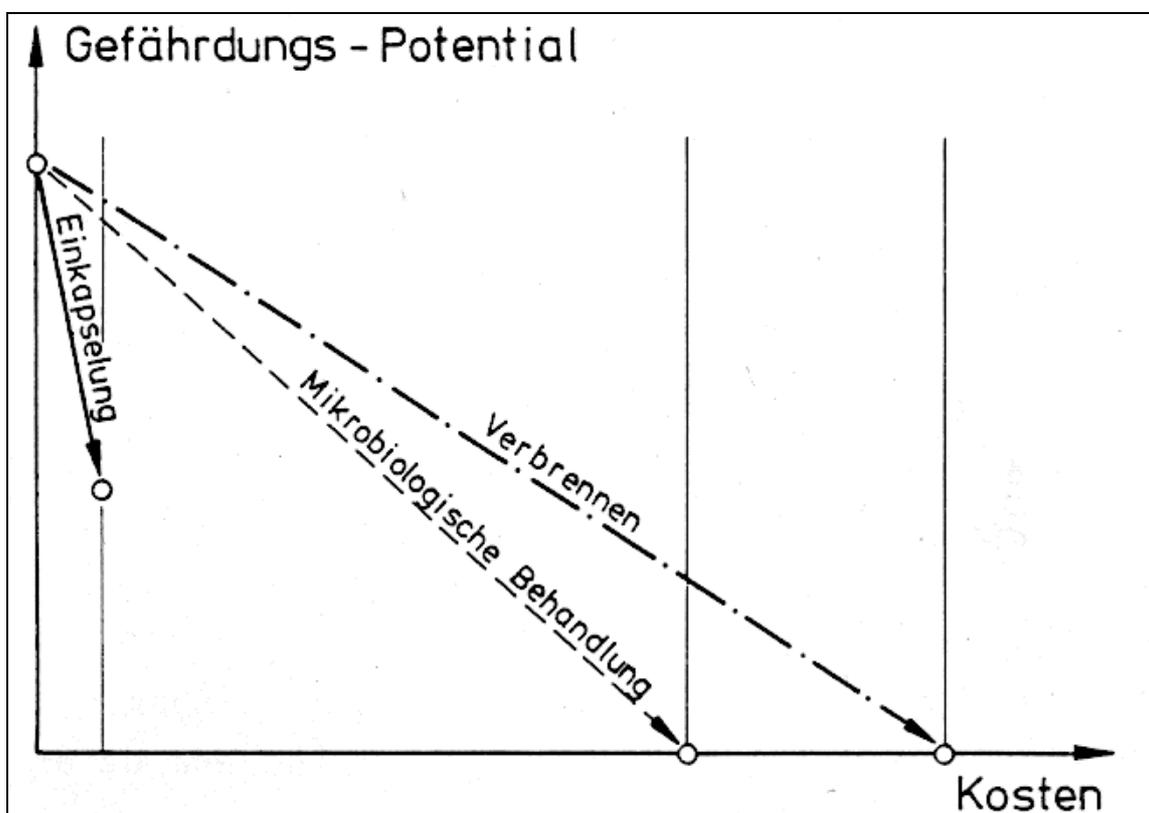


Bild 1.2: Schematischer Zusammenhang zwischen Kosten und Gefährdungspotential

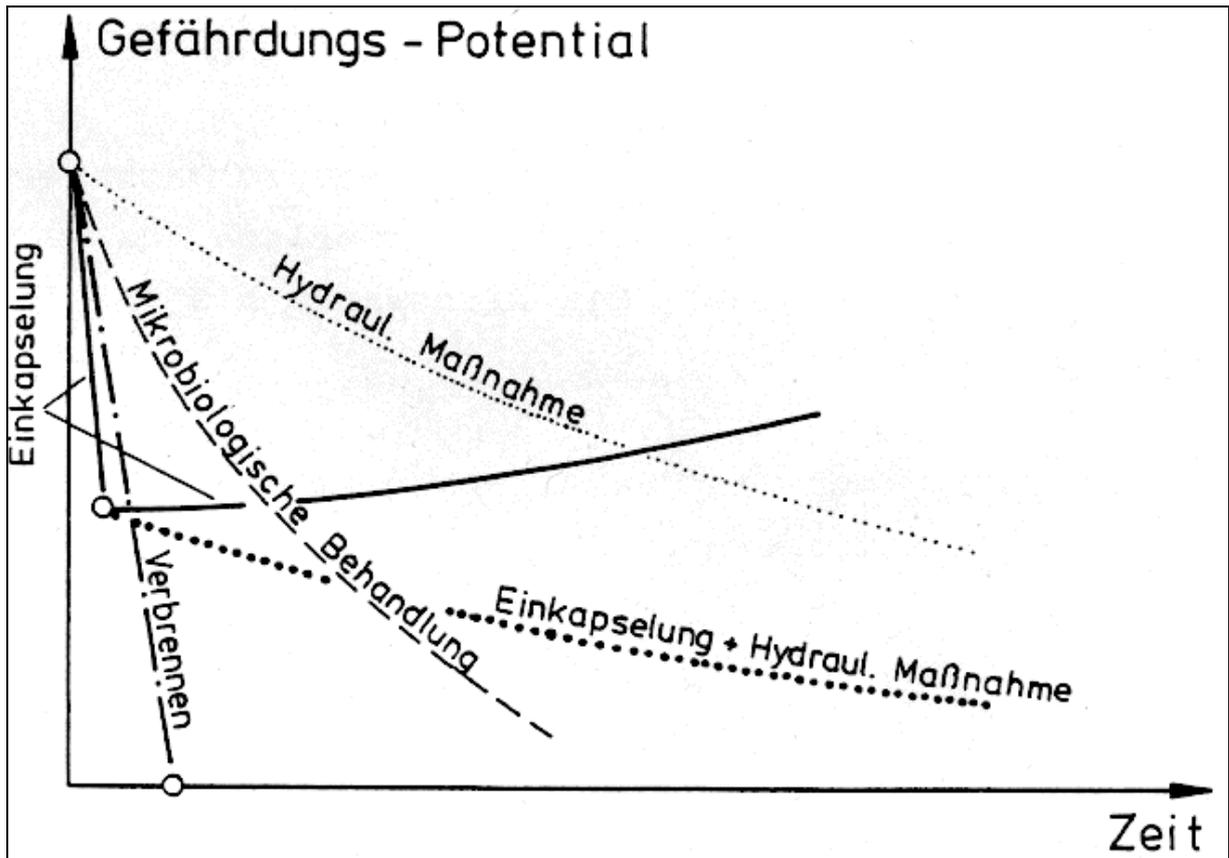


Bild 1.3: Schematischer Zusammenhang zwischen Zeitbedarf und Gefährdungspotential

## 1.4 Übersicht typischer Altdeponierungen

### 1.4.1 Geologisch-hydrogeologische Verhältnisse der Standorttypen für Altdeponien

Die Forderungen an die Abdichtung und das zu wählende Bauverfahren lassen sich anhand von Standortbedingungen aufzeigen. Es ist anschaulich, im Rahmen der Bearbeitung eine Anzahl von typischen **Standorttypen**, wie im Altlasten-Handbuch, Teil II, Untersuchungsgrundlagen der Wasserwirtschaftsverwaltung, Heft 19 des Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten, Juni 1987 genannt, zu betrachten. Grundsätzlich ist bei allen Einkapselungsmaßnahmen eine Dränage vorzusehen.

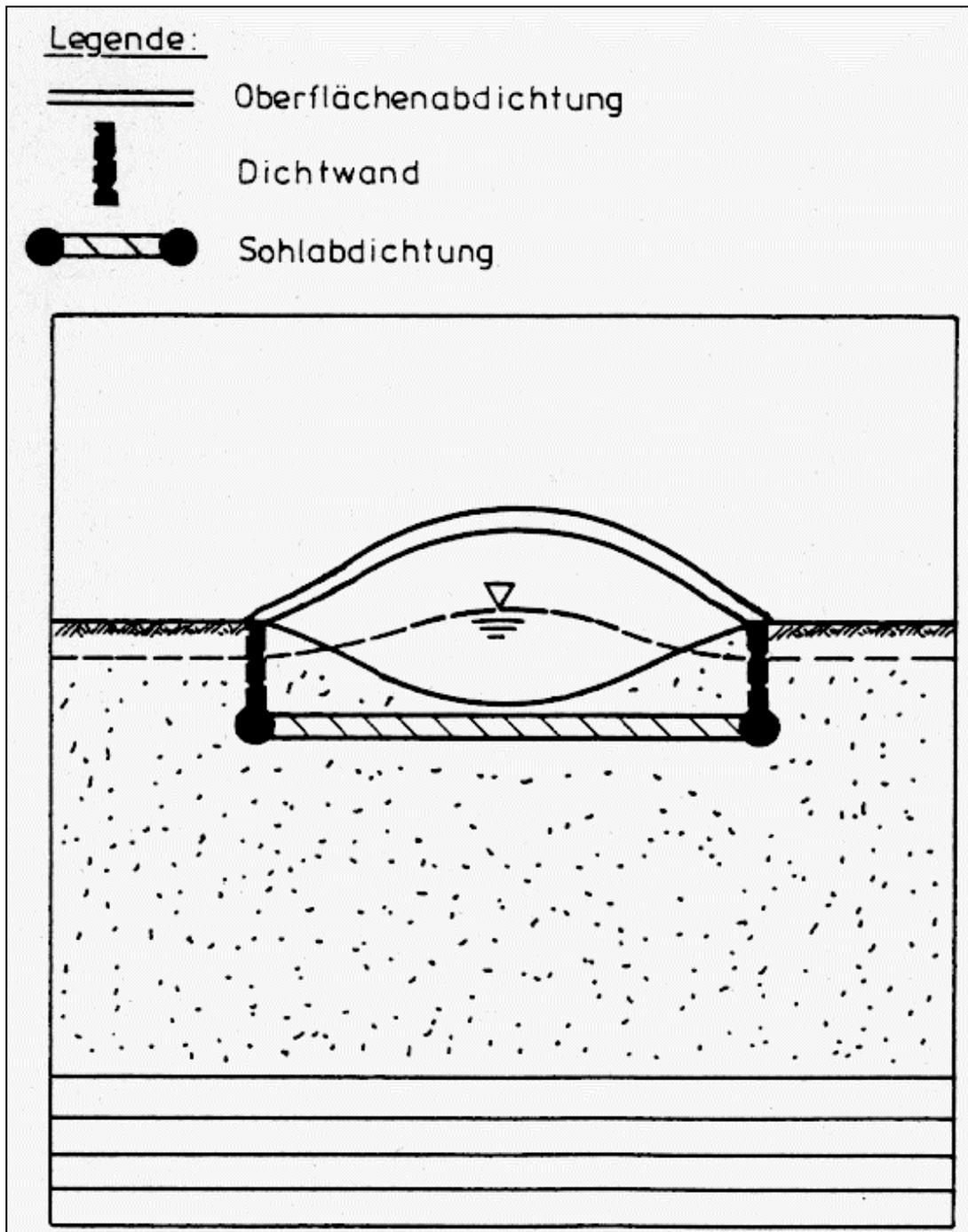
#### Standorttyp 1 (Bild 1.4)

Die große Mächtigkeit des Grundwasserleiters macht eine Sohlabdichtung im Grundwasserleiter erforderlich, da es unwirtschaftlich erscheint, die Dichtwände bis in große Tiefen herzustellen.

Die Durchörterung von Grundwasserleitern stellt an das Bauverfahren folgende Anforderungen:

- Einsatzmöglichkeit in stark grundwasserführenden Schichten ;
- Störunanfälligkeit bei grobkörnigen Böden ;
- Störunanfälligkeit bei nicht standfesten Böden (Flieβsand), wenn nicht besondere Zusatzmaßnahmen ergriffen werden.

Oberflächenabdichtung und Drainage für das Sickerwasser sind erforderlich.

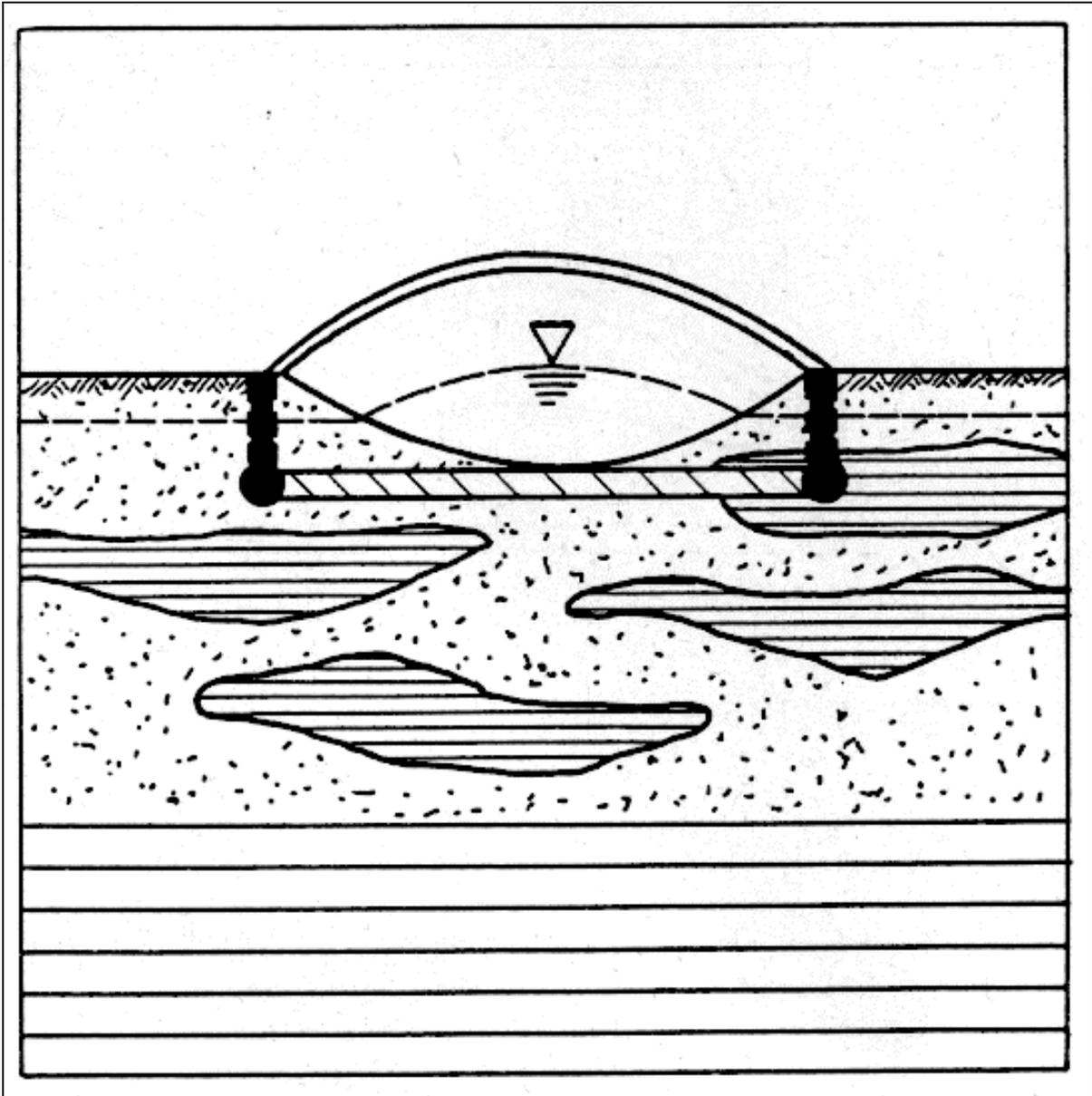


**Bild 1.4: Homogener Grundwasser-Leiter**

**Standorttyp 2 (Bild 1.5)**

Die große Mächtigkeit des Grundwasser-Leiters macht eine Sohlabdichtung im inhomogenen Grundwasser-Leiter erforderlich, mit Dichtwänden und Oberflächenabdichtung.

Zusätzlich zu den bei Standorttyp 1 genannten Anforderungen an die Vortriebstechnologie ergibt sich aus der Inhomogenität des Grundwasser-Leiters die Forderung, daß die Durchörterung in Böden mit stark unterschiedlichen Bodenparametern möglich sein muß.



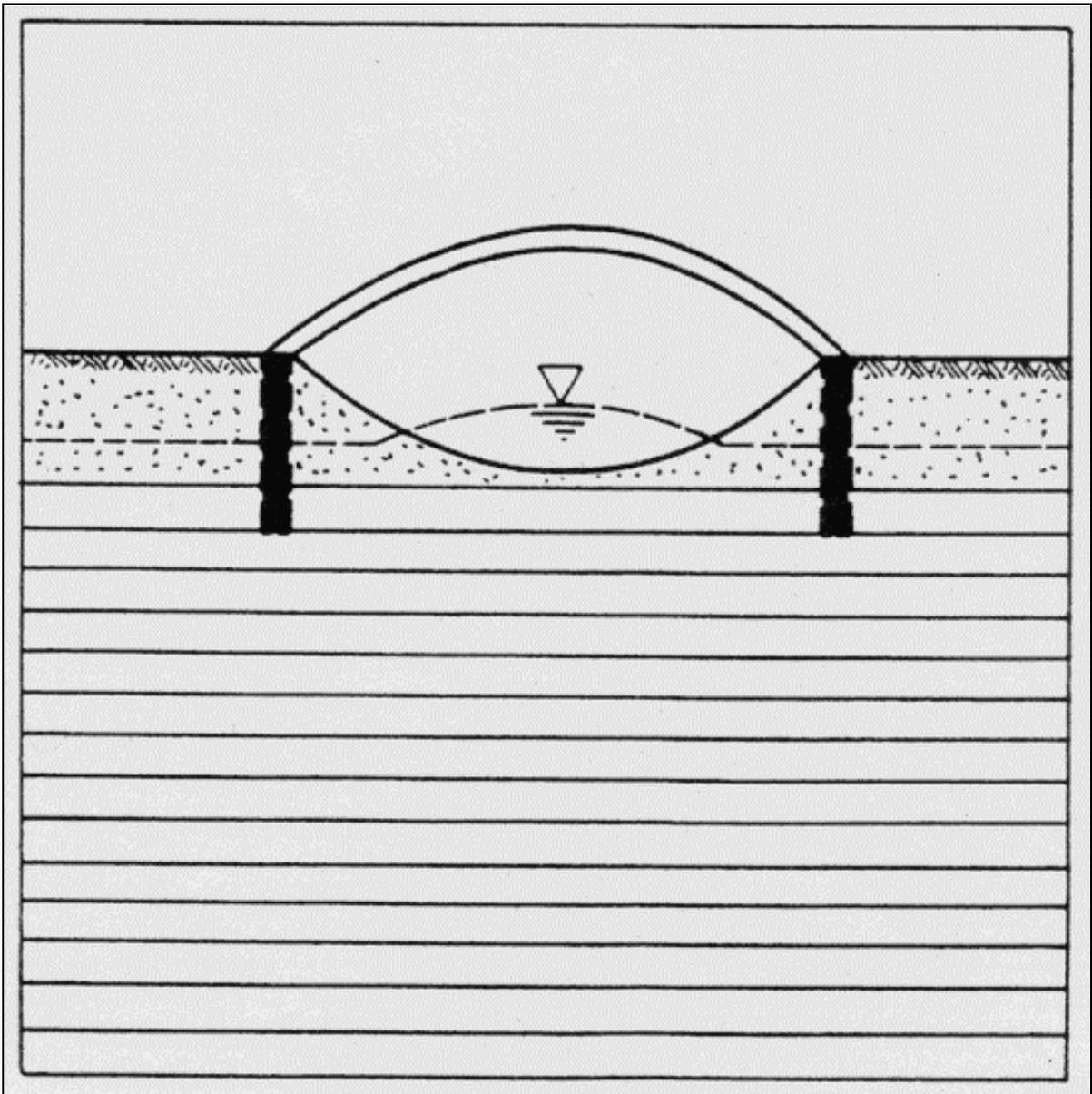
**Bild 1.5: Inhomogener Grundwasser-Leiter**

**Standorttyp 3 (Bild 1.6)**

a) Falls der Grundwasser-Geringleiter aus Lockergestein besteht, wird die Deponiesohle im Geringleiter angeordnet (Bild 1.6). Dies ergibt folgende Anforderung:

- Oberflächenabdichtung
- Dichtwände

b) Besteht der Grundwasser-Geringleiter aus Festgestein, muß die Deponiesohle ggf. mit Injektionen abgedichtet werden, wenn Klüfte vorhanden sind.



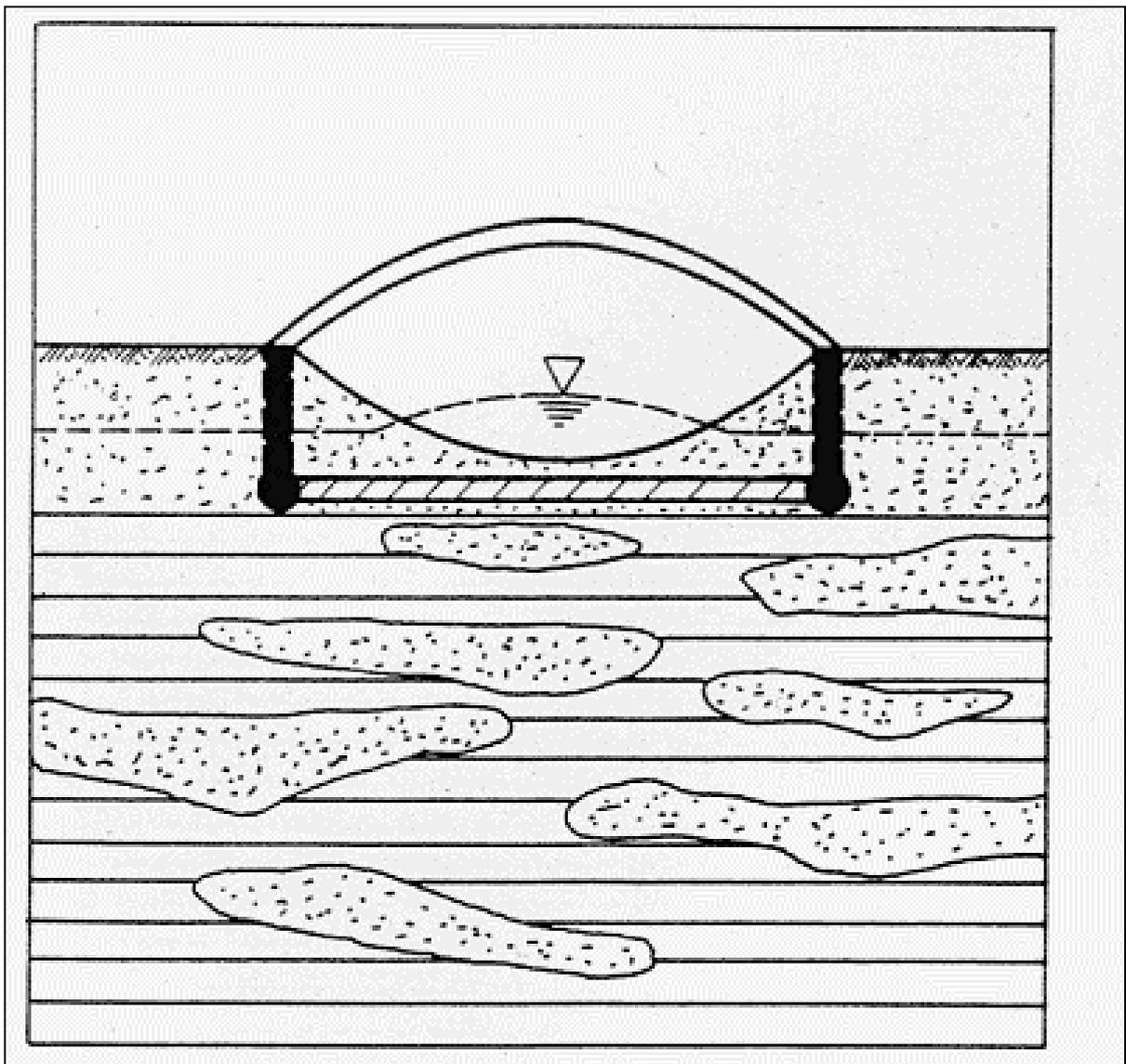
**Bild 1.6: Grundwasser-Leiter über Grundwasser-Geringleiter**

**Standorttyp 4** (Bild 1.7 und Bild 1.8)

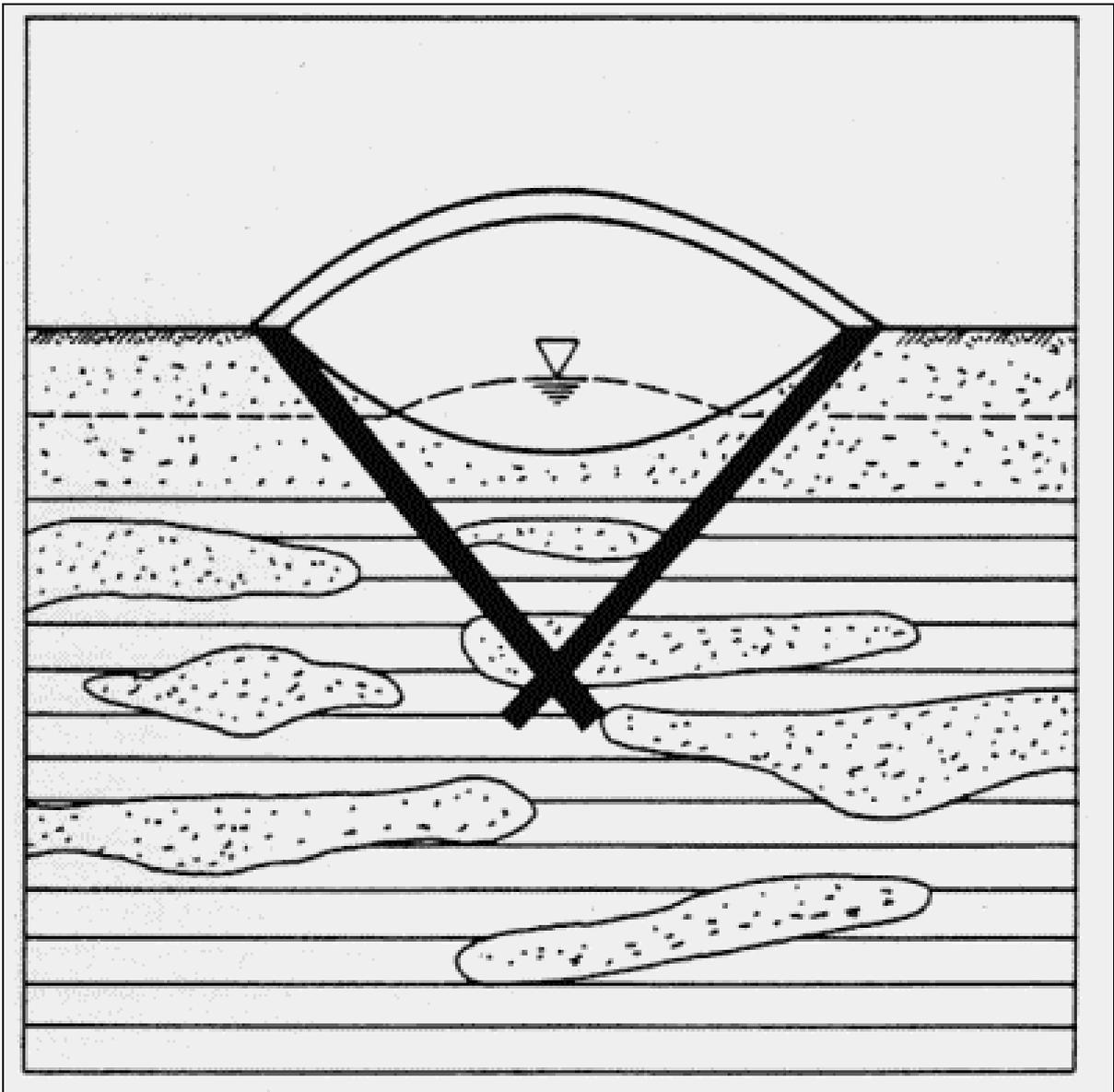
In Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des inhomogenen Grundwasser-Geringleiters ist die Anordnung der Deponiesohle sowohl im Grundwasser-Leiter als auch im Grundwasser-Geringleiter denkbar (Bild 1.7a und 1.7).

Für Bild 1.7b gelten die Anforderungen des Falls b) von Standorttyp 3.

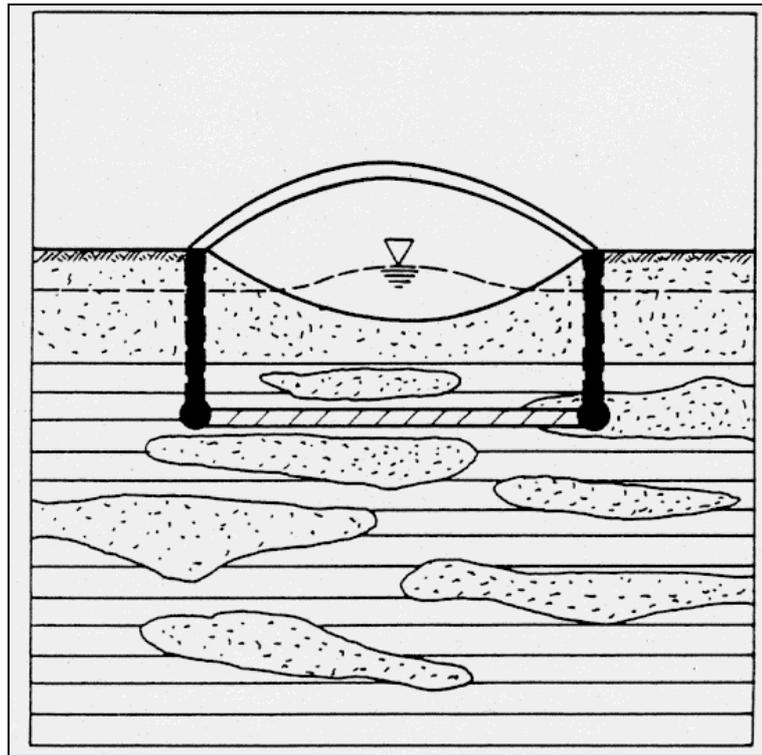
Die Baudurchführung muß auch in größeren Tiefen sowie in inhomogenen Bodenschichten durchführbar sein (Bild 1.8a und 1.8b).



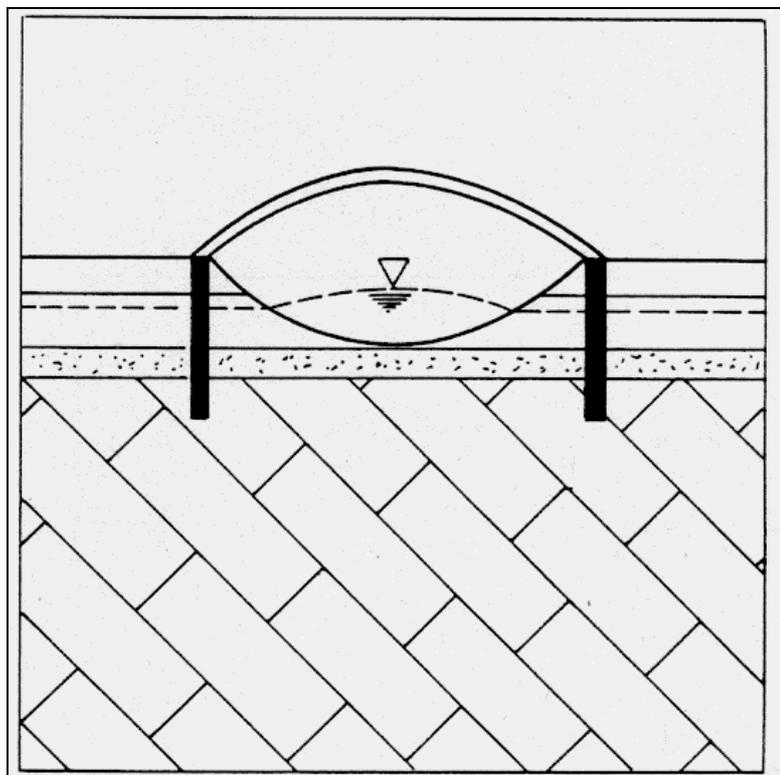
**Bild 1.7a: Grundwasser-Leiter über inhomogenem Grundwasser-Geringleiter**



**Bild 1.7b:** Herstellung seitlicher Abdichtungen und Sohlabdichtungen durch schräge Injektionsschirme



**Bild 1.8a: Grundwasser-Leiter über inhomogenem Grundwasser-Geringleiter**

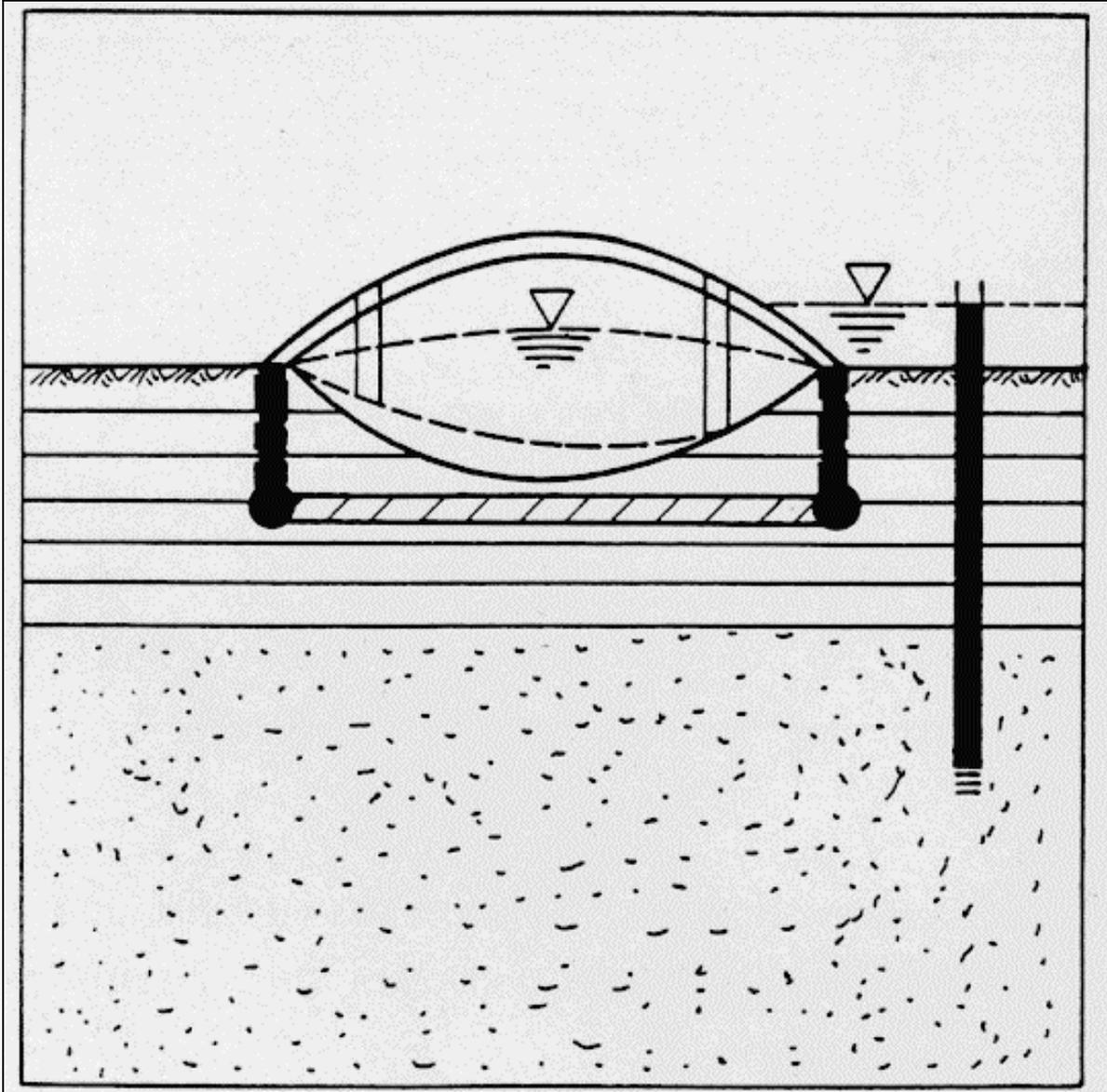


**Bild 1.8b: Herstellung von Oberflächenabdichtung und Dichtwänden bei genügender Dichtigkeit des Untergrundes**

**Standorttyp 5 (Bild 1.9)**

Das drückende Grundwasser ergibt folgende zusätzliche Forderung:

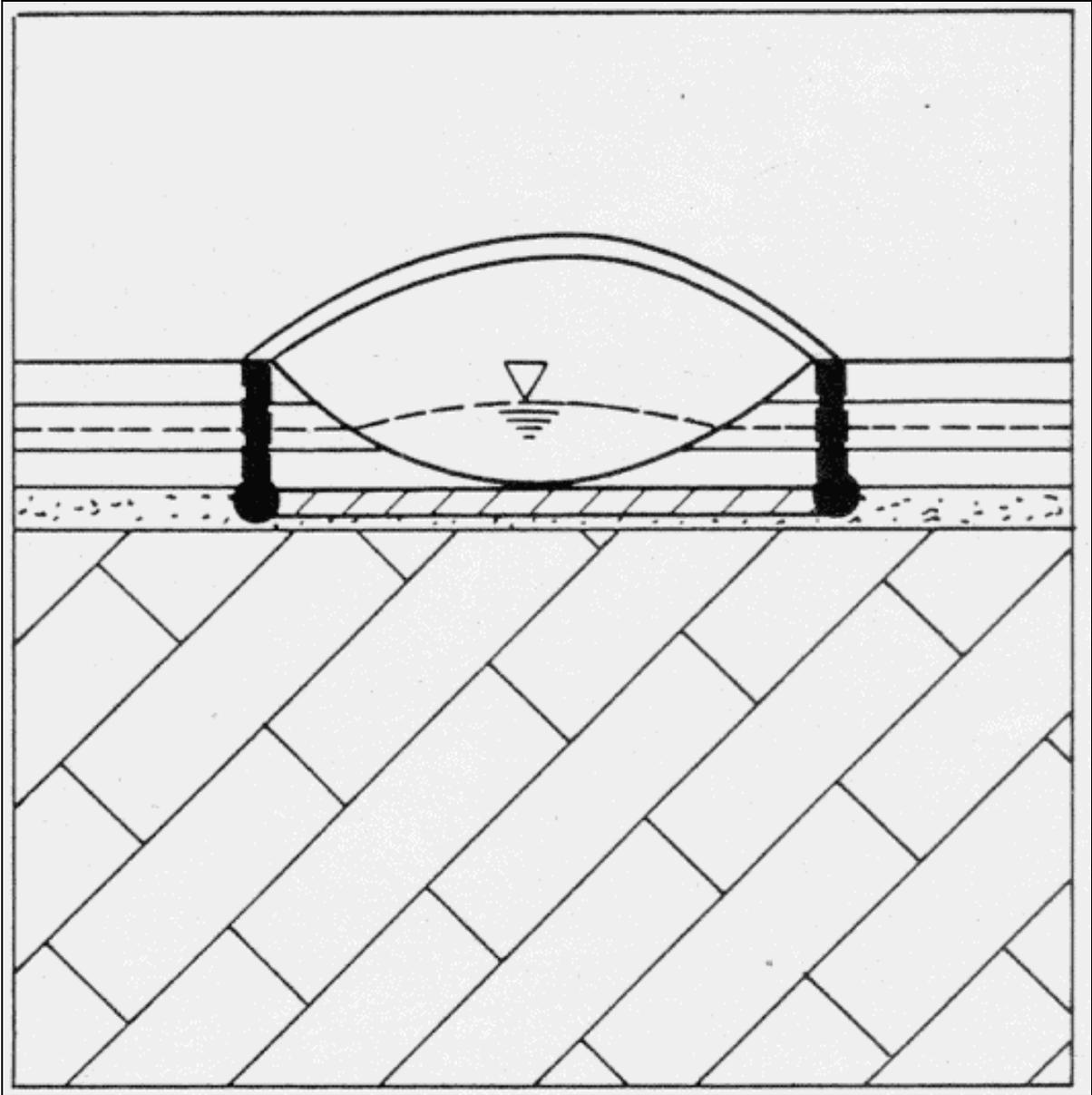
- Richtungsgenauigkeit des Vortriebsverfahrens für die Sohlabdichtung bei erhöhten Auftriebskräften
- Herstellung der Dichtwände bei drückendem Grundwasser



**Bild 1.9: Grundwasser-Geringleiter über Grundwasser-Leiter**

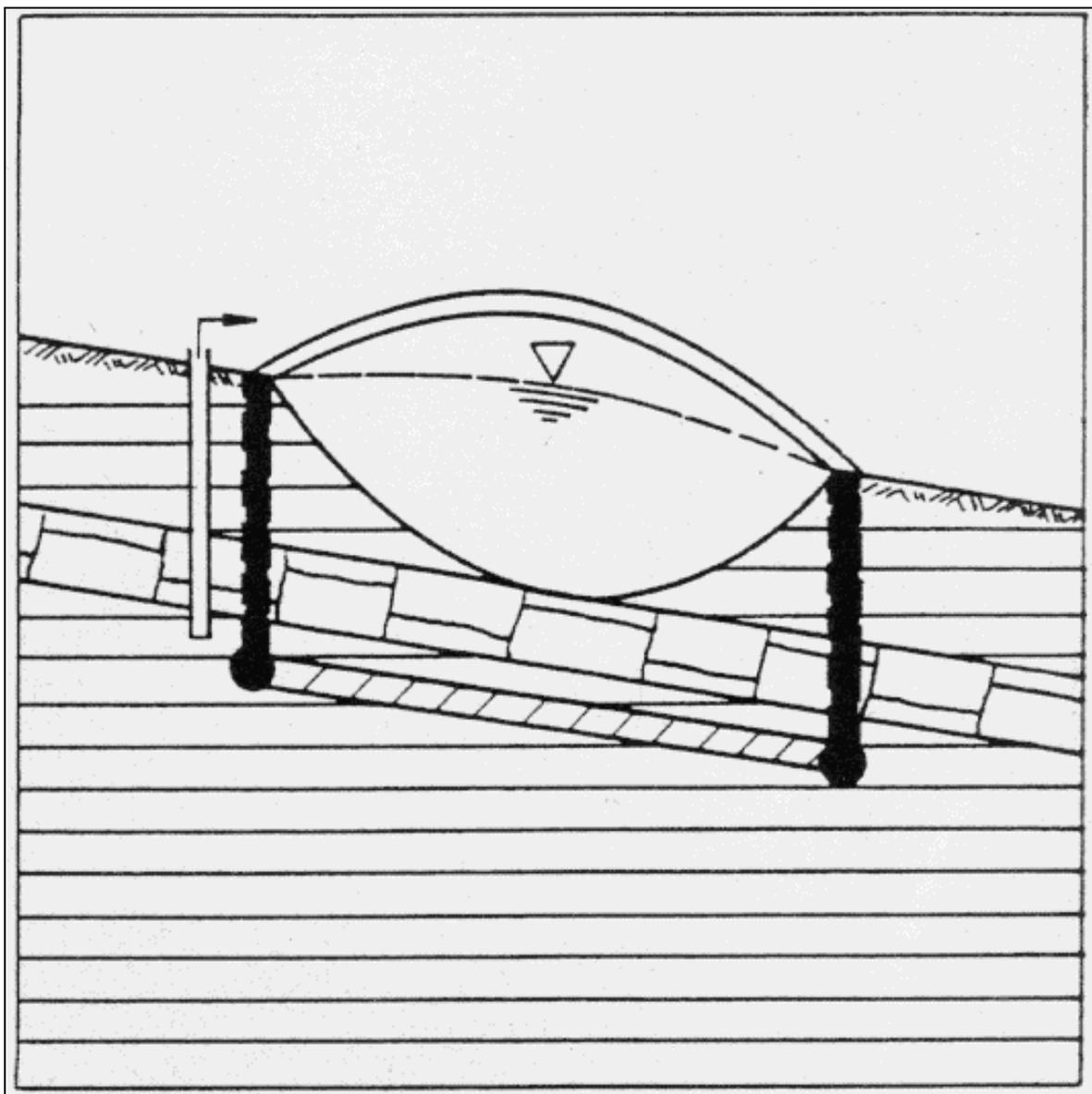
**Standorttyp 6 (Bild 1.10)**

Aus den Bedingungen des Standorttyps 6 ergeben sich die gleichen Forderungen wie bei Standorttyp 3, Fall b.



**Bild 1.10: Grundwasser-Geringleiter über geschichtetem Grundwasser-Leiter**



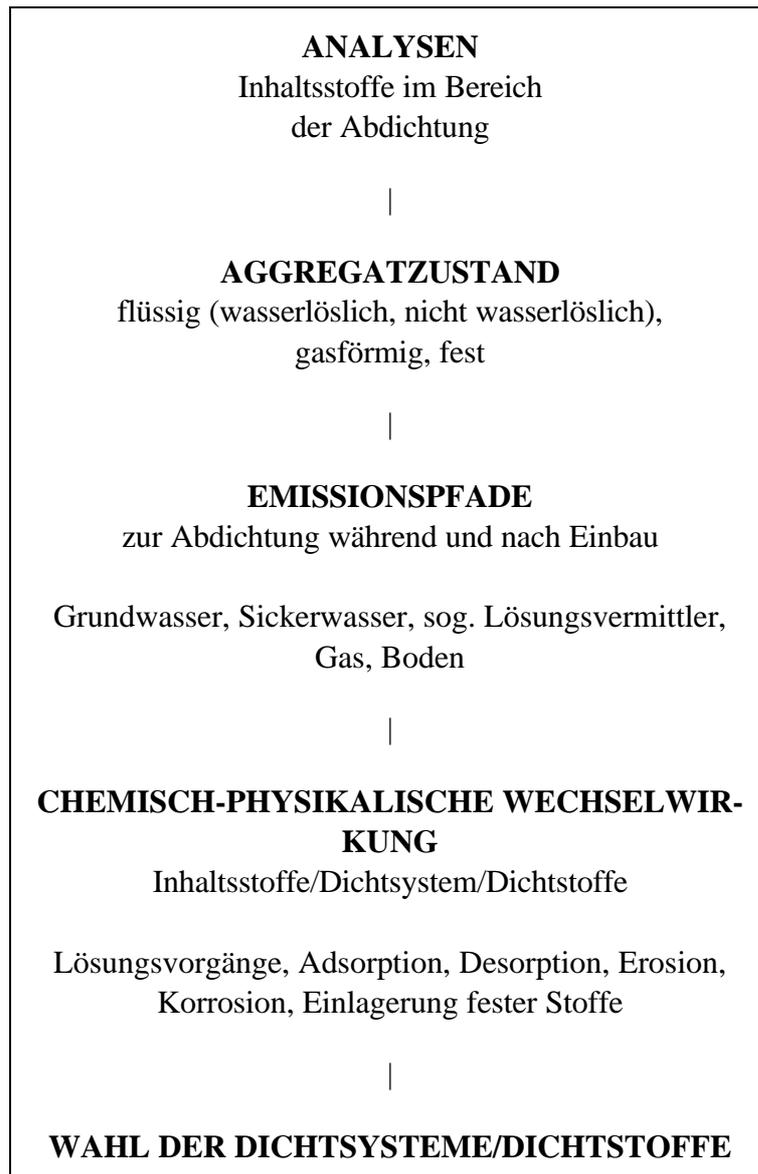


**Bild 1.11b: Grundwasser-Geringleiter**

## 1.4.2 Inhaltsstoffe von Altdeponien

Jede Einkapselungsmaßnahme erfordert Kenntnisse über die Inhaltsstoffe der Altdeponien, da diese über die Emissionspfade direkt oder schon während des Einbaus der Dichtstoffe mit diesen in Berührung kommen. Die Wirksamkeit der Abdichtungsmaßnahme hängt im wesentlichen davon ab, ob und inwieweit die eingebauten Dichtsysteme und Dichtstoffe mit den Inhaltsstoffen in Berührung kommen.

Der Einkapselungsmaßnahme geht in der Regel die Gefährdungsabschätzung voraus, bei der umfangreiche Analysenparameter ermittelt wurden. Wichtig für die Einkapselung ist es nun, abzuschätzen, mit welchen Stoffen auf welchen Emissionspfaden die Dichtsysteme in Berührung kommen und welche chemisch-physikalischen Wechselwirkungen zwischen Inhaltsstoffen und Dichtmaterialien bestehen (s. Bild 1.1). Das in Bild 1.12 aufgezeigte Ablaufdiagramm ermöglicht eine Abstimmung der Dichtsysteme und Dichtstoffe auf die einzukapselnden Stoffe.



**Bild 1.12: Ablaufdiagramm zur Bestimmung notwendiger Analysenparameter zur Wahl der Dichtsysteme und -stoffe**

### **1.4.3 Bodenmechanische Kennwerte des Untergrundes**

Jede Einkapselungsmaßnahme wird nach dem Stand der Technik mit verschiedenen Bauverfahren vorgenommen, sei es nun z.B. eine Oberflächenabdichtung aus mineralischen Baustoffen, die gegriffene Dichtungsschlitzwand oder die nachträgliche Sohlabdichtung durch Injektionen. Jedes Verfahren erfordert eine spezielle Untersuchung der bodenmechanischen Kennwerte. Die wichtigsten sind in Tabelle 1.2 genannt, in Abhängigkeit von der Bodenart sind Erfahrungswerte angegeben.

Tabelle 1.2: Bodenkennwerte von Bodenarten /79/

Spalte	a	b	c							
			Bodenart	Boden-Gruppe nach DIN 18 196	Korngrößenverteilung		Ungleichförmigkeitszahl CU	Plastizitätsgrenzen des Kornanteils < 0,04 mm		
					< 0,06 mm %	< 2,0 mm %		w <sub>L</sub> %	w <sub>p</sub> %	I <sub>p</sub> %
1	Kies, gleichkörnig	GE	< 5	< 60	2 5	—	—	—		
2	Kies, sandig, mit wenig Feinkorn	GW, GI	< 5	< 60	10 100	—	—	—		
3	Kies, sandig, mit Schluff- oder Tonbeimengungen, die das Korngerüst nicht sprengen	GU, GT	8 15	< 60	30 300	20 45	16 25	4 25		
4	Kies-Sand-Feinkorn-gemisch. Das Feinkorn sprengt das Korngerüst	G $\bar{U}$ , G $\bar{T}$	20 40	< 60	100 1000	20 50	16 25	4 30		
5	a) Feinsand	SE	< 5	100	1,2 3	—	—	—		
	b) Grobsand	SE	< 5	100	1,2 3	—	—	—		
6	Sand, gut abgestuft und Sand, kiesig	SW, SI	< 5	< 60	6 15	—	—	—		
7	Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst nicht sprengt	SU, ST	8 15	> 60	10 50	20 45	16 25	4 25		
8	Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst sprengt	S $\bar{U}$ , S $\bar{T}$	20 40	> 60	30 300	20 50	16 30	4 30		
9	Schluff, geringplastisch	UL	> 50	> 80	5 50	25 35	20 28	4 11		
10	Schluff, mittel- und hochplastisch	UM	> 80	100	5 50	35 50	22 23	7 20		
11	Ton, geringplastisch	TL	> 80	100	6 20	25 35	15 22	7 16		
12	Ton, mittelpplastisch	TM	> 90	100	5 40	40 50	18 25	16 28		
13	Ton, hochplastisch	TA	100	100	5 40	60 85	20 35	33 55		
14	Schluff oder Ton, organisch	OU, OT	> 80	100	5 30	45 70	30 45	10 30		
15	Torf	HN, HZ	—	—	—	—	—	—		
16	Mudde	F	—	—	—	100 250	30 80	50 170		

Die Bodenarten (Spalte a), für die die Bodenkenngrößen der Spalten d bis i gelten, wurden durch Grenzwerte ihrer Korngrößenverteilung und ihrer Plastizitätsgrenzen (Zeilen 1 und 2 der Spalten c) bewußt enger definiert als die entsprechenden Bodengruppen nach DIN 18196

(Spalte b). Für jede so beschriebene Bodenart sind in jeweils 2 Zeilen Grenzwerte dieser Bodenkenngrößen angegeben. Gleichzeitig gültig sind die Grenzwerte einer Zeile nur in Spalten, die durch Buchstaben (z.B. e) zu einer Gruppe zusammengefaßt sind. Die Grenzwerte in den Spaltengruppen c, e, f werden alleine durch die stoffliche Zusammensetzung, jene in den übrigen Spalten auch durch die Konsistenzzahl  $I_c$  bzw. Lagerungsdichte  $D$  beeinflusst. Für die Grenzwerte wurde vorausgesetzt, daß  $I_c$  etwa zwischen 0,4 und 1,0 und  $D$  zwischen 0,3 und 0,9 schwanken. Die Symbole in Spalte g weisen darauf hin, ob in der Bodenart bei statischen Spannungsänderungen die Scherfestigkeit beeinflussende Porenwasserdifferenzdrücke  $\Delta u$  entstehen:

Fortsetzung Tabelle 1.2: Bodenkennwerte von Bodenarten /79/

a Bodenart	d Wichte			e Proctor- werte		f Zusammendrückbarkeit			g Scherparameter			i Durch- lässig- keits- Koeffi- zient k m/s
	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma'$ kN/m <sup>3</sup>	w %	$\varrho_{Pr}$ t/m <sup>3</sup>	$w_{Pr}$	$E_s = v_e \cdot \sigma_{at} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{at}} \right) w_e$		$w_e$	$\varphi'$	$c'$ kN/m <sup>2</sup>	$\varphi_r$	
Kies, gleichkörnig	16,0	9,5	5	1,70	8	400	0,6	0	34	—	32	2,10 <sup>-1</sup>
	19,0	10,5	2	1,90	5	900	0,4	0	42	—	35	1,10 <sup>-2</sup>
Kies, sandig, mit wenig Feinkorn	21,0	11,5	7	2,00	7	400	0,7	0	35	—	32	1,10 <sup>-2</sup>
	23,0	13,5	3	2,25	4	1100	0,5	0	45	—	35	1,10 <sup>-6</sup>
Kies, sandig, mit Schluff- oder Tonbeimengungen, die das Korngerüst nicht sprengen	21,0	11,5	9	2,10	7	400	0,7	0	35	10	32	1,10 <sup>-5</sup>
	24,0	14,5	3	2,35	3	1200	0,5	+	43	0	35	1,10 <sup>-8</sup>
Kies-Sand-Feinkorn- gemisch. Das Fein- korn sprengt das Korngerüst	20,0	10,5	13	1,90	10	150	0,9	++	28	30	22	1,10 <sup>-8</sup>
	22,5	13,0	5	2,20	5	400	0,7	++	35	5	30	1,10 <sup>-11</sup>
a) Feinsand Sand, gleichkörnig	16,0	9,5	22	1,60	15	150	0,75	0	32	—	30	2,10 <sup>-4</sup>
	19,0	11,0	8	1,75	10	300	0,60	0	40	—	32	1,10 <sup>-5</sup>
b) Grobsand	16,0	9,5	16	1,80	13	250	0,70	0	34	—	30	5,10 <sup>-3</sup>
	19,0	11,0	6	1,75	8	700	0,55	0	42	—	34	2,10 <sup>-4</sup>
Sand, gut abgestuft und Sand, kiesig	18,0	10,0	11	1,90	10	200	0,70	0	33	—	32	5,10 <sup>-4</sup>
	21,0	12,0	5	2,15	6	600	0,55	0	41	—	34	2,10 <sup>-5</sup>
Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst nicht sprengt	19,0	10,5	15	2,00	13	150	0,80	+	32	10	30	1,10 <sup>-5</sup>
	22,5	13,0	4	2,20	7	500	0,65	+	40	0	32	1,10 <sup>-7</sup>
Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst sprengt	18,0	9,0	20	1,70	18	50	0,90	++	25	50	22	1,10 <sup>-7</sup>
	21,5	11,0	8	2,00	12	250	0,75	++	32	10	30	1,10 <sup>-10</sup>
Schluff, geringplastisch	17,5	9,5	28	1,60	22	40	0,80	+	28	20	25	1,10 <sup>-5</sup>
	21,0	11,0	15	1,80	15	110	0,60	+	35	5	30	1,10 <sup>-8</sup>
Schluff, mittel- und hochplastisch	17,0	8,5	35	1,55	23	30	0,90	++	25	30	22	2,10 <sup>-6</sup>
	20,0	10,5	20	1,75	16	70	0,70	++	33	10	29	1,10 <sup>-9</sup>
Ton, geringplastisch	19,0	9,5	28	1,65	20	20	1,00	++	24	60	20	1,10 <sup>-7</sup>
	22,0	12,0	14	1,85	14	50	0,90	++	32	15	28	2,10 <sup>-9</sup>
Ton, mittelplastisch	18,0	8,5	38	1,55	23	10	1,00	++	20	80	10	5,10 <sup>-8</sup>
	21,0	11,0	18	1,75	17	30	0,95	++	30	20	20	1,10 <sup>-10</sup>
Ton, hochplastisch	16,5	7,0	55	1,45	27	6	1,00	+++	17	100	6	1,10 <sup>-9</sup>
	20,0	10,0	20	1,65	20	20	1,00	+++	27	30	15	1,10 <sup>-11</sup>
Schluff oder Ton, organisch	15,5	5,5	60	1,45	27	5	1,00	+++	20	70	15	1,10 <sup>-9</sup>
	19,0	9,0	30	1,70	18	20	0,85	+++	26	20	22	2,10 <sup>-11</sup>
Torf	10,4	0,4	800	—	—	3	1,00	++	24	15	—	1,10 <sup>-5</sup>
	13,0	3,0	100	—	—	8	1,00	++	30	5	—	1,10 <sup>-8</sup>
Mudde	12,5	2,5	200	—	—	4	1,00	+++	22	20	—	1,10 <sup>-7</sup>
	16,0	6,0	50	—	—	15	0,90	+++	28	5	—	1,10 <sup>-9</sup>

0 = kein oder sehr geringer

+ = geringer

++ = mittlerer bis starker

+++ = sehr starker Einfluß des Porenwasserdifferenzdruckes auf die Scherfestigkeit

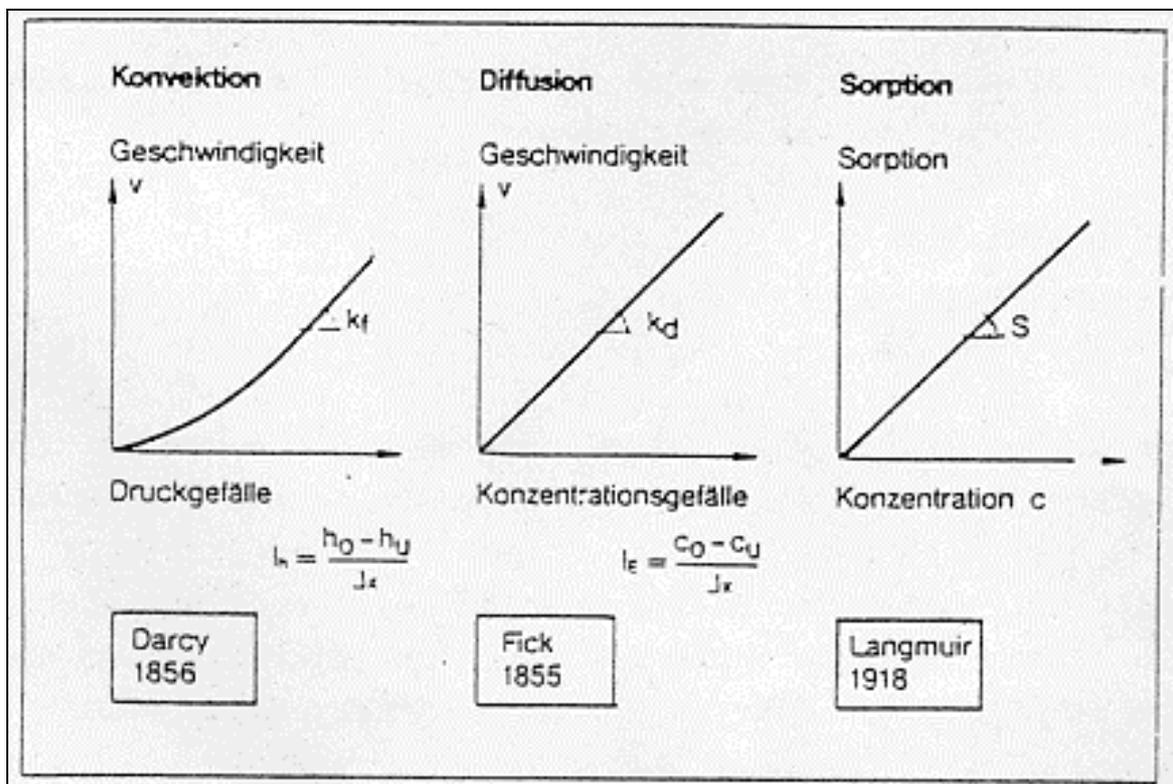
In Spalte f bedeutet  $\sigma_{at}$  den mittleren Atmosphärendruck (10 kN/m<sup>2</sup>)

## 2. Mechanismus der Schadstoffbewegung

Im traditionellen Erdbau war es bisher zur Beurteilung von mineralischen Dichtungen z.B. bei Staudämmen nur erforderlich, die Durchlässigkeit gegenüber Wasser zu berücksichtigen. Bei Deponien fällt Sickerwasser an, das im Normalfall Schadstoffe in gelöster Form enthält. Schadstoffe in Phase wären gesondert zu betrachten.

Bei der Beurteilung der Wirksamkeit einer Dichtung geht es um die Betrachtung des Schadstofftransportes. Der Stofftransport durch eine Dichtung beruht auf folgenden Transportmechanismen:

- Diffusion
- Konvektion
- Sorption



**Bild 2: Stoffgesetze und ihre Begründer /16/**

Die Diffusion ist die molekulare Bewegung gelöster Stoffe infolge eines Konzentrationsunterschiedes, die Bewegung erfolgt vom Ort hoher Konzentration zu niedriger Konzentration. Konvektion heißt die Strömung infolge einer Potential- bzw. Druckdifferenz. Mit Sorption werden physiko-chemische Vorgänge am Korngerüst beschrieben, die ein Rückhaltevermögen der Dichtung bedeuten. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Transportmechanismen und den sie auslösenden physikalisch-chemischen Parametern sind in Bild 2 verdeutlicht. In diesem Bild sind ebenfalls die Begründer der Gesetzmäßigkeiten vermerkt.

Das Zusammenwirken der Mechanismen wird in Form der allgemeinen Differentialgleichung für den **Stofftransport** beschrieben :

$$(k_d \times d^2c / dx^2) + (k_f \times l \times dc / dx) - (S \times dc / dt = 0)$$

Entsprechend dieser Gleichung sind Kenngrößen für die Wirksamkeit und Qualität einer Dichtung die Größen :

- Diffusionsbeiwert  $k_d$
- Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$
- Sorptionsbeiwert  $S$

Erste Ansätze zur Erschließung dieser **Transportgleichung** für die praktische Anwendung liegen vor, es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß hier noch umfangreiche weitere Forschungstätigkeit erforderlich ist. Dabei ist die Konvektion weitgehend erforscht, bei mineralischen Dichtstoffen und kleinen Druckgefällen ist das Gesetz von DARCY nicht linear, sondern vom Druckgefälle selbst abhängig.

Wechselwirkungen zwischen den Schadstoffen und der Dichtung können die Parameter des Schadstofftransports verändern. Diese Wechselwirkungen sind bereits nachgewiesen für Tone und Dichtwandmassen. Die Fragestellung ist daher um die Beständigkeit zu erweitern, wobei hier an die Beständigkeit gegen chemische Angriffe gedacht ist. Die Beständigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung muß durch die Wahl geeigneter Materialien sichergestellt sein.

Bei dem Schadstofftransport ist zu beachten, daß bei Durchlässigkeitsbeiwerten kleiner  $1 \times 10^{-9}$  m/s der diffusive Transport den konvektiven übertrifft. Dies kann für eine Einkapselung bedeuten, daß trotz Erzeugung eines Druckgefälles nach innen durch Pumpmaßnahmen bei sehr kleinen Durchlässigkeiten eine resultierende Schadstoffbewegung nach außen sich infolge Diffusion einstellen kann.

## 3. Oberflächenabdichtungssysteme Anforderungen - Funktionsweise - Bemessung - Aufbau

### 3.1 Aufgabe und Anwendungsbereich

Mit einer Oberflächenabdichtung werden in der Regel folgende Ziele angestrebt :

- Der Wassereintrag in den Deponiekörper durch versickerndes Niederschlagswasser ist zu unterbinden, um die Gefahr einer Schadstoffauswaschung (in das Grundwasser oder in Oberflächengewässer neben der Altablagerung) zu vermeiden.
- Eine unkontrollierte Gasemission in die Atmosphäre, die auch bei Fassung von Deponiegasen mittels Brunnen auftritt, ist soweit wie möglich zu unterbinden. Dies insbesondere dann, wenn in den entweichenden Gasen bzw. Dämpfen gesundheitsgefährdende Beimengungen enthalten sind.
- Die Oberflächenabdichtung muß schließlich eine Nutzung der Oberfläche zulassen; diese ist in der Regel eine Begrünung zur Wiedereingliederung der Altablagerung in die umgebende Landschaft.

### 3.2 Aufbau und Belastung des Abdichtungssystems

Ein festgefügtter Standard für den **Aufbau** einer Abdichtung liegt derzeit noch nicht vor. Eine Abdeckung, mit der die oben definierten Ziele angestrebt werden, wird jedoch immer folgende Hauptelemente aufweisen (vgl. Bild 3.1):

- Oberboden und Mutterboden (mit Entwässerungssystem),
- Dichtungssystem,
- Gasdränage und Ausgleichsschicht (falls erforderlich).

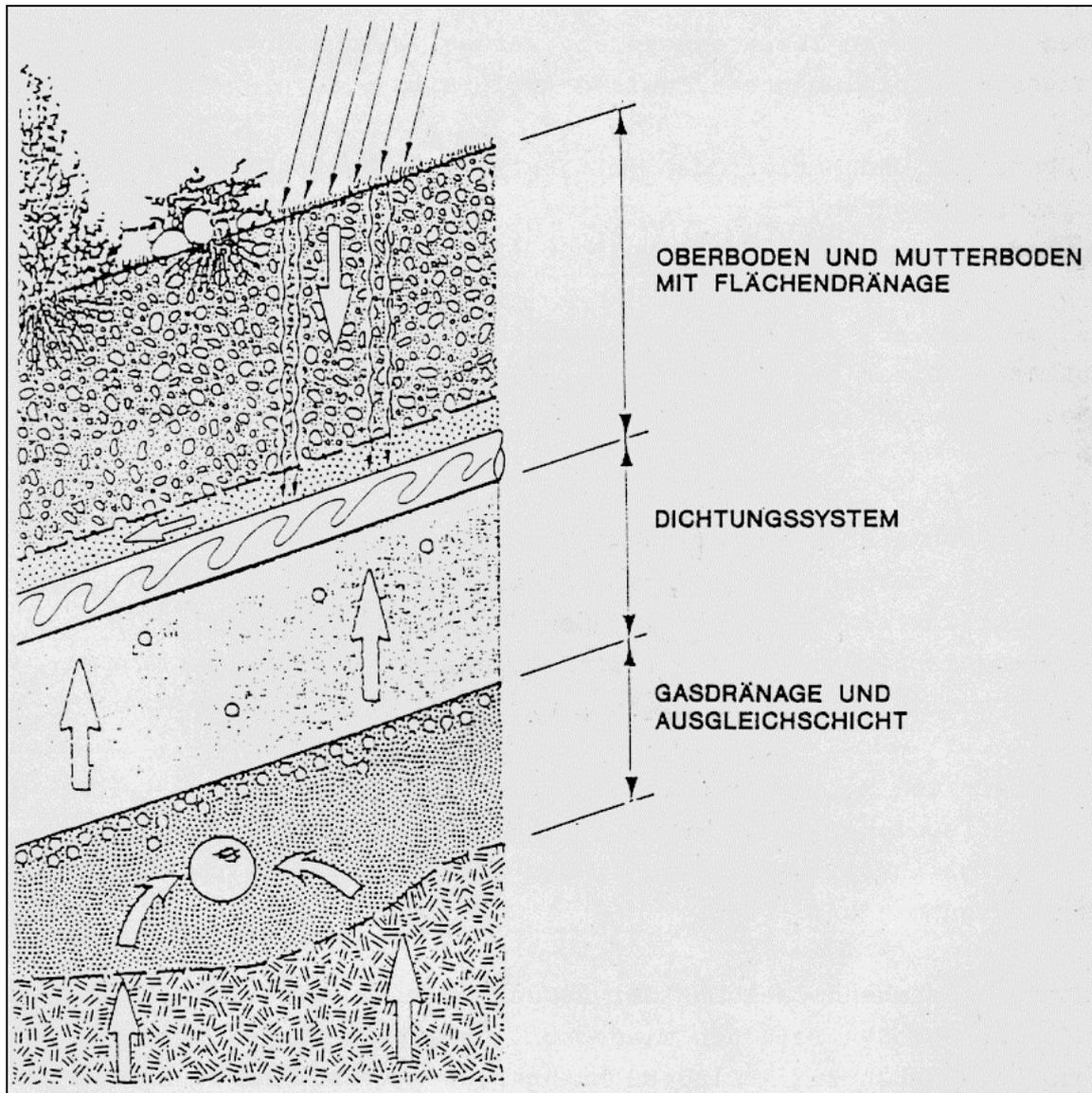
Bei der Auswahl von Einzelkomponenten, die den genannten Funktionsweisen zuzuweisen sind, sind bestimmte Randbedingungen zu beachten. Als Stichpunkte sind hier zu nennen:

- bodenmechanische Bedingungen (Standstabilität, Filterstabilität, Suffosion)
- Schutzfunktion gegen Belastungen der Dichtung (mechanisch-physikalische, biologische, chemische oder kombinierte Belastungen).

Der Ober- und Mutterbodenauftrag dient als Wasser- und Nährstoffspeicher sowie als Wurzelraum für die Begrünung der Fläche, gleichzeitig schützt er das Dichtungssystem vor Beschädigungen und Frost.

Durch ausreichende Neigung der Abdeckung wird angestrebt, einen möglichst großen Teil des Niederschlagswassers oberflächlich auf den Abdeckschichten zum Abfluß zu bringen. Der versickernde Anteil des Niederschlags wird während der Vegetationspausen von den Pflanzenwurzeln allenfalls zu einem geringen Teil aufgenommen und kann sich oberhalb des Dichtungssystems ohne Dränagesysteme stauen. Da die Durchlässigkeit der Abdeckung aus Gründen der

Wasserspeicherung in der Regel nicht ausreicht, um das Wasser über der Dichtung hangparallel abfließen zu lassen, kann es zur Bildung eines Stauspiegels in den Abdeckschichten kommen.



**Bild 3.1: Systemaufbau eines Oberflächenabdichtungssystems /31/**

Dabei ist zu beachten, daß ein hochliegender Stauwasserspiegel entscheidene Nachteile auf das Vegetationsgeschehen bis hin zum Absterben der Pflanzen zur Folge haben kann. Darüber hinaus kann sein Absinken während Trockenperioden das Tiefenwachstum von Pflanzenwurzeln fördern. Dies ist im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung des Dichtungssystems unerwünscht.

Um vorgenannte nachteilige Folgen für die Vegetation und das Dichtungssystem zu vermeiden, wird zwischen den Abdeckschichten und dem Dichtungssystem eine Flächendränage zwischenzuschalten sein, über die von den Pflanzenwurzeln nicht aufgenommenes Sickerwasser (Niederschlagswasser) abgeführt werden kann. Bei steiler Neigung der Deponieoberfläche kann eine Flächendränage darüber hinaus auch notwendig werden, um die Gleitsicherheit der Abdeckung sicherzustellen.

Je nach Kornaufbau der Abdeckung ist die Flächendränage gegen das Einwandern von Feinanteilen und die damit verbundene Gefahr eines allmählichen Verstopfens der Poren im Dränagematerial durch ein Flächenfilter zu schützen. Die einschlägigen Filtergesetze bzw. Bemessungsgrundsätze sind zu beachten.

Abhängig von der Größe des Wasserdurchtritts aus dem Oberboden in die Entwässerungsschicht werden zur Unterstützung der Flächendränage bei Bedarf Entwässerungsrohre einzubauen sein.

Das Dichtungssystem, auf das nachfolgend näher eingegangen wird, hat die Aufgabe, ein Eindringen von Sickerwasser aus der Flächendränage in den Deponiekörper und gleichzeitig ein Entweichen von Deponiegas in die Atmosphäre zu unterbinden.

Mit der Ausgleichsschicht und Gasdränage unterhalb des Dichtungssystems werden Unebenheiten der Deponieoberfläche ausgeglichen. Gleichzeitig dient diese Schicht dazu, die ggf. nicht anderweitig bereits gefaßten Gase einem sekundären Gassammelsystem zuzuführen. Die Systemskizze zeigt einen Schnitt durch eine Gasdränleitung, über die in der flächigen Gasdränage anfallende Gase abgesaugt werden können.

Wenn aus abzudeckenden Böschungen Sickerflüssigkeit austritt, ist innerhalb der Gasdränage ein viertes Element erforderlich: Eine Flächendränage, in der die anfallende Flüssigkeit gefaßt und unterirdisch einem Sammler zugeleitet wird.

Um die vorbeschriebenen 3 bzw. 4 Hauptelemente einer Deponieabdeckung im Detail technisch durchbilden und bemessen zu können, sind zunächst die Beanspruchungen jedes Elementes im einzelnen darzustellen. Im folgenden werden deshalb die Beanspruchungen des Dichtungssystems in einem Oberflächenabdichtungssystem näher aufgezeigt.

Das Dichtungssystem muß folgenden Beanspruchungen dauerhaft gewachsen sein, um seine Aufgaben erfüllen zu können:

- Biologische Beanspruchungen durch
  - mikrobiellen Abbau,
  - Lochfraß durch nagende und grabende Tiere,
  - Durchwurzelung.
- Mechanisch-physikalische Beanspruchungen durch
  - Temperatur,
  - UV-Strahlen,
  - hydraulische Gradienten,
  - Gasdruckgradienten,
  - Diffusionsgradienten,
  - mechanische Kräfte (Setzungen, Schubkraft).
- Chemische Beanspruchungen durch
  - Gase und Dämpfe,
  - Stauwasserinhaltsstoffe,
  - Gaskondensat.

Eine vergleichbare Beanspruchungsliste ist selbstverständlich auch für die anderen Hauptelemente des Systems aufzustellen. Im Anschluß kann jedes Hauptelement unter Berücksichtigung der von ihm zu übernehmenden Funktionen und der Gegebenheiten des Einzelfalles entworfen und - wie bei Baukonstruktionen üblich - der Entwurf im Zuge der Bemessung daraufhin überprüft werden, ob er den geforderten Zielsetzungen gerecht wird und die ausgewählten Materialien den zu erwartenden Beanspruchungen gewachsen sind.

### 3.3 Komponenten und mögliche Materialien

Die einzusetzenden Baustoffe sind entsprechend ihrem Einsatzzweck auszuwählen.

#### Abdichtungsstoffe

Potentielle Abdichtungsstoffe sind

- mineralische Dichtstoffe
- künstliche Dichtungsstoffe.

Eine Kombination dieser Materialien ist aus dem Deponiebau bekannt. Dieses als Kombinationsdichtung bezeichnete Dichtungssystem zeichnet sich gegenüber den Einzelmaterialien dadurch aus, daß beide Einzelkomponenten im Preßverbund eine zusätzliche Wirkungsweise bekommen. Durch einen Preßverbund zwischen den beiden Dichtungselementen wird der strömungsgebundene Schadstofftransport unterbunden und Fehlstellen in den einzelnen Dichtungselementen weitgehend kompensiert.

Mögliche mineralische Dichtstoffe sind feinkörnige Böden wie Schluffe und Tone, die je nach Anforderungsprofil durch Zugabe von Hilfsstoffen wie Bentonit, Zement oder Wasserglas aufbereitet werden können. Gemischtkörnige Böden können ebenfalls sehr geringe Durchlässigkeiten aufweisen. Auch hier können Zusatzstoffe hilfreich bzw. notwendig sein. Künstliche Dichtungsstoffe sind Kunststoffe (Polymere) verschiedener Dichte aus den Grundstoffen:

- Polyethylen (HDPE, LDPE)
- PVC
- Bitumen
- Polymergemische (HDPE mit Elastifikatoren).

#### Entwässerung

Eine Entwässerung des Decksubstrates dient neben einer Reduzierung der hydraulischen Belastung der Dichtstoffe einer Dränung des Wurzelbodens.

Einsetzbar sind:

- mineralische Dränstoffe
- Kunststoffdränkörper.

Zu den mineralischen Dränstoffen zählen Kiese, Sande sowie Reststoffe, die ein umweltverträgliches Eluatverhalten aufweisen. Zu diesen Reststoffen sind zu rechnen Glasasche, Müllverbrennungsschlacke oder Reststoffe des Bergbaus.

Es ist möglich, auch gemischtkörnige Dränstoffe oder Kombinationen von verschiedenen Materialien je nach Anforderungsprofil und Einsatzzweck einzusetzen. Zu den künstlichen Dränkörpern zählen Rohre (HDPE, PVC) und Dränmatten (Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamide (PA), Polyester (PES) oder Polyacrylnitril (PAC)).

### **Schutzfunktion**

Zum Schutz der Dichtungen vor mechanischen Belastungen während der Bauzeit und nach Einbau der Stoffe sind Geotextilien unterschiedlicher Bauart einsetzbar. Im wesentlichen werden zu diesem Zweck Vliese (HDPE, Polyester) eingesetzt. In neuerer Zeit sind auch Bentonitmatten entwickelt worden, die das Quellverhalten des Bentonits bei Wasserzutritt ausnutzen.

Auf einen Einsatz dieser künstlichen Materialien kann ggf. bei entsprechender Sorgfalt beim Einbau der Abdeck- und Dränschichten und Wahl von rundkörnigen, nicht zu grobkörnigen Dränstoffen verzichtet werden.

### **Entgasung**

Eine Entgasung wird je nach Entgasungstechnik und -bedarf mittels mineralischer oder künstlicher Schichten u.U. in Kombination mit Rohrsystemen konzipiert. Gasdränagen werden analog zu Entwässerungsschichten aufgebaut. Bei der Wahl der Werkstoffe sind unterschiedliche Belastungen zu beachten.

Es ist zu unterscheiden zwischen

- vertikaler Entgasung mittels Gasbrunnen (Entgasung des Deponiekörpers)
- horizontale Entgasung mittels
  - Dränmatten
  - Entgasungsschichten aus mineralischen Material (Entgasung nur an der Oberfläche - Emissionsschutz) unter Umständen, d.h. bei zu hoher Gasproduktion unterstützt durch horizontale Gasdränagerohre.

### **Rekultivierung**

Eine mögliche Rekultivierungsschicht setzt sich aus den Komponenten Oberboden und Mutterboden zusammen. Abhängig von der Art der späteren Nutzung kann auch auf den Einsatz einer Mutterbodenaufgabe verzichtet werden.

## 3.4 Anforderungen und Eignungsprüfung für die Materialien

### 3.4.1 Mineralische Dichtstoffe

Die Anforderungen an die mineralische **Dichtstoffe** ergeben sich aus den Belastungen:

- hydraulische Belastung
- ungleiche Setzungen
- Klimaeinflüsse
- Erosion
- Standsicherheitsprobleme
- Durchwurzelung
- Kleintierbefall
- Stauwasserinhaltsstoffe.

Als Anforderungskatalog ergibt sich damit:

- geringe Wasser- und Gasdurchlässigkeit
- geringe Setzungsempfindlichkeit
- Erosionssicherheit (Suffosion)
- Frostbeständigkeit <sup>1)</sup>
- Standsicherheit
- Wurzelfestigkeit <sup>1)</sup>
- Resistenz gegenüber chemischen Angriffen.

Damit die mineralischen Baustoffe diesen Anforderungen genügen, ist es notwendig, insbesondere Kennwerte für Spannungs-Verformungs-Verhalten und Durchlässigkeit zu bestimmen und die Erosionssicherheit nachzuweisen.

<sup>1)</sup> Für verschiedene Belastungen können mineralische Stoffe selbst nicht vollständig ausgelegt werden. Hier ist nur durch eine entsprechende Konzeption des gesamten Oberflächenabdichtungssystems zu einer befriedigenden Lösung zu gelangen.

Ein dementsprechendes Untersuchungsprogramm ist nachfolgend in Tabelle 3.1 aufgeführt.

**Tabelle 3.1: Untersuchungen von mineralischen Dichtstoffen**

<b>Eigenschaft</b>	<b>Prüfungsverfahren</b>	<b>Normen</b>
Herstellung/ Verarbeitbarkeit/ Einbaukriterien	Klassifikation Korngrößenverteilung Proctorversuch Wassergehalt Zustandsgrenzen (Plastizität, Konsistenz) Korndichte Wasseraufnahme Kalkgehalt organischer Gehalt	DIN 18196 DIN 18123 DIN 18127 DIN 18121 DIN 18122 DIN 18124 Enslin/Neff Scheibler Glühverlust oder Naßoxidation
Spannungs-/ Verformungs- Verhalten	Scherversuche Kompressionsversuche Quellverhalten Stand sicherheitsberechnungen	DIN 18137 Oedometer Quellvers. DIN 4017/ DIN 4084
Durchlässigkeits- Verhalten	Durchlässigkeitsversuche (kombiniert mit Proctorversuch) evtl. Prüfung mit Sickerwasser oder Prüfflüssigkeiten	DIN 18130 Siehe auch /41/ , /66/
Beständigkeit Gegenüber chem. Belastungen	siehe nachstehende Erläuterungen	

Eine chemische Beanspruchung der Oberflächenabdichtung findet in geringerem Umfang statt als z.B. bei einer Deponiebasisabdichtung. Ein Schadstoffangriff ist von den Deponiegas-inhaltsstoffen und ggf. von unter der Dichtschicht anfallendem Kondensat herzuleiten. Insofern können die für den Deponiebau geeigneten Dichtungsmaterialien auch für Oberflächenabdichtungen eingesetzt werden.

Standards, die im Deponiebau für Oberflächenabdichtungen einzuhalten sind, sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Anforderungen an Oberflächenabdichtungen für Sonderabfalldeponien /9/

Komponenten der Oberflächenabdichtung	Parameter	Werte/Maßnahmen
Entwässerungssystem	Gefälle	>>3%, zwischen Dränage und Abdichtungsschicht Filterstabilität notwendig
	Dicke	$d \geq 0,3$ m
	Material	chemisch stabiles Rundkornmaterial, u.U. gebrochenes Material $\text{CaCO}_3 \leq 20$ Gew.-Prozent $k > 10^{-3}$ m/s
	Entwässerungsröhre	2/3 gelocht/geschlitzt Nenndurchmesser DN 300
Ausgleichsschicht	Material	homogen, nicht bindig
	Dicke	$d \geq 0,5$ m
Gasdränage	Material	$d \geq 0,3$ m kalziumkarbonatfreier Kies
mineralische Abdichtung	Dicke	$d \geq 0,5$ m
	Material	$k < 5,0 \cdot 10^{-10}$ m/s Feinstkorn $\ll 2 \mu\text{m} \geq 20$ Gew.-Prozent org. Bestandteile $< 5$ Gew.-Prozent $\text{CaCO}_3 < 30$ Gew.-Prozent
Schutz- und Rekultivierungsschicht	Dicke	$d \geq 1,0$ m

Um einen wirkungsvollen Abdichtungseffekt zu erzielen, sollten Durchlässigkeitsbeiwerte von

$$k < 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

eingehalten werden. Da die Oberflächenabdichtung bei Altablagernungen zumeist das wesentliche Dichtungselement darstellen, sind aus Gründen der Langzeitsicherheit Durchlässigkeitsbeiwerte von

$$k \leq 1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

anzustreben. Eine weitere Kenngröße bezüglich eines möglichen Schadstofftransportes stellt die Diffusion dar. Diese ist aus der Betrachtung der Oberflächenabdichtung deshalb nicht generell auszuschließen, da wie erwähnt über die Gasphase an der Unterkante der Dichtung eine Schadstoffanreicherung möglich ist. Aus diesem Grunde sollte - als entscheidende Größe - der effektive Porenraum des Dichtstoffes minimiert werden.

Dabei gilt es allerdings zu beachten, daß es durch Anforderungen der Hohlraumarmut und einer ausreichenden Plastizität zu einem Konfliktpotential kommen kann, das zu einer Kompromißlösung führen muß.

Ein ausreichendes Adsorptionsvermögen des Dichtungsbaustoffes unterstützt dabei einen minimalen Schadstofftransport.

Zu bautechnischen Regelanforderungen sind die üblichen Werte (siehe /2/, /18/, /43/) zu nennen. Hier ist im Einzelfall zu entscheiden, ob höhere Werte angemessen sind.

Entsprechend der Empfehlung E 3-5 der GDA-Empfehlungen /42/ dient die Ausführung des Versuchsfeldes für den Bau einer mineralischen Deponieabdichtung als großmaßstäblicher Eignungsversuch. Geprüft wird im einzelnen:

- Eignung des Materials unter Baustellenbedingungen
- Eignung der Gewinnungs-, Behandlungs- und Aufbereitungsverfahren
- Eignung der Einbau- und Verdichtungsverfahren bzw. der vorgesehenen Geräte
- Einhaltung der geforderten Werte für Durchlässigkeit, Wassergehalt, Dichte und Homogenität
- Festlegung der Bezugswerte für die Qualitätskontrolle

Die Abmessung des Versuchsfeldes richtet sich nach dem Entwurf der Abdichtung, den eingesetzten Erdbaugeräten und den Erfordernissen der vorgesehenen Feldversuche, Probennahmen, Messungen und Beobachtungen. Die Neigung des Planums, auf dem das Versuchsfeld angelegt wird, soll derjenigen der Bauausführung entsprechen. Die Abmessungen des Probefeldes sollten minimal  $8 \times 10$  m betragen. Es sind zwei bis drei Schüttlagen mit 20 bis 25 cm Dicke (im verdichteten Zustand) einzubauen und zu verdichten. Nach der Herstellung des Versuchsfeldes werden pro Schüttlage jeweils an drei Stellen Proben entnommen, an denen Dichte, Wassergehalt, Verdichtungsgrad sowie Wasserdurchlässigkeit und an einer gestörten Probe je Schüttlage jeweils Kornverteilung, Zustandsgrenze sowie Wasseraufnahme bestimmt wird. Alle weiteren Laborversuche sind im Einzelfall festzulegen und auszuführen /43/.

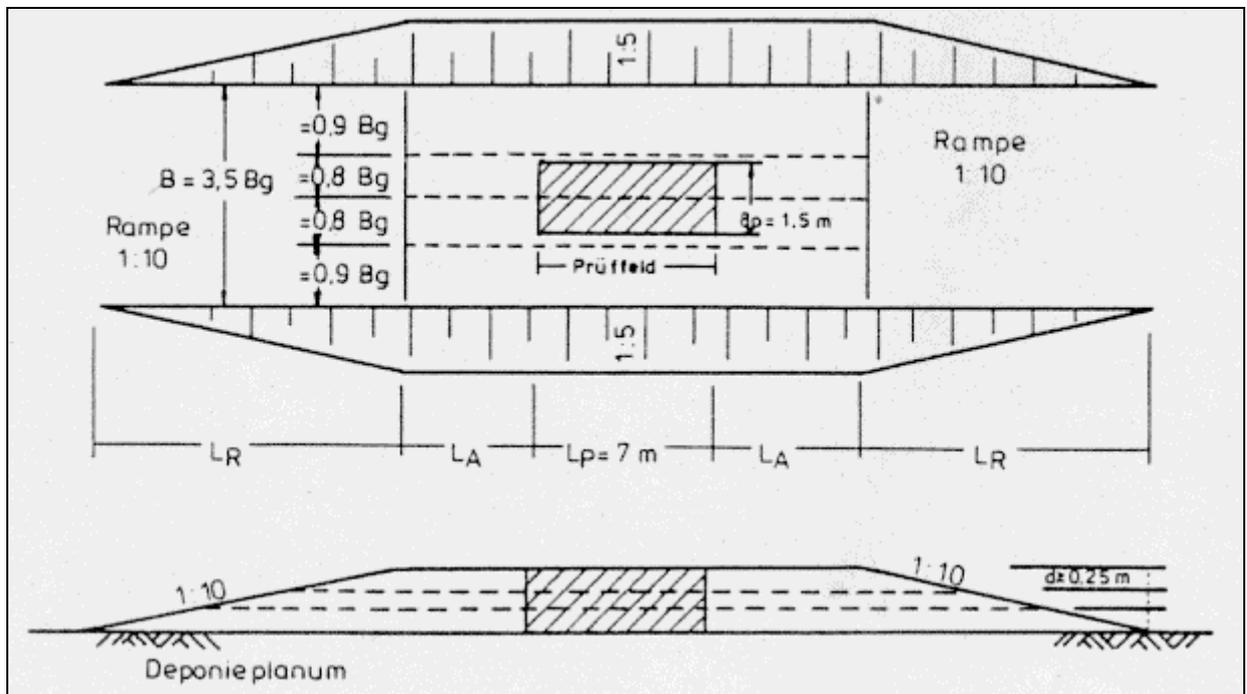
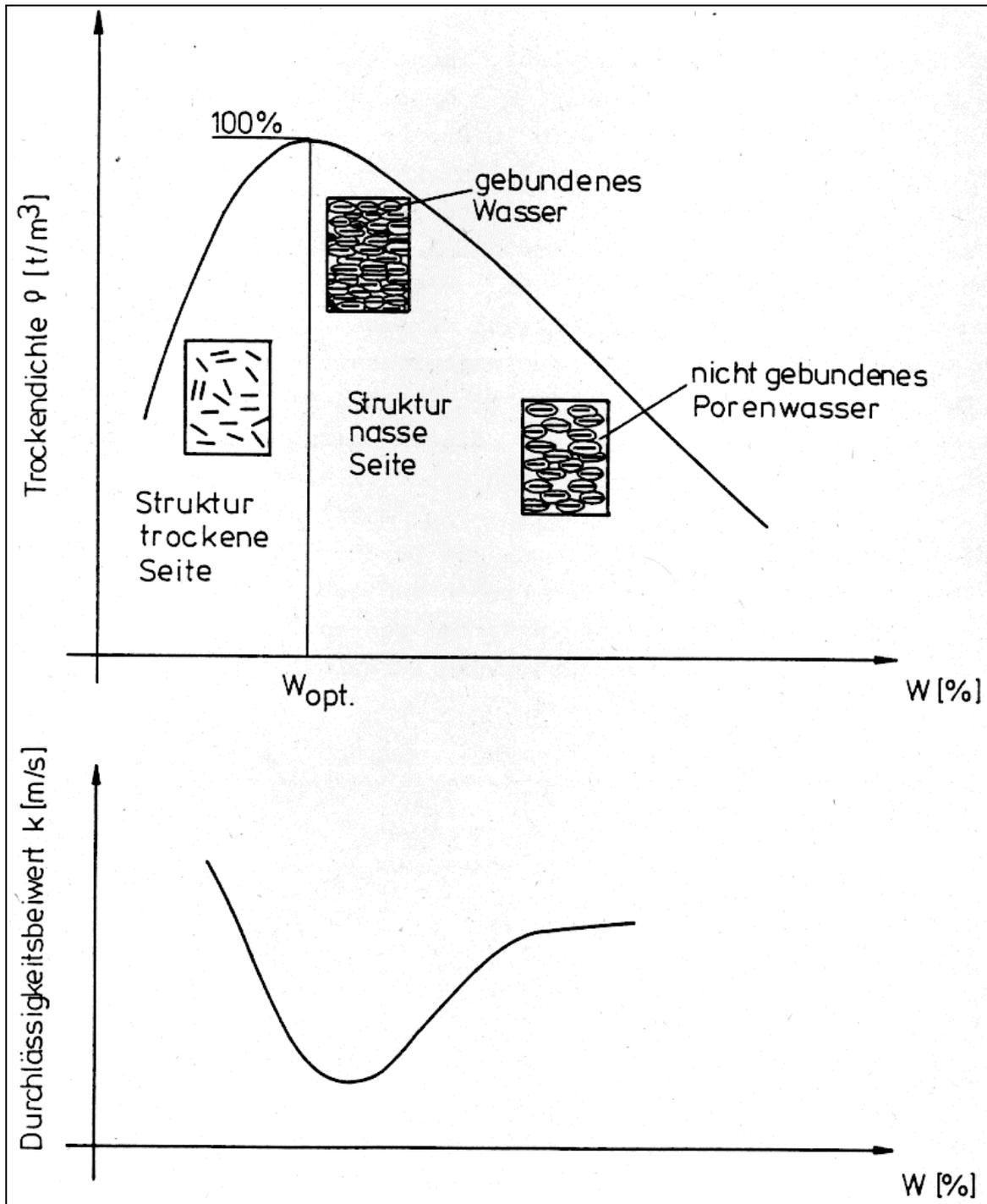


Bild 3.2: Abmessungen eines Versuchsfeldes

### 3.4.1.1 Erläuterungen zur Abdichtungswirkung

Wichtige **Einbaukriterien** für mineralische Abdichtungsschichten sind die Dichte und der Wassergehalt. Die erreichbare Dichte als Funktion des Wassergehaltes wird im Proctorversuch nach DIN 18127 bestimmt. In Verbindung mit Durchlässigkeitsversuchen werden der für den Einbau erforderliche Verdichtungsgrad und der Einbauwassergehalt ermittelt. In Bild 3.3 ist die Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes vom Einbauwassergehalt und der Trocken-dichte aus dem Proctorversuch dargestellt. Die "offene Struktur" der Proben mit geringem Wassergehalt auf der trockenen Seite ist relativ durchlässig. Je mehr sich der Wassergehalt dem optimalen Wassergehalt nähert bzw. diesen überschreitet, bildet sich in den Proben aus dem bindigen Material eine gleichmäßige Struktur aus, die geringe Porenräume aufweist. Das physikalisch gebundene Wasser reduziert den für die Durchströmung vorhandenen Porenraum. Wird mehr Wasser den Proben zugegeben, so kann dies nicht mehr physikalisch gebunden werden und es vergrößert sich der effektive Porenraum und damit auch die Durchlässigkeit.



**Bild 3.3: Abhängigkeit der Durchlässigkeit und der Trockendichte vom Einbauwassergehalt**

In bezug auf mineralische Dichtungsschichten soll hier auch auf den Einfluß der Verdichtungsarbeit hingewiesen werden. Bei Abdichtungen auf einem standfesten Untergrund kann eine hohe Verdichtungsenergie aufgebracht werden. Dies ist bei Oberflächenabdichtungen auf Deponien wegen des nachgiebigen Untergrundes nicht immer möglich. Den Einfluß auf die erreichte Trockendichte und den Durchlässigkeitsbeiwert zeigt Bild 3.4. Der untere Teil des Diagramms zeigt den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und erreichter Trockendichte im Proctorversuch bei verschiedenen Verdichtungsenergien /70/. Je größer die Verdichtungsenergie, desto höher ist die erreichbare Trockendichte.

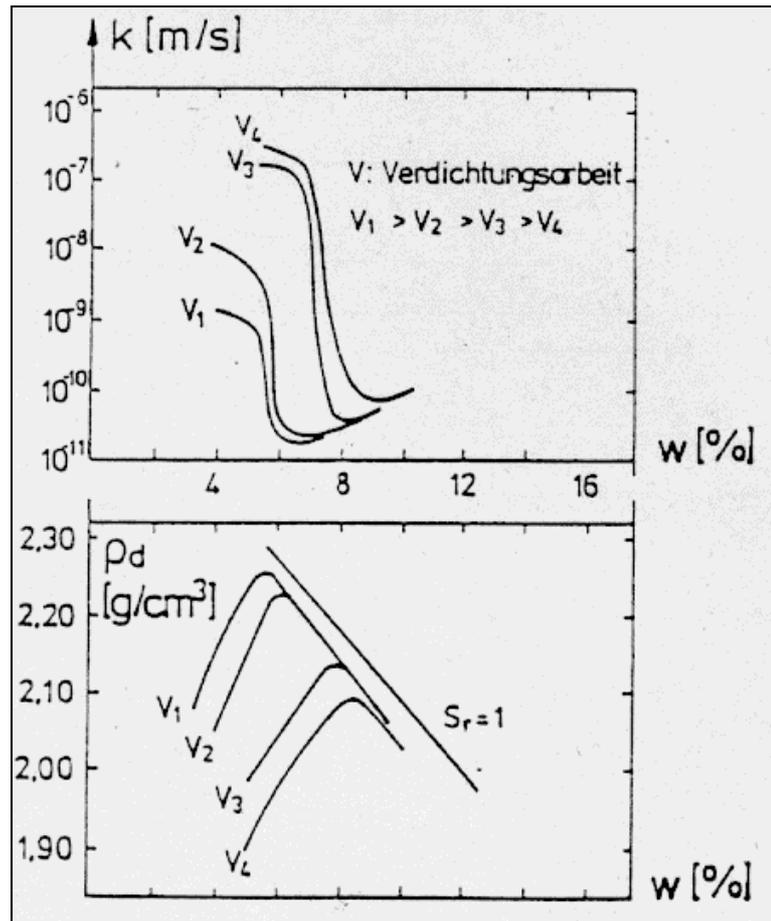


Bild 3.4: Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Trockendichte und Durchlässigkeitsbeiwert /70/

Der optimale Wassergehalt wird mit größerer Verdichtungsenergie kleiner. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist bei Wassergehalten unterhalb des optimalen Wassergehaltes in dem dargestellten Beispiel um mehr als 2 Zehnerpotenzen größer als nach Verdichtung bei einem Wassergehalt geringfügig über dem optimalen Wassergehalt. Bei größerer Verdichtungsenergie wird ein geringerer Durchlässigkeitsbeiwert erzielt. Diese Zusammenhänge sind bei der Herstellung mineralischer Dichtungsschichten zu berücksichtigen.

### 3.4.1.2 Materialien und Mischungen

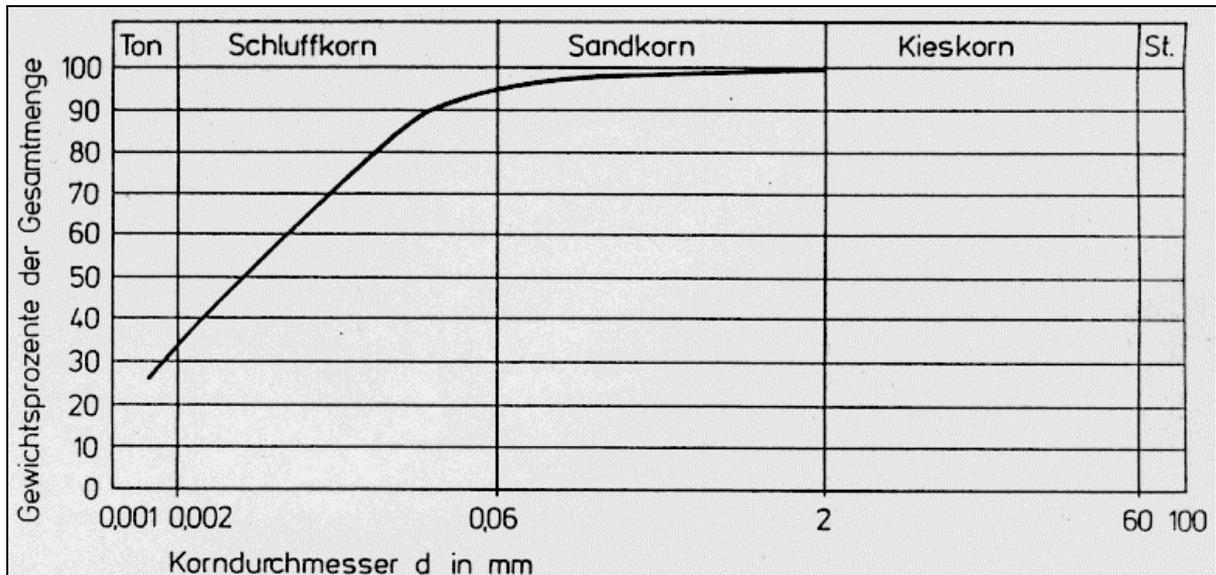
Eine Übersicht zu einsetzbaren **Baustoffen** enthält Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Beispiele von Materialien für Dichtungs- und Dränageschichten

Art des Materials	Dichtung	Dränage
natürlich	Ton	Kiessand
aufbereitet	bentonitvergüteter Erdstoff	Einkornbeton
Abfallstoffe	Waschberge, vergütet	Schlacke Glasasche

## a) natürliche Bodenmaterialien

In Bild 3.5 ist die Körnungslinie eines tonigen Schluffes wiedergegeben.



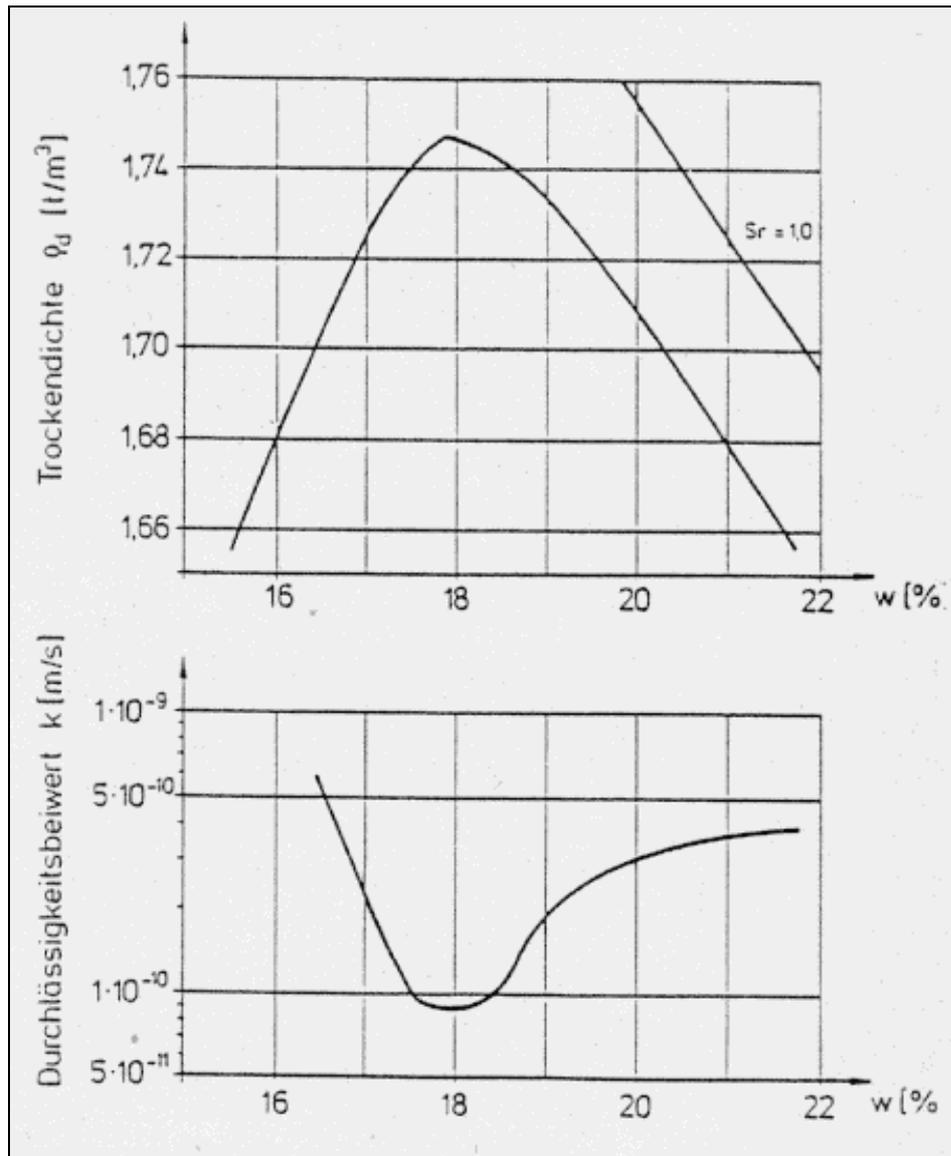
**Bild 3.5:** Kornverteilung eines tonigen Schluffes

Kennwerte aus den Eignungsversuchen zeigt Tabelle 3.4. Aus diesen Ergebnissen ist eine Eignung als mineralische Abdichtungsschicht zu erwarten.

**Tabelle 3.4:** Kennwerte des tonigen Schluffes

Parameter	Kennwerte
Tongehalt	33,00 %
Schluffgehalt	63,00 %
Sandgehalt	4,00 %
nat. Wassergehalt	16,80 %
Fließgrenze	48,50 %
Ausrollgrenze	22,30 %
Plastizitätszahl	16,20 %
Konsistenzzahl	1,21 %
Glühverlust	1,80 %

Dieses Material muß durch Homogenisierung, Einstellen des Einbauwassergehaltes und anschließendes Verdichten so eingebaut werden, daß eine geringe Durchlässigkeit erzielt wird. Die Abhängigkeit der Trockendichte und die dabei erzielbaren Durchlässigkeitsbeiwerte vom Wassergehalt wird in Bild 3.6 dargestellt. Weitere Erläuterungen zu tonigen Böden und anderen Baustoffen in Kap. 6.



**Bild 3.6:** Abhängigkeiten der Trockendichte und des Durchlässigkeitswertes vom Wassergehalt eines tonigen Schluffes

#### b) Mit Bentonit vergütete Böden

Gleichförmige Böden, die einen im Hinblick auf die Abdichtungswirkung ungünstigen Kornaufbau haben, können durch Zumischung von geeigneten Körnungen in ausreichend kornabgestuftes Material überführt werden. Diese Kornverbesserung kann durch Zugabe von Tonmehl oder Bentonit verstärkt werden, so daß eine undurchlässige Bodenschicht entsteht.

Eine mineralische Dichtungsschicht aus anstehendem Boden mit 0,5% Bentonitzugabe - bezogen auf die Trockenmasse des Bodens - ist in Bild 3.7 dargestellt. Bild 3.8 zeigt für das gleiche Bodengemisch die Abhängigkeit von Trockendichte und Durchlässigkeitsbeiwert vom Wassergehalt. Für solche Materialien liegen günstige Zugabemengen von Bentonit zwischen 0,5 und 2,0%. Höhere Bentonitzugaben sind zur Erzielung einer ausreichenden Plastizität möglich, stoßen aber an Grenzen hinsichtlich Verarbeitbarkeit bzw. Herstellbarkeit.

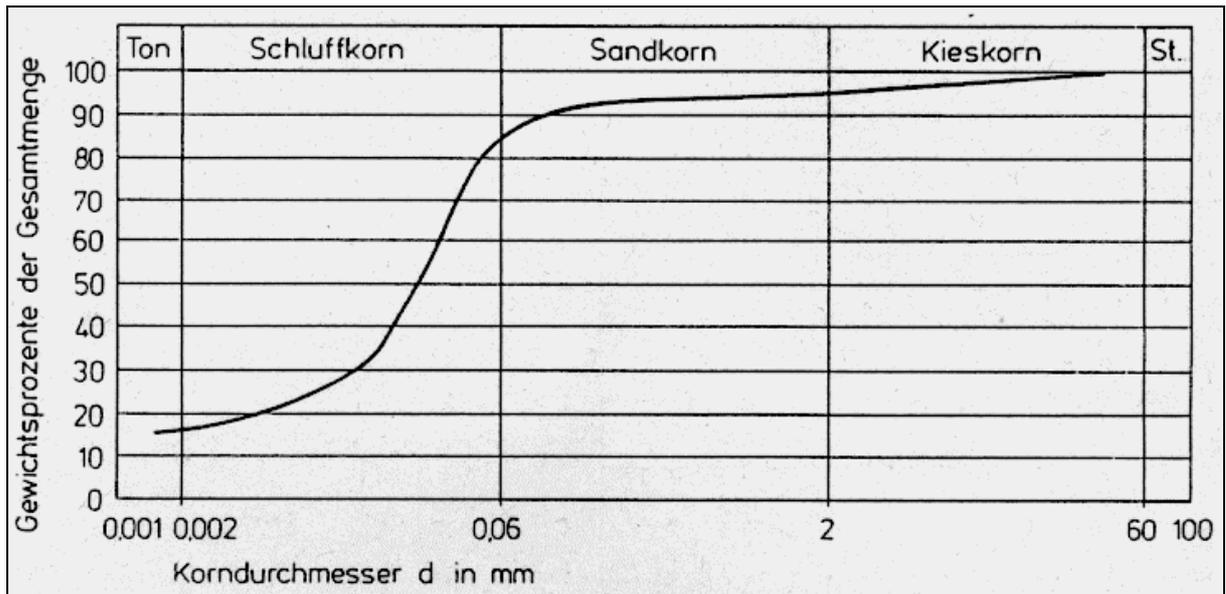


Bild 3.7: Kornverteilung eines schwach sandigen Schluffes

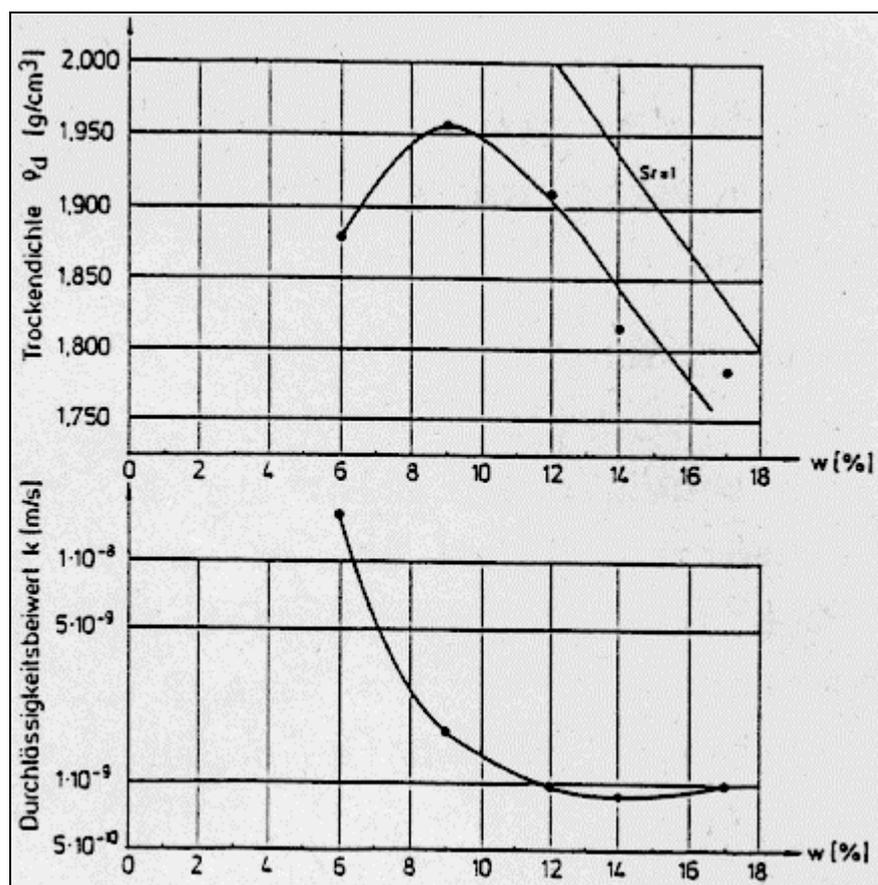


Bild 3.8: Abhängigkeit der Trockendichte und des Durchlässigkeitsbeiwertes vom Wassergehalt eines mit 0,5% Bentonit vergüteten schwach sandigen Schluffes

### 3.4.2 Kunststoffdichtungen

Die Anforderungen an künstliche **Dichtungswerkstoffe** resultieren aus den gleichen Belastungen wie die der mineralischen Dichtstoffe. Zusätzlich sind Anforderungen an das Herstellungsverfahren und die Fügetechnik zu stellen.

Das globale Anforderungsprofil sieht demnach wie folgt aus:

- Wasser- und Gasdichtigkeit
- geringe Setzungsempfindlichkeit
- Beständigkeit gegenüber physikalischen, chemischen und biologischen Belastungen.

Einzelheiten sowohl zu Einzelanforderungen und Prüfverfahren sind z.B. dem Entwurf zur Technischen Anleitung Abfall (Stand 7/88) zu entnehmen /9/ (s. auch /67/) und nachfolgend auszugsweise wiedergegeben.

Dieses für Deponiebasisabdichtungen vorgestellte Anforderungsmuster ist auf Oberflächenabdichtungen zu übertragen unter Berücksichtigung der Unterschiede in den Belastungsmerkmalen.

Besondere Aufmerksamkeit bei Kunststoffdichtungsbahnen verdient das Problem der Schadstoffpermeation. Hierzu ist auf jüngste Untersuchungen /10/, /84/ zurückzugreifen.

**Tabelle 3.5: Physikalische Anforderungen an Kunststoffdichtungsbahnen (Bezugsdicke  $d = 2,5$  mm)**

#### Allgemeine physikalische Anforderungen

Kenngröße	Prüfgröße	Kennwerte (Merkmale)	Prüfverfahren Prüfvorschriften	Bemerkung
1	2	3	4	5
<b>Äußere Beschaffenheit</b>	Oberfläche	geschlossen		
	Homogenität des Materials	frei von Fehlern (Poren, Lunker, Fremdeinschlüsse)	visuelle Beurteilung	Hinweise auf einwandfreie Verarbeitung, Zwischenlagerung, Anlieferungszustand
	Geradheit g	$g \leq 50$ mm	DIN 16726 Abschnitt 5.2	Bahn muß von Rolle auf ebener Unterlage kantengerade und gleichmäßig breit abrollbar sein
	Planlage h	$h \leq 30$ mm am Rand		
<b>Wasseraufnahme</b>	Gewichtsänderung	$\leq 0,3$ Gew.-% Sättigungswert	in Anlehnung an DIN 53495 Verfahren 1 40°C	

Kenngröße	Prüfgröße	Kennwerte (Merkmale)	Prüfverfahren Prüfvorschriften	Bemerkung
1	2	3	4	5
<b>Dicke (Nenndicke)</b>	Minstdicke	= 2,5 mm	DIN 16726	Konstruktive und Baustellenbeanspruchung erfordern Minstdicke = 2,5 mm
	Mittelwert	> Minstdicke	Abschn. 5.3	
	Einzelwert	= Mittelwert ± 10%		
<b>Warmlage- ungsverhalten</b>	Maßänderung in Maschinenrichtung und senkrecht dazu	≤ 1%	DIN 53 377*)	Ziel: Nachweis einwandfreier Verarbeitung
	Änderung der äußeren Beschaffenheit	Keine oder nur unwesentliche. Keine Blasenbildung	visuelle Beurteilung	
	Änderung mechanischer Eigenschaften (aus dem Zugversuch)	wird noch festgelegt	DIN 53 455*)	Ziel: Hinweise auf Oxidationsempfindlichkeit bei
	Änderung der Spannungsrißbeständigkeit		in Anlehnung an DIN 53 449*)	Einbau und Einwirkung von Deponiegut
	Änderung des Verhaltens bei Falzen in der Kälte		DIN 53 361*)	Probennahme: I und ⊥ zur Extrusionsrichtung
<b>Witterungsverhalten</b>	Änderung mechanischer Eigenschaften (aus dem Zugversuch)	wird noch festgelegt	Freibewitterung oder GLOBAL-UV-Testgerät System Weiss	Entsprechend einer Zeit von zwei Jahren, in der die Bahn durch Zwischenlagerung und Einbau ohne Schutzschicht der Bewitterung ausgesetzt ist. Wenn Rußgehalt > 1,8%, kann Prüfung entfallen
	Änderung der Spannungsrißbeständigkeit ähnlich DIN 53449	wird noch festgelegt	wird noch festgelegt	
<b>Dichtheit</b>	Permeationsverhalten gegen KW/CKW: Trichlorethylen Aceton	Permeationsraten J J < 70 g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> Tri J < 0,3 g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> Aceton	in Anlehnung an DIN 53532	Messung im stationären Zustand Probendurchmesser ≥ 80 mm Dichtungsbahndicke 3 mm

\*)Lagerung bei 80°C 7 d/14 d/28 d/...224d/- Konditionierung 23°C ± 2°C

**Besondere physikalisch-mechanische Anforderungen**

<b>Kenngröße</b>	<b>Prüfgröße</b>	<b>Kennwerte (Merkmale)</b>	<b>Prüfverfahren Prüfvorschriften</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Verhalten bei Zugbeanspruchung</b>	mehrachsig Zugbeanspruchung: Bruchdehnung	$\leq 15\%$	Berstdruckversuch Systemversuch mit Proben $\varnothing$ : $100 \text{ cm} \geq \varnothing \geq 80 \text{ cm}$ RT	Druckstufen zu 20 kPa/2 min bis Fließgrenze bzw. Bruch. Dehnung aus Wölbhöhe als Funktion von $\varnothing$
	Einachsige Zugbeanspruchung Zugkraft bei 5% Dehnung. Bei Normalklima 23/50 bei 70°C	$\geq 1250 \text{ N}/50 \text{ mm}$  $\geq 250 \text{ N}/50 \text{ mm}$	in Anlehnung an DIN 53455	Versuch wird an 50 mm breiten Parallelstreifen durchgeführt. Zuggeschwindigkeit: 10 mm/min. freie Ein- spannlänge: 150 mm Probennahme: I und $\perp$ zur Extrusionsrichtung aus dem Randbereich
<b>Widerstand gegen Weiterreißen</b>	Weiterreißkraft	$\geq 600 \text{ N}$	DIN 53363	Ermittlung der Höchstkraft F (max) parallel und senkrecht zur Fertigungsrichtung
<b>Widerstand gegen punktförmige, quasistatische Einzellasten</b>	Durchdrückkraft	$\geq 2000 \text{ N}$	DIN 54307	Ermittlung der Höchstkraft, bei der der Stempel die Bahn durch- dringt $V_{\text{Stempel}} = 50 \text{ mm}/\text{min}$
<b>Widerstand gegen punktförmige Durchdringung</b>	mechanische Durchschlagsfestigkeit	$\geq 1500 \text{ mm}$ Fallhöhe bei 500 g keine Undichtigkeit	DIN 16726 Abschn. 5.12	Perforationswiderstand bei hoher Verformungs- geschwindigkeit
<b>Verhalten bei niedrigen Temperaturen</b>	Kältesprödigkeit	keine Risse bis zu - 20°C	DIN 53361	Falzen in der Kälte
<b>Nahtfestigkeit</b>	Kurzzeit-Schweißfaktor aus dem Scherversuch	$\geq 0,9$ bei teilkristallinen Hochpolymeren	DIN 53455 RT	Zuggeschwindigkeit $v = 50 \text{ mm}/\text{min}$ , Streifenprobe 250 mm x 50 mm
	Schälversuch	Verstrecken des Grundmaterials in oder neben der Schweißnaht	in Anlehnung an DIN 53357 RT//80°C	Streifenprobe 250 mm x 50 mm $v = 50 \text{ mm}/\text{min}$ Schälwiderstand = mittlere Schälkraft/ Pro- bekörperbreite
	Langzeit-Schweißfaktor	wird noch festgelegt	in Anlehnung an DVS 2202	-

Tabelle 3.6: Chemische und biologische Anforderungen an den Werkstoff der Kunststoffdichtungsbahnen

## Chemische Anforderungen

Kenngröße	Prüfgröße	Kennwerte (Merkmale)	Prüfverfahren Prüfvorschriften	Bemerkung
1	2	3	4	5
<b>Widerstandsfähigkeit gegenüber hochkonzentrierten flüssigen Medien</b>	Gewichtsänderung $\Delta G$		DIN 53521	Konzentrierte Medien gemäß Anhang, Anlage 1 Gruppe A, NRW-Richtlinie Immersionsversuche, min. 90 d sonst bis Gewichtskonstanz
	Änderung mechanischer Eigenschaften (aus dem Zugversuch)	Nach Rücktrocknung bis Gewichtskonstanz $\Delta \sigma (s) < 10\%$ $\Delta \epsilon (s)$	DIN 53455	Lagerungstemperatur RT, Zeitraffung mit höheren Temperaturen, wenn keine Schädigung dadurch, Probenkörper aus 1 mm Preßplatte

## Anforderungen gegen kombinierte physikalisch-chemische Beanspruchungen

Kenngröße	Prüfgröße	Kennwerte (Merkmale)	Prüfverfahren Prüfvorschriften	Bemerkung
1	2	3	4	5
<b>Spannungsrißbeständigkeit</b>	Verfahren und wird erarbeitet	Anforderung	in Anlehnung an DIN 53449	Stifteindruckversuch
<b>Spannungsrißbeständigkeit der Schweißnaht</b>	Schälwiderstand nach 28 Tagen Zeitstandsversuch in Netzmittellösung LAST: 300 N	wird noch festgelegt	in Anlehnung an DIN 53357	Streifenproben 250 mm x 15 mm $v = 50 \text{ mm/min}$
<b>Zeitstandverhalten</b>	Als Materialkenngröße der Dichtungsbahn ist das Verhalten des Werkstoffes gegenüber Wasser (40°C luftsauerstoffgesättigt) im Zeitstandsrohrversuch zu prüfen. Durch Extrapolation auf 40 Jahre ist nachzuweisen, daß bei 5 N/mm <sup>2</sup> kein Bruch auftritt.			
<b>Relaxationsversuch</b>	wird noch festgelegt			

**Biologische Anforderungen**

Kenngröße 1	Prüfgröße 2	Kennwerte (Merkmale) 3	Prüfverfahren Prüfvorschriften 4	Bemerkung 5
<b>Beständigkeit gegen Mikro- organismen</b>	Gewichtsänderung	≤ 5%	DIN 53739 Ver- fahren D	Erdeingraberuche in mikrobiell aktiver Erde/1 Jahr
	visuelle Beurtei- lung	keine wesentliche Veränderung	"	"
	Änderung mecha- nischer Eigen- schaften (aus dem Zugversuch)	≤ 10%	DIN 53455	
<b>Beständigkeit gegen höhere pflanzliche Organismen</b>	Wurzelfestigkeit	kein Durchwuchs	in Anlehnung an DIN 4062 Abschn. 5.7	Grundmaterial und Fügenähte
<b>Beständigkeit gegen höhere tierische Or- ganismen</b>	Nagetierbeständig- keit	keine Durchnagun- gen: Annagungen vom Rand 50 mm	gemäß *) Seite 38, Abschn. 3.8/4.8	MPA Dortmund Arvicola terrestris (große Wühlmäuse)

\*) BPG Kunststoffbahnen ifBt 1982

**3.4.3 Mineralische Dränstoffe**

Die Anforderungen an **Dränstoffe** im allgemeinen leiten sich aus der Aufgabenstellung von Entwässerungssystemen ab.

- Konzeptionelle Aufgaben
  - Wasserwegsamkeit ( $k > 10^{-3}$  m/s)
  - Filterfestigkeit (zu benachbarten Elementen)
- Materielle Anforderungen
  - möglichst frei von Über- und Unterkorn
  - unempfindlich gegenüber Verkrustungen (Rundkorn mit glatter Oberfläche bevorzugen)
  - Rundkorn (Schutz der Dichtungen)
  - beständig gegenüber Sickerwasser (im Schadensfall bzw. bei Stauwasserdruck im Inneren relevant)
  - Reibungsbeiwerte (Standicherheit)
  - Eigenfestigkeit (Auflast und Setzungen)
  - kapillarbrechende Funktionen (Wurzelsperre)

Als Eignungsnachweise werden die in Tabelle 3.7 genannten Untersuchungen durchgeführt.

**Tabelle 3.7: Eignungsprüfungen für mineralische Dränstoffe**

Eigenschaft	Prüfungsverfahren	Normen
Dränfunktion	Korngrößenverteilung hilfsweise Ermittlung der Filterfähigkeit über empirische Verfahren (zitiert in /42/ ansonsten : Durchlässigkeitsprüfung	DIN 18123  DIN 18130
Beständigkeit	Kalkgehalt ggf. Organischer Gehalt ggf. Geologische Beschreibung Bestimmung der Tonminerale	Scheibler Glühverlust Naßoxidation halbquantitativ
Beschaffenheit	visuelle Prüfung auf Aussehen	
Standsicherheit	i.a. Schätzen bodenmechanischer Kennwerte ggf. Scherversuche	DIN 18137

### 3.4.4 Kunststoffdränkörper

**Kunststoffdränkörper** (Dränmatten, Rohrsysteme) müssen geringe Korrosions- und Abriebfestigkeiten haben, allerdings gegen Belastungen aus Setzungen und Auflast ausreichend dimensioniert werden. Rohrsysteme sollten geradlinig geführt und möglichst für Reinigungsarbeiten zugänglich ausgelegt werden.

Zum Nachweis der Filterstabilität und Filterfestigkeit von Dränmatten siehe Kap. 3.5.3.

Die Oberfläche der Altablagernung als Basis der Entwässerungssysteme sollte so ausgebildet werden, daß einzelne Dränstränge die hydraulischen Belastungen aufnehmen können. Im Deponiebau werden derzeit Neigungsverhältnisse von 3% als Stand der Technik angesehen.

Die Querschnitte sollten bei Bedarf einer Wartung nicht unter  $\varnothing$  250 mm ausgebildet werden.

Der Abstand der Dränrohre untereinander sollte so gewählt werden, daß bei Ausfall einer Leitung die nächste hilfsweise entlasten kann.

Bei Einsatz der Komponenten des Entgasungssystems ist eine Materialauswahl anhand der Belastungen der Gasphase zu treffen. Insbesondere Kondensatbildungen sind zu beachten. Da Dränkörper meistens aus den gleichen Materialien wie Dichtungsbahnen hergestellt sind, können die entsprechenden Anforderungen an das Material übernommen werden.

### 3.4.5 Entwässerungs- und Kontrollschächte

**Entwässerungs- und Kontrollschächte** sind soweit möglich außerhalb des Ablagerungsbereiches anzuordnen. Innerhalb des Bereiches des Altablagernungskörpers müssen sie auf der Oberflächenabdichtung gegründet werden und auf alle aus dem Baubetrieb herrührenden Beanspruchungen und den Bauendzustand rechnerisch bemessen werden.

### 3.4.6 Abdeckschichten

Die **Abdeckschichten** haben den Anforderungen an eine Schutz- und Rekultivierungsschicht zu genügen.

Die Oberflächengestaltung hat sowohl den Funktionen der Entwässerung als auch der morphologischen Eingliederung in die Landschaft zu genügen.

Als bodenmechanische Anforderung ist bei entsprechender Morphologie der Oberfläche der Altablagerung die Anordnung von Bermen in Kombination mit einem Fassungs- und Ableitungssystem für Oberflächenwasser zu sehen.

Ziel des Einbaus von Abdeckschichten ist

- die Ermöglichung einer Folgenutzung
- Schutz der Dichtungssysteme vor
  - Frost
  - Erosion
  - sonstigen klimatischen Einflüssen.

Die Abdeckschichten selbst sind durch Pflanzenansaat vor Erosion zu schützen.

Es sollten aus Entwässerungsgründen keine Neigungen unter 3% konzipiert werden.

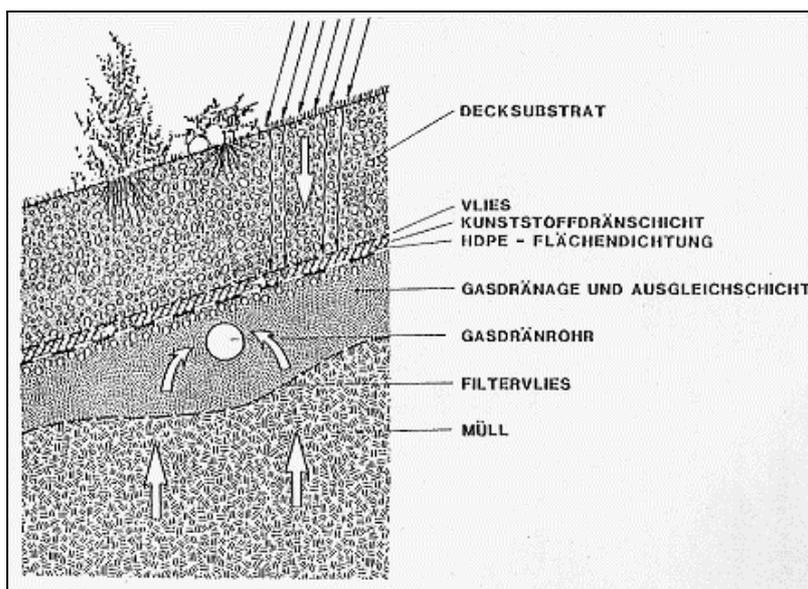
### 3.4.7 Ausgleichsschicht

Die **Ausgleichsschicht** sollte aus nichtbindigem Material (z.B. Kiese, Schotter, klassifizierten Baustellenabfällen, Glasasche, etc.) bestehen, das im wesentlichen homogen aufgebaut sein soll. Die Schichtdicke richtet sich nach den zu erwartenden ungleichmäßigen Setzungen. Die Mächtigkeit sollte mindestens  $d = 0,2$  m betragen.

## 3.5 Ausgewählte Bemessungsbeispiele

### 3.5.1 Kunststoffdichtungen

Im folgenden werden die Bemessungsgrundsätze eines Dichtungssystems am Beispiel einer Flächendichtung aus geschweißten HDPE-Bahnen aufgezeigt (s. auch Bild 3.9).



**Bild 3.9: Deponieabdeckung mit HDPE-Dichtung /31/**

Das gewählte Beispiel stellt nach /31/ zweifellos ein einfaches und zugleich preisgünstiges Dichtungssystem dar. Es ist bei den zu erwartenden Gradienten wasser- und weitgehend gasdicht, so daß es die Anforderungen der Dichtfunktion erfüllt. Darüber hinaus weist die Dichtung nur eine geringe Dicke auf, so daß sich bei begrenzter Höhe einer zu rekultivierenden Ablagerung ein Maximum an Deponievolumen ergibt. Der Bedarf an nicht kontaminierten Erdstoffen sowie der Massentransport zur Herstellung der Deponieabdichtung wird minimiert. Die Anforderungen an den Aufbau der Flächendrénage im Decksustrat können wegen der hohen Beständigkeit von HDPE-Dichtungsbahnen gegen alle biologischen Beanspruchungen reduziert werden, sofern wegen der Gleitsicherheit der Abdeckung bei steilen Böschungsneigungen nicht besonders hohe Qualitätsanforderungen an die Flächendrénage zu stellen sind. Die Bauausführung ist deutlich weniger witterungsabhängig als bei Einsatz mineralischer Dichtungen.

Entscheidendes Kriterium sind aber die qualitativen Eigenschaften der Dichtungsstoffe. Die Langzeitsicherheit ist zu beachten.

Es gilt nun zu überprüfen, inwieweit ein Dichtungssystem aus HDPE-Bahnen den zu erwartenden Beanspruchungen gewachsen ist.

### **Biologische Beanspruchung**

Bei ausreichender Bahndicke weist eine Dichtung aus HDPE zufriedenstellende Sicherheiten gegen sämtliche biologischen Beanspruchungen auf. Voraussetzung ist eine sorgfältige Ausführung und Überprüfung der Schweißnähte, damit dort kein Ansatzpunkt für nagende Tiere und das Einwachsen von Pflanzenwurzeln gegeben ist. Prüfverfahren über das Verhalten von HDPE-Bahnen bei biologischer Beanspruchung liegen vor und sind weitgehend standardisiert /73/, /8/.

HDPE besteht im wesentlichen aus Olefin-Copolymerisat und Ruß, bei dessen Oxydation (Verbrennung) keine schädlichen Abbauprodukte entstehen.

### **Physikalische und chemische Beanspruchungen**

Die Beanspruchungen der Dichtung aus Temperaturdifferenzen und aus UV-Strahlung sind beherrschbar. Auch bei Auftreten größerer hydraulischer Gradienten ist die Wasserdichtigkeit gewährleistet. Für Gase gilt dies weitgehend.

In bezug auf die physikalischen Beanspruchungen ist zu prüfen, ob das gewählte Dichtungssystem ausreichende Sicherheiten gegen Permeation von Schadstoffen vom Deponieinneren in das Decksubstrat und gegen die zu erwartenden mechanischen Beanspruchungen bietet.

### **Schadstoffpermeation**

Ein Kontakt der Dichtung mit Sickerflüssigkeit ist zwar nicht auszuschließen, durch geeignete konstruktive Maßnahmen jedoch weitgehend zu vermeiden. Auf der Unterseite der Dichtung ist dagegen u.U. mit Kondensatbildung aus Gasen zu rechnen. Dieses kann einen hohen Anteil an Schadstoffen enthalten. Hierdurch entsteht ein Gefälle in der Schadstoffkonzentration zwischen Unter- und Oberseite der Dichtung. Dies kann zu einer Schadstoffpermeation durch die HDPE-Bahnen führen. Sofern mit einem erhöhten Schadstoffanfall auf der Unterseite der Dichtung zu rechnen ist, muß folglich auf ein aufwendigeres Dichtungssystem ausgewichen werden.

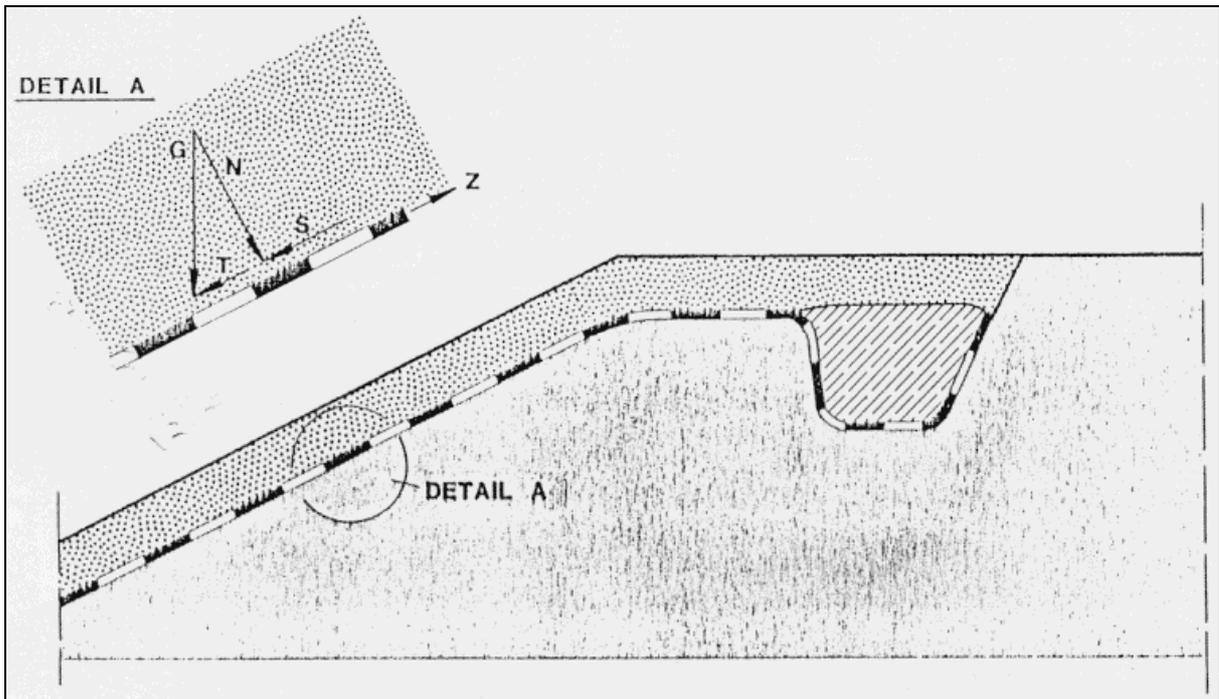
### **Mechanische Beanspruchung**

Bei der Betrachtung der mechanischen Beanspruchung des Dichtungssystems in Oberflächenabdeckungen treten insbesondere zwei Größen in den Vordergrund. Die eine ist die biaxiale Dehnung der Flächendichtung infolge ungleichmäßiger Setzungen der Deponieoberfläche. Hierbei sind nicht nur die Dichtungsbahnen allein, sondern insbesondere auch die Haltbarkeit der Schweißnähte unter Berücksichtigung deren Kurz- und Langzeitfestigkeit näher zu untersuchen.

Die andere Größe ist die Beanspruchung der Dichtungsbahn durch Schubkräfte, die aus der hangabwärts gerichteten Gewichtskomponente des überlagernden Bodens und aus dem Strömungsdruck des hangabwärts fließenden Sickerwassers resultieren (vgl. Detail A in Bild 3.10). Vorgenannte Schubkräfte können bei langen Böschungen nicht - wie häufig bei Deponiebasisabdichtungen auf kurzen Böschungen praktiziert - über Zugkräfte in den Dichtungsbahnen

bis zu deren Verankerungspunkt abgeleitet werden. Wie Schadensfälle bereits gezeigt haben, können bei langen Böschungen die Bahnen die Zugkräfte nicht mehr aufnehmen und reißen. Die auftretenden Schubbeanspruchungen müssen deshalb flächig durch das Dichtungssystem hindurch auf die darunterliegenden Ablagerungsschichten übertragen werden.

Die beiden geschilderten physikalischen Beanspruchungen sind stets zusammen mit der chemischen Beanspruchung der Dichtung, der Temperatur und mit den Werkstoffeigenschaften des zum Einsatz gelangenden HDPE zu betrachten. Wie in /54/ erläutert, kann die chemische Beanspruchung von HDPE-Dichtungsbahnen, z.B. durch das Kondensat des Deponiegases, die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs ungünstig beeinflussen. Hierbei ist insbesondere die Langzeitfestigkeit des Werkstoffs näher zu beleuchten.



**Bild 3.10: Schubkraftableitung in HDPE-Dichtungsbahnen über Zug /31/**

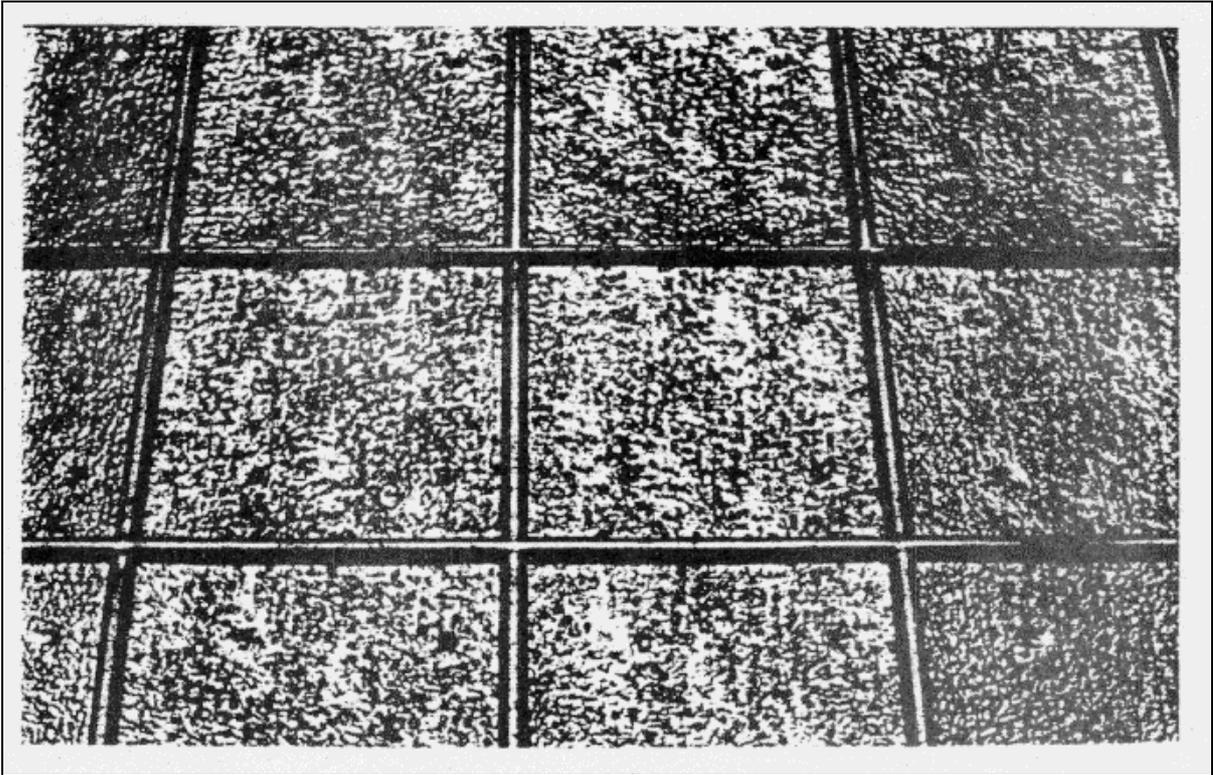
Weiterhin ist zu beachten, daß die beiden genannten mechanischen Beanspruchungsarten einen grundsätzlichen Unterschied aufweisen. Die durch Setzungsdifferenzen der Deponieoberfläche hervorgerufenen Spannungsspitzen in der Dichtungsbahn bauen sich mit der Zeit infolge des Kriechens des HDPE deutlich ab. Bei der Überprüfung, ob der Werkstoff den auftretenden Beanspruchungen gewachsen ist, muß somit sein Relaxationsverhalten berücksichtigt werden. Mit anderen Worten, bei der Beurteilung der Langzeitfestigkeit von HDPE infolge Beanspruchung durch Setzungsdifferenzen sind nicht die Spannungsspitzen maßgebend, die kurzfristig im Material auftreten, sondern deutlich niedrigere, langfristig auftretende Spannungen /54/.

In keinem Fall darf hierbei jedoch außer Betracht bleiben, daß Setzungsdifferenzen in der Regel zu zweiachsigen Zugspannungszuständen in den Dichtungsbahnen führen. Während HDPE unter einachsialer Zugbeanspruchung meist mehr als 100% Reißdehnung aufweist, sind seine Festigkeitsreserven unter zweiachsigem Zug meist schon bei ca. 20% Dehnung erschöpft (gemessen im Kurzzeitversuch). Über längere Zeit sind Dehnungen von ca. 6% tolerierbar.

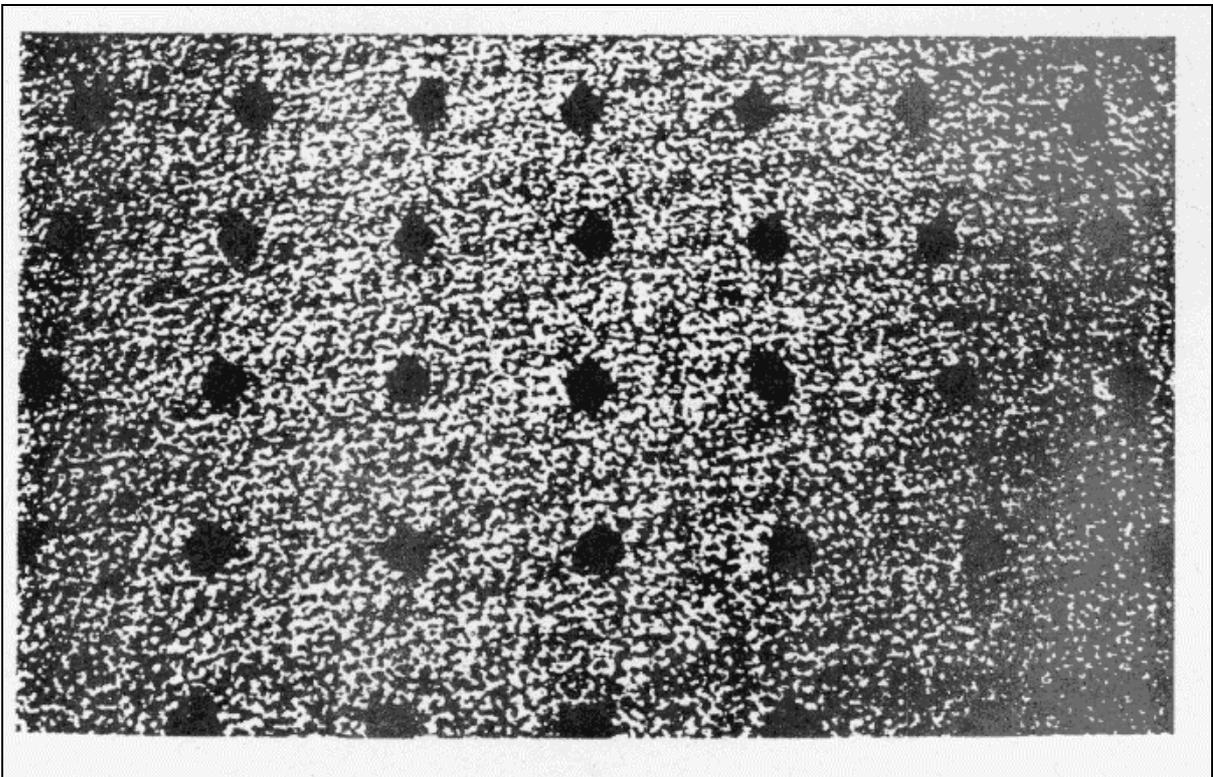
Bei der erwähnten Schubbeanspruchung der Dichtung aus Eigengewicht des überlagernden Bodens- und aus Strömungsdruck des Sickerwassers handelt es sich nicht um Zwängkräfte, die nur örtlich und infolge des Relaxationsverhaltens des Werkstoffs in ihrer vollen Größe nur zeitlich begrenzt auftreten. Die Schubkräfte stellen vielmehr flächig und dauernd äußere Lasten dar. Die Oberflächenstruktur der HDPE-Bahnen ist so auszubilden, daß die Deponieabdeckung trotz der genannten Schubkräfte eine ausreichende Gleitsicherheit aufweist. Einzelheiten hierzu sind folgenden Abbildungen zu entnehmen.

Nr.	Symb	Oberfläche	Querschnitt	Scher- richtlg.	Material
1	□			↑ ↓	HDPE
2	△			↑ ↓	HDPE
3	○			↑ ↓	HDPE + ECP
4	+			↑ ↓	HDPE + ECP
5	■	glatt		↑ ↓	HDPE + ECP
6	▲			↑ ↓	HDPE + ECP
7	●			↑ ↓	HDPE + ECP
8	x			↑ ↓	HDPE
9	◇			↑ ↓	HDPE
10	◆	rauh		↑ ↓	HDPE

Bild 3.11: Dichtungsbahnen mit strukturierter Oberfläche /61/



**Bild 3.12:** Oberflächenprofilierung für die Grenzfläche zwischen HDPE-Dichtungsbahn und Sand



**Bild 3.13:** Oberflächenprofilierung für die Grenzfläche zwischen HDPE-Dichtungsbahn und verdichtetem bindigen Boden

Die Verbundeigenschaften zwischen HDPE-Dichtungsbahnen und den sie berührenden Bodenschichten sind bei der Abdichtung der Deponie Georgswerder überprüft worden. Die in Bild 3.14 angegebenen Scherparameter sind als reine Laborwerte zu betrachten und für einen konkreten Anwendungsfall zu überprüfen.

**Bild 3.14: Scherparameter verschiedener Böden und zugehörigen Verbundparametern zwischen Boden und HDPE-Bahn, ermittelt im direkten Scherversuch /19/**

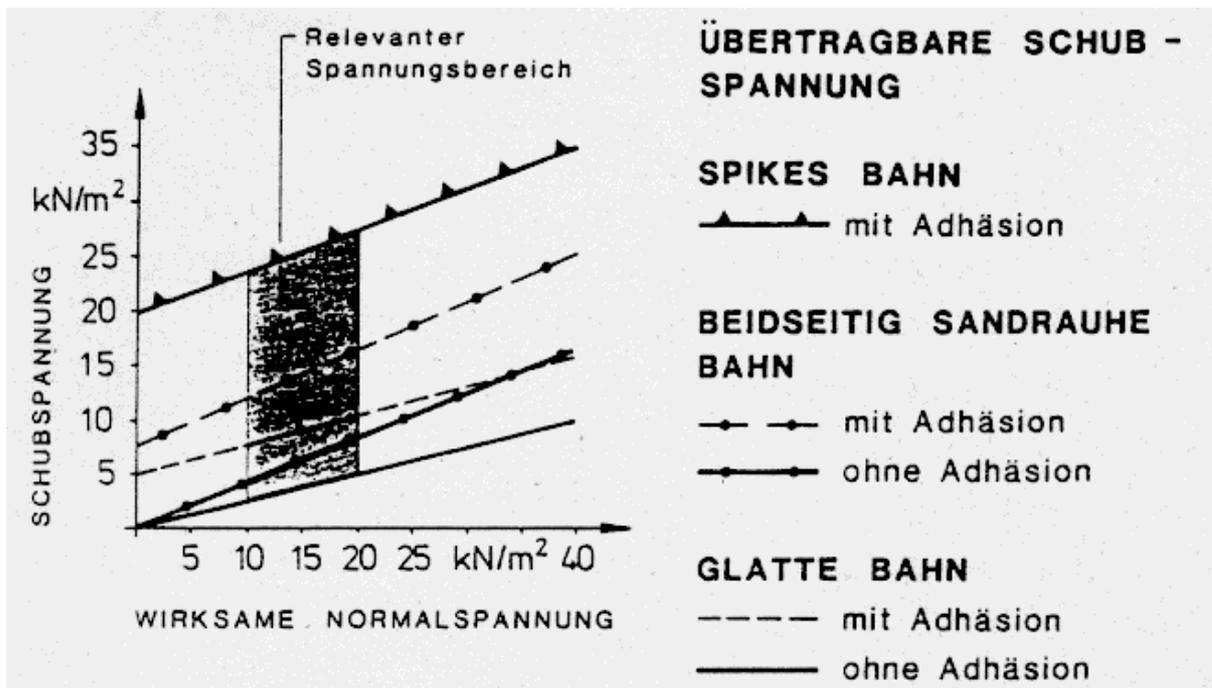
Bodenschichten Bodenart	Raumgewicht		Scherparameter	
	Feucht $\gamma$	unter Auftrieb $\gamma'$	$\varphi'$	$c'$
-	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Belastungfilter + Schutzschicht (Kies)	16	10,0	37,5	-
Deckssubstrat	18	8,0	33,0	-
Flächendränge (Sand)	17	10,7	35,0	-
mineralische Dichtung	20	12,0	25,0	17

Anmerkung:

$\delta$  = Reibungsanteil des Verbundes (°)

$a$  = Adhäsionsanteil des Verbundes (kN/m<sup>2</sup>)

In Bild 3.15 sind die Verbundeigenschaften nochmals für einen relevanten Spannungsbereich bei verschiedenen Oberflächenstrukturen aufgezeigt.



**Bild 3.15: Verbundeigenschaften zwischen einer mineralischen Dichtung und HDPE-Bahnen mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur /19/**

Als Anhaltswerte für Reibungsbeiwerte zwischen verschiedenen Systemkomponenten können die in Tabelle 3.8 aufgeführten Werte angenommen werden.

**Tabelle 3.8: Reibungsbeiwerte zwischen verschiedenen Komponenten (s.a. Bild 3.14)**

Kombination	$\delta$ (°)	a (kN/m <sup>2</sup> )
Vlies - Boden	20-35	-
Vlies - HDPE, glatt	15-17	-
Vlies - min. Dränschicht	25-35	-
HDPE-Bahn, glatt - min. Dränschicht	ca. 20	-
HDPE-Bahn, glatt - min. Dichtung	ca. 15 -18	-
HDPE-Bahn, Spikes - min. Dränschicht (Steg-Seite)	ca. 30	-
HDPE-Bahn, Spikes - min. Dichtung (Spikes-Seite)	ca. 18	ca. 15

### 3.5.2 Mineralische Dichtung

Grundsätzliche Bemessungsansätze für eine **mineralische Dichtung** sind bereits im vorangehenden Kapitel beschrieben worden. Hier sollen nun Unterschiede in Funktionen, Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

Zwischen mineralischer Dichtung und Kunststoffdichtungsbahn bestehen grundsätzliche Unterschiede bezüglich:

- Durchlässigkeitsverhalten
- üblicher Bauhöhe
- Anforderungen an benachbarte Komponenten
- Empfindlichkeit gegenüber Belastungen chemischer, biologischer oder physikalischer Art
- Langzeitbeständigkeit.

Das wichtigste Kriterium bei Einsatz einer Oberflächenabdichtung, unabhängig davon, welcher Baustoff zur Anwendung gelangt, ist die Durchlässigkeit.

Kunststoffdichtungen weisen bei einer einwandfreien Verlegung Schadstofftransportraten auf, die weitgehend durch Permeationsvorgänge geprägt sind. Hochwertige mineralische Dichtungen reichen in ihrem Durchlässigkeitsverhalten an die Grenze zwischen Permeation und Konvektion heran.

Da bei Oberflächenabdichtungen jedoch Permeationsvorgänge im Unterschied zu Sohl- bzw. Basisabdichtungen kein vorrangiges Beurteilungskriterium darstellen, kann man die Dichtungseigenschaften von hochwertigen mineralischen und künstlichen Dichtungen als gleichwertig ansehen.

Die Vorteile einer Kunststoffdichtung liegen zweifelsohne in ihrer geringen Bauhöhe, einem Kriterium, das bei der Einkapselung von Altablagerungen keine untergeordnete Rolle spielt. Mineralische Dichtstoffe weisen dagegen klare Vorteile bei der Langzeitbeständigkeit des Materials auf. Ohne Kunststoffdichtungen ihre Qualität abzusprechen, sollte man erkennen, daß mineralische Materialien über geologische Zeiträume funktionstüchtig sind.

Die Funktionstüchtigkeit der gesamten Abdichtungsschicht hängt allerdings noch von weiteren Einflußgrößen ab.

### **Biologische Beanspruchung**

Derartige Beanspruchungen durch Kleinlebewesen, insbesondere Wühltieren oder durch aggressivwurzelnende Pflanzen, sind bei mineralischen Dichtungen nicht auszuschließen. Sie stellen eine potentielle Gefährdung einer durchgehenden Dichtwirkung dar. Anders als bei Kunststoffdichtungen sind hier zusätzliche Vorkehrungen gegenüber solchen Belastungen zu treffen.

Zu möglichen Maßnahmen gegenüber Durchwurzeln zählen eine Überdeckung der Mineralschicht mit einer Kunststoffbahn (s. Fallbeispiel Deponie Georgswerder) bzw. die Auslegung der Oberflächendränge als Wurzelsperre. Durch Einsatz einer grobkörnigen Zwischenschicht scheint es nach dem derzeitigen Diskussionsstand möglich, ein Wurzelwachstum auf den Oberbodenhorizont begrenzen zu können.

Der Effekt, der mit einer grobkörnigen Zwischenschicht erzielt wird, liegt in einer radikalen Veränderung der Umgebungsbedingungen für Wurzeln, durch Verminderung der Bodenfeuchte, der Feldkapazität und des Nährstoffangebotes.

### **Physikalische und chemische Beanspruchungen**

Beanspruchungen aus Temperaturdifferenzen und aus UV-Strahlen sind bei ausreichender Überdeckung irrelevant. Der Einfluß von lang andauernden, tiefen Temperaturen stellt insbesondere für frostgefährdete Materialien bei ausreichender Überdeckung von im Minimum 80 cm ebenfalls kein Problem dar. Überdeckungshöhen von 80 cm sind auch schon aus Rekultivierungsgründen als empfehlenswertes Maß anzusetzen. Hierdurch werden die Variationsmöglichkeiten für eine Pflanzliste verträglicher Pflanzen verbessert.

Schadstoffpermeationsvorgänge sind, falls sie überhaupt in relevanter Größe auftreten, durch Einsatz einer konstruktiven Entgasung bzw. Entwässerung von Stauwasser bzw. Schichtwasser zu minimieren. Sollten hohe Permeationswiderstände gefordert werden, so sind hohlraumarme Dichtungsmaterialien zu bevorzugen.

### **Mechanische Beanspruchungen**

Eine mineralische Oberflächenabdichtung ist im wesentlichen 3 Belastungen ausgesetzt :

- hydraulische Belastung durch Oberflächenwasser
- Setzungen
- ggf. Standsicherheit (Schubkräfte).

Da die hydraulische Belastung der Oberflächenabdichtung bei funktionstüchtiger Drainage relativ gering ist (nach der Sättigungsphase: hydraulischer Gradient  $i = 1$ ) hängt somit die Wasserdurchströmung nur noch von der durchströmten Fläche und dem Durchlässigkeitsbeiwert ab.

Die Standsicherheit ist abhängig von den geometrischen Böschungsverhältnissen, einem möglichen Stauwasserspiegel und den Scherparametern. Der Nachweis der Standsicherheit ist entsprechend den im Erd- und Grundbau gängigen Berechnungsverfahren zu führen.

Die größte Unsicherheit bezüglich der Ausbildung einer mineralischen Dichtungsschicht sind mögliche Setzungseinflüsse aus dem Untergrund. Gleichmäßige Setzungen können in der Regel unbeschadet aufgenommen werden. Abhängig vom Alter und von den Inhaltsstoffen der Altablagerung müssen mögliche unetwöhnliche Setzungen, d.h. Setzungsdifferenzen abgeschätzt werden /3/. Erst damit kann eine Dimensionierung der Dichtung im Hinblick auf ihre Dicke und Setzungsunempfindlichkeit erfolgen. Die Setzungsunempfindlichkeit kann beeinflusst werden durch die Materialauswahl (Plastizität) oder durch konstruktive Ausbildungen. Hierbei ist an die Bemessung der Ausgleichsschicht oder die Einlage von Geogittern in die Dichtungsschicht zu denken.

### 3.5.3 Oberflächenentwässerung mit Dränmatten

Dränmatten sind Kombinationsprodukte, die aus einer Krallschicht mit beidseitigen Geotextil-(Vlies-) Auflagen bestehen.

Für die Bemessung als Dränkörper ist aufgrund der geringeren Durchlässigkeit zunächst das Geotextil von entscheidender Bedeutung. Hier ist der vertikale Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k_v$  die bestimmende Größe.

Für die Angabe der horizontalen Ableitungskapazität besitzt dagegen der Krallschichtkörper höhere Bedeutung.

Welcher der beiden Einflüsse letztendlich ausschlaggebend für die Wahl einer bestimmten Dränmatte ist, hängt dabei im wesentlichen von der je Meter Entwässerungsbreite (senkrecht zur Fallrichtung betrachtet) abzuleitenden Wassermenge ab.

Um die Wirkungsweise einer solchen Dränmatte erläutern zu können sind einige Ausführungen voranzustellen.

#### Geotextilauflagen

Die hydraulischen Filtereigenschaften eines Geotextils (Darcy-Beiwert) senkrecht zu seiner Ebene sind abhängig von :

- der fabrikneuen Durchlässigkeit  $k_v$
- dem abzufilternden Boden (Korngrößenverteilung,  $k$ -Wert)
- wirksame Öffnungsweite  $D_w$
- Dicke des Geotextils, lastabhängig und absolut.

Die wirksame Öffnungsweite  $D_w$  ist eine aus den bekannten Filterregeln bekannte Größe, die diejenige Korngröße des abzufilternden Bodens angibt, die gerade noch durch den Filter tritt. Sie beschreibt die mechanische Filterfestigkeit.

Die hydraulische Filterwirksamkeit ist abhängig von der durch Bodenkontakt entstehenden Abminderung der fabrikneuen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte. Sie wird angegeben in der Form  $k_{v,B}$  ( $m^3/m^2 s$ ).

Nach /74/ hat weiterhin die Dicke der Geotextilien einen Einfluß auf das Filterverhalten. Bei dicken Geotextilien ist die Neigung dazu, daß sich ein sogenannter Filterkuchen ausbilden kann, geringer.

Bei Dränmatten ist aber in der Regel davon auszugehen, daß nur dünne Geotextillagen die Krallschicht umgeben. Somit sind auch keine Einflüsse aus der lastabhängigen Dicke der Geotextilien zu erwarten.

### **Krallschicht**

Das Abflußverhalten der Krallschicht wird bestimmt von der horizontalen Abflußleistung (Transmissivität), die eine lastabhängige Größe darstellt.

### **Bemessungsvorschlag**

Auf der Grundlage der genannten Untersuchungsergebnisse ist folgender Bemessungsvorschlag zur Dimensionierung von Dränmatten entstanden.

In einem ersten Schritt müssen die Durchlässigkeit und die Körnungskurve des abzufilternden Decksstrats, d.h. des Oberbodens bestimmt werden. Aus der Korngrößenverteilung können bei den entsprechenden Siebdurchgängen die zugehörigen Korndurchmesser abgelesen werden.

Einen mineralischen filterfesten Aufbau erhält man vergleichsweise damit entsprechend der bekannten Filterregeln. Für verschiedene Anwendungsfälle sind in Tab. 3.9 die Filterkriterien aufgeführt (zitiert aus /18/).

	$D_{15}/d_{35}^{1)}$	$D_{50}/d_{50}^{2)}$	$D_{15}/d_{15}^{2)}$	Bodenart	Anmerkung
Sichardt (1952)	—	4,0–4,5	—	Fein- und Mittelsand	Stufenfilter
Bureau of Reclamation (1953)	—	5–10	—	Sand	—
	—	12–58	12–40	Sand und Kies, ungleichkörnig	Mischkiesfilter
Corps of Engineers (1953)	< 5	—	< 20	—	—
Terzaghi-Peck (1948)	≤ 4	~ 10	≥ 4	Fein- und Grobsand	—
Mayer (1954)	—	—	6–10	—	Brunnenfilter
Mallet-Paquant (1951)	—	—	9	—	Filter in Erdamm
Bertram (1940)	≤ 6	—	≈ 9	Feinsand	
	—	13–20	—	Feinsand	
BAW (1956)	—	5–10	—	Grob- u. Mittelkies, gleichkörnig	
	—	> 15	—	Feinsand	
	—	> 25	—	Feinkies	
BAW (1959)	—	9–19	—	Fein- und Mittelkies, gleichkörnig	
	—	16–19	—		
	—	10–100	—		
	—	6–30	—		

1) Filterstabilität  
2) Filterdurchlässigkeit

(145) Ermittlung der Grenzkurve für den Filteraufbau

Tabelle 3.9: Filterkriterien für verschiedene Anwendungsfälle

Nach /74/ ist bei künstlichen Filtern, zunächst bei Geotextilauflagen folgendes vereinfachtes Fließdiagramm anwendbar.

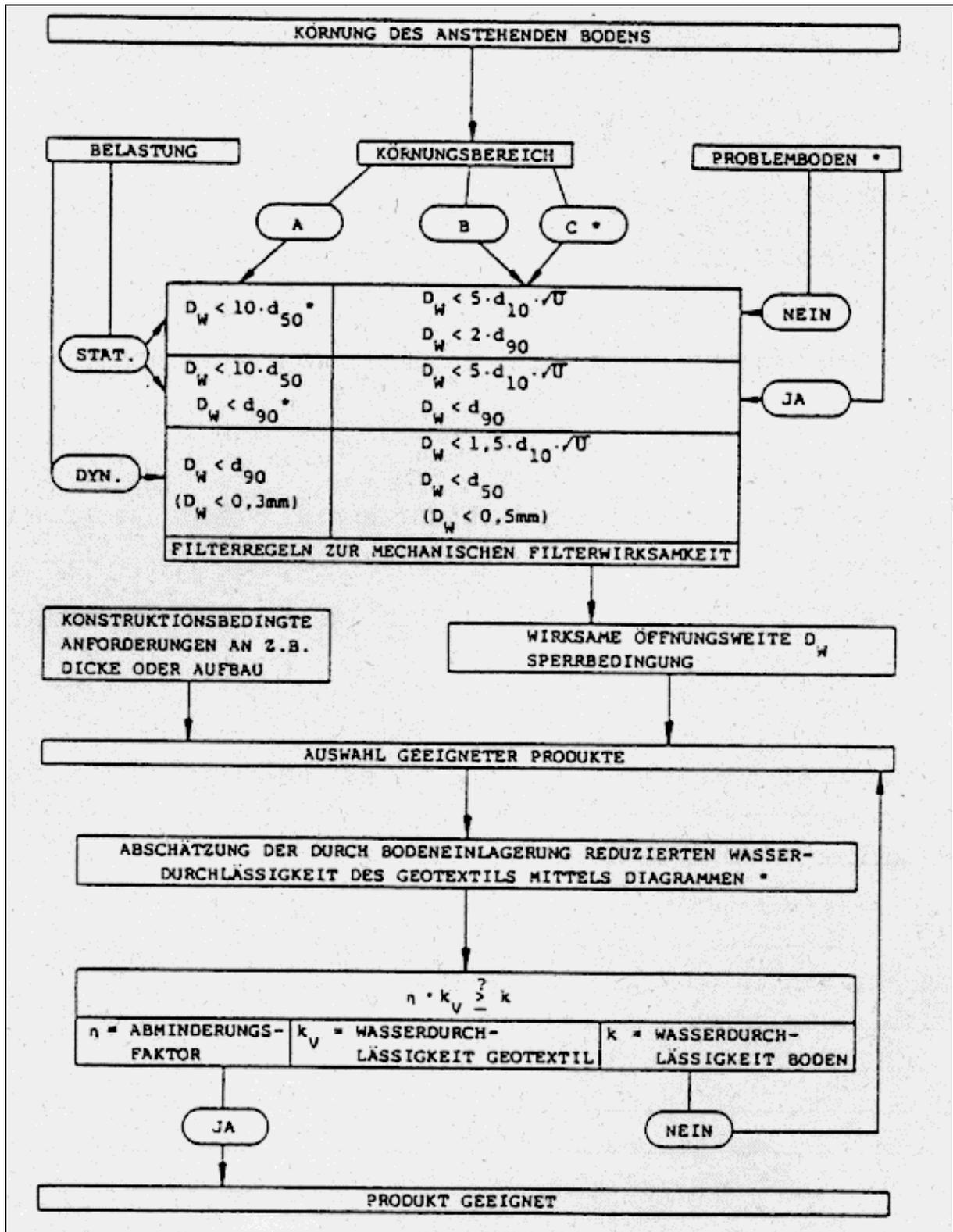


Bild 3.16: Vereinfachtes Fließdiagramm zur Filterbemessung von Geotextilien, nach /74/, /34/.

Für die Durchführung der Bemessung müssen dazu die o.g. Daten

- Boden
  - Körnungslinie
  - k-Wert
- Geotextil- wirksame Öffnungsweite
  - Durchlässigkeitsbeiwert, fabrikneu
  - Porenanteil
  - Dicke

bekannt sein.

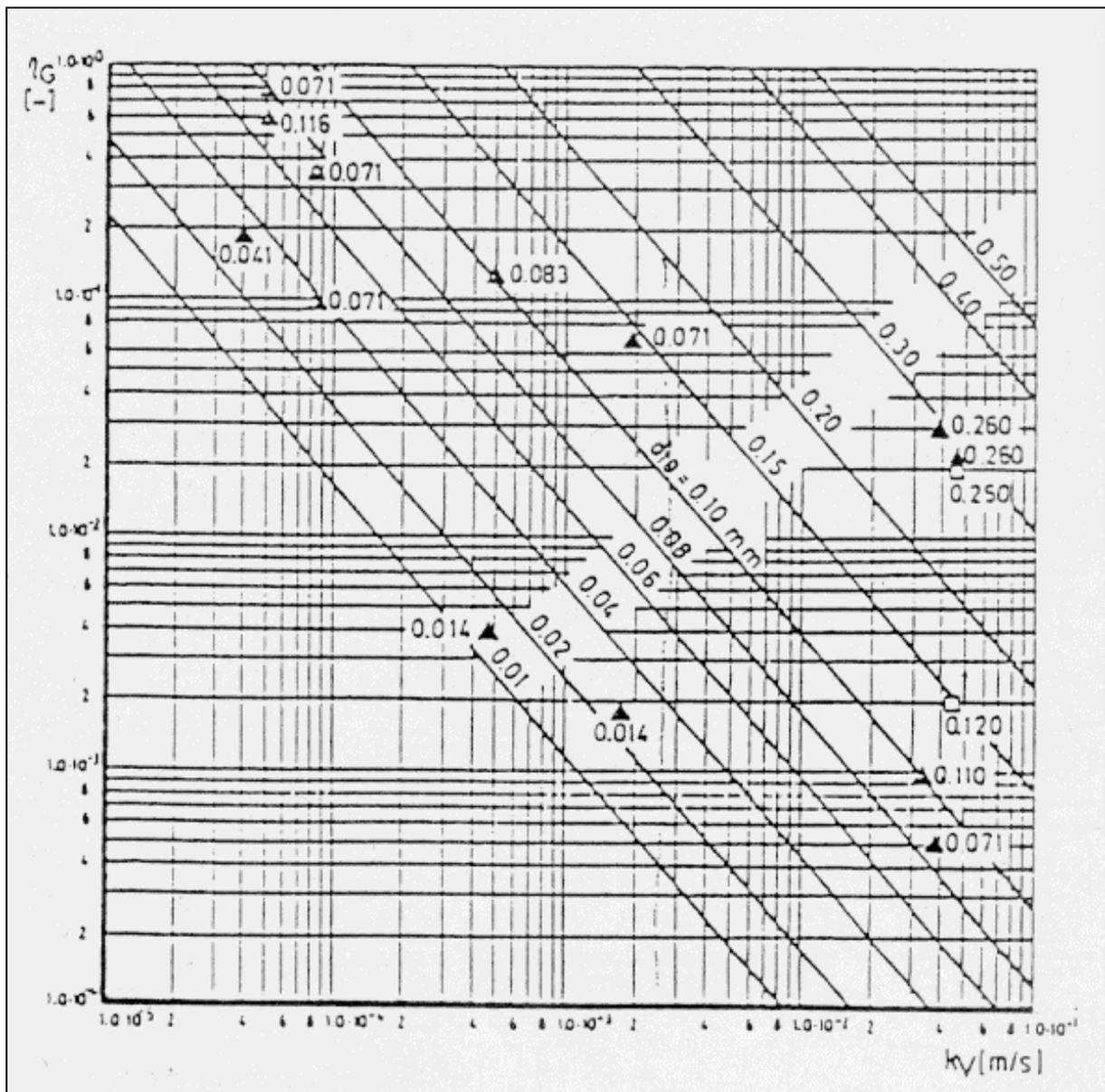
Der durch Bodenkontakt entstehende Abminderungseffekt der vertikalen Wasserdurchlässigkeit wird nach dem Diagramm in Bild 3.17 bestimmt.

Bei relativ dünnen Geotextilien, die bei Dränmatten zur Anwendung kommen (bis 2,0 mm Dicke), kann eine Überprüfung der hydraulischen Filterwirksamkeit unter der Vorgabe einer druckverlustarmen Wasserabführung nach der Gleichung

$$\zeta_G k_v \geq k$$

erfolgen.

Für den Geltungsbereich ( $0,01 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 0,5 \text{ mm}$ ) wird der Abminderungsfaktor  $\zeta_G$  in Abhängigkeit vom Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k_v$  und des Korndurchmessers  $d_{10}$  des abzufilternden Bodens ermittelt (nach /34/).



**Bild 3.17:** Bestimmungsdiagramm für den Abminderungsfaktor  $\zeta_G$  (Gewebe und dünne Vliestoffe,  $d \ll 2,0$  mm) /34/.

Aus dem so ermittelten bodenabhängigen Durchlässigkeitsbeiwert kann anschließend entsprechend der Filterfläche die hydraulische Belastung der Krallschicht bestimmt werden.

Ein Beispiel für die Ableitungskapazität einer Dränmatte ist in Bild 3.18 aufgezeigt. Für den speziellen Anwendungszweck sind entsprechende Prüfdiagramme für das auszuwählende Produkt zu verwenden.

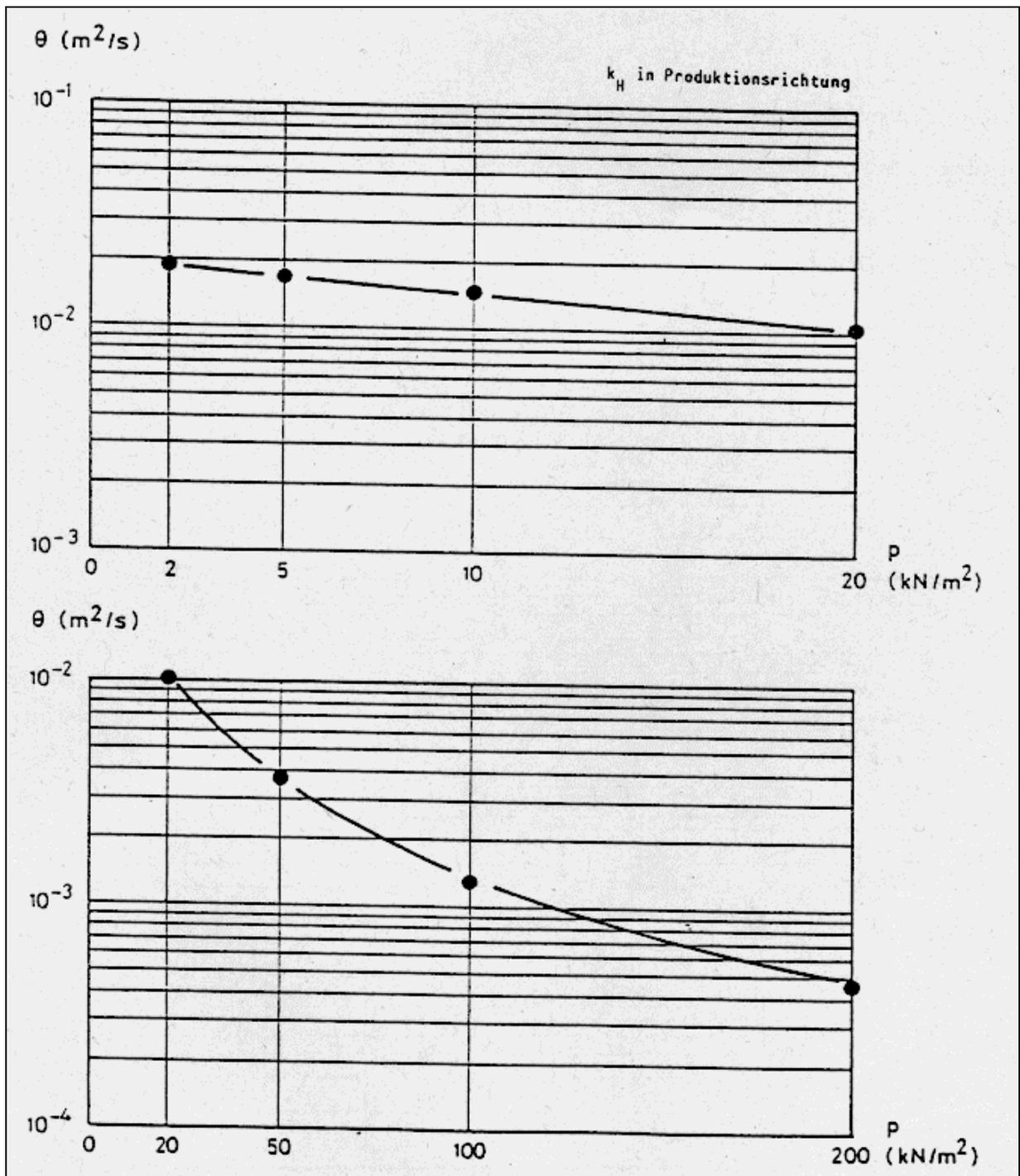


Bild 3.18: Beispiel für die horizontale, lastabhängige Transmissivität einer Krallschicht.

Ungeklärte Einflußgrößen sind bislang das lastabhängige Kriechverhalten der Kunststoffe, das Verhalten bei mechanischen Beschädigungen und die Langzeitbeständigkeit der Werkstoffe.

### 3.5.4 Überlegungen zur Rekultivierung

Sowohl der Mutterboden als auch der Oberboden sind für die **Rekultivierung** einer Oberfläche von Altablagerungen wurzelfähig.

Bei der Auswahl von Pflanzen sind zum einen die landschaftstypischen Merkmale der Pflanzenwelt als auch sicherheitstechnische Belange bzgl. der Oberflächenabdichtung zu beachten.

Aus sicherheitstechnischer Sicht sind Pflanzen zu bevorzugen, die in der Regel keine Wurzeltiefen von über 80 cm aufweisen. Erfahrungen hierzu sind bei der Sanierung der Deponie Breite Hille in Bochum (Fallbeispiel 4) gemacht worden.

Um eine schnellstmögliche Begrünung aus Gründen des Erosionsschutzes zu erzielen, kann es angebracht sein, zunächst eine Graseinsaat vorzunehmen. In Abhängigkeit von der Umgebungssituation können anschließend standortgerechte regionale Pflanzenarten ergänzt werden, die z.B. zu Pflanzengemeinschaften zusammengefaßt werden können.

Die Verwendung lebender Pflanzen für Sicherungsaufgaben z.B. gegen Wind- und Wassererosion sind in vielen Klimazonen und Landschaften seit langem bekannt.

Für den planenden und ausführenden Ingenieur sind Grundkenntnisse über Bau und Lebensweise der Pflanzen im Hinblick auf die technisch nutzbaren Eigenschaften notwendig /32/. Hier ist die Durchwurzelung und die Wurzeltiefe von besonderer Bedeutung.

Intensivwurzler bleiben meist in den obersten Bodenschichten, sind also Flachwurzler, mit dem Boden durch einen Wurzelfilz innig verbunden. Gemischte Pflanzenbestände bilden gestufte Wurzelhorizonte und festigen den Boden wirkungsvoll. Biotechnisch interessant ist ein Pflanzenbestand, dessen Wurzeln einen Boden möglichst tiefreichend erschließen. Das Wurzelwachstum lockert den Boden durch Verdrängung und fördert durch den Austausch von Gasen und Wasserdampf sowie durch Ausscheiden von Pflanzenschleim die Bildung von Aggregaten und damit einer porösen stabilen Struktur. Für einige Pflanzen sind in Tabelle 3.10 Wurzeltiefen angegeben.

**Tabelle 3.10: Wurzeltiefen von Kulturpflanzen für Rekultivierungsschichten**

Kulturpflanze	Wurzeltiefe Hauptwurzelhorizont	Merkmale
Kartoffel	ca. 40 cm	Haar- u. Filzwurzeln
Gerste	ca. 40 cm	schwach ausgebildetes Wurzelnetz
Weizen	ca. 40 cm	Haar- u. Filzwurzeln
Roggen	ca. 40 cm	Haar- u. Filzwurzeln
Futterrüben	> 80 cm	-
Futtermais	< 80 cm	dichtes, weit verzweigtes Wurzelnetz
Mais	> 80 cm	dichtes, weit verzweigtes Wurzelnetz
Zuckerrüben	> 80 cm	-
Hafer	≈ 70 - 80 cm	stark ausgeprägtes Wurzelnetz, hoher Wasserbedarf
Lupine	150 - 300 cm	-
Rotklee	150 - 300 cm	-
Sonnenblume	150 - 300 cm	-
Adlerbohne	80 - 150 cm	-
Erbse	80 - 150 cm	-
Senf	80 - 150 cm	-
Raps	80 - 150 cm	-
Ölrettich	80 - 150 cm	-
Weißklee	bis 80 cm	-
Zottelwicke	bis 80 cm	-

## 4. Beschreibung von Dichtwand- und Sohlabdichtungssystemen und deren Herstellung

### 4.1 Allgemeines

Die Entwicklung neuer Bauverfahren im Spezialtiefbau führt heute zu einer Vielzahl von Dichtwänden, die je nach Art und Herstellung wie in Tabelle 4.1 aufgeführt, zu unterscheiden sind. Von den aufgeführten Systemen ist die Verdichtungswand für die Sanierung von Altlasten nicht von Interesse. Bei Sohlabdichtungen sind Injektionsmaßnahmen und Stollenvortrieb zu unterscheiden. Systeme, die relativ neu sind, werden umfassend beschrieben. Abhängig von den Herstellungsverfahren werden darauf abgestimmte Dichtmassen eingesetzt, auf die in Kap. 7 näher eingegangen wird.

Prinzip	Dichtwandsystem	Grundriß	Böden	Material	Neuentwicklung
Verringerung der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens	Verdichtungswand		keine Anwendung bei Einkapselung		
	Injektionswand		1) begrenzt anwendbar	Tonpasten, Zementpasten, Ton-Zement-Pasten, Silikat-Gele	
	Gefrierwand		kontaminierte	flüssiger Stickstoff	F + E - Vorhaben
	Düsenstrahlwand		auch in sehr feinkörnigen	Bentonit-Zement-Suspension, mit / ohne Füllstoffe	Zement-Wasserglas-Suspension
Verdrängung des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Spundwand		rammfähige	St Sp 37	Kunststoff-Beschichtung Kunststoff-Dichtung
	Schmalwand			Bentonit-Zement-Suspension, mit / ohne Füllstoffe	Doppelkammersystem, Ca-Bentonit-Zement-Suspension, Fertigprodukte
	gerammte Schlitzwand			Tonbeton	
Aushub des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Bohrpfahlwand		abhängig vom Bohrverfahren	Tonbeton Beton	
	Schlitzwand Einphasen-Verfahren		begr. anwendbar bei Torf/Huminsäuren	Bentonit-Zement-Suspension, mit / ohne Füllstoffe	zementfreie Dichtwandmassen Fertigprodukte Sonderzemente
	Schlitzwand Zweiphasen-Verfahren		keine Einschränkung	Bentonit-Zement-Suspension Tonbeton	zementfreie Dichtwandmassen
	Schlitzwand Kombinationsdichtung		s. o.	HDPE-Dichtungsbahn	Schoßdichtungen

Tabelle 4.1: Dichtwandssysteme

## 4.2 Dichtwandsysteme ohne Bodenaushub

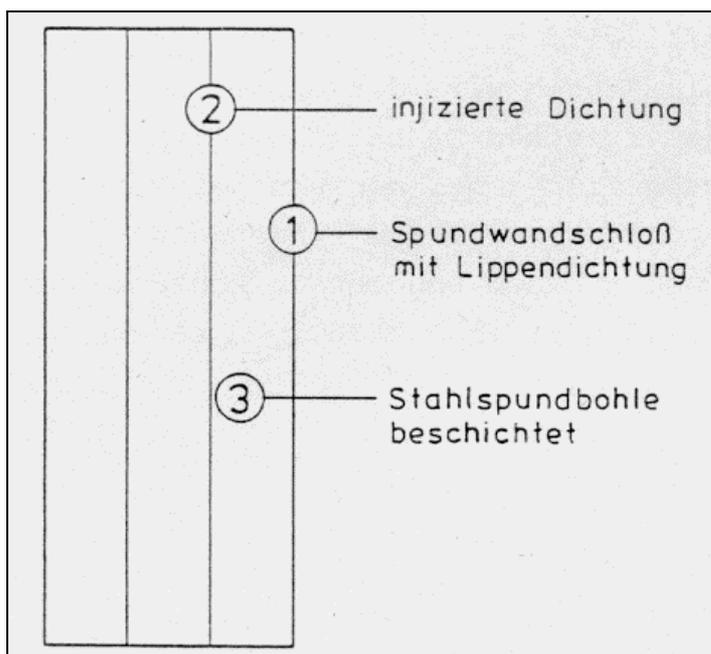
### 4.2.1 Schmalwand

**Schmalwände** sind Dichtungswände von ca. 8 bis 15 cm Dicke, die im rammfähigen Boden bis zu einer Tiefe von 23 m erstellt werden. Die Herstellung von Schmalwänden erfolgt durch wiederholtes Einbringen und Ziehen einer Stahlbohle mit I-Profil bei gleichzeitiger Verpressung der durch die Bohle entstehenden Hohlräume mit Dichtungsmaterial. Diese Dichtwandmasse besteht meist aus einer Bentonit-Zement-Suspension unter Zugabe von Steinmehl. Durch das Verpreßsystem findet keine Vermischung der Dichtwandmasse mit dem umgebenden kontaminierten Boden statt.

Für die Einkapselung von Altablagerungen kann ein Dichtwandkammersystem aus doppelten Schmalwänden gewählt werden (Beispiel s. Kap. 11.2).

### 4.2.2 Spundwand

Die **Spundwand** besteht aus aneinandergereihten Stahlbohlen, die mit Schlössern durchgehend verbunden sind und in den Untergrund eingerammt werden. Sie wird dort eingesetzt, wo ein rammfähiger Baugrund vorliegt und eine rasche Baumaßnahme erforderlich ist. Durch den Einsatz neuer Beschichtungsmaterialien und Schloßdichtungen wird eine gegen die einzukapselnden Stoffe beständige Wand erstellt. So wurde beispielsweise der Schadstoffaustritt bei der Deponie Penzberg, der durch einen hydraulischen Grundbruch bedingt war, durch eine mit Beschichtungsmaterial und Schloßdichtung versehene Spundwand verhindert. Die Spundwand wurde eingesetzt, da eine Dichtwand aus Bentonit-Zement-Suspension in den Torfböden nicht stabil war.



**Bild 4.1 : Dreifachbohle mit Dichtungsmaterialien**

### 4.2.3 Gerammte Schlitzwand

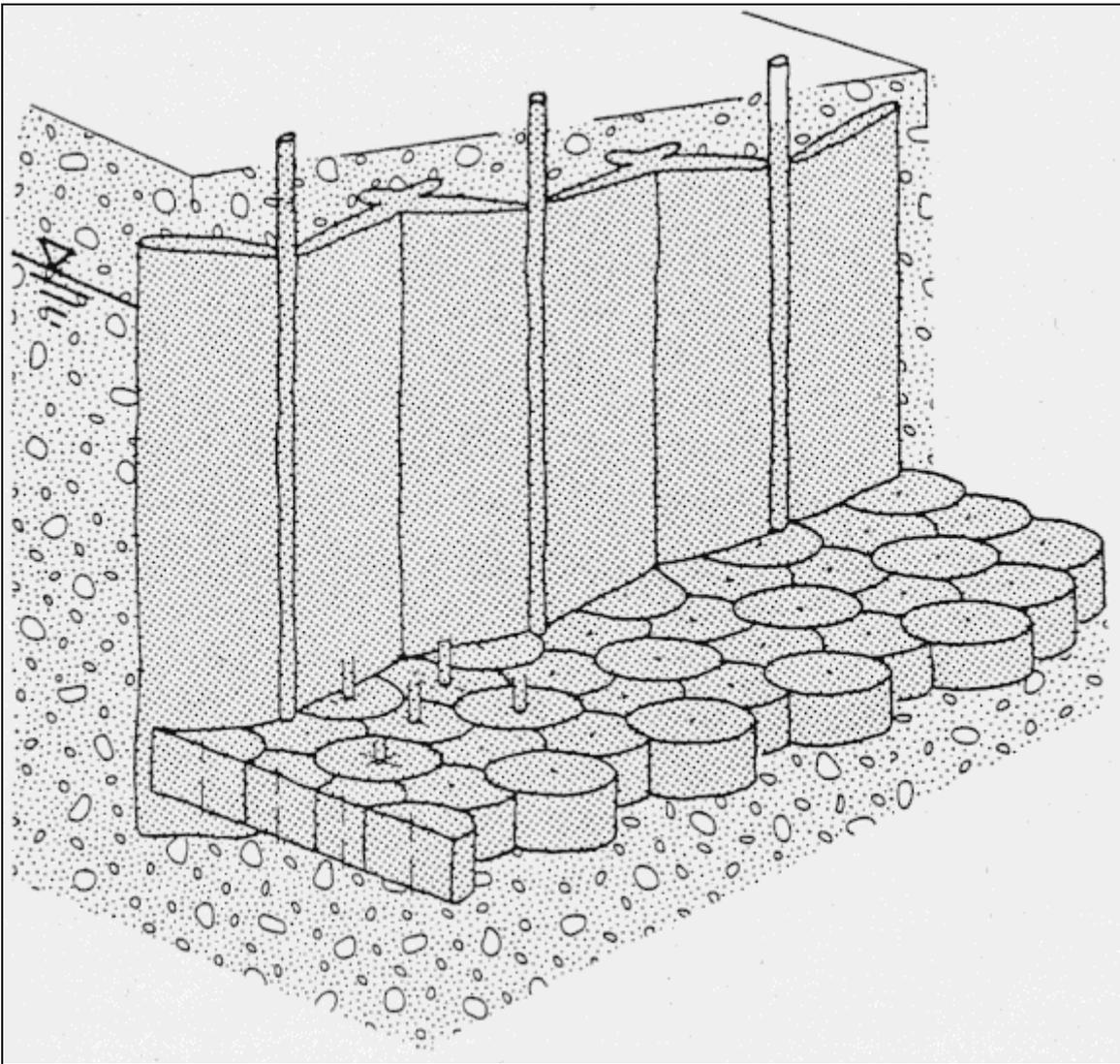
Dieses Verfahren wurde erstmalig bei der Sanierung einer in Hamburg-Wilhelmsburg gelegenen Altablagernung angewendet. Ähnlich wie bei der Herstellung von Ortbetonpfählen wird bei der gerammten Profildichtwand der Boden durch Einrammen eines unten geschlossenen Hohlkastens verdrängt. Der Hohlkasten ist unten mit einer lösbaren Stahlplatte wasserdicht verschlossen. Jedes Rammelement besteht aus zusammengesetzten Peiner-Kasten-Spundbohlen und hat die Abmessungen 0,95 x 0,40 m und wird mit einem Hydrobären auf die erforderliche Tiefe gerammt. Daran wird anschließend das nächste Element gerammt, wobei die einzelnen Elemente in Schösser geführt werden. So werden 5 Elemente gerammt. Nach dem Rammen des 3. und 4. Elementes wird das 1. Element mit Dichtwandmasse aus Erdbeton gefüllt. Das Element wird dann gezogen, wobei sich unter dem Gewicht der Füllmasse die Sohlplatte löst. Das gezogene Profil wird mit einer neuen Sohlplatte versehen und wieder gerammt. Beim Ziehen wird der eingebrachte Erdbeton verdichtet. Zwischen dem frischen Erdbeton und dem unter der Ramme stehenden Profil befinden sich immer mehrere gerammte, aber nicht gefüllte Elemente. Bei diesem Verfahren findet also keine Vermischung der Dichtwand mit dem umgebenden kontaminierten Boden statt. Erprobt wurde das Einrammen mit 10,50 m langen Rammelementen.

### 4.2.4 Hochdruckinjektionswand

Bei der **Hochdruckinjektion** wird ein Bohrgestänge mit speziellen Düsenköpfen in den Boden eingebracht. Das Bohrgestänge wird gleichzeitig zur Injektion genutzt. Nach Erreichen der Endtiefe wird mittels einer oder mehrerer energiereicherer Flüssigkeitsstrahlen der Boden in seiner Struktur aufgelöst und in Suspension gebracht. Zur Erzeugung des energiereichen Strahles werden Pumpdrücke von 300 bis 500 bar benötigt. Durch den rotierenden Hochdruck-Düsenstrahl wird der aufgelöste Boden mit der Injektionssuspension vermischt. Das Bohrgestänge wird mit auf die Bodenart abgestimmten Dreh- und Ziehgeschwindigkeiten nach oben gezogen (s.a. Kap. 4.4.5 und Bild 4.10).

Je nach Körnung des Bodens, des Injektionsdruckes, der Dreh- und Ziehgeschwindigkeit des Injektionsgestänges kann der im Ringraum des Gestänges zutage geförderte Boden im Injektionsgut minimiert werden, so daß lediglich durch Verringerung der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens die Abdichtung erzielt wird ohne Bodenaushub (s.a. Kap. 4.4.5 und Bild 4.10). Nach der Aushärtung entstehen je nach Dreh- und Ziehgeschwindigkeit der Injektionsdüse säulen- oder wandförmige Verfestigungskörper mit Durchmessern von 0,6 bis 1,0 m.

Die Hochdruckinjektion, die auch durch Schrägbohrungen herstellbar ist, eignet sich zur Einkapselung von lokal begrenzten Kontaminationsbereichen. Um eine ausreichende Dichtigkeit einer solchen Wand zu erreichen, kann die Anordnung einer zweiten Reihe von Einpresspunkten "auf Lücke" erforderlich werden. Die mit dem Soilcrete-Verfahren hergestellte Dichtwand aus überschrittenen Säulen oder Lamellen eignet sich auch zur Schließung von Fenstern bei bereits hergestellten Dichtwänden. Mit Fenstern werden bautechnisch hervorgerufenen Lücken in einer Dichtwand benannt.



**Bild 4.2: Kopplung von SOILCRETE-Lamellendichtwand und SOILCRETE-Sohle /60/**

## 4.2.5 Gefrierwand

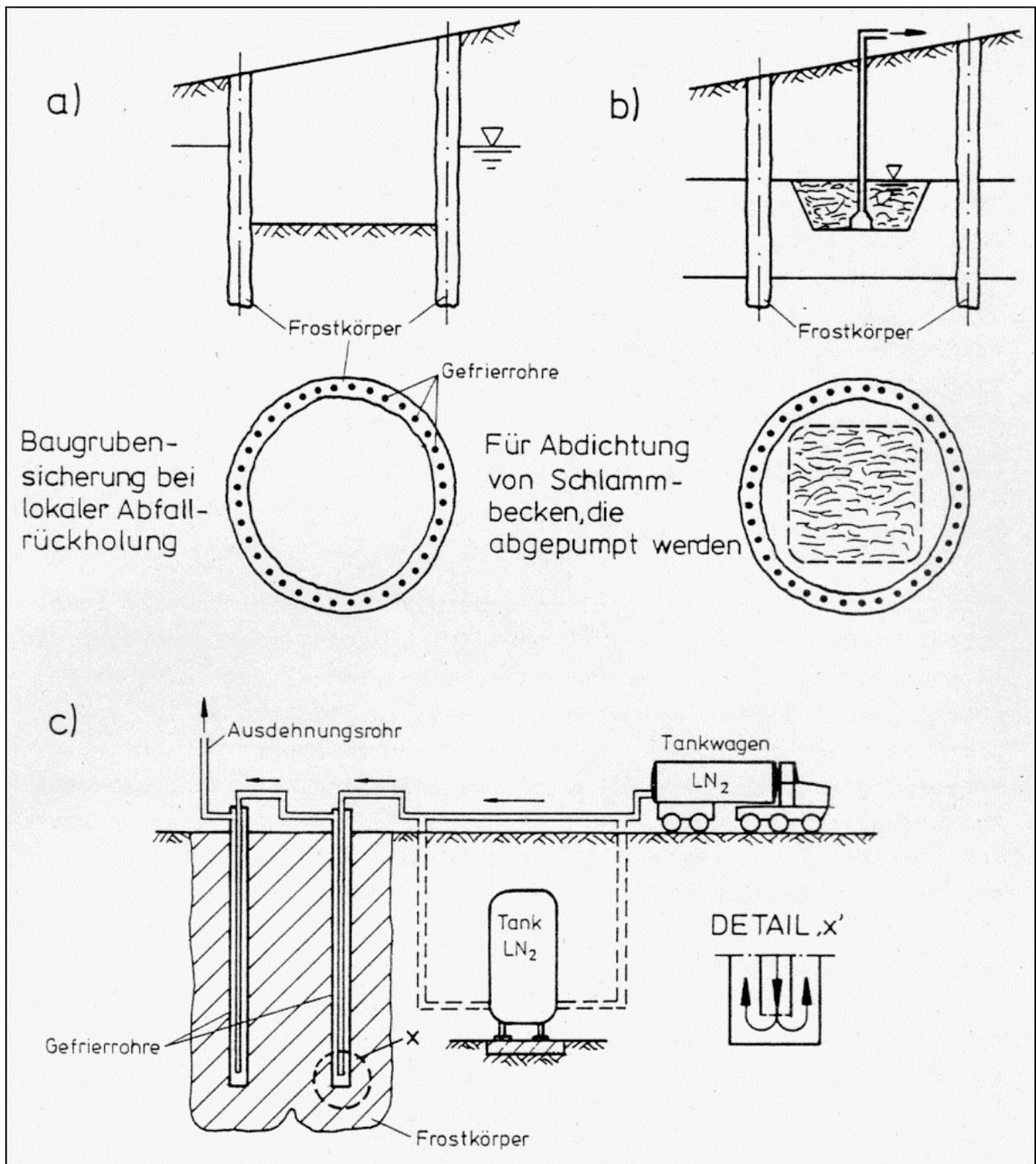
Zur Herstellung des Frostkörpers werden in den Boden sog. Gefrierrohre eingebracht, durch die eine Kühlsole zirkuliert, um dem Boden die Wärme zu entziehen und das Bodenwasser zum Gefrieren zu bringen. Durch Aneinanderreihung vieler Gefrierrohre entsteht eine **Gefrierwand** mit optimaler Abdichtung, durch den gefrorenen Boden erzielt.

Dies ist vornehmlich eine temporäre Maßnahme, die z.B. auch zum Schließen von Fenstern bei Dichtwänden eingesetzt werden kann und dazu dient, den Schadstoffaustritt zu vermeiden. Die Gefrierwand kann bei Bedarf auch dort eingesetzt werden, wo es gilt, eine herzustellende Dichtwand und einzubauende Dichtwandmasse vor der vorhandenen Kontamination zu schützen. Dies ist insbesondere dort, wo ölhaltige Böden in die Dichtwandmasse eingetragen werden können, von Vorteil.

Der Einsatz von flüssigem Stickstoff bis  $-196^{\circ}\text{C}$  führt zu einer temporären Immobilisierung der Schadstoffe und damit zu einer wesentlichen Verbesserung der Arbeitsbedingungen und zur Sicherung der Umgebung vor schädlichen Einflüssen /44/.

Bild 4.3 zeigt als Beispiel die Herstellung eines Frostkörpers mit kreisringförmigem Grundriß, der durch Anordnung von Gefrierrohren auf einem sogenannten Gefrierkreis erzeugt wird. Der Frostkörper wirkt wie eine Schachtauskleidung und ermöglicht den gefahrlosen Aushub. Bei Bedarf kann der Frostkörper als Barriere gegen Sickerwasseraustritt eingesetzt werden. Je nach der Aufgabenstellung sind auch andere Formen des Frostkörpers herstellbar.

Das Prinzip der Beschickung der doppelwandigen Gefrierrohre mit flüssigem Stickstoff aus einem stationären Tank oder direkt aus einem Tankwagen ist in Bild 4.3c dargestellt.



**Bild 4.3:** Stickstoffvereisung mit Anwendungsmöglichkeiten bei Altablagerungen

## 4.3 Dichtwandsysteme mit Bodenaushub

### 4.3.1 Überblick

Dichtungsschlitzwände können sowohl im Einphasen- wie auch im Zweiphasen-Verfahren hergestellt werden. Sie werden mit einem seilgeführten Schlitzwandgreifer oder einer Hydrofräse hergestellt. Bei lokal begrenzten Kontaminationen und bei geringer Wandtiefe ist auch die Herstellung der Schlitzwand mit dem Tieflöffel im Einphasen-Verfahren möglich. Injektionswände mit dem Düsenstrahlverfahren erstellt können gleichzeitig den Boden ausspülen und den Hohlraum mit Dichtungsmaterial verfüllen.

### 4.3.2 Einphasen-Schlitzwand

Der Schlitz wird mit den Schlitzwandgreifern abschnittsweise ausgehoben (Pilgerschrittverfahren). Beim Einphasen-Verfahren stützt die Bentonit-Zement-Suspension beim Aushub den Boden, verbleibt nach Aushubende im Boden und härtet aus. Nach ca. 48 Stunden ist die Dichtwandmasse stichfest, so daß die Nachbarelemente mit Überschneidung erstellt werden. Durch den noch nicht abgeschlossenen Hydrationsvorgang bindet die frische an die bereits erstarrte Masse an. Mit dem Tieflöffel wird die Schlitzwand kontinuierlich hergestellt (Bild 4.4).

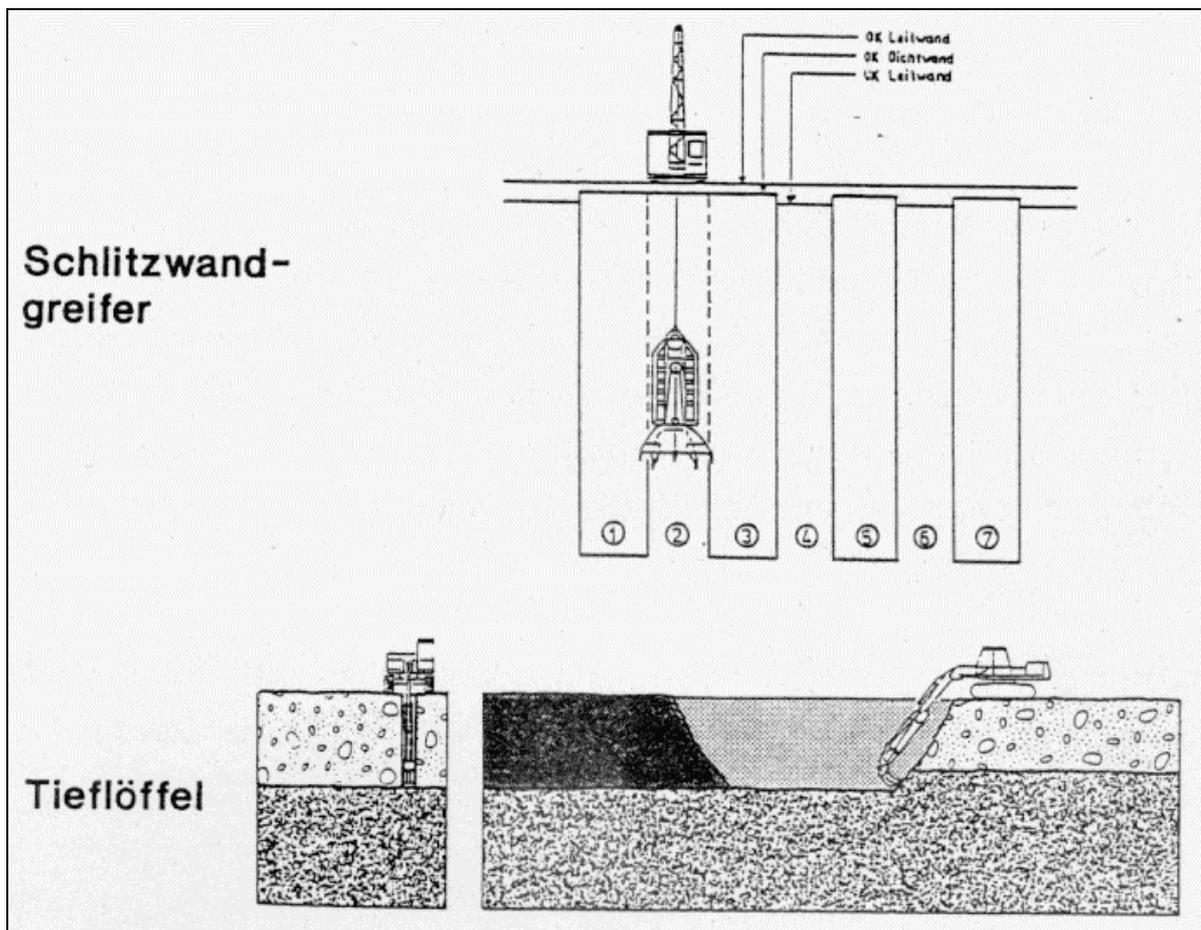


Bild 4.4: Dichtungsschlitzwand im Einphasen-Verfahren /25, 60/

### 4.3.3 Zweiphasen-Schlitzwand

Im Zweiphasen-Verfahren (Bild 4.5) wird im Schutze einer Bentonit-Suspension der Schlitz ausgehoben und nach Fertigstellung des Schlitzes das eigentliche Dichtungsmaterial im Kontraktorverfahren, d.h. von unten nach oben, in den Schlitz eingebracht. Es verdrängt die Bentonit-Suspension, die abgepumpt und beseitigt werden muß. Hydrofräsen sind z.Zt. nur beim Aushub in Bentonitsuspension einsetzbar.

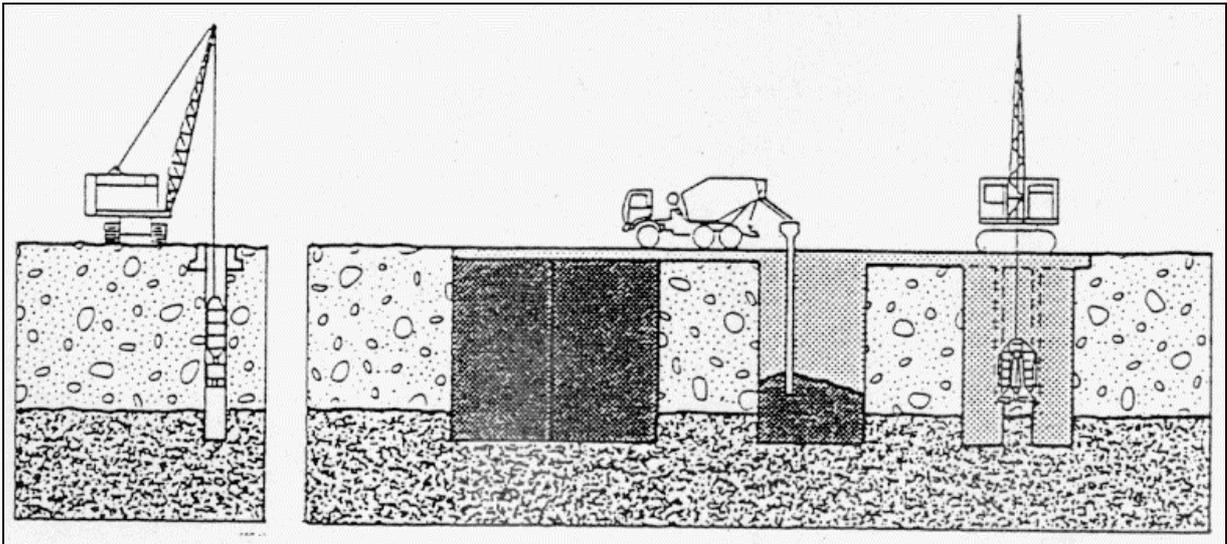


Bild 4.5: Herstellung der Dichtwand im Zweiphasen-Verfahren

### 4.3.4 Kombinationsdichtwand

In die hergestellten Schlitzwände können sowohl Kunststoffdichtungsbahnen wie auch Spundbohlen eingestellt werden. Kombinationsdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen sind bei Einkapselungen der Sondermülldeponien Sprendlingen, Gerolsheim und Malsch eingesetzt und auf der Deponie Geldern-Pont erprobt worden. Spundbohlen werden vornehmlich in Bergsenkungsgebieten verwendet.

Während Spundbohlen durch ihr großes Eigengewicht die Scherkräfte der Bentonit-Zement-Suspension überwinden, werden Kunststoffdichtungsbahnen aus HDPE durch spezielle Einbauvorrichtungen abgesenkt :

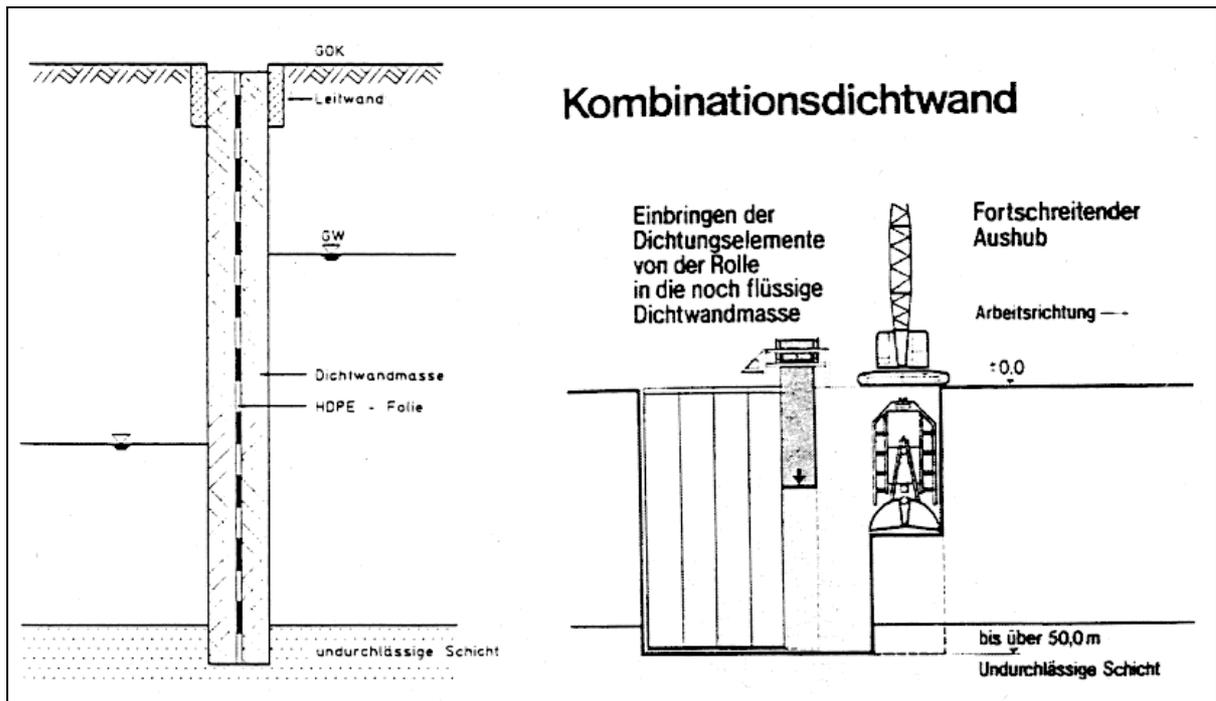
- Aufspannen der Kunststoffbahn auf schwere Einbaurahmen oder Spundbohlen. Nach dem Absenken wird die Kunststoffbahn gelöst und die Einbauvorrichtung wieder gezogen.
- Die Kunststoffdichtungsbahn wird am Fuß mit Ballastgewicht beschwert und dann in die Dichtwandmasse gezogen.

Als günstig hat sich das Einziehen der Dichtungsbahn von der Rolle erwiesen, da so Windkräfte vermieden werden.

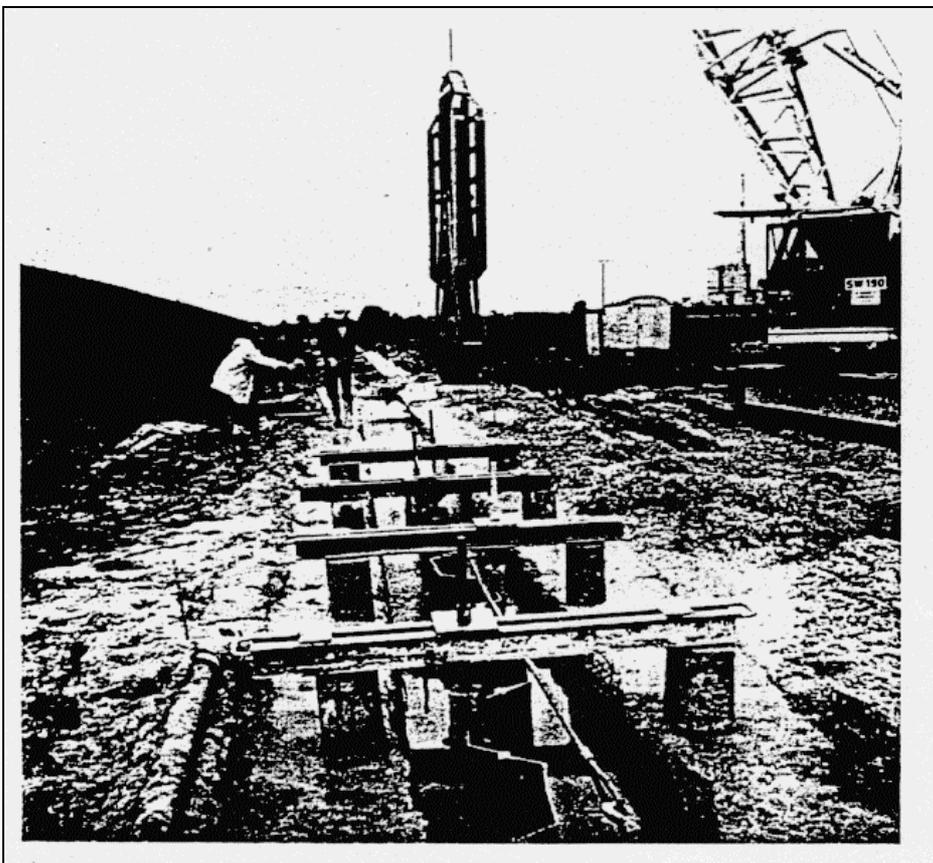
Die Schlösser werden entweder mit einem eingezogenen Dichtungsband oder durch Injektion und Verschweißung gedichtet.

VERBINDUNG VON VERTIKALEN KUNSTSTOFF - DICHTUNGSBAHNEN		
	ÜBERLAPPUNG	1
	EINFÄDELN	2
	EINFÄDELN AUFWEITEN	3
	EINFÄDELN QUELLDICHTUNG	4
	EINFÄDELN SCHWEISSEN	5

Bild 4.6: Mögliche Fugenausbildungen /60/



**Bild 4.7: Kombinationsdichtwand**



**Bild 4.8: Spundbohlen in einer Dichtwand**

## Kombinationsdichtwand mit Glaswänden

Von den Firmen Flachglas AG und Philipp Holzmann AG wurde ein Konzept "Kombinationsdichtwände mit in die Schlitzwand gestellte Glaswände" erarbeitet. Dieses System ist zum Patent angemeldet. Die Ausführung des Systems und die Wirksamkeit sowie Beständigkeit des Gesamtsystems werden geprüft. Glas ist gegen mit Schadstoff belastete Sickerwässer hoch korrosionsbeständig, was im Einzelfall nachzuweisen ist. Anordnung und Konstruktion der Glasbarrieren in der Schlitzwand können den örtlichen Verhältnissen, speziell dem chemischen Angriff auf die Dichtwand angepaßt werden (s. Bild 4.9a-c).

### Ausführungsvariante I

Geringer chemischer Angriff auf die Dichtwand

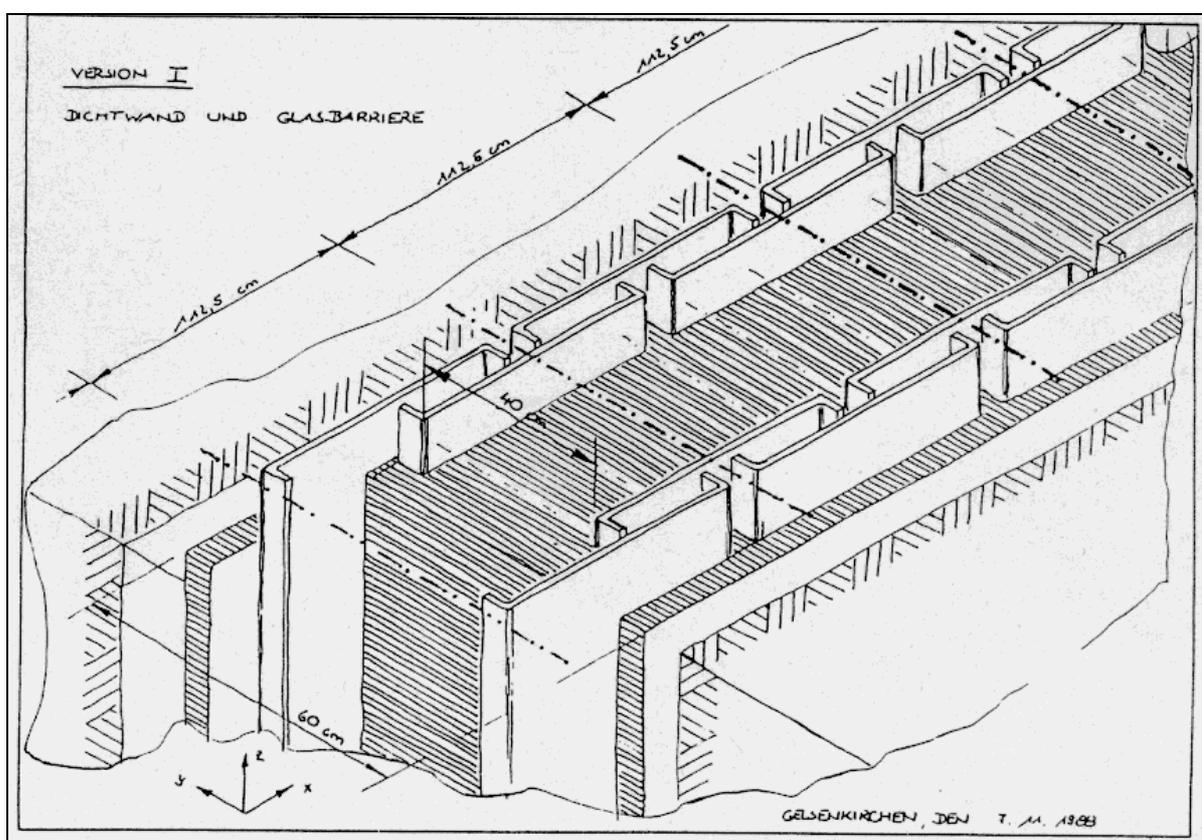
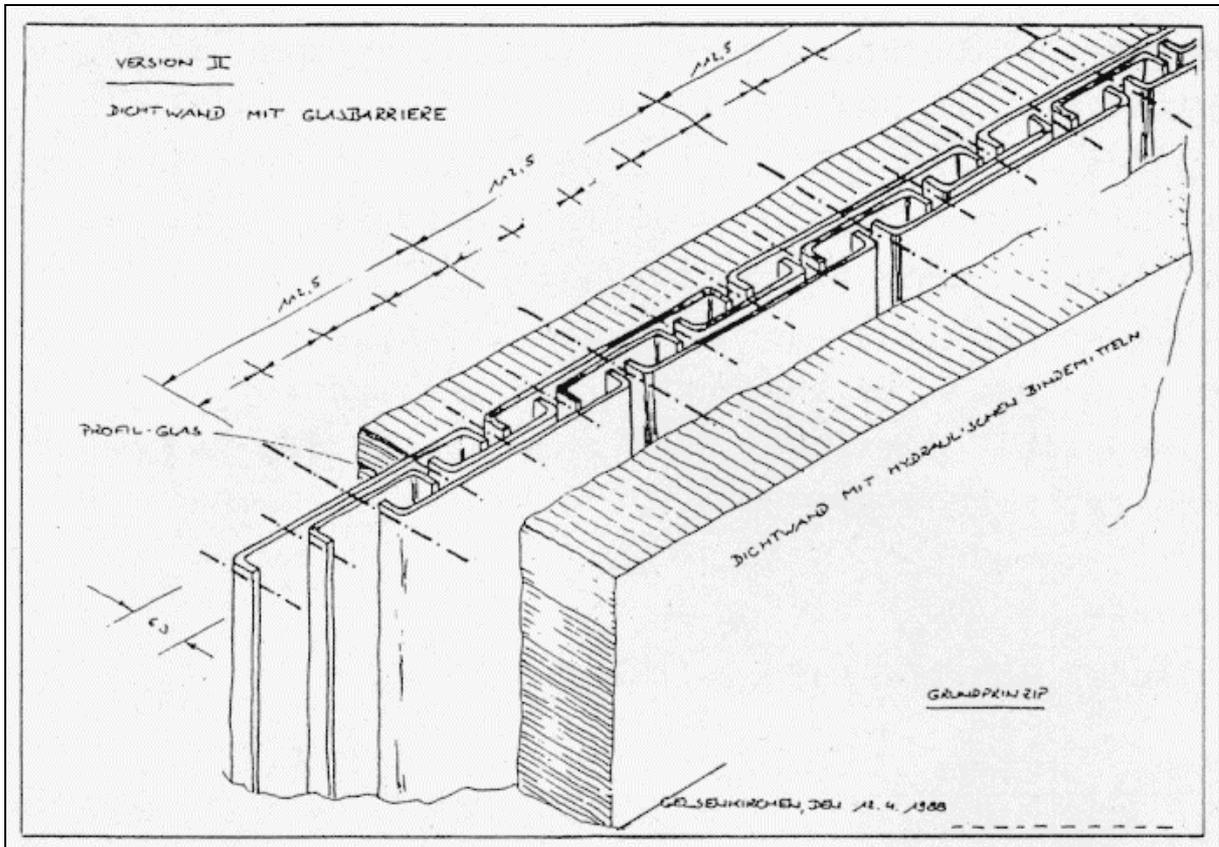


Bild 4.9a: Dichtwand mit einer doppelschaligen Glasbarriere

## Ausführungsvariante II

## Mittlerer chemischer Angriff auf die Dichtwand

**Bild 4.9b: Dichtwand mit einer mittig eingebrachten Glasbarriere**

## Ausführungsvariante III

## Starker chemischer Angriff auf die Dichtwand

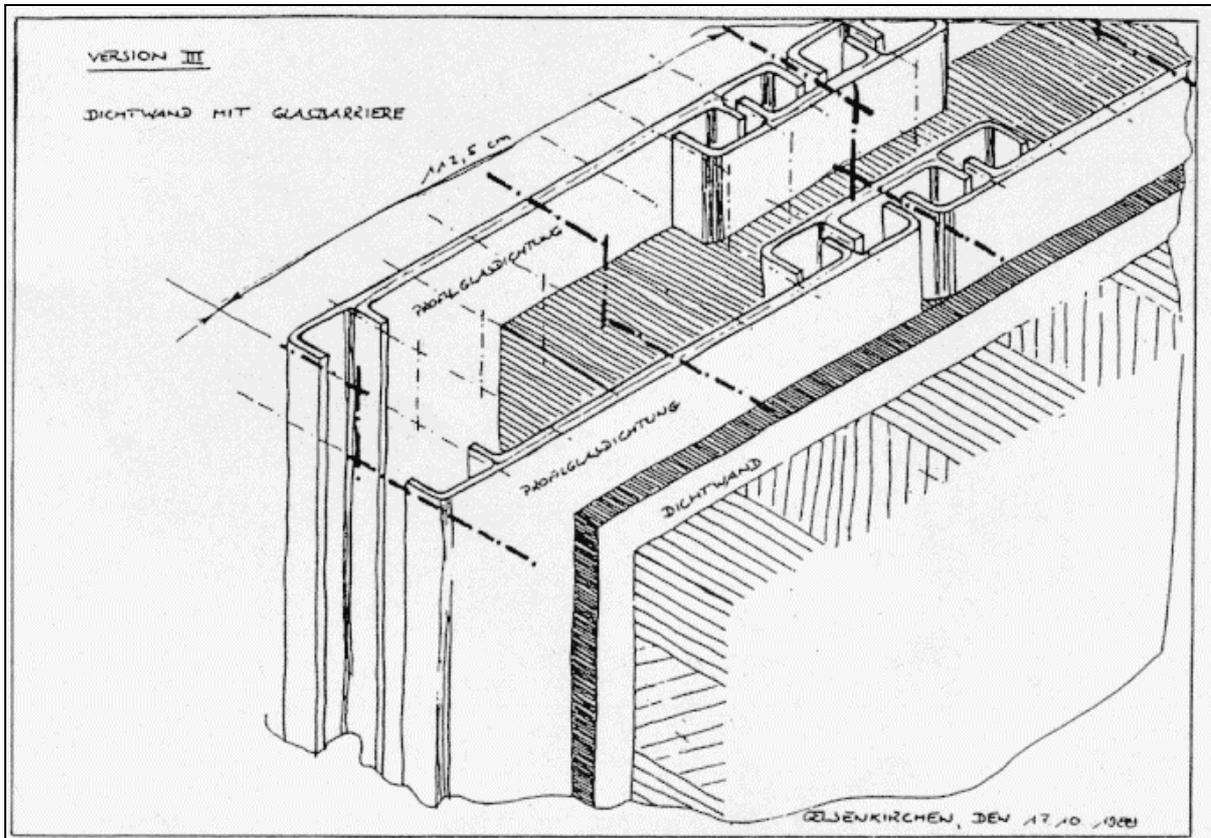
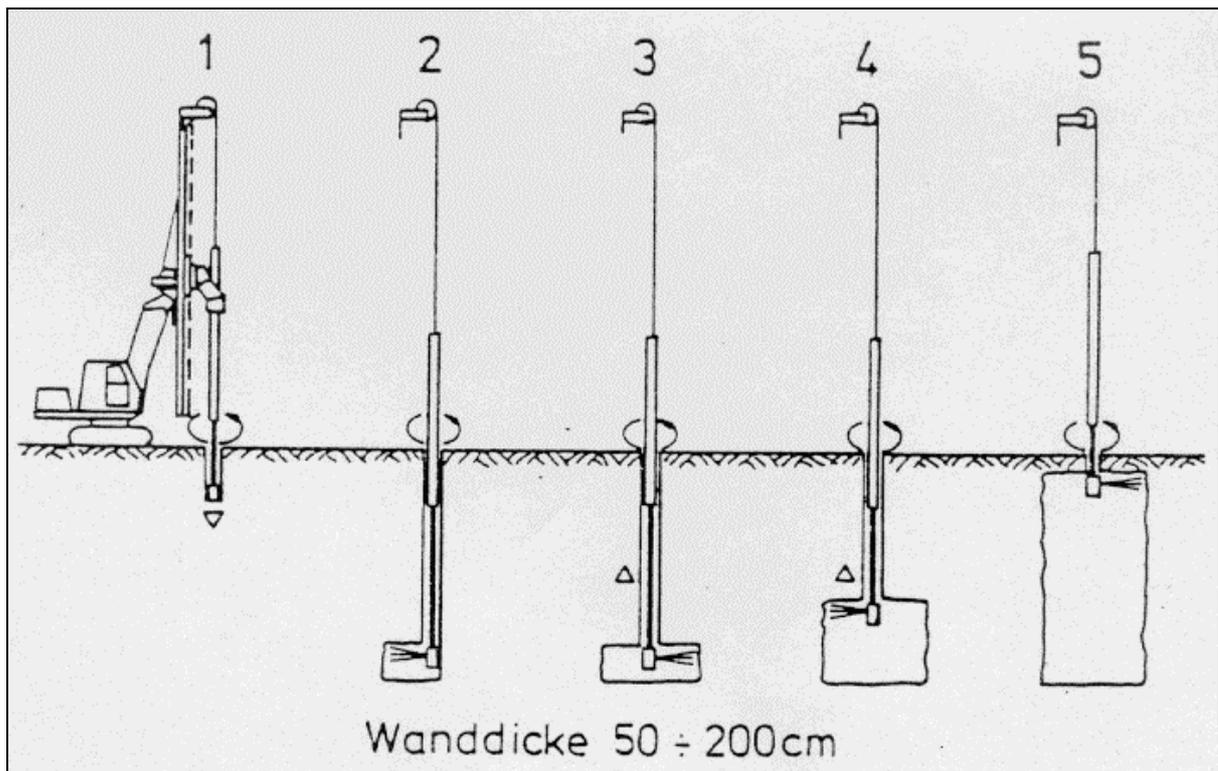


Bild 4.9c: Dichtwand wird mit einer doppelschaligen Glasbarriere

### 4.3.5 Injektionswände

Entsprechend den Untergrundverhältnissen werden verschiedene Bohr- und Verpreßmethoden angewendet. Sie sind im großen Maße von den einsetzbaren Injektionsmitteln abhängig (s. Kap. 8.2, Bild 8.2). Die Entwicklungen und Erfahrungen zeigen, daß insbesondere Hochdruckinjektionen sich für Einkapselungsmaßnahmen eignen (s.a. Kap. 4.2.4), da konventionelle Injektionsverfahren nur in eng begrenzten Körnungsbereichen einzusetzen sind. Durch das als Jet-grouting bekannte Düsenstrahlverfahren (Soilcrete-Verfahren) sind Abdichtungswände auch bis im Tonbereich herstellbar. Dieses Düsenstrahl-Injektionsverfahren besteht darin, daß mittels eines oder mehrerer energiereicherer Flüssigkeitsstrahlen eine Zement- bzw. Ton-Zement-Suspension in den Boden eingebracht wird, der in seiner Struktur aufgelöst und praktisch verflüssigt wird. Die nicht vom Boden aufgenommene oder in Hohlräumen abfließende Boden-/Suspensions-Mischung steigt über den Bohrlochringraum zutage und wird abgeführt.



**Bild 4.10:** Herstellung eines Einzelelementes einer Düsenstrahlwand /51/

Dies Verfahren ermöglicht, den Boden mit der verpreßten Dichtungsmasse zu erodieren, zur Erhöhung der Effektivität Luft zuzugeben oder mit Wasser und Luft über getrennte Zuleitungen den Boden zu erodieren und unterhalb der Wasser- und Luftdüsen mit der Dichtungsmasse zu verpressen. Die Hochdruckinjektion ermöglicht somit, möglichst viel Bodenmaterial zu verdrängen und dies durch Dichtungsmasse zu ersetzen.

### 4.3.6 Kombinierte Verfahren

Vorhandene Bebauung und Baugrundverhältnisse können zu kombinierten Verfahren führen. Die Hochdruckinjektionstechnik erlaubt die Variation durch überschnittene Säulen und überschnittene Dichtungselementen (Bild 4.11). Das Injektionsverfahren ermöglicht gleichzeitig eine Bodenwäsche. Der verunreinigte Boden wird durch den rotierenden Hochdruckwasserstrahl zylinderförmig erodiert, gewaschen und als fließfähige Suspension nach oben gefördert /27/. Der Hohlraum wird mit Dichtwandmasse gefüllt und der Untergrund abgedichtet.

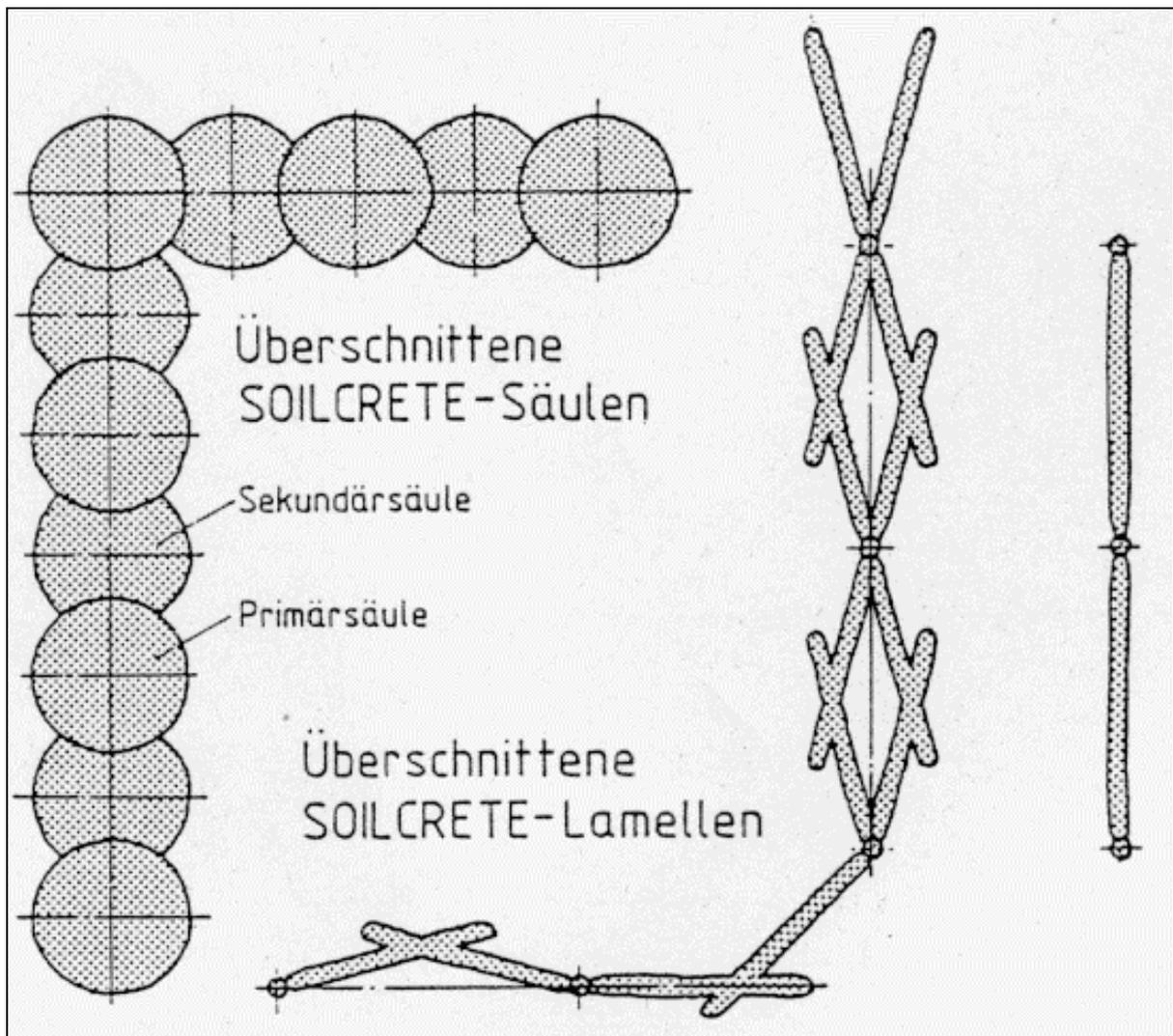
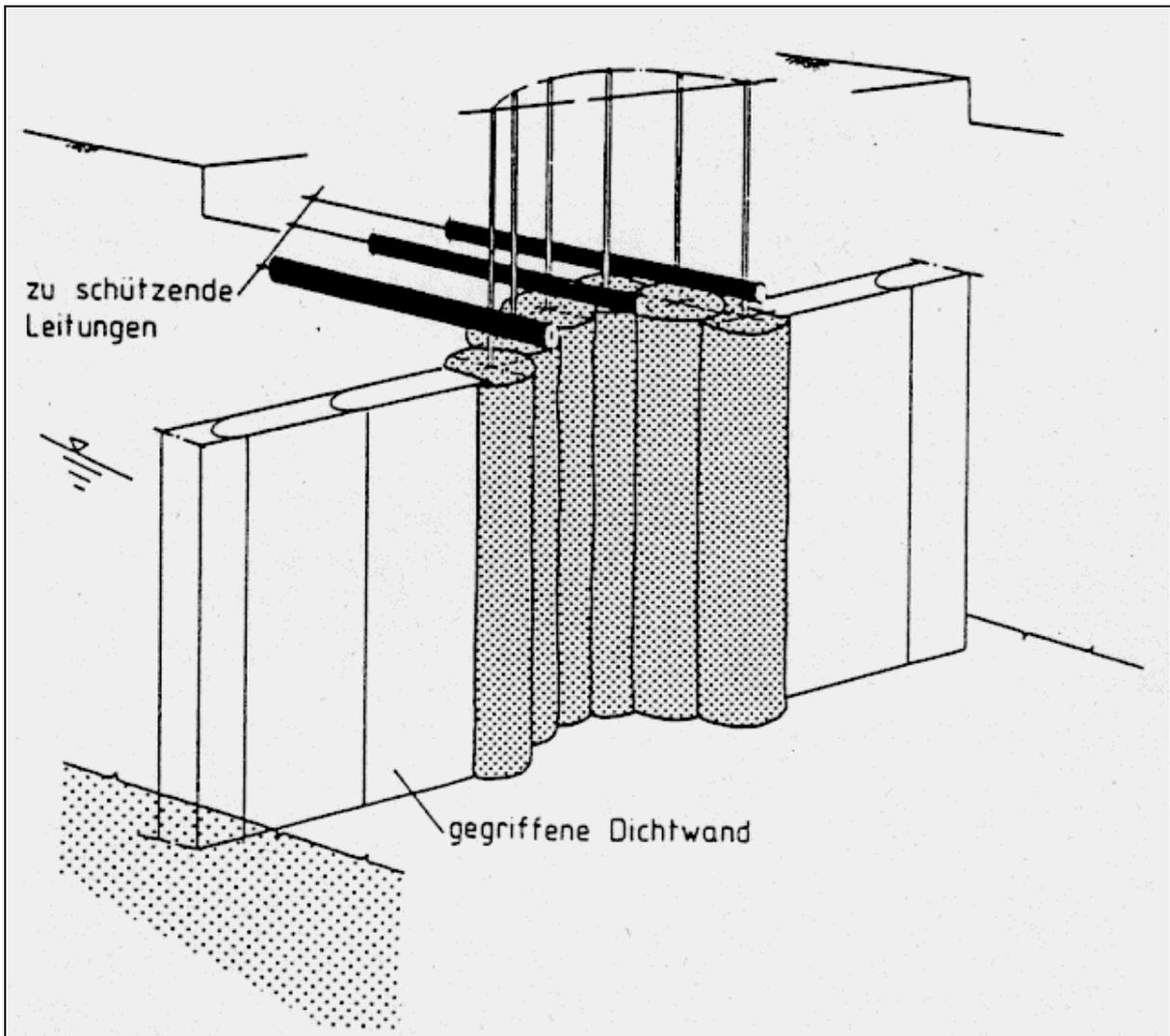


Bild 4.11: Soilcrete-Dichtungselemente



**Bild 4.12: Hochdruckinjektions-Dichtwand aus überschrittenen Säulen zur Schließung von Fenstern in gegriffenen oder gebohrten Dichtwänden**

### 4.3.7 Kostenüberblick

In der Tabelle 4. 2 sind Anwendungsgebiete der Dichtwände und Kosten dargestellt.

**Tabelle 4.2: Dichtwandssystem mit Kostenüberblick - Richtwerte für Wandtiefe 15 m**

Dichtwandssystem	Kosten DM/m <sup>2</sup>	Art der Dichtungswand und Gerät	Gerät mit	Mischanlage
			Leistung m <sup>2</sup> DW <sup>1</sup> /h	Baustellenein- richtung in DM
Schmalwand	60,-	o Schmalwand (Stegdickte d = 8 cm)	30	150000
doppelte Schmalwand	120,-			
Stahlspundwand	240,-			
gerammte Schlitzwand	200,-			
Schlitzwand Einphasen-Verfahren	100,-	o Einphasen-Schlitzwand mit d = 60 cm		
		- Schlitzwandgreifer	12	150000
		- Tieflöffel	24	100000
Schlitzwand Zweiphasen- Verfahren	250,-	o Zweiphasen-Schlitzwand mit d = 60 cm		
		- Schlitzwandgreifer	12	300000
		- Hydrofräse (ab 15 m Tiefe)	15	400000
Schlitzwand Einphasen-Verfahren mit Kunststoffdich- tungsbahn	250,-	o Einphasen-Schlitzwand - eingestellte Dichtungs- bahn	12	200000
Jet-Grouting- Verfahren mit Bodenwäsche 1 bis 2 x waschen u.	250,- bis 300,- 600,- bis 1000,- DM/m <sup>3</sup>	o Dichtungswand mit Soilcrete		
dann mit Dicht- wandmasse verpres- sen		d ≈ 10 cm	12	200000
d ≈ 10 cm	200,-	d ≈ 60 cm	6	200000
d ≈ 60 cm	400,-			
Schlitzwand Einphasen-Verfahren mit Glasbarrieren				
- doppelschalig Variante I	200,-			
- mittig Variante II	210,-			
- doppelschalig Variante III	230,-			

## 4.4 Systeme der nachträglich hergestellten horizontalen Sohlabdichtungen

### 4.4.1 Übersicht

In Tabelle 4.3 sind mögliche Verfahren aufgelistet. Die Herstellung basiert im wesentlichen auf Elementen der Injektionstechnik und aus dem Stollen- und Tunnelbau.

Von Stollen aus lassen sich Injektionsschirme oder überschnittene Säulen und Lamellen herstellen. Bergmännisch vorgetriebene Stollen, die sich überschneiden oder aneinandergereiht sind und mit Füllmassen abgedichtet sind, ergeben ebenfalls durchgehende Sohlabdichtungen.

Bei der Herstellung von Injektionssohlen unter Altlasten sind viele Faktoren zu berücksichtigen. Bei Injektionen von der Oberfläche aus müßte der Deponiekörper durchörtert werden. Ein weiteres Problem resultiert aus der Art und dem Gehalt an Schadstoffen im Boden und deren Wirkung zur Zeit der Herstellung der Injektionssohle und nach deren Fertigstellung auf die Injektionssohle selbst. Injektionssohlen sind überwiegend als Kombinationselement mit vertikalen Dichtwänden sinnvoll.

Es sollte die Durchörterung des Deponiekörpers vermieden werden um zu verhindern, daß abgelagerte Behälter mit Schadstoffen durchstoßen und so Stoffe frei werden, die neben der Bodenverunreinigung möglicherweise auch das Herstellpersonal gefährden. Dies kann bei geringen Abmessungen des Deponiekörpers durch Anordnung von Injektionsschrägbohrungen vermieden werden.

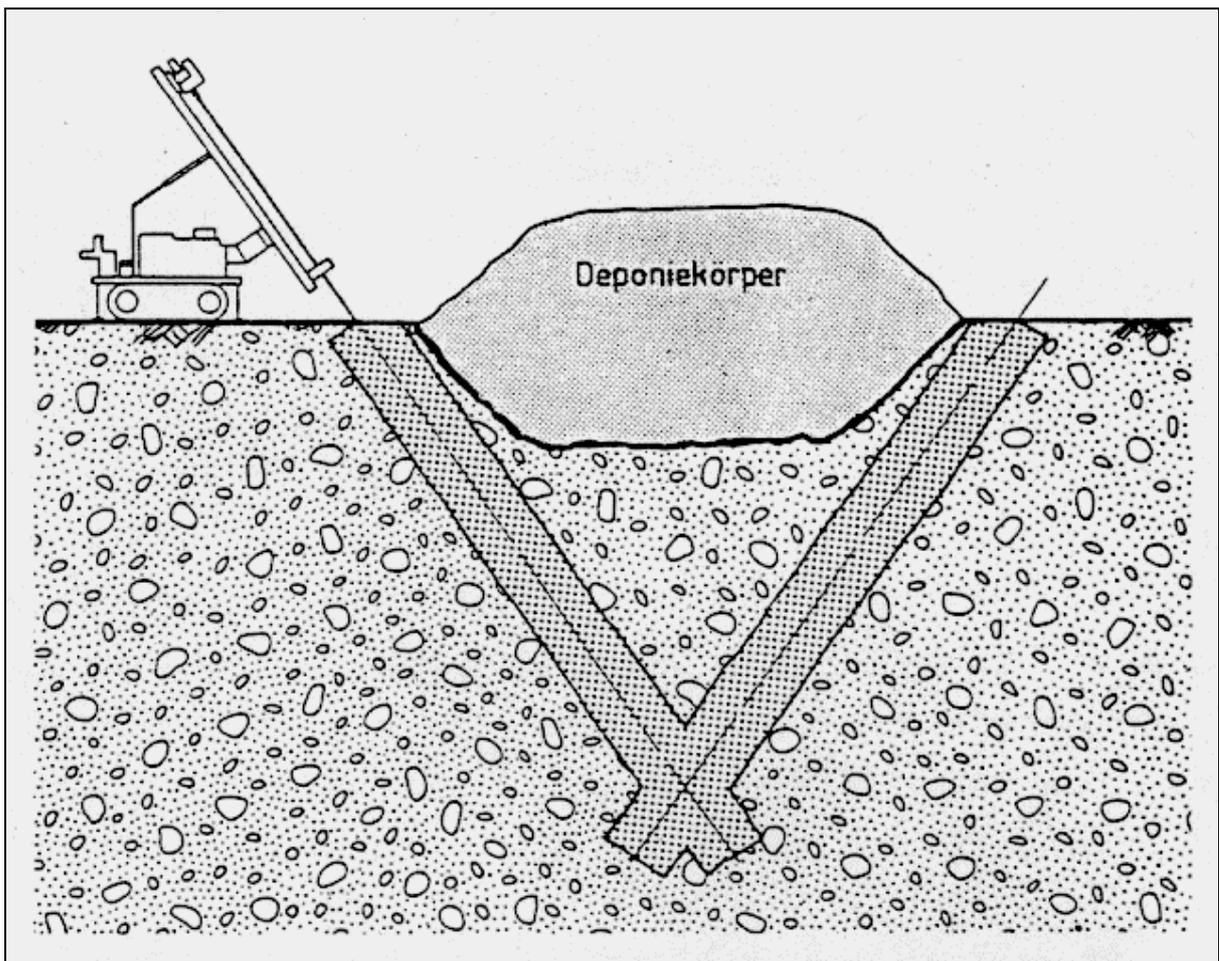
**Tabelle 4.3: Sohlabdichtungssysteme**

Verfahren	System
1. Injektion von der Geländeoberfläche	überschnittene Säulen oder Lamellen
2. horizontale Injektion	überschnittene Scheiben
	von Stollen aus mit geneigten und horizontalen Injektionsschirmen
3. Stollen mit Dichtungsteppich	von Stollen aus mit geneigten und horizontalen Injektionsschirmen aus mehreren Injektionshorizonten ev. mit Entwässerungsschichten
	durchgehende Sohle mit Düsenstrahlsäge
	Stahlelemente mit Dichtungsmasse.
	Schwerteinbauverfahren mit Rohrvortrieb
4. Sohlabdichtungen aus Stollen	nicht begehbare Sohle - überschnittene Stollen
	begehbare Sohle - Stollen mit nachträglich aufgefahrenen Zwickel
	Stollen dicht an dicht

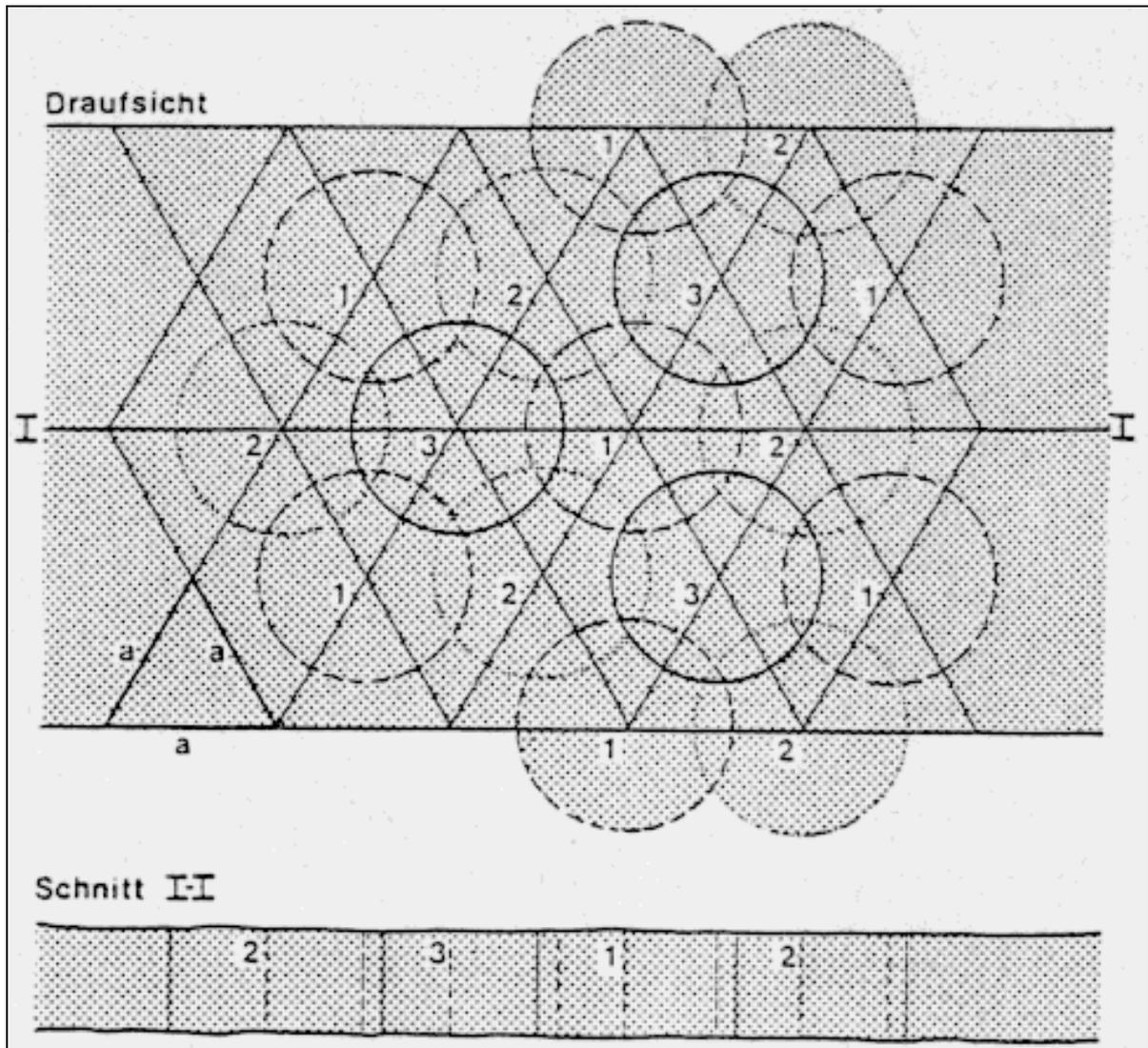
## 4.4.2 Injektion von der Geländeoberfläche

Entsprechend den Untergrundverhältnissen werden bei der Injektion verschiedene Bohr- und Verpreßmethoden angewendet. Neben der schon genannten Hochdruckinjektion sind die beiden wesentlichen Verfahren die Packer-Injektion im Festgestein und die Manschettenrohr-Injektion im Lockergestein (s.a. Kap. 8.2). Erläuterungen zu den Verfahren finden sich in DIN 4093. Die Injektionstechnik besteht darin, daß man zunächst mit weitständigen Injektionslochserien beginnt und dann sukzessive mittig zwischen den Löchern der vorhergehenden Serie die weiteren Injektionslöcher bohrt und verpreßt, bis sich die einzelnen Injektionskörper überschneiden.

Wesentlicher Vorteil von Injektionen und Hochdruckinjektionen ist die geometrische Flexibilität der Verfahren. Die Sohlelemente können aus unterschiedlichen Einzelementen aufgebaut und dem gegebenen Untergrund und eventuell vorhandener Bebauung angepaßt werden. Die Einkapselung von lokal begrenzten Kontaminationsbereichen ist in Bild 4.13 dargestellt. Die Möglichkeit der Herstellung einer durchgehenden Injektionssohle, allerdings mit Durchörterung des Deponiekörpers, veranschaulicht Bild 4.14.



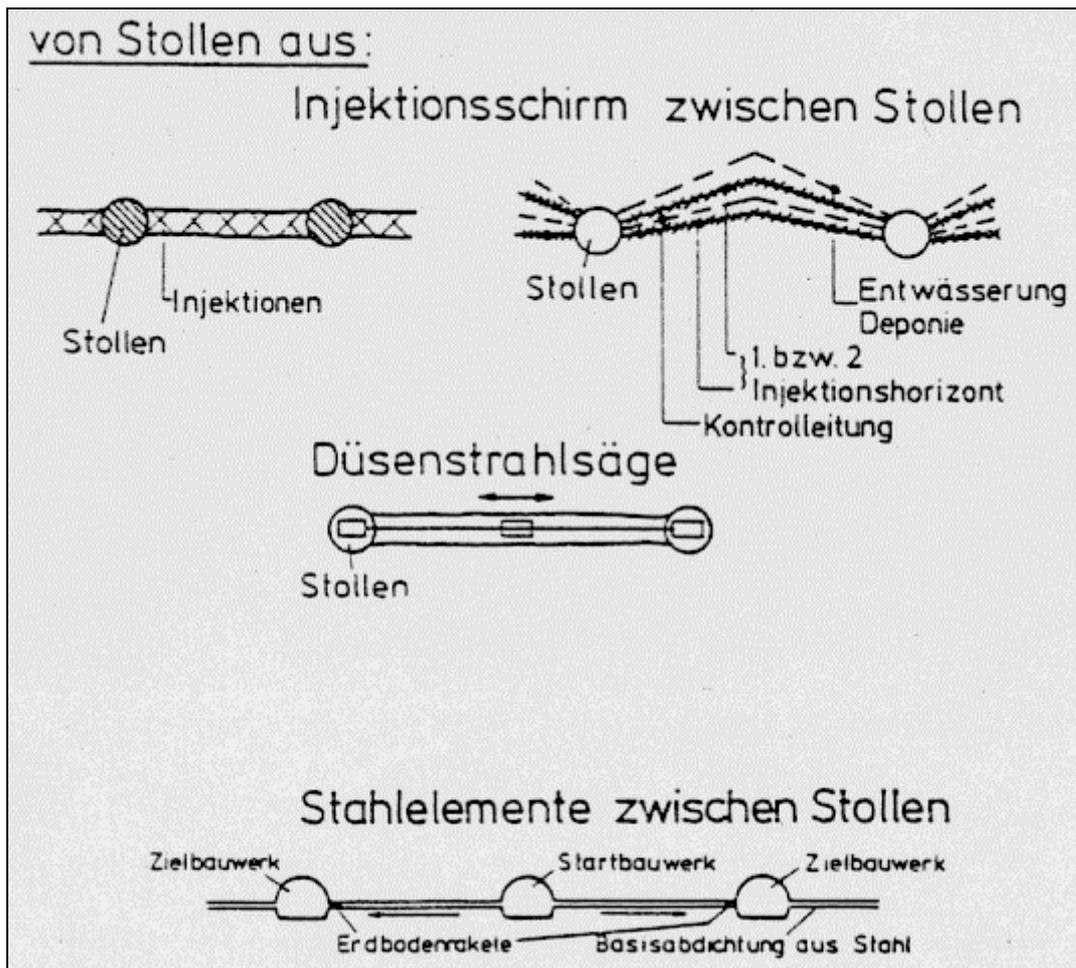
**Bild 4.13: Einkapselung von lokal begrenzten Kontaminationsbereichen**



**Bild 4.14: Horizontale Sohlen durch Anordnung der überschrittenen SOILCRETE-Scheiben im Dreiecksraster**

### 4.4.3 Stollen mit Dichtungsteppich

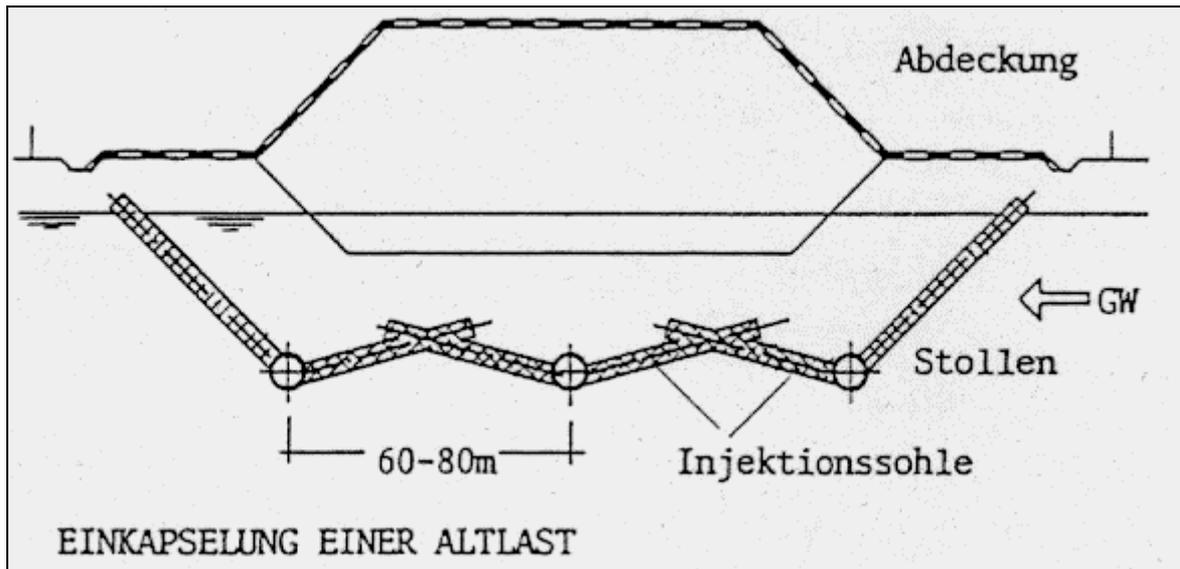
Die Herstellung von Injektionsschirmen vom Stollen aus umfaßt im wesentlichen die in Bild 4.15 dargestellten Systeme. Die Injektionsschirme sind entweder horizontal oder geneigt zwischen den Stollen angeordnet (Bild 4.16) und können zusätzlich mit einer auch von den Stollen hergestellten Entwässerungsschicht überlagert werden. Die Anordnung von mehreren Injektionshorizonten bietet die Möglichkeit zwischen diesen eine Kontrolleitung als Warnsystem für Undichtigkeiten anzuordnen.



**Bild 4.15: Stollen mit Dichtungsteppich**

Während diese Injektionsschirme durch klassische Injektionsbohrungen und anschließender Verpressung hergestellt werden, liefert ein von der Firma Züblin pateniertes Verfahren durch eine horizontal zwischen zwei Stollen verlaufende Düsenstrahlsäge die Herstellung einer durchgehenden horizontalen Sohle. Über die Düsenstrahlsäge wird wie bei den Injektionsbohrungen Injektionsgut in den Untergrund verpreßt.

Des weiteren gibt es Konstruktionskonzepte, Stahl als Trag- und Dichtungselemente einzusetzen. Der Hohlraum wird mit Dichtungsmasse verpreßt. Die Stahlelemente werden mit einer Erdbodenrakete vorgetrieben.



**Bild 4.16: Injektionssohle aus geneigten und horizontalen Injektionsschirmen, von Stollen aus verpreßt**

Die "Arbeitsgemeinschaft Altlast-Nachträgliche Deponiebasisabdichtung" der Firmen Kunz GmbH, Niederberg-Chemie und Ed. -Züblin bietet eine weitere nachträgliche Sohlabdichtung mit dem Schwerteinbauverfahren an (Bild 4.17). Dieses Verfahren erlaubt im Schutze eines Schwertvortriebs den nachträglichen Einbau verschiedener Abdichtungssysteme

- einfache mineralische Dichtung
- Kombinationsdichtung mit Kunststoffdichtungsbahnen und mineralischer Dichtung
- mehrlagige Dichtungen
- Fassung von Sickerwässern.

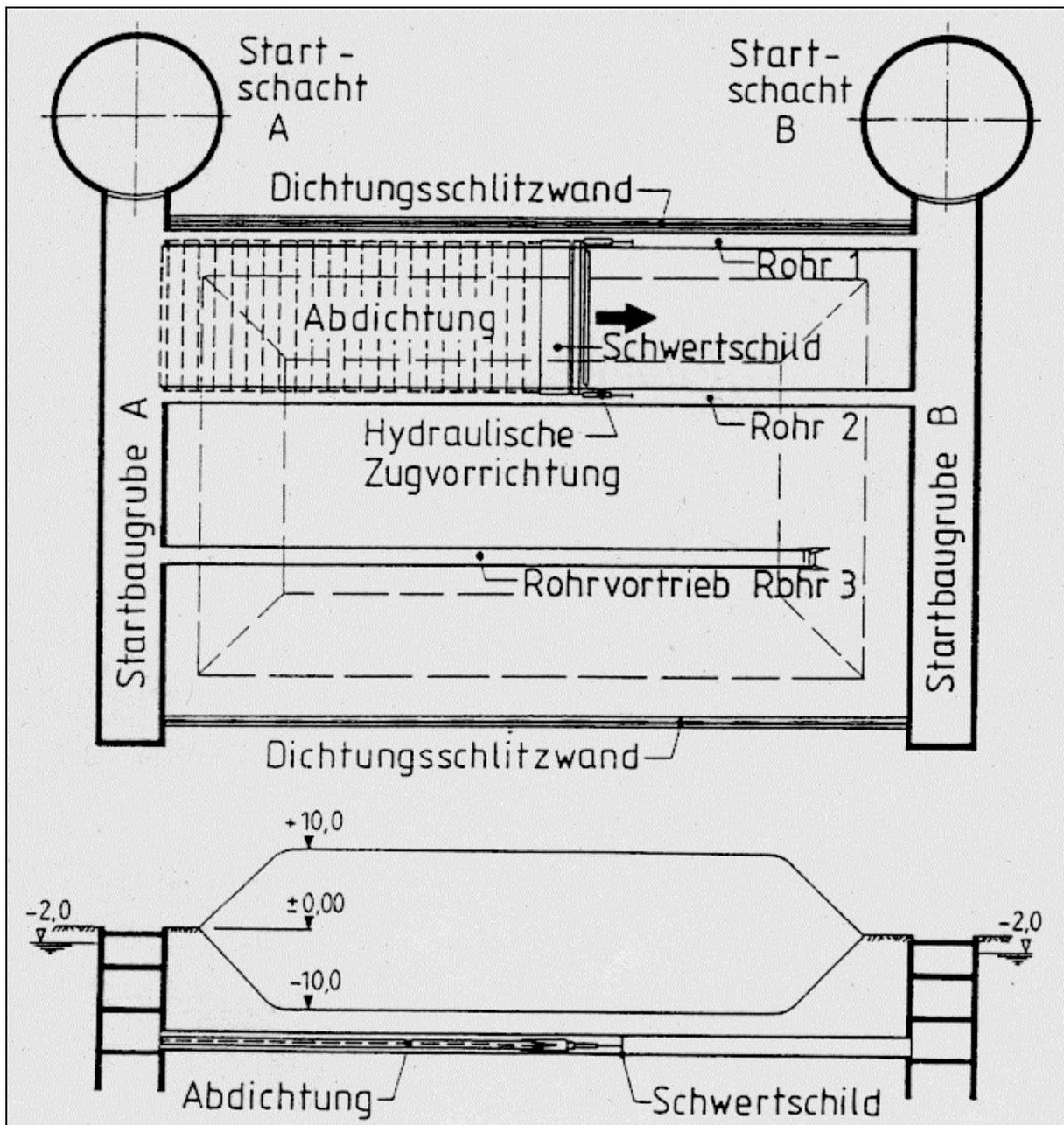


Bild 4.17: Schwerteinbauverfahren

#### 4.4.4 Sohlabdichtungen aus Stollen

Im Tunnelbau und Leitungsbau praktizierte Vortriebsbauweisen können auch auf die nachträglich herzustellenden horizontalen Sohlabdichtungen angewendet werden. Die begehbaren und nicht begehbaren Stollen werden entweder überschritten und dann mit erhärtenden Suspensionen verpreßt. Da die Überschneidung und je nach Baugrund und herzustellender Länge gewisse Vortriebszeiten zu berücksichtigen sind, bei denen der Anschnitt bereits erhärteter Suspensionen ein bautechnisches Problem darstellt, sind auch Stollen dicht an dicht oder Stollen mit nachträglich aufgefahretem Zwickel möglich (Bild 4.18).

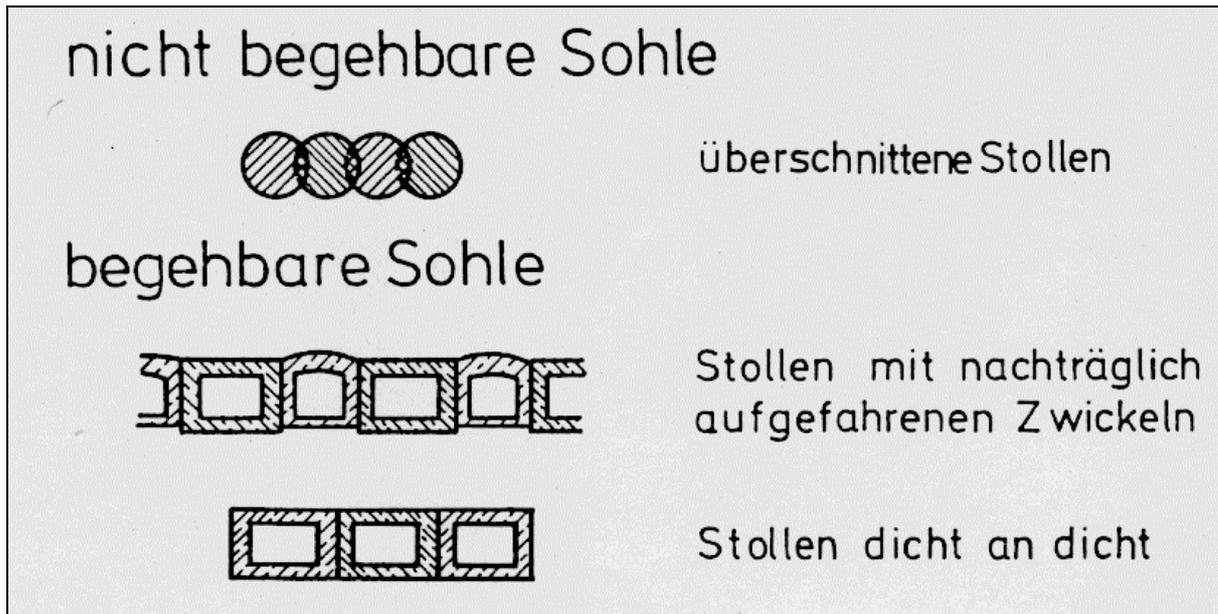


Bild 4.18 : Sohlabdichtungen aus Stollen

#### 4.4.5 Verbindung der horizontalen und vertikalen Dichtungselemente

Um den gesamten Altdeponiekörper sicher abzudichten, müssen die horizontalen und vertikalen Dichtungselemente wirksam verbunden und diese Verbindung sicher abgedichtet werden. In Bild 4.16 ist das Beispiel mit geneigten Injektionen dargestellt. In Abhängigkeit von dem Vortriebsverfahren müssen bei der Verfahrensauswahl folgende Kriterien berücksichtigt werden :

- Tiefenlage der Deponie
- Vortriebsverfahren (Abschnitt 4.4.4 und 4.4.5)
- Bauverfahren für vertikale Abdichtung (Stahlpundwand, Dichtungsschlitzwand, Schmalwand, Hochdruckinjektionssäulen)
- Grundwasserverhältnisse
- Festigkeit des Untergrundes.

Während Injektionen, insbesondere Hochdruckinjektionen, an mineralische Dichtwände (Dichtungsschlitzwand, Schmalwand, Hochdruckinjektion) ohne Schwierigkeiten angeschlossen werden können, sind die horizontalen Stahlelemente nur einzubringen in

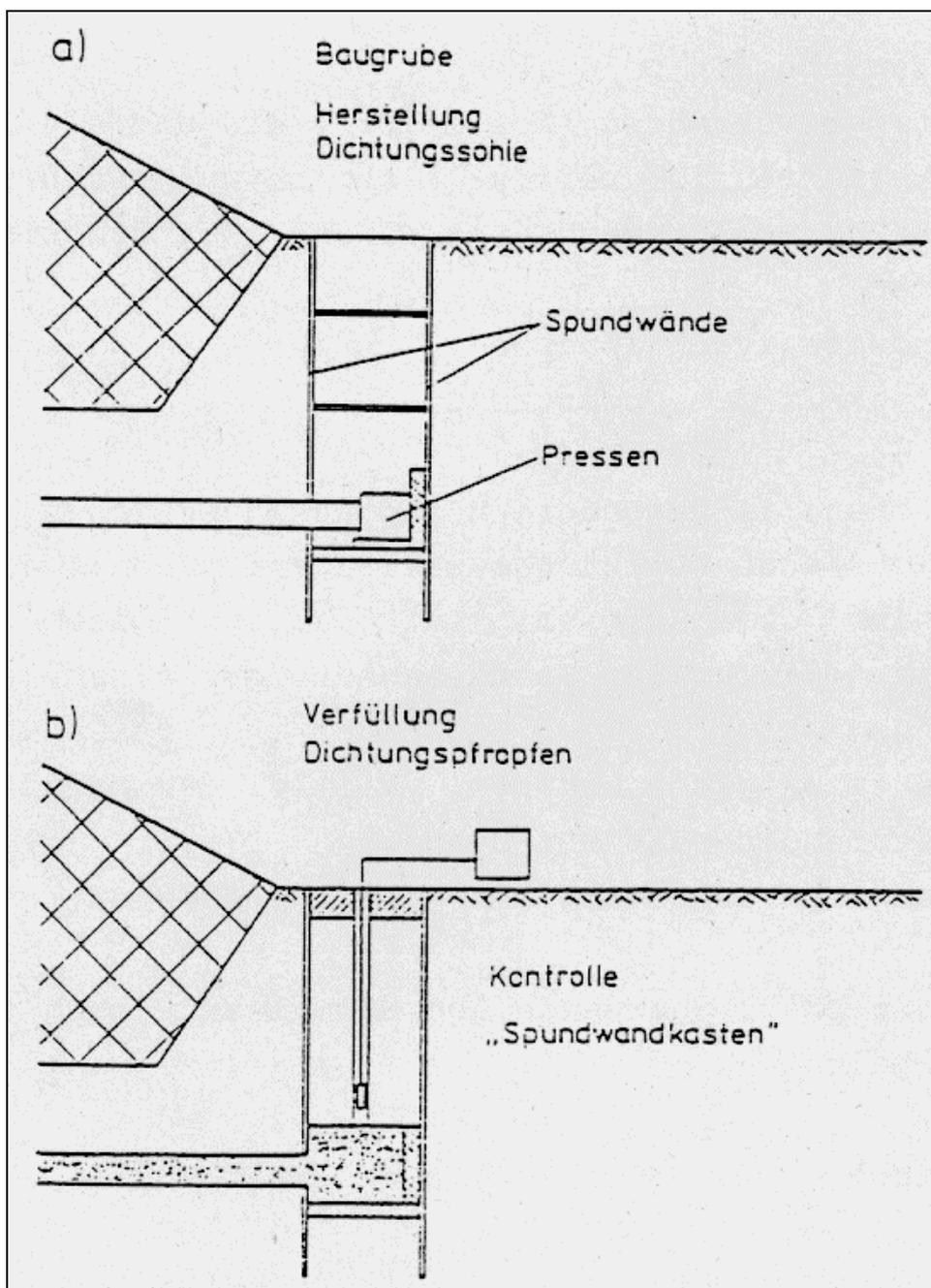
- offener Baugrube aus zwei parallel zueinander verlaufenden Stahlpundwänden
- einem Arbeitsstollen mit Schmalwandkästen.

Die abgedichteten Stahlpundwände und Schmalwandkästen dienen dann als vertikale Abdichtung.

a) offene Baugrube

Das Erdreich zwischen beiden Spundwänden wird entfernt und im Auflagerbereich unten mit einer Betonsohle versehen. Danach wird eine Stahlbetondruckwand als Pressenwiderlager gegen die Spundwand betoniert. Für die Durchführung der Vorpreßelemente durch die Spundwand wird in der Größe des Bohrkopfes die Spundwand aufgeschnitten.

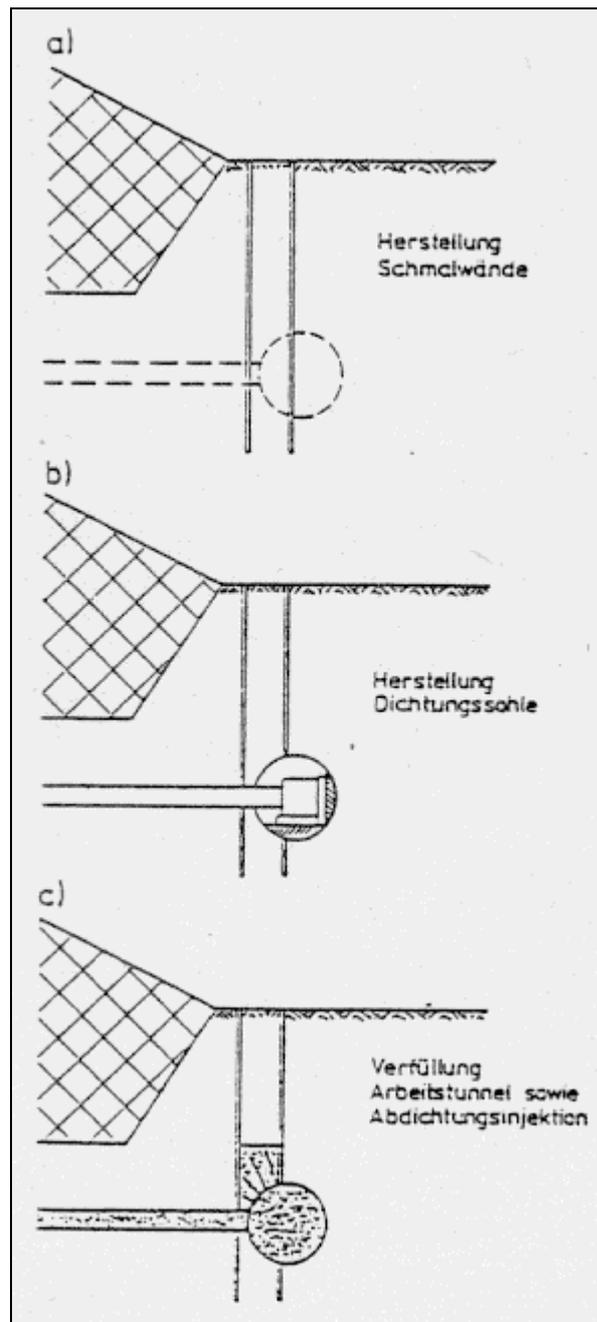
Nach Fertigstellung der Sohlabdichtung wird in dem unteren Bereich der Baugrube eine mineralische Dichtungsmasse lagenweise eingebracht und optimal verdichtet. Die weitere Auffüllung erfolgt mit einem nichtbindigen Material, so daß in Verbindung mit einigen Spundwandquerschotten Spundwandkästen entstehen, in denen durch Pegelmessungen die Dichtigkeit kontrollierbar ist (Bild 4.19).



**Bild 4.19: Herstellung einer Dichtungssohle mit offener Baugrube, Verbindung der horizontalen und vertikalen Dichtungen /85/**

## b) Arbeitsstollen

Bei Altdeponien mit größerer Breite kann die Dichtungssohle von jeweils parallel in entsprechendem Abstand voneinander verlaufenden Stollen hergestellt werden. Der Stollenvortrieb kann so erfolgen, daß die äußere Schmalwand zerschnitten wird (Bild 4.20). Von diesem Arbeitsstollen erfolgt dann die Herstellung der Dichtungssohle durch Anschnitt und Durchfahren der inneren Schmalwand. Nach Herstellung der Dichtungssohle wird der Arbeitstunnel sowie der untere Teil der Schmalwandkästen mit Abdichtungsmaterial verfüllt bzw. injiziert. Doppelte Dichtungsschlitzwände sind ebenfalls einsetzbar.



**Bild 4.20: Herstellung der Dichtungssohle mit Arbeitsstollen, Verbindung der horizontalen und vertikalen Dichtungen /85/**

## 5. Anforderungen an Dichtungsmaterialien

### 5.1 Einsetzbare Materialien

Die wichtigsten Materialien sind in Tab. 5.1 aufgelistet. Obwohl die Materialien für Dichtwände und Sohlen aus den gleichen Komponenten bestehen, muß hier je nach dem Bauverfahren unterschieden werden.

#### a) Dichtwand

Materialien mit langen Verarbeitungszeiten, die eine hohe Fließfähigkeit, geringe Sedimentation und eine auf den Boden abgestimmte Festigkeit haben.

#### b) nachträgliche **Sohlabdichtung**

Die wichtigsten Materialeigenschaften sind Fließfähigkeit, geringe Sedimentation, rasches Abbinden nach der Verfüllung sowie hohe Festigkeit. Bezogen auf eine 50 m hohe Auflast, bei Wichten des Mülls zwischen 10 bis 20 kN/m<sup>3</sup>, ergeben sich erforderliche Festigkeiten zwischen 500 bis 1 000 kN/m<sup>2</sup>.

**Tab. 5.1: Materialien für Dichtwände und Dichtsohlen**

Einkapselungssystem	Materialien
Dichtwandssysteme + Sohlabdichtungen	Bentonit Tonmehl hydraulische Bindemittel mineralische Füllstoffe Sand-Kies-Gemische Silane Injektionsgele
Kombinationsdichtungen	Kunststoffdichtungsbahnen Stahl Kunststoffdichtungen Glas

Die Materialien für Dichtwandssysteme und Sohlabdichtungen sind von der Art gleich, sie unterscheiden sich von der Qualität und Quantität.

## 5.2 Forderungen an die Dichtungen infolge Standortbedingungen

Die Herstellung der vertikalen und horizontalen Dichtungssysteme richtet sich zum einen nach dem Bauverfahren und vorliegendem Untergrund und zum anderen nach der Machbarkeit bei vorliegender Kontamination (Tab. 5.2). Hieraus ergeben sich physikalische und chemische Beanspruchungen der Dichtsysteme und Baustoffe. Da mit der Einkapselung auch immer eine hydraulische Maßnahme und somit eine Änderung bzw. Vermeidung des Sickerwasserzuflusses und -austritts verbunden ist, kann unter Berücksichtigung der Standorttypen damit gerechnet werden, daß der Einfluß von Kontaminationen, die auf die Dichtwände wirken, mit der Zeit geringer wenn nicht sogar praktisch ausgeschlossen wird. Es ist aber davon auszugehen, daß mögliche Kontaminationen weiterhin auf die Dichtsohle wirken können. Das bedeutet eine Abstimmung der einsetzbaren Baustoffe auf Bauverfahren und Abdichtungsmaßnahme. Wenn bereits durch die Grundwassersituation Stoffe in die unmittelbare Umgebung der Einkapselungsmaßnahme ausgewaschen wurden, ist damit zu rechnen, daß diese Stoffe weiterhin auf die Dichtelemente wirken.

Bei der Herstellung der Dichtwände und Dichtungssohle kommen die Materialien mit den Kontaminationen bei allen Standorttypen in Berührung. Die Kontaminationen wirken auf die Dichtungssohle ständig, ebenso auf die Dichtwände bei Standorttyp 3 und 7. Bei den Standorttypen 1, 2, 4 bis 6 ist nur teilweise eine Einwirkung im Gebrauchszustand gegeben.

**Tab. 5.2 : Anforderungen der Standorttypen an Bauverfahren**

Standort	Dichtwand	Dichtungssohle
1	stark grundwasserführende Schichten bereits kontaminierte Umgebung grobkörnigen Böden nicht standfeste Böden (Fließsand)	
2		Durchörterung bei stark unterschiedlichen Bodenparametern
3	Einbindung in Festgestein	Abtransport bzw. Verdrängung von sehr feuchtem oder nassem bindigen Material
4	inhomogene Bodenschichten	
5	drückendes Grundwasser	Richtungsgenauigkeit bei erhöhten Auftriebskräften
6	s. Standort 3	
7	Durchörterung härterer Bodenschichten	geneigte Vortriebstrasse

## 5.3 Physikalische und chemische Beanspruchung der mineralischen Baustoffe

Bei der physikalischen und chemischen Beanspruchung der mineralischen Baustoffe durch die Altlast ist zu unterscheiden :

- physikalische und chemische Beanspruchung während des Einbaus
- physikalische und chemische Beanspruchung nach dem Einbau der mineralischen Baustoffe.

### a) Dichtwand

- hydraulisches Gefälle durch unterschiedliche Wasserstände innerhalb und außerhalb des Deponiekörpers
- Durchströmung mit Sickerwasser oder Grundwasser
- Erosion durch Sickerwasser- oder Grundwasserströmung
- ungleiche Setzungen
- Erddruck

### b) Nachträgliche Sohlabdichtung

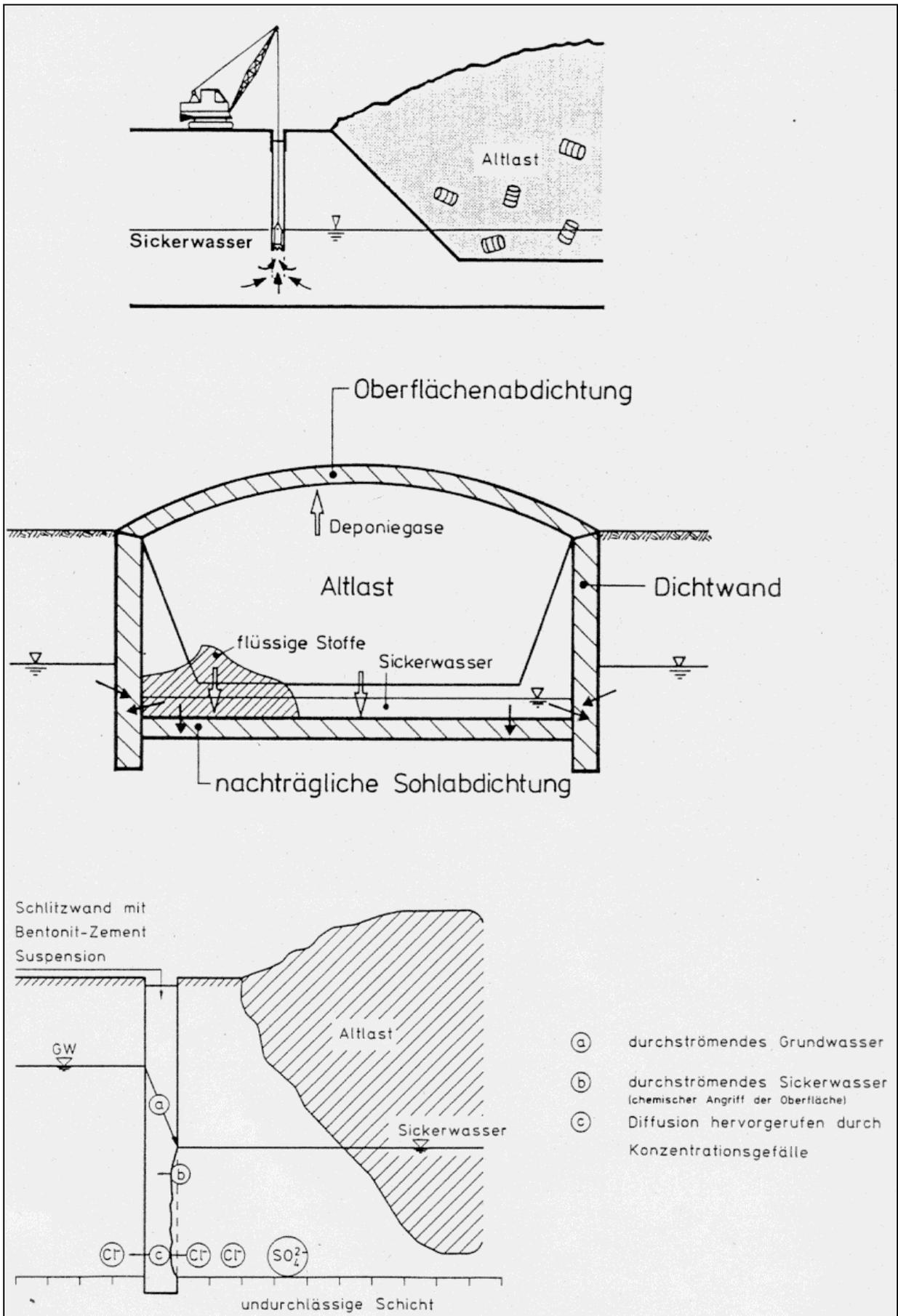
- statische Auflasten aus überlagernden Abfällen und Böden
- Scherkräfte und Verformungen bei ungleichmäßigen Setzungen
- Erosion durch Sickerwasser- oder Grundwasserströmung

Damit die mineralischen Baustoffe diesen Anforderungen genügen, ist es notwendig, insbesondere Kennwerte für Spannungs-Verformungs-Verhalten und Durchlässigkeit zu bestimmen und die Erosionssicherheit nachzuweisen.

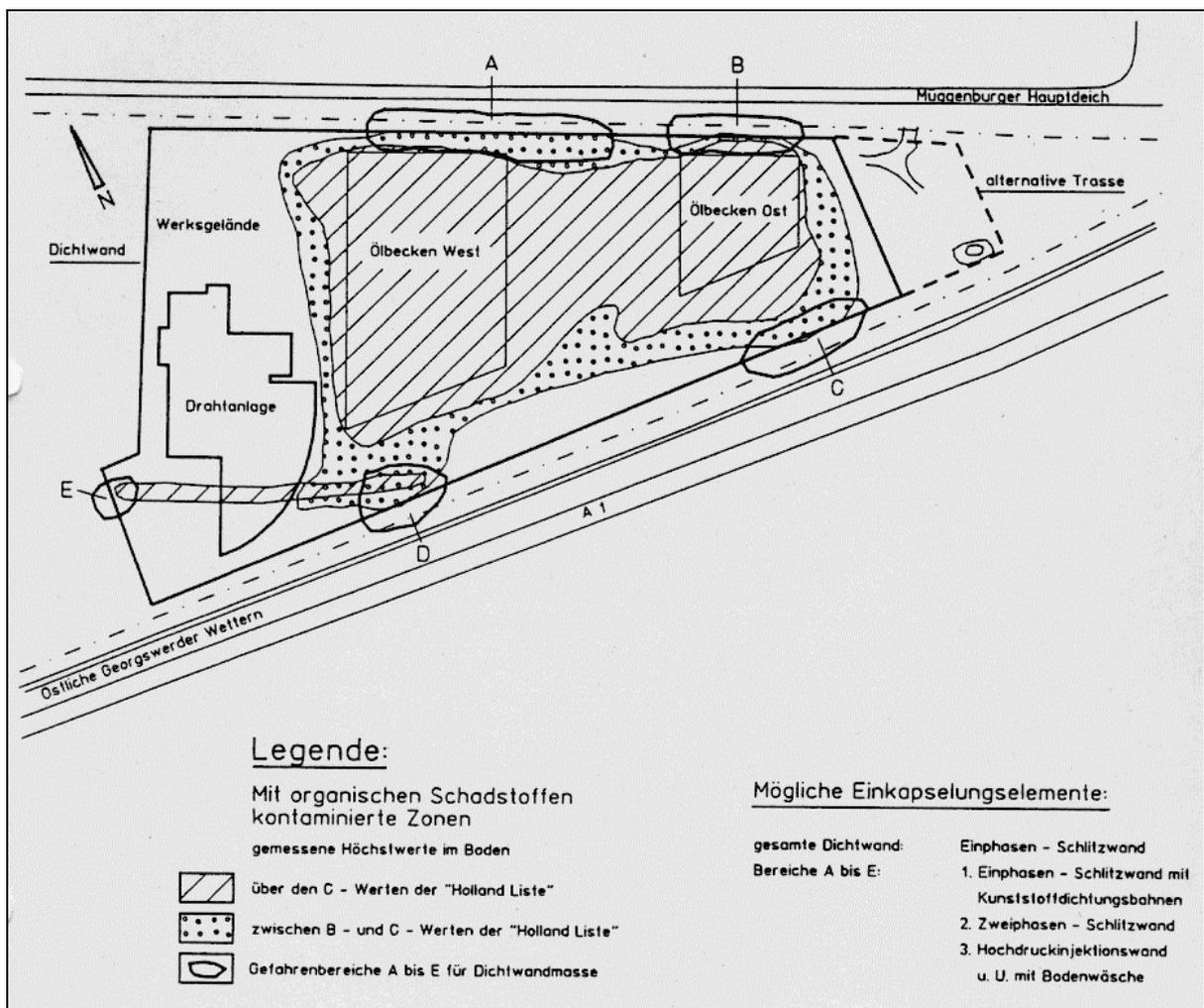
Die chemischen Beanspruchungen der Baustoffe ergeben sich aus dem möglichen Stoffeintrag von

- Deponiegasen in Oberflächennähe der Dichtwände
- Sickerwässern und flüssigen Inhaltsstoffen in und durch Dichtwände und Sohlabdichtungen
- kontaminierten Böden in Dichtwände und Sohlabdichtungen während der Herstellung.

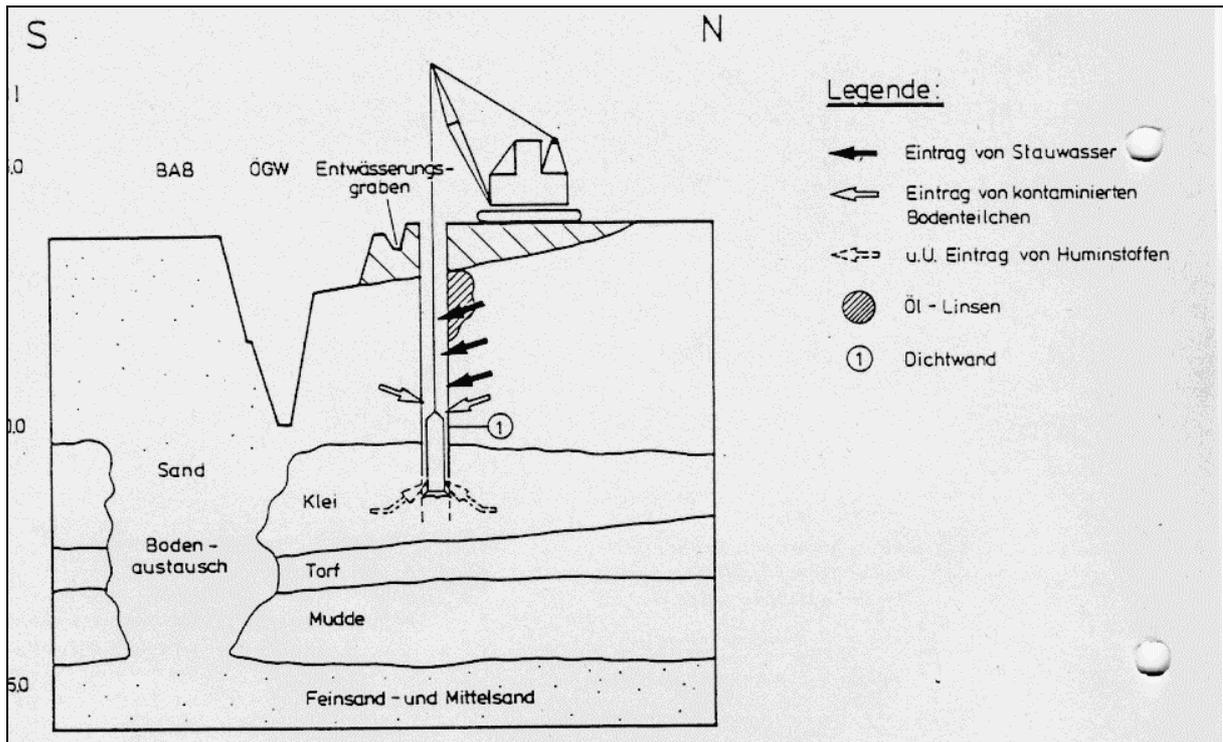
Für das Beispiel der Dichtwand ist den Bildern 5.1 und 5.2 der Stoffeintrag während der Herstellung und im Gebrauchszustand dargestellt.



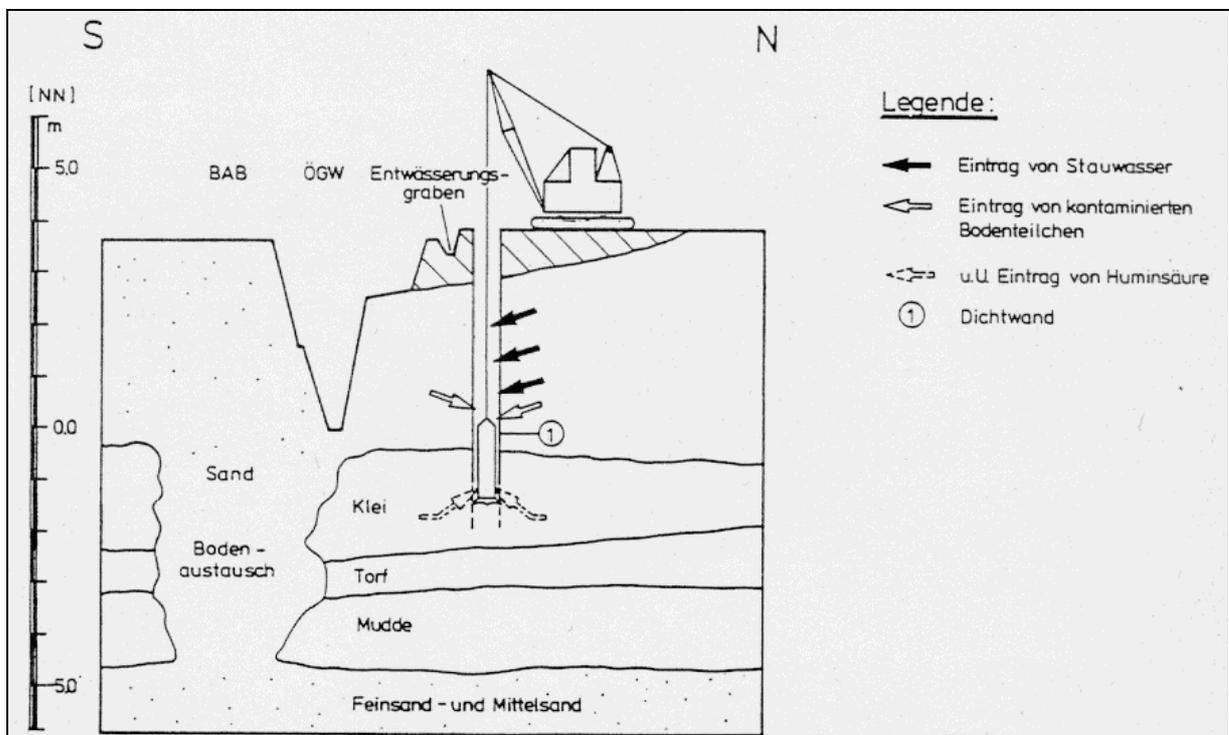
**Bild 5.1: Eintrag von Kontamination während der Herstellung und im Gebrauchszustand**



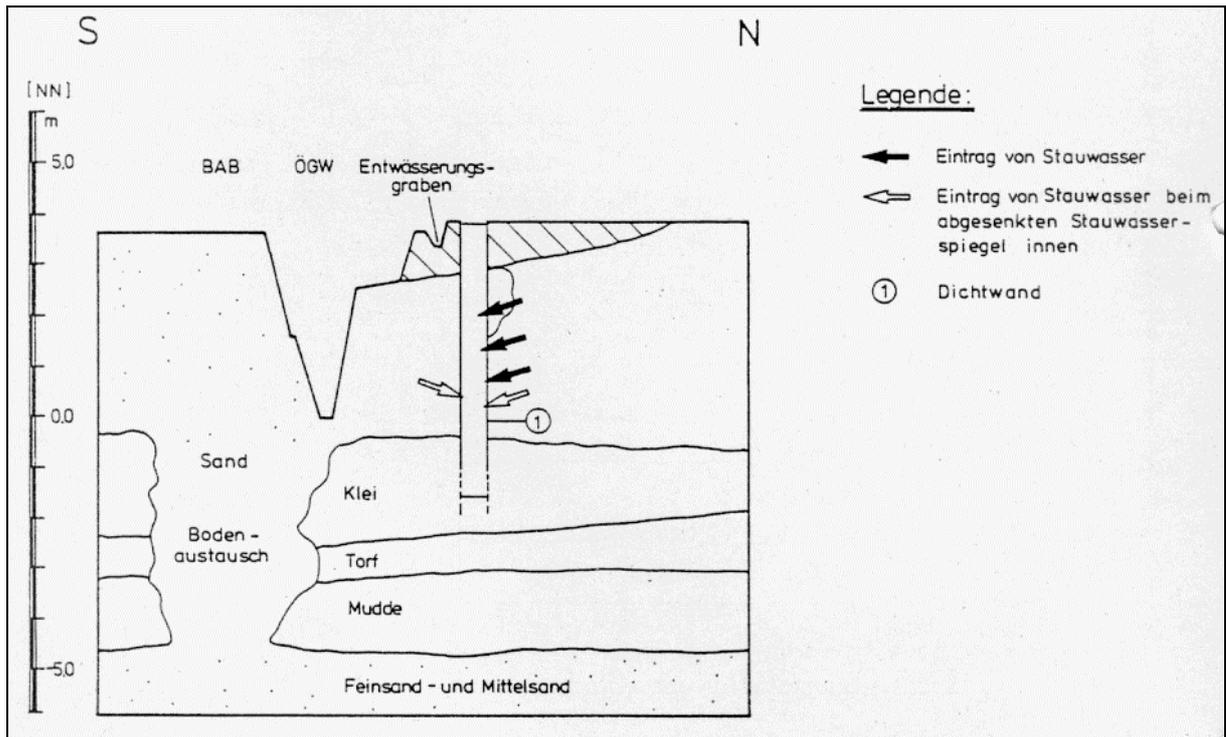
**Bild 5.2: Schadstoffeintrag in die Dichtwand bei der Herstellung und im Gebrauchszustand am Beispiel einer Altablagerung**



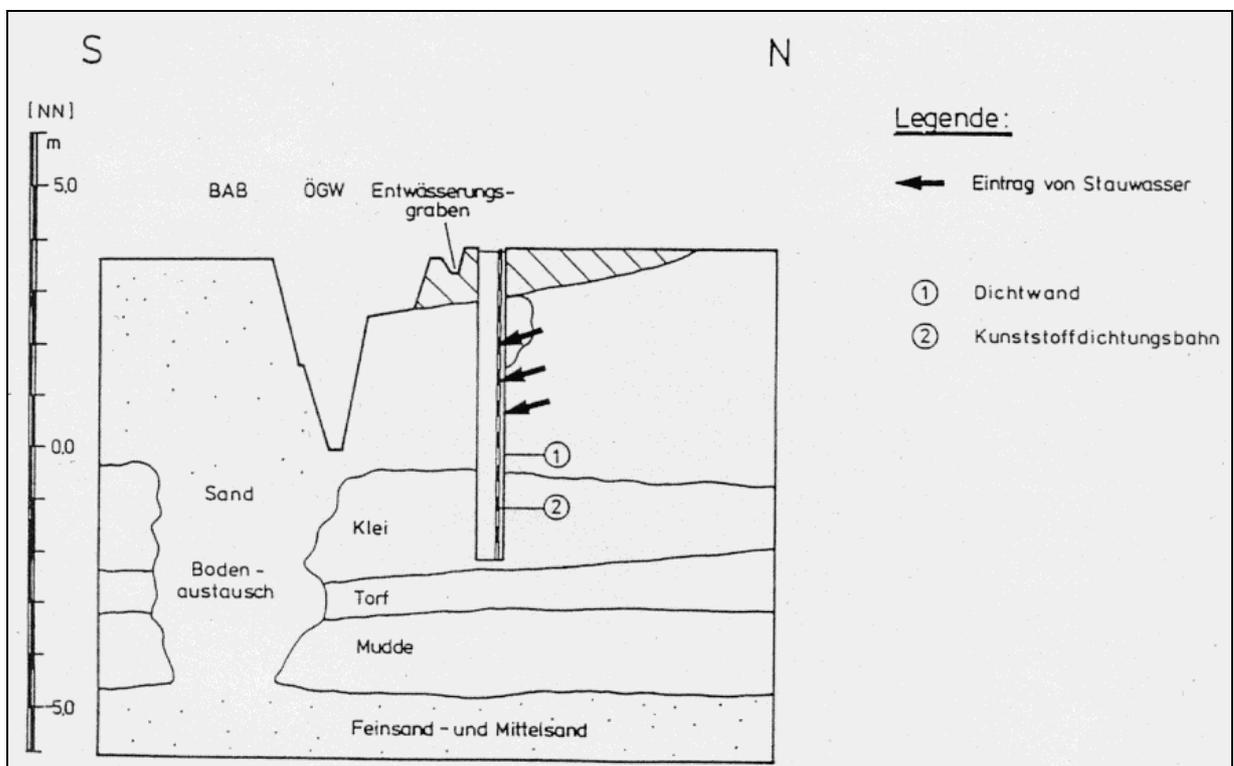
**Bild 5.2a: Herstellung der Dichtwand im Einphasen - Verfahren mit mineralischen Baustoffen in den Gefahrenbereichen A und B**



**Bild 5.2b: Herstellung der Dichtwand im Einphasen-Verfahren mit mineralischen Baustoffen in den Gefahrenbereichen C, D und E**



**Bild 5.2c: Erstarren und Erhärten der Dichtwand mit mineralischen Baustoffen**



**Bild 5.2d: Herstellung der Dichtwand im Einphasen-Verfahren mit Kunststoffdichtungsbahnen**

Die Baustoffe müssen auch bei der vorhandenen Kontamination abdichten und verfestigen. Der Stoffaustrag durch die mineralische Abdichtungsschicht soll so gering wie möglich sein. Zur Beurteilung einsetzbarer Baustoffe sind Kenntnisse über die chemische Zusammensetzung des Sickerwassers und über die bodenmechanischen, mineralogischen und chemischen Eigenschaften der Baustoffe notwendig.

Notwendige Untersuchungsparameter zur Charakterisierung von Sickerwasser hinsichtlich der chemischen Beanspruchung mineralischer Abdichtungsmaterialien sowie Untersuchungsmethoden zur Prüfung der Veränderung der chemischen Langzeitbeständigkeit mineralischer Abdichtungsmaterialien sind in /42/ enthalten.

Die Kunststoffdichtungsbahnen und Kunststoffdichtungen sind entweder zusammen mit den mineralischen Dichtstoffen wirksam oder in Verbund mit Stahlspundwänden direkt der Kontamination ausgesetzt.

## 6. Eigenschaften der Abdichtungsmaterialien

### 6.1 Übersicht der Komponenten

Mineralische Baustoffe für Einkapselungen sind:

- natürlicher Boden,
- Tone,
- hochquellfähige Tone (Bentonit),
- hydraulische Bindemittel (Zement)
- Füllstoffe.

Mit diesen Baustoffen werden Mischungen mit geringer Durchlässigkeit hergestellt. Jedes Abdichtungssystem verlangt eine Mischung, die in ihrer Herstellung, Zusammensetzung und Eigenschaft eigens auf das System und den einzukapselnden Schadstoff abgestimmt ist.

#### a) Dichtwand

Mineralische Baustoffe für Dichtwandmassen sind:

- Bentonit (zementstabiler Na-Bentonit, Ca-Bentonit)
- Tonmehl
- Attapulgit
- hydraulische Bindemittel (Zement)
- mineralische Füllstoffe (Sand-Kies-Gemische, Quarzmehl, Kalksteinmehl)

Aus Bentonit und Wasser werden Suspensionen hergestellt, die nach Zugabe von Füllstoffen und Bindemitteln nach längerer Verarbeitungszeit erhärten.

In diese Suspensionen werden Kunststoffdichtungsbahnen, Stahl- oder Glaselemente gestellt. Dichtwände aus Stahlpundwänden sind ebenso einsetzbar.

#### b) Nachträgliche **Sohlabdichtung**

Mineralische Baustoffe für Sohlabdichtungen sind:

- Bentonit (Na-Bentonit, Ca-Bentonit)
- Ton
- aufbereitete Böden
- hydraulische Bindemittel (Zement)
- mineralische Füllstoffe (Sand-Kies-Gemische, Quarzmehl, Kalksteinmehl).

Diese Baustoffe werden je nach der mengenmäßigen Zusammensetzung zu Pasten, Gelen oder fließfähigen Suspensionen gemischt, die nach längerer Verarbeitungszeit erhärten. Sie werden entweder in den Boden injiziert oder in vorbereitete Hohlräume gepreßt. Auch hier können Stahlelemente mit mineralischen Füllmassen in den Boden gepreßt werden.

#### c) **Kunststoffe**

Kunststoffdichtungsbahnen für Dichtwände werden meist in HDPE gefertigt. Soweit sie aus anderen Materialien bestehen müssen sie ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen.

#### d) **Stahl**

Stahl als Spundbohle oder Sohlelement wird je nach Anforderung aus gegen Korrosion geschütztem Stahl verwendet.

## 6.2 Notwendige Angaben und Untersuchungen

### 6.2.1 Mineralische Komponenten

Alle **mineralischen Baustoffe**, die bei der Einkapselung der Altlasten zum Einsatz kommen, müssen auf ihre Eignung untersucht werden. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der eingesetzten Baustoffe bestimmen

- Herstellung
- Verarbeitbarkeit
- Einbaukriterien
- Spannungs-Verformungs-Verhalten
- Durchlässigkeitsverhalten
- chemische und mechanische Langzeitbeständigkeit.

Dazu ist es notwendig, Art und Zusammensetzung des Abdichtungsmaterials zu kennen. Die entsprechenden Informationen sind je nach den verwendeten Komponenten der Abdichtungsschichten zu ermitteln.

#### a) Komponenten der **Dichtwandmassen**:

- Bentonit (Na- oder Ca-Bentonit)
- hydraulische Bindemittel
- mineralische Füllstoffe
- Wasser
- Zusatzmittel

Folgende Angaben sind notwendig /42/:

#### Bentonit

- Beschreibung gemäß DIN 4127
- Wasseraufnahme
- Montmorillonitgehalt
- Ionenaustauschkapazität

Für Ca-Bentonit wird die Beschreibung gemäß DIN 4127 nur hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung empfohlen, da aus Ca-Bentonit und Wasser keine stabilen Mischungen herstellbar sind. Die Fließgrenzwerte und Filtratwasserabgaben der Suspensionen sind nicht mit denen von Na-Bentonitsuspensionen vergleichbar.

#### Hydraulische Bindemittel

- für Zement Angaben nach DIN 1164
- für Sonderzemente HOS-Anteil

#### Mineralische Füllstoffe

- bodenphysikalische Beschreibung (Kornform, Korngrößenverteilung, Gehalt an organischen Bestandteilen, Korndichte, Kalkgehalt, Wassergehalt, Wasseraufnahme)
- mineralogische und chemische Beschreibung

#### Wasser

- Angaben nach DIN 4030 incl. Gesamthärte und Karbonathärte

#### Zusatzmittel

- Art und Wirkungsweise des Stoffs
- Dichte
- Prüfzeugnisse

b) Die Komponenten für nachträgliche **Sohlabdichtungen** entsprechen grundsätzlich denen der Dichtwandmassen, ggf. ergänzt um herstellungsbedingte Einmischung von anstehendem Boden.

#### c) **Bodenphysikalische Klassifizierung** der Baustoffe

Die Kennwerte der bodenphysikalische Klassifizierung für die verwendeten Tone, Bentonite und Böden werden entsprechend der Tabelle 6.1 bestimmt.

**Tabelle 6.1: Kennwerte zur bodenphysikalischen Klassifizierung von mineralischen Abdichtungsmaterialien nach den GDA-Empfehlungen**

Parameter	zu bestimmen nach
Korngrößenverteilung	DIN 18123
Zustandsgrenzen (Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze, Plastizitätszahl, Konsistenzzahl)	DIN 18122
Gehalt an organischen Bestandteilen (Glühverlust oder Naßoxidation)	DIN 18128 (in Vorber.)
Korndichte	DIN 18124
Kalkgehalt	DIN 18129 (in Vorber.)
Wasseraufnahmevermögen	nach Enslin/Neff
Wassergehalt	DIN 18121
Dichte	DIN 18125

Erste Hinweise über die Art der Tonminerale liefert Tabelle 6.2.

#### d) Untersuchungsparameter

**Tabelle 6.2: Mineralbestand, Bildsamkeitsgrenzen, Wasseraufnahmefähigkeit und Schrumpfgrenze (in %) von Böden nach /30/**

Erdstoff	Mineral	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	w <sub>A</sub>	w <sub>s</sub>
schluffiger Ton	Kaolinit und Quarz	30-60	10-20	60	10
Rohton	Kaolinit	60-80	20	80	20
Rohton	Ca-Montmorillonit	200	40	300	30
Rohton	Na-Montmorillonit	500	60	700	40

Die mineralogische Analyse ergibt, ob es sich um die Tonminerale Montmorillonit, Illit, Kaolinit usw. handelt. Aus diesen mineralogischen Zusammensetzungen lassen sich mögliche oder wahrscheinliche Wechselwirkungen zwischen Sickerwässern und den Tonmineralien erfassen. Darüber hinaus sind sie wichtig zur Beurteilung der Wechselwirkung von Bentonit und Zement.

Die wichtigsten Untersuchungsparameter sind

- Korngrößenverteilung am Feinstkorn  $\leq 0,002 \text{ mm} = 2 \text{ }\mu\text{m}$
- Ionenaustauschkapazität
- Röntgenographische Analyse
- Wasseraufnahme
- Karbonatanteil.

Mit der Korngrößenverteilung und der röntgenographischen Analyse lassen sich die chemisch aktiven Tonminerale bestimmen, die sich fast ausschließlich in der Fraktion  $\leq 2 \text{ }\mu\text{m}$  befinden; Kaolinit geht meist auch in die Fraktion zwischen 2 und 6,3  $\mu\text{m}$ .

Die Ionenaustauschkapazität (Tabelle 6.3) ist wichtig zur Beurteilung der Wechselwirkung von Ton mit Sickerwässern, aber auch hydraulischen Bindemitteln wie z.B. Zement. Sie bestimmt indirekt den Anteil quellfähiger Tonminerale, die durch Wasseraufnahme der Feinstkornfraktion Hinweise auf das Quellvermögen geben.

**Tabelle 6.3: Ionenaustauschkapazitäten von verschiedenen Tonmineralen nach /42/**

Tonmineral	Ionenaustauschkapazität (mval/100 g)
Kaolinit/Fireclay	25
Illit	50
Halloysit	100
Attapulgit	100
Mixed-Layer-Minerale	100
Montmorillonit	200

## 6.2.2 Kunststoffdichtungsbahnen

Die eingesetzten **Kunststoffdichtungsbahnen** sollten eine Mindestdicke von 2 mm aufweisen und eine hohe Beständigkeit gegen kohlenwasserstoffhaltige Deponiesickerwässer haben. Die Beständigkeit kann entsprechend der "Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen", herausgegeben vom Landesamt für Wasser und Abfall, NRW, Mai 1985 überprüft werden. Sie müssen eine auf das Einbauverfahren abgestimmte Zug- und Reißfestigkeit haben. Da die Dichtwandmassen eine gewisse Durchlässigkeit behalten, muß die Permeationsrate durch die Kunststoffdichtungsbahn so gering wie möglich sein (s. auch Abschnitt 3.4.2)

## 6.2.3 Stahl

Neben der Angabe der **Stahlsorte** sind Kenntnisse über die Korrosionsneigung der Stähle in verschiedenen Prüfflüssigkeiten (s. Abschnitt 6.3.2) wichtig. Werden Spundbohlen in den Erdboden gerammt, so sind auch mögliche Stahlkorrosionen durch die Böden zu berücksichtigen.

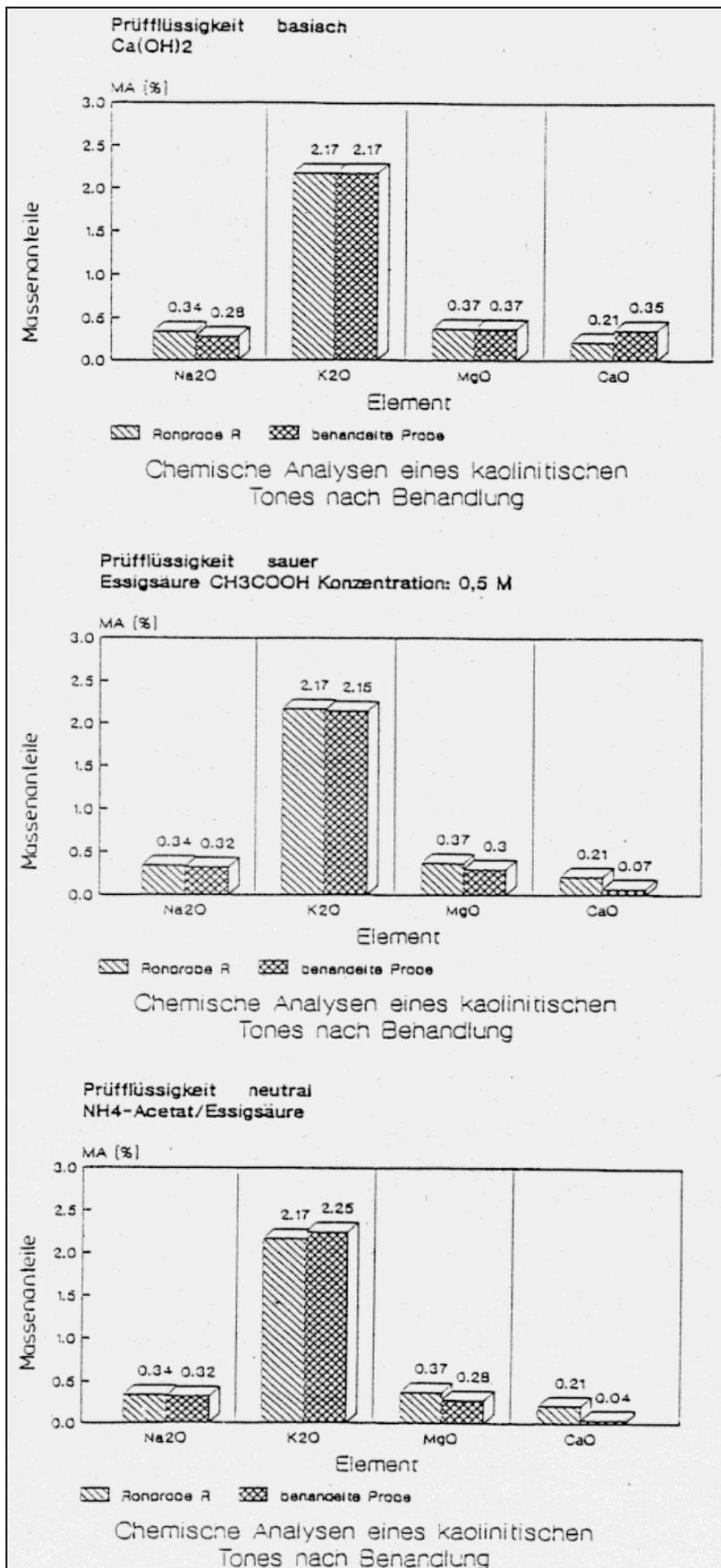
## 6.3 Physikalische und chemische Eigenschaften der Komponenten

### 6.3.1 Mineralische Baustoffe

#### 6.3.1.1 Ton

Die für das Abdichtungsverhalten von **Ton** wichtigen Tonminerale der Fraktionen  $< 2 \mu\text{m}$  Korndurchmesser sind vor allem Montmorillonit, Illit, Kaolinit und Chlorit.

Die Anforderungen an eine mineralische Abdichtungsschicht leiten sich neben der bautechnischen Herstellbarkeit aus dem Zusammenwirken zwischen Sickerwasser und Tonmineralen ab. Aus kristallchemischen Untersuchungen von Kohler /57/ ist bekannt, daß organische Säuren und Basen zwar die Oberfläche der Tonminerale angreifen können, aber die Gitterstruktur bleibt grundsätzlich erhalten. Aus den Reaktionsprodukten können sich künstliche Porenzemente bilden, die dem Mineralsystem eine zusätzlich abdichtende und stabilisierende Wirkung verleihen.



**Bild 6.1: Chemische Analysen eines kaolinitischen Tones nach Behandlung a) mit basischer, b) mit saurer, c) neutraler Prüfliquidität**

Es stellt sich ein Bremseffekt ein, der nach Kohler bis zum Stillstand der Migrationsbewegung gehen kann. Die z.B. unter anaeroben Verhältnissen im Müllkörper auftretende Essigsäure führt bei der Durchströmung von Tonen zu keiner Auflösung der feinkörnigen blättchen- bis stäbchenförmigen silikatischen Bestandteile der Tone. Es ist zu erwarten, daß sich in der Weiterführung solcher Untersuchungen ein neuer Weg der Beurteilung von Langzeitwirkungen mineralischer Abdichtungen gegenüber Deponiesickerwasser beschreiten läßt, für den die früher überschätzte pauschale Rückhaltewirkung von mineralischen Abdichtungen eindeutig als unrichtig erkannt wird, sich aber die positive Langzeitwirkung in der Reaktion von Sickerwasser mit Tonmineralen nachweisen und sicher prognostizieren lassen.

Die Beständigkeit von Tonen ist in Langzeitversuchen an Kaolinit, Illit und Montmorillonit (Bentonit) bei der Durchströmung mit verschiedenen Prüf Flüssigkeiten und Sickerwässern nachgewiesen worden /77/.

### 6.3.1.2 Bentonit

**Bentonit** ist ein spezieller Ton und besteht hauptsächlich aus dem Tonmineral Montmorillonit. Der Montmorillonit gehört zu der Gruppe der 3-Schicht-Mineraie. Eine Aluminium-Oktaeder-Schicht ist von zwei Silicium-Tetraeder-Schichten umschlossen. Ein Teil der Aluminiumionen der Oktaeder-Schicht ist beim Montmorillonit durch niederwertige Magnesium-Ionen ersetzt. Diese Störung im Gitteraufbau führt zu einer negativen Überschußladung an der Oberfläche des Schichtpaketes. Dieser Überschuß an negativer Ladung wird durch Adsorption von Kationen, meist Ca- oder Na-Ionen, kompensiert. Nach der Art der angelagerten Kationen spricht man von Ca- oder Na-Bentonit.

Die Kationen haben bei Anwesenheit von Wasser das Bestreben, sich zu hydratisieren, wodurch sich der Abstand zwischen den Schichtpaketen vergrößert. Dieser als innerkristalline Quellung bezeichnete Vorgang ist eine kennzeichnende Eigenschaft von Montmorillonit bzw. Bentonit.

Die Anwesenheit austauschfähig gebundener Na-Ionen und weniger austauschfähig gebundener Ca-Ionen sind Ursache dafür, daß sich Bentonite zur Verbesserung von nicht ausreichend undurchlässigen Erdschichten eignen. Ihr Quellvermögen liegt, je nach Art des Ausgangsmaterials und der Art der Aufbereitung, zwischen 350 und 800%. Ton hat dagegen ein Quellvermögen von 80 bis 100%. Bedingt durch das hohe Wasserbindevermögen von Bentonit wird seine Austrocknung im Vergleich zu Ton erheblich verzögert.

Na-Ionen neigen im adsorbierten Zustand eher zur Hydratation als Ca-Ionen und ermöglichen dadurch eine größere Wasseraufnahme und Quellung. Na-Bentonite sind daher besonders für die Herstellung von Bentonitsuspensionen geeignet. Na-Bentonit ist nur in USA in größeren Lagerstätten vorhanden.

Bentonit kommt im europäischen Raum als Ca-Bentonit vor, der durch Sodazugabe zu Na-Bentonit (aktivierter Ca-Bentonit) aktiviert wird. Bei Zugabe von Zement zu diesem Bentonit wird ein Teil des Natriums im Bentonit wieder durch Calcium aus dem Zement ersetzt. Daher wird der Na-Bentonit teilweise zu Ca-Bentonit rückverwandelt.

Es sind aber zementstabile Na-Bentonite (aktivierte Ca-Bentonite) verfügbar. Diese Bentonite besitzen ein geringes Ionenaustauschvermögen und gute abdichtende Wirkungen in Verbindung mit Zement.

Nicht aktivierter Ca-Bentonit ist bis zur 5-fachen Menge gegenüber den o.g. Na-Bentoniten in der Dichtwandmasse verarbeitbar. Er ist gegen eine Vielzahl von Stoffen beständiger, da durch die höheren Haltekräfte das Calcium weniger austauschbar ist.

Es gibt mittlerweile modifizierte Bentonite zur Adsorption organischer Lösungsmittel oder Substanzen aus wässrigen Lösungen /83/. Durch Zugabe zu handelsüblichen Bentoniten in mineralischen Abdichtungsschichten können Chlorphenole adsorbiert werden. Durch Zugabe zu zementstabilen Bentoniten in frischen Dichtwandmassen kann deren Stabilität gegenüber organischen Sickerwässern erhöht werden /49/.

Die o.g. Bentonite sind Grundsorten, wobei es für den jeweiligen Anwendungsfall, z.B. grobkörnige Bodenschichten, humushaltige Schichten, Kontamination, Verarbeitbarkeit, Quelleigenschaften, Temperaturbeständigkeit, hieraus entwickelte Spezialbentonite gibt.

Bentonite unterliegen als Naturprodukt gewissen Streuungen. Die Bentonite sind je nach ihrem Herkunftsort unterschiedlich. Sie werden im Werk aufbereitet und aktiviert. Handelsübliche Bentonitsorten werden in Deutschland vornehmlich von 5 Firmen vertrieben (Tab. 6.4)

Die verschiedenen Bentonitsorten für Dichtwandmassen werden je nach vorhandenem Baugrund, Konzentration der Komponenten in der Dichtwandmasse und Bauablauf unterschiedlich eingesetzt. Daher sind vorab Eignungsversuche mit den vorgesehenen Bentoniten durchzuführen. Um einen Überblick über die derzeit verfügbaren Bentonite (Grundsorten) zu geben, sind diese in Tabelle 6. 5 mit ihren Einsatzmöglichkeiten aufgelistet.

**Tabelle 6.4 : Handelsübliche Bentonitsorten (Auswahl, Stand 12/1988)**

	<b>Süd-Chemie AG München</b>	<b>Erbslöh &amp; Co Geisen- heim</b>	<b>Süd-Chemie AG Duisburg</b>	<b>CECA- GmbH Düsseldorf</b>	<b>Cebo-Group Holland, Heemstede</b>
Na-Bentonit (aktivierter Ca-Bentonit) für Oberflächen- abdichtung	Montigel F	Deponit B 4	Pact S	STF	Cebogel
zementstabiler Na-Bentonit (aktivierter Ca-Bentonit) für Dichtwandma- ssen	CV 15 Tixoton	CT B I B II	Slurry Ben 90	FTP 3 FTP 3 S FTP 3 B	CS.R
Na-Bentonit für Stützflüssig- keit nach DIN 4127	Tixoton	B I	Slurry Ben 90	FB 2 FTP 2 Clarsol FTP 5	CS.K
Ca-Bentonit	Calzigel	Calzonit		Clarsol Brut	Cebo-cal
modifizierter Bentonit zur Ad- sorption von CKW's	Tixosorb				
Attapulgit				ATC	

1) für humushaltige Böden besonders geeignet

2) sehr beständiger Bentonit

Tabelle 6.5 : Einsatzmöglichkeiten von verfügbaren Bentoniten

Einsatz	Dichtwandmassen Einphasen- Schlitzwand	Bentonitsuspension für Zweiphasen- Schlitzwand	Schmalwandma- ssen	Injektionen
Na-Bentonit	Zementstabiler Na-Bentonit akt. Ca-Bentonit	Na-Bentonit akt. Ca- Bentonit nach DIN 4127	zementstabiler akt. Ca-Bentonit (Spe- zialbentonit)	Zementstabiler Na- Bentonitakt. Ca- Bentonit (Spezial- bentonit)
Eigenschaften Bentonitsus- pension	gute Quelleigen- schaften, niedrige Viskosität, geringe Stützeigenschaften	gute Quelleigen- schaften, geringe Filtratwasserabgabe, hohe Fließgrenzen- werte	geringere Quellei- genschaften, gerin- ge Viskosität gerin- ge Stützeigen- schaften	gute Quelleigen- schaften, geringe Viskosität
anzustrebende Eigenschaften Bentonit	sehr geringe Ionen- austauschkapazität	-	-	abhängig vom Bau- verfahren
Konzentration	30 - 45 kg pro m <sup>3</sup> Wasser	30 - 60 kg pro m <sup>3</sup> Wasser	35 - 50 kg pro m <sup>3</sup> Wasser	Konzentration ab- hängig von Injekti- onsmassen
Ca-Bentonit	Ca-Bentonit	-	Ca-Bentonit	Ca-Bentonit
Eigenschaften	sehr geringe Ionen- austauschkapazität hoher Feststoffan- teil		geringe Ionenaus- tauschkapazität größerer Feststof- fanteil	geringe Ionenaus- tauschkapazität ho- her Feststoffanteil
Konzentration	150 - 250 kg pro m <sup>3</sup> Wasser		115 kg pro m <sup>3</sup> Sus- pension	200 - 400 kg pro m <sup>3</sup> Suspension
Modifizierter Bentonit	5% des Feststoff- gehaltes	1-2% des Feststoff- gehaltes	-	1-2% des Feststoff- gehaltes

### 6.3.1.3 Attapulgit

**Attapulgit** ist ein Tonmineral mit Kettenstruktur, das ebenso quellfähig wie Bentonit ist, aber im Gegensatz zu Na- und Ca-Bentonit zu geringerem Ionenaustausch bei hohen Salzkonzentrationen führt und in Dichtwandmassen einsetzbar ist /49/.

### 6.3.1.4 Hydraulische Bindemittel

Die Zementsorten PZ und HOZ lassen die mineralischen Dichtwandmassen früher oder später erstarren und erhärten. Um längere Verarbeitungszeiten zu erlangen und gleichzeitig den frischen Suspensionen für Dichtwände und Injektionen genügend Stabilität zu verleihen, wird meist ein Zement HOZ 35 L verwendet. Er enthält 36 bis 80 Gew.-% Hüttensand. Als Hüttensand wird die glasig erstarrte Hochofenschlacke (HOS) bezeichnet. HOS erhärtet wie Portlandzement in Klinkerphasen zu den gleichen chemischen Verbindungen, spaltet aber weniger Calciumhydroxid ab. HOS ist latent hydraulisch und bedarf einer alkalischen Anregung. Zemente mit geringem HOS-Gehalt spalten zu Beginn der Hydratation mehr Calciumhydroxid ab und reaktivieren den beigefügten Na-Bentonit in der Suspension stärker als bei hohem HOS-Anteil. Durch die Reaktivierung des Bentonits ist eine längere Verarbeitbarkeit des Dichtmaterials möglich, die im Kap. 7 näher beschrieben wird.

Im Hinblick auf seitlichen oder vertikalen Zufluß von Sickerwässern oder flüssigen Inhaltsstoffen der Altlast ist zu beachten, daß man zementhaltige Abdichtungsmaterialien mit kontaminierten Wässern anmachen kann, bei der Erhärtung diese Zemente aber vor der Kontamination zu schützen sind.

Die Beständigkeit gegenüber Sickerwässern wird durch den HOS-Anteil erhöht. Der Anteil in dem Zement kann in dem Maße gesteigert werden, wie eine Reaktivierung des Bentonits möglich und Beständigkeit gegenüber sulfathaltigen Wässern gefordert ist. Mit erhöhtem HOS-Anteil in der Dichtwandmasse fällt der k-Wert mit zunehmendem Probenalter rasch ab, bewirkt aber auch eine geringere Plastizität der fertigen Wand. Günstig erscheinen Zemente mit 65 bis 72 Gew.-% HOS.

Während Zement gegenüber aggressiven Stoffen wie z.B. Salzen nicht beständig ist, kann entsprechend Tabelle 6.6 in Verbindung mit Bentonit eine resistente Dichtwandmasse entstehen. Das liegt an der Bildung treibender Salze, die in die großen Porenräume hineinwachsen und diese abdichten.

Über die Zementbeständigkeit gegenüber organischen Verbindungen ist wenig bekannt. Kohlenwasserstoffe sind an sich träge. Sie haben jedoch z.T. ein größeres Poreneindringungsvermögen als Wasser, das durch Quellung des Zementgels die Poren verengt, und sie dringen tief in Beton ein, ohne ihn zu schädigen /58/. Daher steigt der k-Wert mit zunehmender Durchströmungsdauer gegenüber Wasser bei Dichtwandmassen und Sohlabdichtungen u.U. wieder an. Durch Verwendung von Spezialzementen und speziellen hydraulischen Bindemitteln z.B. mit höherer Mahlfineinheit kann die Durchlässigkeit wiederum verringert werden.

Formel Name	Konzentration	Aggressive Wirkung auf		
		Bentonit	Zement 1)	Dichtwandmasse
$\text{Na}_2\text{SO}_4$ Natriumsulfat	0,1 val/l			
$\text{H}_2\text{SO}_4$ Schwefelsäure	1% ige			
$\text{NH}_4\text{Cl}$ Ammoniumchlorid	$\text{NH}_4^+$ 300 mg/l $\text{Cl}^-$ 583 mg/l			

 nicht   
  schwach   
  mittel   
  stark   
  sehr stark

**Tabelle 6.6: Aggressive Wirkung von Salzen auf Zement und dessen Schutz durch Bentonit in Dichtwandmassen**

### 6.3.1.5 Mineralische Füllstoffe

#### a) Sand-Kies-Gemische

Sand-Kies-Gemische als mineralische Füllstoffe zu tonigen Abdichtungsmaterialien und Zementen ergeben Tonbetone mit einer der Fuller-Kurve angepaßten Körnungslinie, die zu einer geringen Durchlässigkeit führen.

#### b) Quarzmehl

Quarzmehl wird als Füllstoff für Suspensionen und Pasten mit hohem Bentonitanteil und zementfreien Härtern wie z.B. Wasserglas verwendet. Quarz gehört zur kristallinen Form der Kieselsäure. Sie ist aufgrund der geringen Löslichkeit kaum angreifbar. Durch Kornform und Körnungsgröße wird Quarzmehl ideal in das tonige Abdichtungsmaterial eingebunden. Quarzmehl hat ein Wasserbindevermögen von etwa 40% /65/.

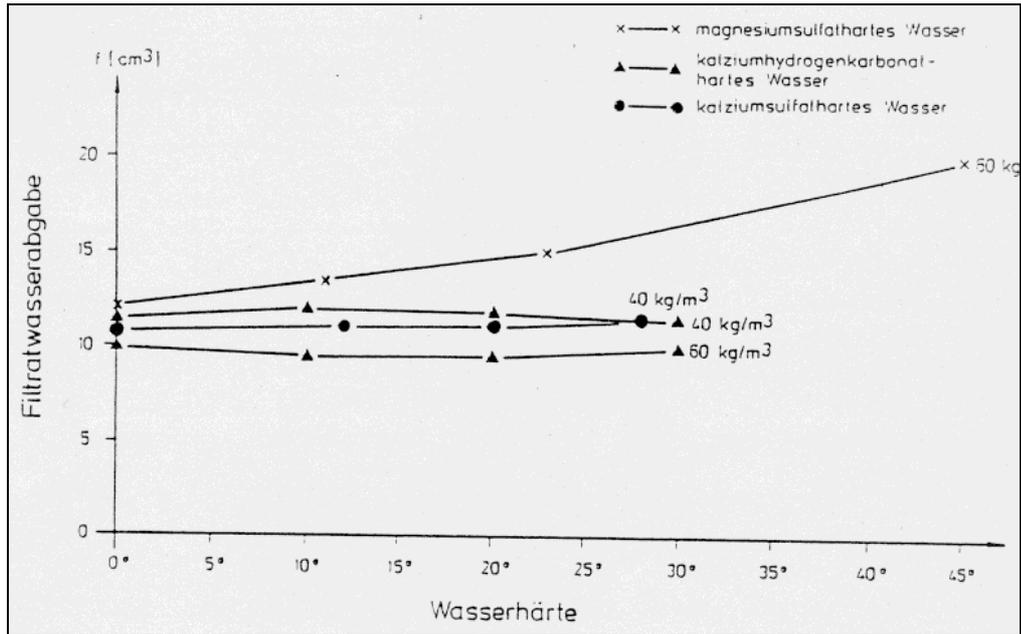
#### c) Kalksteinmehl

Kalksteinmehl wird meist als Füllstoff z.B. bei Schmalwänden verwendet. Es besitzt eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit und hat sich bei der Durchströmung von Schmalwandmassen mit Sickerwässern aus Hausmülldeponien als resistent erwiesen, wie REM-Aufnahmen zeigten.

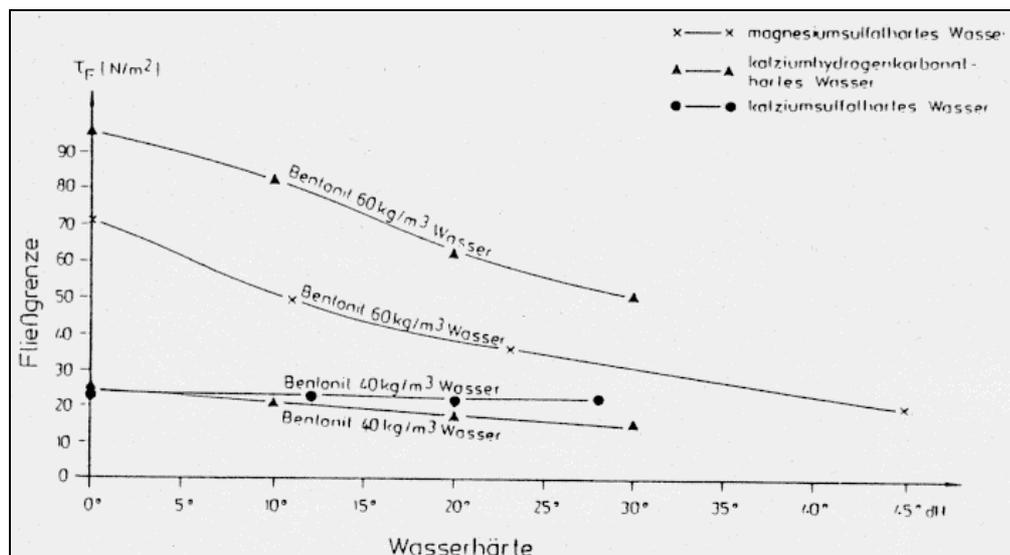
### 6.3.1.6 Wasser

Das Anmachwasser sollte nicht solche Stoffe enthalten, die die Stabilität des Bentonits in der Suspension herabsetzen. Die Stabilität wird vor allem von gelösten Natrium-, Kalzium- und Magnesium-Ionen beeinträchtigt. Die Tendenz der Einwirkungen in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und der Härte des Wassers zeigen die Abbildungen 6.2 und 6.3.

Betonangreifende Inhaltsstoffe nach DIN 4030 (Tab. 6.7) sind zu vermeiden. Leitungswasser ist deshalb oft der Verwendung von Grundwasser vorzuziehen.



**Bild 6.2:** Einfluß von magnesiumsulfat-, kalziumhydrogenkarbonat- und kalziumsulfathartem Wasser auf die Filtratwasserabgabe von Bentonitsuspensionen mit 40 und 60 kg Bentonit pro m<sup>3</sup> Wasser



**Bild 6.3:** Einfluß von magnesiumsulfat-, kalziumhydrogenkarbonat- und kalziumsulfathartem Wasser auf die Fließgrenze von Bentonitsuspensionen

**Tabelle 6.7 : Betonaggressivität von Wässern nach DIN 4030**

Angreifende Bestandteile	Angriffsgrad		
	schwach	stark	sehr stark
Säure (pH-Wert)	6,5-5,5	5,5-4,5	< 4,5
Kalklösende Kohlensäure			
CO <sub>2</sub> in mg/l	15-30	30-60	> 60
Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	15-30	30-60	> 60
Magnesium Mg <sup>2+</sup> mg/l	100-300	300-1500	> 1500
Sulfat SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	200-600	600-3000	> 3000

### 6.3.1.7 Zusatzmittel

#### a) Verflüssiger

Verflüssiger müssen meist dort eingesetzt werden, wo feststoffreiche Suspensionen eine lange Verarbeitung nicht zulassen. Verflüssiger auf Silanbasis haben sich als schadstoffresistent erwiesen /10/. Sie werden im Prozent- und Promillebereich zugegeben.

#### b) Verzögerer

Verzögerer unterbinden die frühzeitige Erstarrung des Zementes. Sie bestehen z.T. aus organischen Stoffen, wie Kohlehydraten (z.B. Stärke und Zucker), Ligninsulfonaten oder aus anorganischen Verbindungen, insbesondere Phosphaten /58/.

Bei der Zugabe zu Bentonit-Zement-Suspensionen muß beachtet werden, daß die zementstabilen Na-Bentonite bereits als Verzögerer wirken. Durch eine Überdosierung mit Verzögerern (über 1% der Zementmenge) tritt eine Beschleunigung der Erstarrung ein /22/.

#### c) Beschleuniger

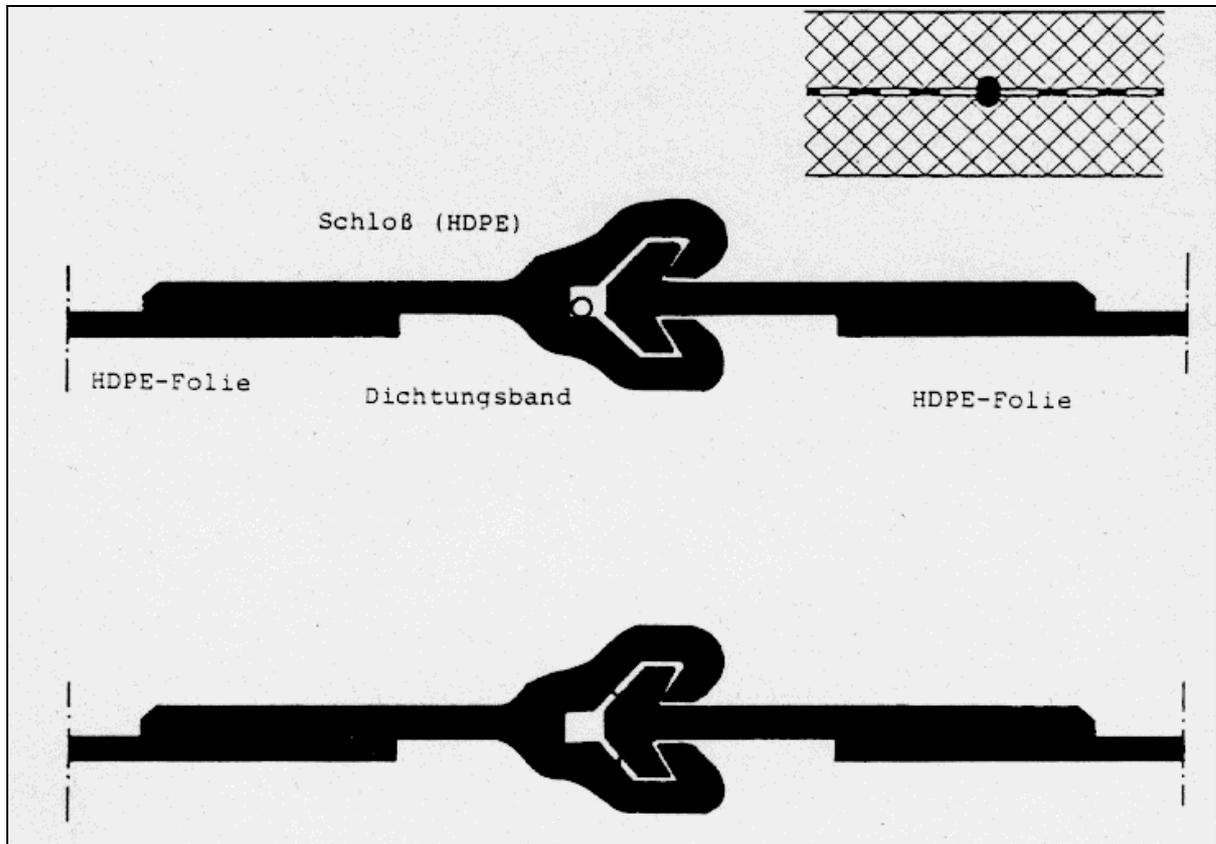
Beschleuniger können dort eingesetzt werden, wo die frühzeitige Erhärtung des Zementes erwünscht ist. Ein wirksamer Beschleuniger ist Calciumchlorid (CaCl<sub>2</sub>), das aber die Stabilität der Bentonitsuspensionen herabsetzt und somit nicht einsetzbar ist. Anstelle von CaCl<sub>2</sub> sind Erhärtungsbeschleuniger auf der Basis von Natrium- und Kaliumsalzen der Kohlensäure (z.B. Soda) und Kieselsäure (Wasserglas) einsetzbar, des weiteren Fluorkieselsäure, Aluminate und Borate, teilweise auch Natron- und Kalilauge. Alle Stoffe können u.U. bei Bentonit-Zement-Suspensionen die Stabilität der Bentonite in der Suspension verändern oder führen im Falle der Natronlauge u.U. zunächst zu einer Verflüssigung der Suspension.

## 6.3.2 Kunststoffdichtungsbahnen

**Kunststoffdichtungsbahnen** wurden in den letzten Jahren gegenüber Sickerwässern aus Altablagerungen und Deponien untersucht. Bei Dichtwänden müssen sie zusammen mit der Dichtwandmasse auf Durchlässigkeit und Beständigkeit geprüft werden.

Die Dichtungsbahnen werden durch ein spezielles Schloßsystem miteinander verbunden. Innerhalb dieses Schloßsystems befindet sich entweder ein Quellband mit hoher chemischer Resistenz (Prüfung und Angaben s. Punkt 6.4.2) oder die Materialien werden verschweißt.

In Bild 6.4 ist die Lage des Dichtungsbandes im Schloß beim Einbau der Dichtungsbahnen in die mit Bentonit-Zement-Suspension oder Fertigmischung gefüllte Dichtwand und die abdichtende Wirkung der Schloßdichtung nach der Quellung in der erhärtenden Dichtwandmasse dargestellt.



**Bild 6.4:** Schloßverbindung der HDPE-Folien mit quellfähigem Dichtungsband

In über 6 Monate dauernden Versuchen mit einem Sickerwasser einer Zentralmülldeponie wurden die Durchlässigkeit und chemische Beständigkeit an der Kombinationsdichtung "Dichtwandmasse mit eingestellter Kunststoffdichtungsbahn einschließlich Schloßverbindung" getestet. Die geringe Durchlässigkeit der Dichtwandmasse vor der Kunststoffdichtungsbahn verhinderte zwar keinen Stofftransport zur Kunststoffdichtungsbahn, nach den vorliegenden Erkenntnissen fand aber kein Stofftransport durch Kunststoffdichtungsbahn und Schloßdichtung statt.

Durch eine Kombinationsdichtung aus Ton und Kunststoffdichtungsbahnen findet eine verringerte Permeation statt. Bei einer Kombinationsdichtung mit Dichtwandmassen kann zusätzlich eine dichtende Korrosionsschicht innerhalb der Dichtwandmasse den Stofftransport verringern.

### 6.3.3 Stahl

Die im **Stahl** enthaltenen Metalle sind im allgemeinen gut laugenbeständig, weshalb man sie in Dichtwandmassen  $\text{pH} = 12,5-13,5$  gut verwenden kann. Die Korrosion von im Erdboden befindlichem Stahl ist ein sehr komplexer Vorgang. Nach /58/ sind Moorböden wegen ihres sauren Charakters stark aggressiv, im geringeren Maße aggressiv sind Humusböden (Bild 6.5).

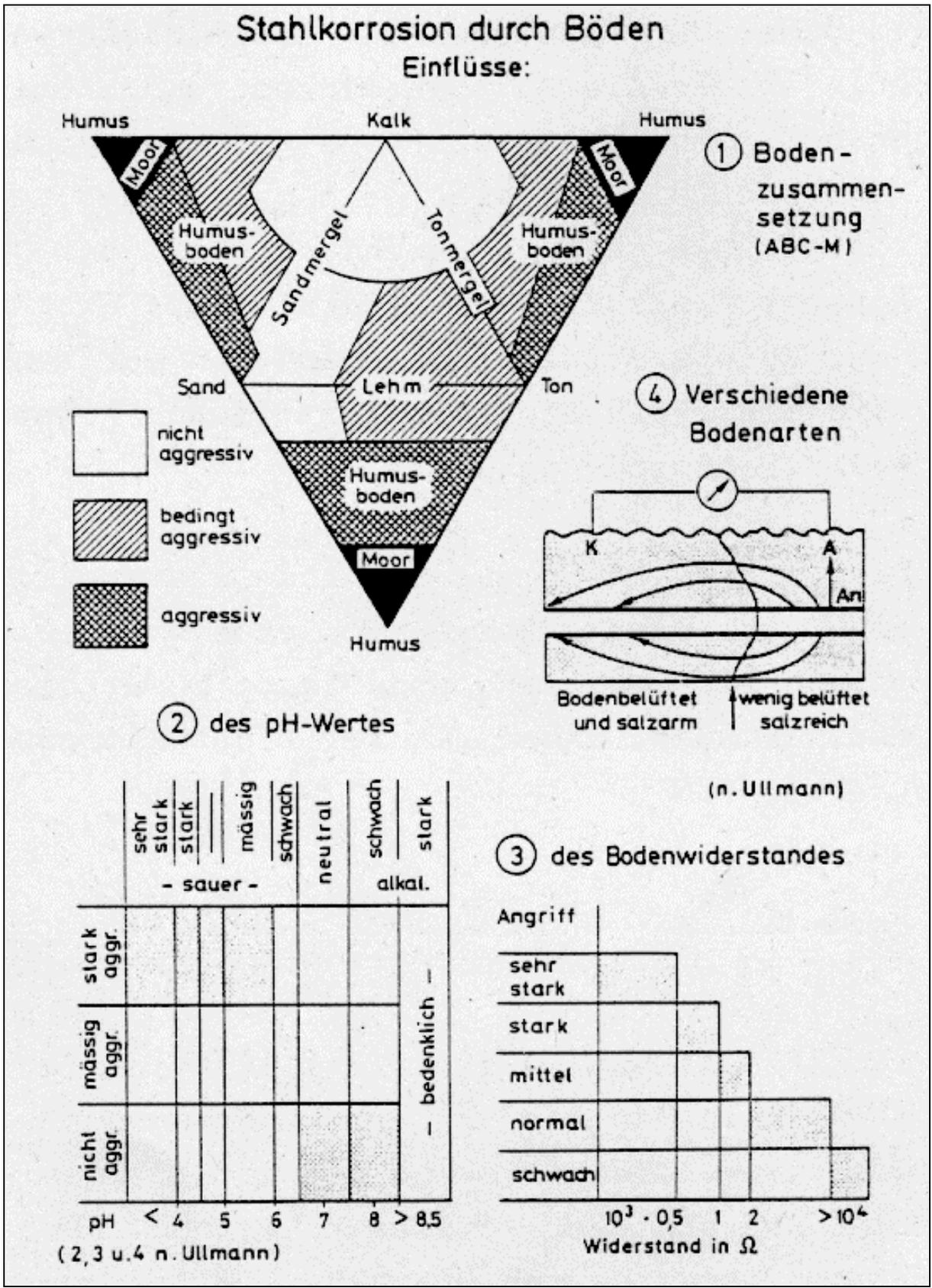


Bild 6.5: Stahlkorrosion durch Böden /58/

Lehmböden sind gering aggressiv. In sandreichen Böden und Böden mit hohem Kalkgehalt findet praktisch keine Korrosion statt.

Die Beständigkeit des Stahls soll bei Abdichtung der Deponie oder Altlast mit Beschichtungen aus beständigem Kunststoff verbessert werden.

Da Sickerwässer in ihrer Zusammensetzung starken Schwankungen je nach Inhaltsstoffen und Alter der Ablagerungen sowie dem Lösungscharakter der durchsickernden Wässer unterliegen, war es notwendig, repräsentative Prüfflüssigkeiten auszuwählen. Die Spundbohle soll durch die Beschichtung beständiger und das Schloß sowie die Nahtstellen durch Lippen- und Injiziermaterial gedichtet werden. Da die Sickerwässer somit vornehmlich diese Dichtungsmaterialien aus Kunststoff angreifen, wurden die Prüfflüssigkeiten aus der Gruppe A (hochkonzentrierte Medien) der "Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen", herausgegeben vom Landesamt für Wasser und Abfall NRW, Mai 1985, ausgewählt. Aus dieser Gruppe sind die den vorliegenden Kontaminationen entsprechenden Stoffe ausgewählt.

Die Abdichtung von Altlasten und Prüfung der einsetzbaren Dichtungen führte in den letzten Jahren dazu, aus der Vielzahl der möglichen organischen und anorganischen Bestandteile der Sickerwässer eine Prüfflüssigkeit M auszuwählen, die durch hohe Salzfrachten und chlorierte Kohlenwasserstoffe gekennzeichnet ist.

In einer Versuchsreihe wurden 7 unterschiedliche Dichtungen und der Stahl St Sp 37 auf ihre chemische Beständigkeit durch 6 Monate dauernde Lagerung in Prüfflüssigkeiten und Sickerwässern geprüft. Es handelt sich bei den Dichtungen um 2 Beschichtungsmaterialien PZ und LU von unterschiedlichen Herstellerfirmen. Obwohl fast alle Materialien aus Polyurethan hergestellt sind, verhielten sie sich in den Prüfflüssigkeiten und Sickerwässern während der Lagerung recht unterschiedlich. Die gemessene Korrosionsneigung des Stahls in den Prüfflüssigkeiten ist in Tabelle 6.8 im Vergleich zu Hafenwasser aus Hamburg dargestellt und in Bild 6.6 beurteilt.

Es zeigt sich, daß Stahl mit Beschichtungsmaterial versehen am besten geeignet ist. Die Lippen- und Injizierdichtungen wiesen unterschiedliche Korrosionsneigungen auf.

**Tabelle 6.8: Korrosionsneigungen von unbeschichteten und beschichteten Stählen und Spundwanddichtungen**

Alternativen	Materialien	Benzine und aromatische Kohlenwasserstoffe	Heizöl, Dieselkraftstoffe, Paraffinöle, Schmieröle	Prüfflüssigkeit M
Spundwand Stahl	ST Sp 37	keine sichtbare Korrosion 0,1 mm Abtrag pro 1/2 Jahr	keine sichtbare Korrosion 0,11 mm Abtrag pro 1/2 Jahr	chemische Veränderung 0,13 mm Abtrag pro 1/2 Jahr
mit Beschichtung	PE 50-8166 Epoxidharz einschichtig	keine Korrosion	keine Korrosion	chemische Veränderung bei der Flüssigkeit - nicht an der Probe
	PZ Polyurethan einschichtig	keine Prüfung	keine Korrosion	gering elastisch nach 4,5 Monaten wird Probe dunkelgrün
mit Injiziermaterial	I Injizierdichtung Polyurethan einschichtig	nicht geeignet	quillt geeignet	chemische Veränderung, quillt stark nicht geeignet
	IU Gerudur Polyurethan einschichtig	nicht geeignet	keine Korrosion	gering elastisch keine
	HVP Polyurethan einschichtig	chemische Veränderung, quillt bedingt geeignet	keine Korrosion schrumpft bedingt geeignet	schrumpft geringfügig geeignet
mit Lippen- dichtung	K2D Polyurethan einschichtig	nicht geeignet	keine Korrosion	chemische Veränderung der Prüfflüssigkeit keine Korrosion
	IU Unitecta Polyurethan einschichtig	Korrosion, quillt	schrumpft bedingt geeignet	schrumpft geringfügig keine Korrosion

Alternativen	Materialien	Benzine und aromatische Kohlenwasserstoffe	Heizöl, Dieselkraftstoffe Paraffinöle, Schmieröle	Prüfflüssigkeit M
<u>Spundwand</u> Stahl	ST Sp 37	☉	☾	☀
mit Beschichtung	PE 50 - #166 Epoxidharz einschichtig	○	○	☉
	PZ Polyurethan einschichtig		○	☾
mit Injiziermaterial	I Injizierdichtung Polyurethan einschichtig	●	☉	●
	IU Gerudur Polyurethan einschichtig	●	○	☉
	HVP Polyurethan einschichtig	☾	☾	☉
mit Lippendichtung	KZD Polyurethan einschichtig	●	○	☉
	LU Unitecta Polyurethan einschichtig	☾	☾	☉

○ kein Angriff      ☉ gering      ☾ mittel      ● stark      ● sehr stark

Bild 6.6: Eignung der Spundwandssysteme in vergleichbaren Prüfflüssigkeiten

## 7. Dichtwände

### 7.1 Konzeption

Einsetzbare **Bauverfahren** für Dichtwände sind

- Schlitzwand
- Schmalwand
- Injektion/Düsenstrahl-Injektion

#### 7.1.1 Dicken und erreichbare Tiefen

In Bild 7.1 sind die **Dicken** und erreichbaren **Tiefen** der Dichtwände dargestellt.

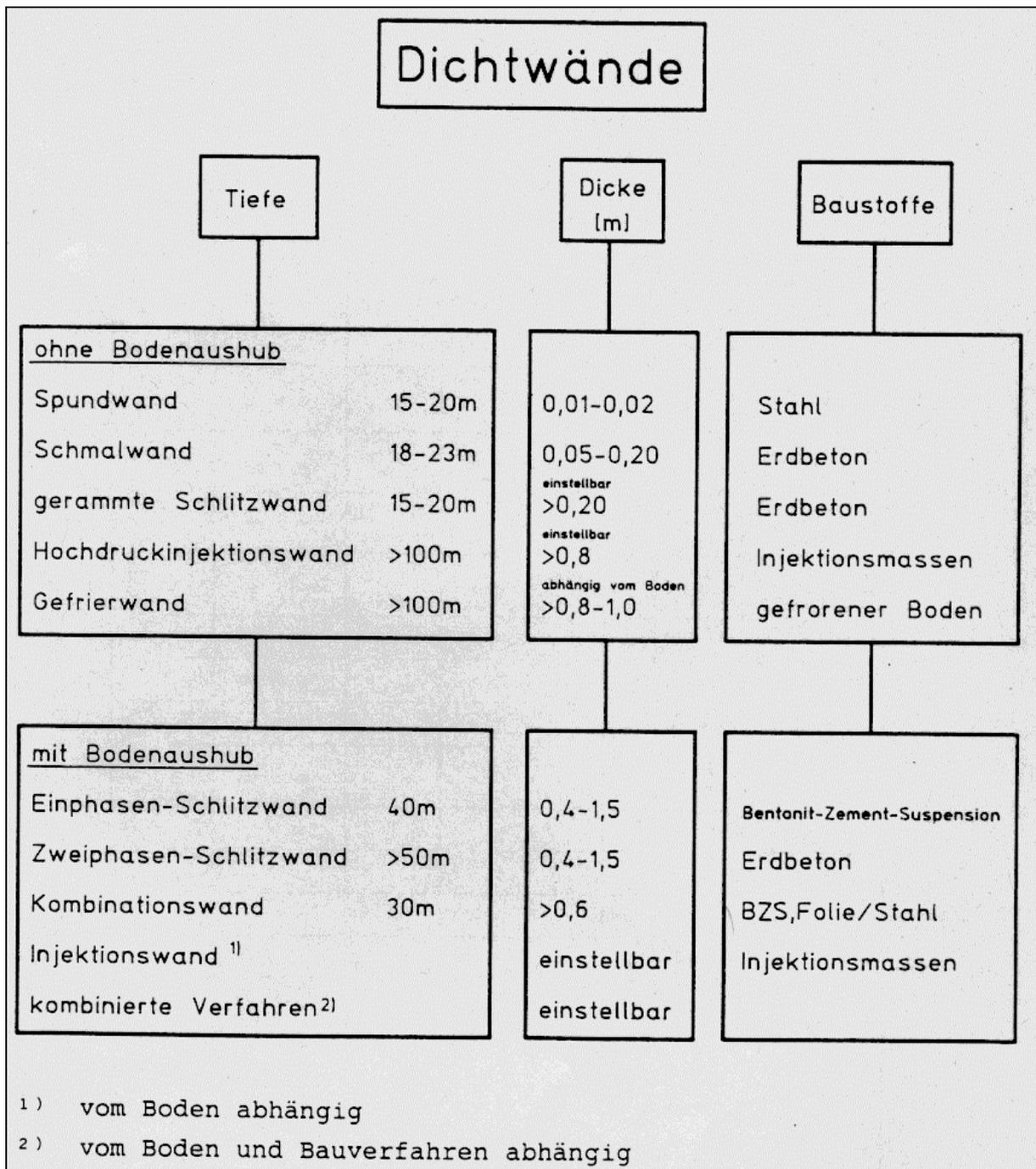


Bild 7.1: Erreichbare Tiefen und Dicken

### 7.1.2 Einsetzbare Dichtwandmassen

Bei den genannten Verfahren wird als Hauptkomponente für die Herstellung der **Dichtwandmasse** Bentonit oder Tonmehl mit hydraulischen Bindemitteln (Zement) zugegeben. Jedes Verfahren verlangt eine auf den Herstellungsvorgang und Bauablauf individuell abgestimmte Dichtwandmasse. In Tabelle 7.1 sind mit Hilfe von Laborversuchen entwickelte und in der Praxis erprobte Dichtwandmassen aufgelistet.

Kriterium	Pumpfähigkeit	Verarbeitbarkeit	Stabilität	austauschbar	Eintrag von Kontamination (Herstellung)	Dichtigkeit	Festigkeit	Erosionsbeständigkeit	Erhärten in kontaminierten Wässern	Dichtigkeit gegen (H) Sickerwasser	Dauerbeständigkeit gegen Sickerwasser (H)	chemische Erosionssicherheit	Beständigkeit Boden	Stauwasser	Säuren	Laugen	Lösungsmittel	Schadstoffrückhaltevermögen	
<b>Herstellungsverfahren</b>																			
<b>Schmalwand</b>	X	X	X			X	X	X	0	X	X	X	X	0	□	□	0	0	X
<b>Schlitzwand</b>																			
<b>Einphasen - Verfahren</b>																			
Na-Bentonit-Zement-Suspension	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X
Ca-Bentonit-Zement-Suspension	X	X	X		0	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X
Bentonit-Additiv-Suspension	X	X	X		X	X	X	X	X	0	0	0	0	0					?
<b>Schlitzwand</b>																			
<b>Zweiphasen - Verfahren</b>																			
a) Bentonitsuspension	X	X	X		X								0	0	X	X	X	X	X
b) Austauschmasse																			
b1) Ton-Zement-Mischung	X	X	X	X	0	X	X	0	0	X	X	0	0	0	X	X	X	X	X
b2) Co-Bentonit-Zement-Mischung	X	X	X	0	0	X	X	0	0	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X
b3) Bentonit-Additiv-Mischung	X	X	X		0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
b4) zementfreie DWM																			
<b>Jet - Grouting - Verfahren</b>	X	X	X		0	X	X	?	0	X	0	0	0	0	X	X	X	X	X

□ keine Erfahrungen    X Erfahrungen liegen vor    0 muß untersucht werden    (H) = Hausmüll

Tabelle 7.1 : Beurteilung der Dichtwandmassen für verschiedene Dichtwandssysteme

Tabelle 7.2: Dichtwandmassen für verschiedene Dichtwandssysteme

Dichtwand-system	Konzentrationen Feststoffe pro 1000 kg Wasser		Dichtwandmassen	Bentonit	Fertig-produkt	Zement
	mit Na-Bentonit	mit Ca-Bentonit				
Einphasen-Verfahren Schlitzwand		<= 400 kg	Bentonit-Zement-Suspensionen mit/ohne Füllstoffe	Na-Bentonit  Ca-Bentonit Attapulgit Tixosorb		HOZ 35 L  HOZ 35 L  NW/HS Spezial-zemente
	> 390 kg	> 500 kg	Fertigprodukte		Solidur Camix DiWa-mix N DiWa-mix K	
Zweiphasen-Verfahren Schlitzwand	ohne Wasser		Tonbeton : Bentonit-Zement-Sand/Kies-Gemisch  Fertigprodukt	Na-Bentonit Ca-Bentonit Attapulgit	Solidur  F+E-Entwickl.	HOZ 35 L  HOZ 35 L NW/HS Spezial-zemente
Kombinations-dichtwand		>= 400 kg	Bentonit-Zement-Suspensionen mit/ohne Füllstoffe	Na-Bentonit Ca-Bentonit	Camix  DiWa-mix N DiWa-mix K	HOZ 35 L  HOZ 35 L NW/HS  Sonder-zemente
	> 390 kg	> 500 kg	Fertigprodukte		Solidur	
Schmalwand	> 156 kg	128,5 kg	Ton-Zement-Steinmehl-Suspensionen	Na-Bentonit Ca-Bentonit	Solidur  DiWa-mix k	PZ  HOZ 35 L
			Fertigprodukte			
Jet-Grouting-Verfahren	Konzentrationen abhängig vom Injektionsverfahren		Silikatgelinjektion Zement-Suspension	Na-Bentonit Ca-Bentonit		HOZ 35 L HOZ 35 L
Düsenstrahlwand			Ton-Zement-Suspension			NW/HS  Sonder-zemente

## 7.2 Anforderungen an Dichtwandmassen

### 7.2.1 Schlitzwände

#### a) Einphasen-Schlitzwand

Die frische Dichtwandmasse muß während der Aushubphase

- die Erdwände stützen,
- stabil bleiben, d.h. sie darf sich auch beim Eintrag von kontaminierten Bodenteilchen oder Wässern nicht entmischen,
- niedrige Viskositäten besitzen, damit sie möglichst rasch aus dem Greifer abfließt,
- während der gesamten Aushubphase verarbeitbar sein, d.h. die Hydratation des Zementes darf vor Beendigung der Aushubphasen nicht einsetzen.

Nach Beendigung des Aushubs muß die Dichtwandmasse

- möglichst rasch erstarren und erhärten, um den Anschluß an die Nachbarlamellen so früh wie möglich zu gewährleisten und gegen die Kontaminationen abzudichten. Die Erstarrung muß auch bei vorhandener Kontamination gewährleistet sein,
- Mindestdruckfestigkeit erreichen, die in etwa der Festigkeit des umgebenden Bodennaterials entspricht und
- geringe Durchlässigkeit gegenüber Grundwasser und Sickerwasser aufweisen und dauerbeständig sein.

#### b) Zweiphasen-Schlitzwand

Die im Kontraktorverfahren herzustellende Zweiphasen-Schlitzwand erfordert eine Dichtwandmasse mit folgenden Eigenschaften :

- Ausreichende Dichte gegenüber der auszutauschenden Bentonitsuspension in der Lamelle,
- Entsprechend DIN 4126 ein Ausbreitmaß von 55 cm bis 60 cm bei Verwendung eines in seiner Konsistenz betonähnlichen Baustoffes und
- Steiggeschwindigkeiten, die ein einwandfreies Absaugen der u.U. während der Herstellung kontaminierten Bentonitsuspensionen ermöglichen.

Dichtwandmassen, die im Zweiphasen-Verfahren hergestellt werden, haben aufgrund der höheren Dichte einen gegenüber herkömmlichen Dichtwandmassen geringeren W/Z-Wert, d.h., sie erstarren und erhärten eher. Dies muß berücksichtigt werden

- bei baubetrieblich bedingten Störungen, die den Einbau der Dichtwandmasse nach der Herstellung verzögern können. Dann ist die vorzeitige Erstarrung des Zementes u.U. durch Verzögerer zu stoppen.
- beim Ziehen der verfahrensbedingten Abschalrohre.

Zu diesem Zeitpunkt muß die Masse eine Mindestdruckfestigkeit haben, die das Hineinrutschen in den mit Bentonit-Suspension gefüllten Nachbarschlitz verhindert.

Hinsichtlich Dichtigkeit, Festigkeit und Erosionssicherheit gelten über alle eingesetzten Dichtwandmassen die folgenden Anforderungen :

- Die Masse soll sich unter Belastung möglichst rißfrei verformen können.
- Die Erosionssicherheit muß gewährleistet sein; an der Grenzfläche Wand zu Boden muß verhindert werden, daß einzelne Partikel aus der Dichtwandmasse gelöst werden. Es dürfen sich nicht durch rückschreitende Erosion vorhandene Fehlstellen weiter auflösen, die zur Zerstörung der Wand führen können.
- Bei der Durchströmung mit Grund- oder Sickerwasser darf es nicht durch die Ausspülung von Stoffen aus der Dichtwand, insbesondere bei der Ausspülung von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bei zementhaltigen Dichtwandmassen zu einem Verlust der Festigkeit des Korngerüsts und damit zur Zerstörung kommen.
- Die Dichtwandmassen müssen u.U. in kontaminiertem Untergrund/Boden erstarren und erhärten. Bei Bedarf müssen sie gegen schädliche Kontaminationen geschützt werden.
- Die dauerhafte Dichtigkeit (Dauerbeständigkeit) muß gewährleistet sein.

#### c) **Gerammte Schlitzwand**

Der Erdbeton muß ein auf das Bauverfahren (Dauer des Rammvorgangs) abgestimmtes Ausbreitmaß und entsprechend der Anbindung der Nachbarlamelle einstellbare Erstarrung und Festigkeit sowie Durchlässigkeit haben.

#### d) **Kombinationswand.**

Im Gegensatz zur herkömmlichen Schlitzwandbauweise im Pilgerschrittverfahren erfordert die Kombinations-Dichtungswand die Herstellung in kontinuierlicher Bauweise. Dabei entstehen lange, mit Flüssigkeit gestützte Schlitzte. Deshalb ist zusätzlich zu den o.g. Anforderungen eine Dichtwandmasse zu verwenden, die

- ausreichende Fließgrenzenwerte zur Stützung des Bodens hat und gleichzeitig das Einstellen der Kunststoffdichtungsbahnen zuläßt,
- nach dem Einstellen der Kunststoffdichtungsbahn rasch ansteigende Scherfestigkeiten hat, um die Standsicherheit der Lamellen zu gewährleisten.

Die Dichtwandmassen sind in Abhängigkeit der zeitabhängigen Eigenschaften bewegter und unbewegter Suspensionen durch Wahl der Bentonit- und Zementsorten und dem Mischungsverhältnis auszuwählen.

## 7.2.2 Schmalwände

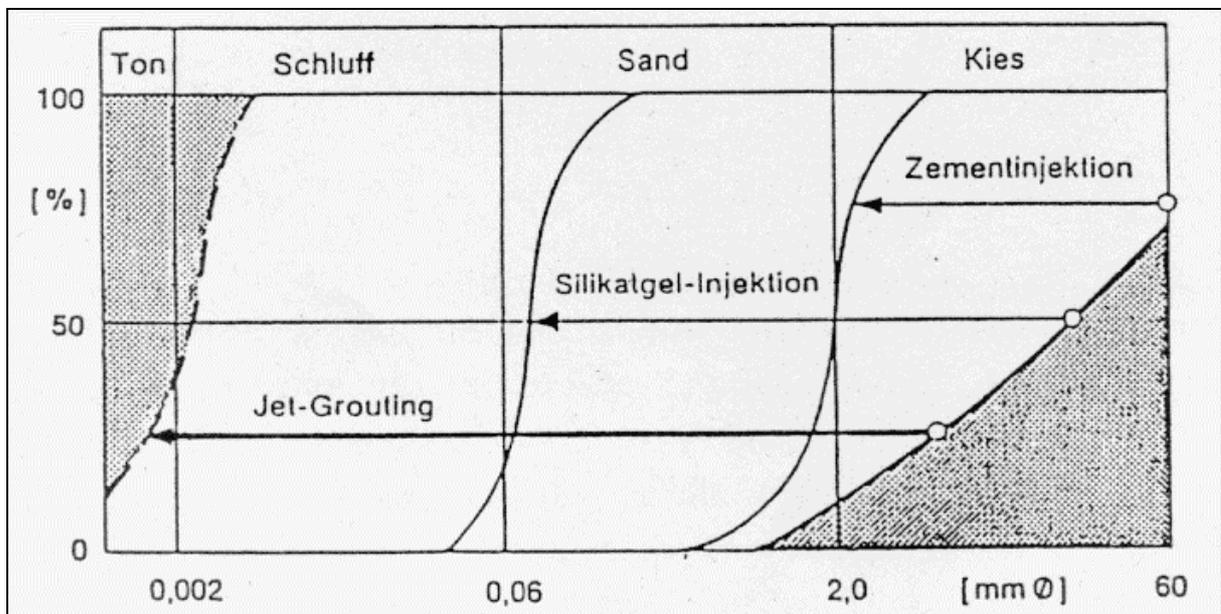
Diese Dichtwandmasse besteht meist aus einer Bentonit-Zement-Suspension unter Zugabe von Steinmehl oder Fertigmischung.

Da die Schmalwand gegenüber den anderen Wänden nur eine geringe Dicke hat, muß sie eine möglichst hohe Dichte, ein rasches Abbindevermögen und eine geringe Durchlässigkeit besitzen. Dies erfordert

- Dichte von möglichst  $\rho_F \geq 1,5 \text{ t/m}^3$ ,
- ausreichende Filtratwasserabgaben zur Erhöhung der Stabilität,
- rasches Abbindevermögen der Masse. Bei hohem Verbrauch an Dichtwandmasse ist die Zugabe von Abbindebeschleunigern zweckmäßig,
- Erosionssicherheit, wobei berücksichtigt werden muß, daß durch die geringere Dicke der Schmalwand ein höherer hydraulischer Gradient auf die Wand als bei Dichtwänden wirkt,
- Durchlässigkeit und Dauerbeständigkeit müssen gewährleistet sein.

## 7.2.3 Injektionswände

Durch das als Jet Grouting bekannte Düsenstrahlverfahren (SOILCRETE-Verfahren) sind Abdichtungswände auch in tonigen Böden herstellbar (Bild 7.2).



**Bild 7.2: Anwendungsbereiche des Soilcrete-Verfahrens /26/**

Die Anforderungen an einsetzbare Injektionsmittel ergeben sich daraus, daß das Injektionsverfahren im Boden eine Dichtungsmasse aus Injektionsmittel und Boden erzeugt. Sie lassen sich unabhängig vom Injektionsmittel wie folgt angeben:

- Eigenschaften wie Viskosität, Fließeigenschaften und Eindringverhalten je nach Bodenart sind auf das gewählte Herstellungsverfahren abzustimmen.
- Die Masse muß nach dem Einpreßvorgang rasch abbinden und gegen Kontaminationen abdichten.
- Die Masse muß u.U. mit eingetragener Kontamination und unter vorhandener Kontamination erstarren und erhärten. Sie muß beständig gegen Kontamination im frischen und erhärteten Zustand sein.
- Die Masse muß eine geringe Durchlässigkeit sowohl gegen Wasser als auch gegen Sickerwasser aus der Altlast haben.

## 7.3 Eignungsprüfungen

Zum Nachweis, ob die bei der Altlastsanierung eingesetzten Dichtwandmassen sämtliche Anforderungen erfüllen, sind unter realistischen Gesichtspunkten Eignungsprüfungen durchzuführen. Unter Berücksichtigung aller in Frage kommenden Anforderungen und Prüfungen sind in Anlehnung an /42/ in Tabelle 7.3 die **Eignungsprüfungen** aufgelistet.

**Tabelle 7.3 : Eignungsprüfungen an zementhaltigen Dichtwandmassen**

Untersuchungsbereich	Kennwert	Verfahren
Herstellung, Auswahl der Bentonite, Auswahl der Zemente	Dichte, Auslaufzeit, Filtratwasserabgabe, Fließgrenze	Bestimmung der Meßwerte direkt nach der Herstellung und 1 h später an unbewegten BZS
Verarbeitung, Einfluß der Bentonite, Einfluß der Zemente	Auslaufzeit, Filtratwasserabgabe, Fließgrenze, Druckfestigkeit	Rührversuch, Bestimmung der Meßwerte direkt nach der Herstellung und alle 2 h bis zur Dauer der Aushubzeit mind. 5 h an bewegten BZS
Einbaukriterien bei Herstellung in kontaminierten Wässern und Böden	Auslaufzeit, Filtratwasserabgabe, Fließgrenze, Dekantation, Erstarrung	Herstellung der BZS mit 10% Sickerwasser und 90% Leitungswasser, Erstarrung unter Sickerwasser und Leitungswasser
Erstarrung	Nadeleindringverhalten, Scherfestigkeit	an unter Wasser gelagerten Proben
Spannung, Festigkeit, Spannungs-Verformungsverhalten	einaxiale Druckfestigkeit	an unter Wasser gelagerten Proben nach 14, 28 und 56 d
Erosionsverhalten	einaxiale Druckfestigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert, hydraul. Gefälle, Ausspülrate an Calcium	Durchströmung der Proben mit Stauwasser mind. 90 d, vorzugsweise 180 d
Durchlässigkeitsprüfung, Beständigkeitsprüfung	Durchlässigkeitsbeiwert	Durchlässigkeit bei konstantem hydraulischen Gefälle ( $i \geq 30$ ) isotroper Spannungszustand ohne back pressure mit Stauwasser üblich 90 d

**Tabelle 7.4: Bestimmung der Eigenschaften der Bentonitsuspensionen und frischen Dichtwandmassen**

<b>Kennwert</b>	<b>Standardmeßgeräte</b>
Dichte ( $t/m^3$ )	Spüluingswaage Hydrometer Pyknometer
Auslaufzeit (sec)	Marsh-Trichter
Filtratwasserabgabe ( $cm^3$ )	Filterpresse (API) 7 bar, 7,5 min
Fließgrenze ( $N/m^2$ )	Pendelgerät Larümeter Kugelharfe

Die Eignungsprüfungen gliedern sich in :

#### a) **Frischsuspensionen**

Prüfung der Eigenschaften der frischen Dichtwandmasse.

Die Eigenschaften der Bentonitsuspensionen beim Zweiphasenverfahren und der Dichtwandmasse beim Einphasenverfahren werden entsprechend der Tabelle 7.4 gemessen. Ist mit eindringender Kontamination in der Bentonit-Suspension oder der frischen Dichtwandmasse während der Aushubphase entsprechend Bild 5.2a zu rechnen, so sollte auch die Dekantation gemessen werden. Sie gibt einen Hinweis auf die Stabilität der Bentonit-Suspension und der Dichtwandmasse.

#### b) **Erhärtete Masse**

Untersuchungen zu Verarbeitbarkeit und Erstarrungsverhalten

Die bewegten Suspensionen werden in einem Rührversuch geprüft, wobei sie jeweils 5 Minuten lang mit  $500 \pm 200$  Umdrehungen pro Minute gerührt und dann 15 Minuten in Ruhe gelassen werden. Das Erstarrungsverhalten wird meist mit dem Nadelgerät nach Vicat bzw. mit dem Tauchstab nach DIN 1164 gemessen.

#### Bestimmung des **Festigkeits-** und **Spannungs-Verformungs-Verhaltens**

An den Dichtwandmassen wird nach 14, 28 und 56 Tagen Lagerung unter Wasser die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136 bestimmt. Je nach Anforderung sollte diese Prüfung auch an älteren Proben durchgeführt werden. Das kann z.B. bei Prüfung der Erosionssicherheit an mit weichem Wasser durchströmten Proben sinnvoll sein. Wenn die Wand durch Verformungen beansprucht wird, können auch Kompressionsversuche oder Dreiaxialversuche und Zugversuche notwendig werden.

## Bestimmung der **Erosionssicherheit**

Während der Durchströmung von Dichtwandmassen mit weichem Wasser vor allem bei hohen hydraulischen Gefällen wird entsprechend dem Lösungsvermögen aus der Dichtwandmasse Calcium ausgespült. Je geringer der k-Wert und damit die eindringende Wassermenge ist, um so weniger Calcium wird auch gelöst. Untersuchungen von Carl und Strobl /4/ führten zu dem Ergebnis, daß die einaxiale Druckfestigkeit mindestens  $350 \text{ kN/m}^2$  betragen muß. Spätere Versuche von Strobl ergaben, daß mit Durchströmungsversuchen mit weichem Wasser von mindestens 180 Tagen Dauer die Ausspülrate an Calcium bestimmt werden kann und darüber die Erosionssicherheit bei hohen hydraulischen Gefällen berechnet wird. Damit sich bei strömendem Wasser keine Partikelchen aus der Wand lösen, muß die Filterstabilität der Dichtwandmasse nachgewiesen werden. Bei der Durchströmung mit Sickerwässern kann es entsprechend dem lösenden Charakter zu einer Ausspülung an Calcium kommen, die zu einer Festigkeitsminderung führen kann. Dies ist entsprechend den GDA-Empfehlungen durch Prüfung der Durchlässigkeit mit Wasser oder Prüfflüssigkeiten bzw. anstehenden Sickerwässern zu untersuchen.

## 7.4 Dichtwandmassen

In Eignungsprüfungen werden für den speziellen Anwendungsfall die Fließ- und Stützeigenschaften der frischen Suspensionen, ihre Verarbeitbarkeit, Erstarrung und Erhärtung überprüft. Dafür werden im Labor die Bentonit- und Zementsorten sowie deren wirtschaftliche Zusammensetzungen getestet. Zur Anwendung kommt sowohl Na-Bentonit (aktivierter Ca-Bentonit) sowie Ca-Bentonit, der besonders dort eingesetzt wird, wo eine hohe Beständigkeit des Bentonits gegen stark elektrolythaltige Wässer zu gewährleisten ist /24/.

Da die Dichtwandmaterialien je nach Art des Abdichtungssystems in Abhängigkeit von ihrem Aushärtungsgrad von Grund- oder Sickerwasser durchströmt bzw. angegriffen werden, ist es notwendig, den Chemismus beim Durchströmen von Proben mit Sickerwässern zu beobachten. Hier muß insbesondere die Veränderung der Durchlässigkeit dieser Werkstoffe untersucht werden. Bei Ton-Zement-haltigen Dichtwandmaterialien handelt es sich um Produkte, die im Laufe der Durchströmung durch den Aushärtungsgrad und die damit verbundene Reduzierung der Porosität die Durchlässigkeit verringern.

Durch die Wahl des Zementes und die Wahl des Bentonits können maßgebliche Eigenschaften der Dichtwand entscheidend verändert werden. So kann z.B. durch die Wahl der Komponenten die Beständigkeit beeinflusst werden (Tabelle 7.5). Die hier behandelten Dichtwandmassen sind Na-BZS und Ca-BZS, die im Einphasenverfahren eingesetzt werden.

	Flüssigkeiten	Zemente			Bentonite		
		PZ	HOZ 35L	HOZ 35L-NW/HS	Na-Bentonit (inkl. Ca-Bentonit)	Ca-Bentonit	Allapulgit
Wässer	Fluß- und Seewasser	○	○	○	○	○	○
	weiches Wasser	◐	◐	◐	○	○	○
	saures CO <sub>2</sub> -Wasser	◑	◑	◑	○	○	○
	Meerwasser	◐	○	○	◐ <sup>2)</sup>	◐ <sup>2)</sup>	○
	sulfathaltiges Wasser	◑	◐	○	○	○	○
org. Stoffe	PAK	◐	◐	◐	○	○	○
	Teeröle	◐	◐	◐	○	○	○
	Aromate Phenole	◐	◐	◐	○	○	○
org. Säuren	Essigsäure	◐	◐	◐	◐	◐	keine Angaben
	Ameisensäure	○	○	○	◐	◐	

○ beständig    ◐ geringer Angriff    ◑ mittlerer Angriff    ● starker Angriff

1) Betonaggressivität  
 2) bei elektrolythaltigen Wässern kann es zum Kationenaustausch kommen

Tabelle 7.5 : Beständigkeit von Zementen und Bentoniten gegen verschiedene Flüssigkeiten

Bentonit [ kg ]	Zement [ kg ]	Wasser [ kg ]	Prüfflüssigkeit	Beständigkeit		k-Wert (28 Tage) [ m/s ]
				Stabilität frisch	erhärtender Zustand	
Na-Bentonit 41,7	175 HOZ 35 L NW/HS HOS 72% MA	925,9	91% Diesel 9% Motoröl	○	○	
Na-Bentonit 38,0	200 HOZ 35 L HOS 65% MA	920,1		○	○	$2 \cdot 10^{-10}$
Ca-Bentonit 175	175 HOZ 35 L NW/HS HOS >70% MA	875,6		◐	○	
			Sickerwasser SAD Malsch	◐	○	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Na-Bentonit und Ca-Bentonit 20 175	175 HOZ 35 L NW/HS HOS 73% MA	871,9	Sickerwasser SAD Sprenglingen	●	○	

○ kein Angriff    ◐ geringer Angriff    ● sehr starker Angriff

Tabelle 7.6: Auswahl beständiger Dichtwandmassen mit Na-Bentoniten und Ca-Bentoniten gegenüber Ölen und Sickerwässern aus SAD

Der Bentonit hat in der Dichtwandmasse die Aufgabe, der Suspension genügende Stabilität und Stützwirkung zu verleihen und den Zement in Schwebelage zu halten. Daher muß bei der Herstellung der Wand beachtet werden, daß die Stützwirkung der Bentonitsuspension, insbesondere bei der Erstellung der Schlitzwand im Zweiphasenverfahren, durch Wasser und Inhaltsstoffe nicht beeinträchtigt wird.

Für jede Dichtwandmasse müssen zunächst ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften überprüft und die Wechselwirkung von Bentonit und Zement untersucht werden. Handelt es sich um salzhaltiges Sickerwasser, mit dem die frische Suspension bei der Herstellung in Berührung kommen kann, sind oft Na-Bentonite gegenüber Ca-Bentoniten vorzuziehen. In humushaltigen Böden muß eine hohe Na-Bentonitkonzentration und geringe Zementkonzentration verwendet werden, da es meist zu einem Stabilitätsverlust kommt; bei Wässern mit saurem Charakter sind Ca-Bentonite stabiler. Bei vorhandenen anorganischen und organischen Kontaminationen, die ebenfalls zu einem Verlust der Stabilität der Suspension bzw. zu einer Zerstörung der erhärteten Struktur führen können, hat sich die Verwendung von Attapulgit als erfolgversprechend herausgestellt /49/.

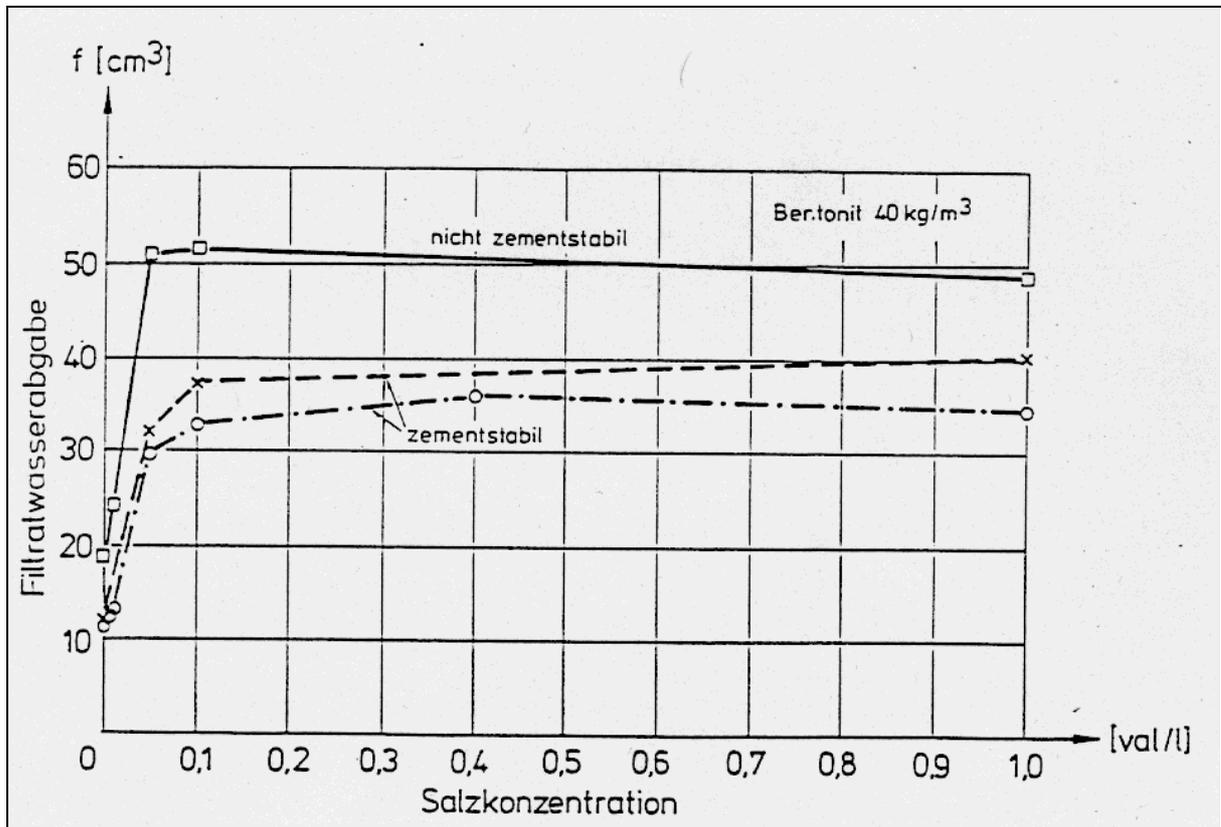
Die Anteile der Komponenten der BZS sollen nach E3-2 in kg Bentonit, kg Zement und kg Wasser je m<sup>3</sup> Frischsuspension angegeben werden. Davon abweichend werden aus ausführungstechnischen Gründen nachfolgend die Komponenten in kg Bentonit je m<sup>3</sup> Wasser und kg Zement je m<sup>3</sup> Frischsuspension dargestellt.

Zum Vergleich:

Bentonit kg/m <sup>3</sup> Wasser	Zement kg/m <sup>3</sup> Frischsus- pension		Bentonit kg/m <sup>3</sup>	Zement kg/m <sup>3</sup>	Wasser kg/m <sup>3</sup>
40	175	entspricht	37,1	175	927,7
45	150		42,0	150	934,1
45	175		41,7	175	925,9
45	200		41,3	200	917,8
200	175		175,0	175	875,6
200	200		173,6	200	867,8

### 7.4.1 Na-Bentonit-Zement-Suspension

Zementstabile Bentonite zeichnen sich dadurch aus, daß sie gegen Salze wesentlich stabiler als nicht zementstabile Bentonite sind; Bild 7.3 zeigt einige Versuchsergebnisse. Zementstabile Bentonite haben bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen in der Suspension eine geringere Filtratwasserabgabe.



**Bild 7.3:** Einfluß von  $\text{CaCl}_2$ -Lösungen auf die Filtratwasserabgabemengen von Bentonitsuspensionen mit zementstabilen und nicht zementstabilen Bentoniten /25/

Bei der Zugabe von Zement zu Na-Bentonit wird ein Teil des Na-Bentonits durch das  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  wieder in Ca-Bentonit rückverwandelt (Reaktivierung). Die Reaktivierung hängt von der Bentonitsorte in der Weise ab, daß Bentonite mit geringer Austauschkapazität und/oder Zugabe von Pufferstoffen weniger reaktiviert werden. Zemente mit einem geringen HOS-Anteil setzen gegenüber Zementen mit hohem HOS-Anteil mehr  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zu Beginn der Hydratation frei, so daß sie den Bentonit mehr reaktivieren. Die Folge ist eine zunehmende "Verflüssigung" der Bentonit-Zement-Suspension. Die Auslaufzeiten der BZS mit geringem HOS-Anteil (z.B. 50 Gew.-%) verringern sich mit zunehmender Rührzeit. Bei Zementen mit höherem HOS-Anteil steigen die Auslaufzeiten dagegen stetig an.

Die "Verflüssigung" kann durch eine höhere Bentonitkonzentration (Bild 7.4) gestoppt werden.

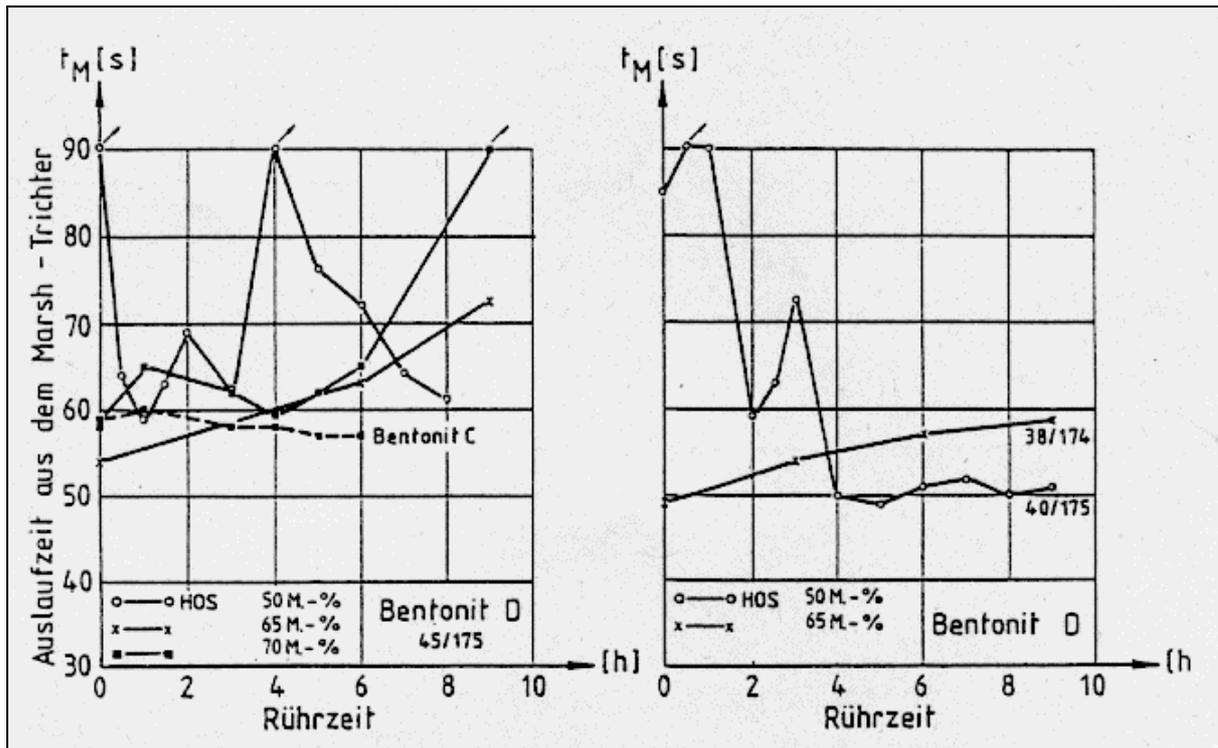


Bild 7.4: Auslaufzeiten bewegter BZS in Abhängigkeit vom HOS-Anteil /25/

Unbewegte BZS weisen eine stetige Zunahme der Viskosität (Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter) auf. Bewegte BZS haben aufgrund der Rührbewegung eine zeitverzögerte Zunahme der Auslaufzeit.

BZS haben weitaus höhere Filtratwasserabgaben als reine Bentonitsuspensionen. Die Filtratwasserabgabe steigt mit der Verarbeitungszeit an. Durch Zemente mit einem höheren HOS-Anteil wird die Filtratwassermenge erhöht (s. Bild 7.5). Die Filtratwasserabgabemengen sind ein Kennzeichen für die Stabilität der BZS. Durch Eintrag von Kontaminationen in die BZS bei der Herstellung können diese soweit erhöht werden, daß es zu einem Stabilitätsverlust, d.h. zu einer Entmischung der BZS kommt. Dies muß durch Auswahl stabiler Bentonite mit höherer Bentonitkonzentration und ggf. geringerer Zementkonzentration verhindert werden.

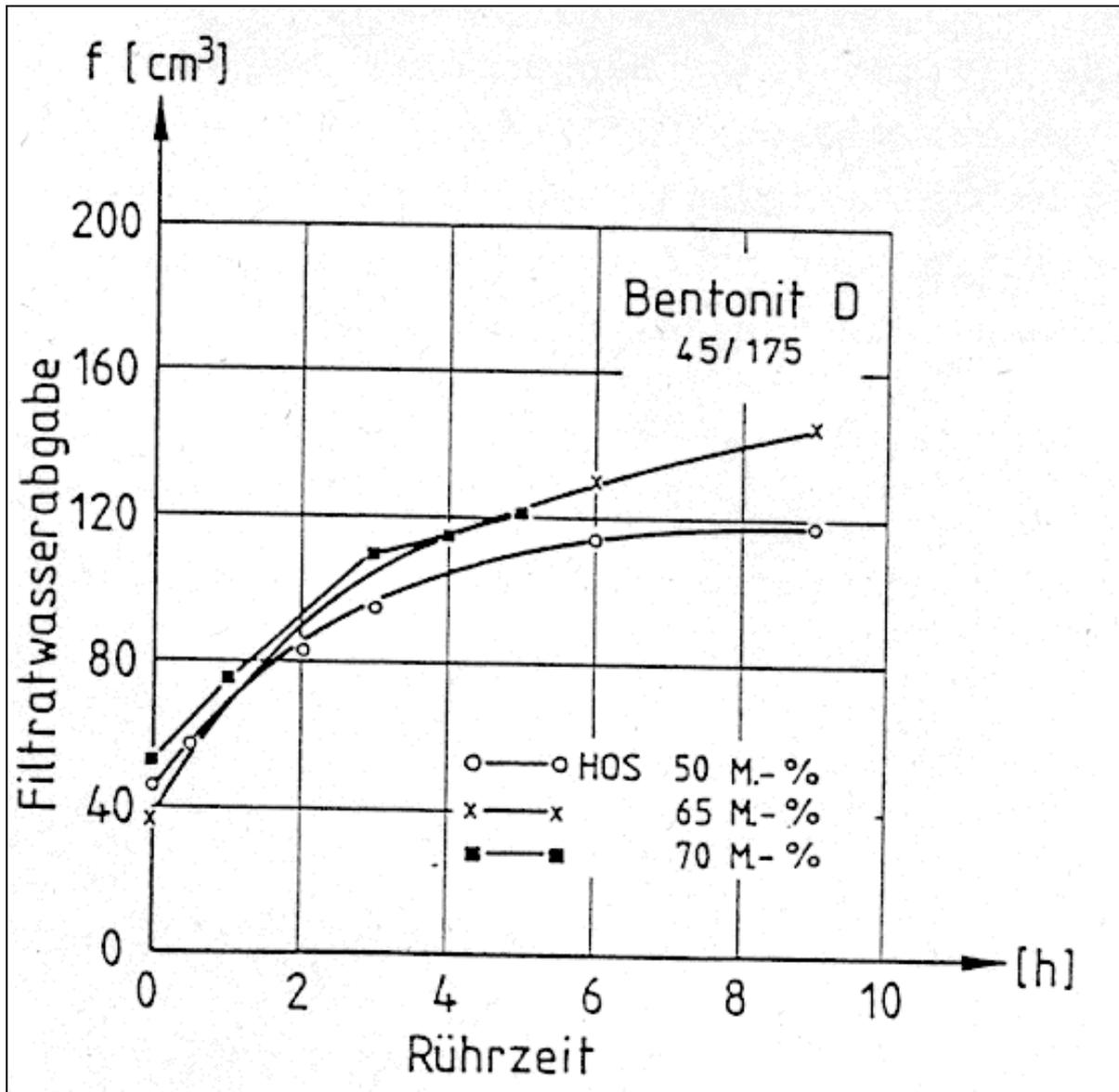


Bild 7.5: Filtratwasserabgaben als Funktion der Rührzeit /25/

Die Erstarrung von Na-BZS mit Bentonitgehalt von  $45 \text{ kg/m}^3$  und Zementgehalten zwischen  $175$  und  $150 \text{ kg/m}^3$  hängt deutlich von der verwendeten Zementsorte (HOS-Anteil) ab. Nach Bild 7.6 liegt der Erstarrungsbeginn (Eindringung des Tauchstabes  $40 \text{ mm}$ ) zwischen etwa  $20$  und  $40$  Stunden nach Suspensionsherstellung und das Erstarrungsende (Eindringen des Tauchstabes  $\leq 1 \text{ mm}$ ) zwischen etwa  $40$  und  $60$  Stunden nach Herstellung.

Bei der Hydratation bindet der Zement bis zu  $40 \text{ Gew.-%}$  Wasser. Trotz der hohen W/Z-Werte in Na-BZS sind nur  $2/3$  bis  $1/2$  des Porenvolumens mit nicht gebundenem Wasser gefüllt. Durch die Wahl eines beständigen Bentonits und sulfatbeständigen Zementes können hier in Abhängigkeit vom effektiven Porenvolumen Wasserdurchlässigkeiten im Bereich  $k < 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  bei abgeordneten Dichtwandmassen erreicht werden. Diesen geringen k-Wert hat sowohl eine BZS mit  $40 \text{ kg Na-Bentonit/m}^3$  Wasser und  $200 \text{ kg Zement/m}^3$  BZS als auch eine BZS mit  $45 \text{ kg Bentonit/m}^3$  Wasser und  $150 \text{ kg Zement}$ , da sie in etwa das gleiche effektive Porenvolumen aufweisen. Damit wird die Möglichkeit angesprochen, bei niedrigerer Zementkonzentration durch höheren Bentonitanteil eine relativ undurchlässige Dichtwandmasse zu erzielen.

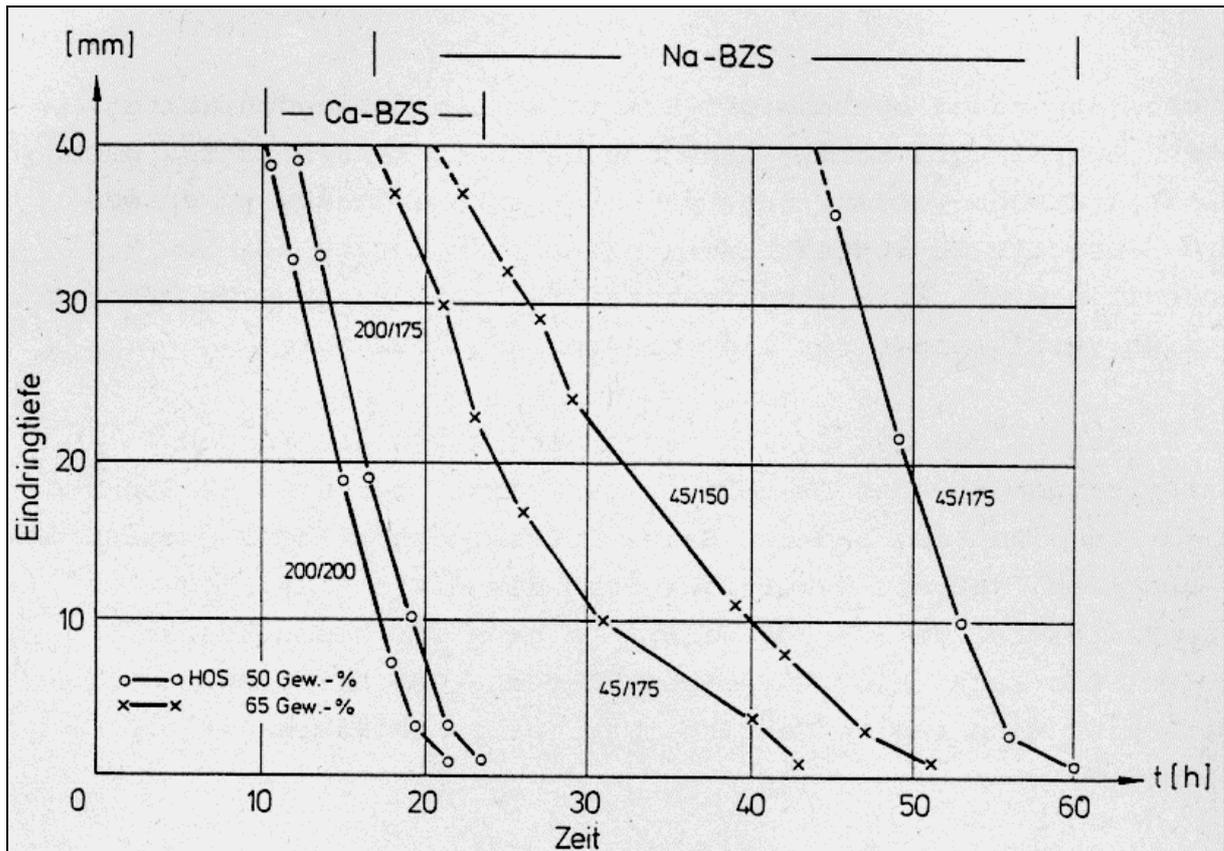


Bild 7.6 : Erstarrungsmessungen mit Vicat-Nadelgerät (Tauchstab) /25/

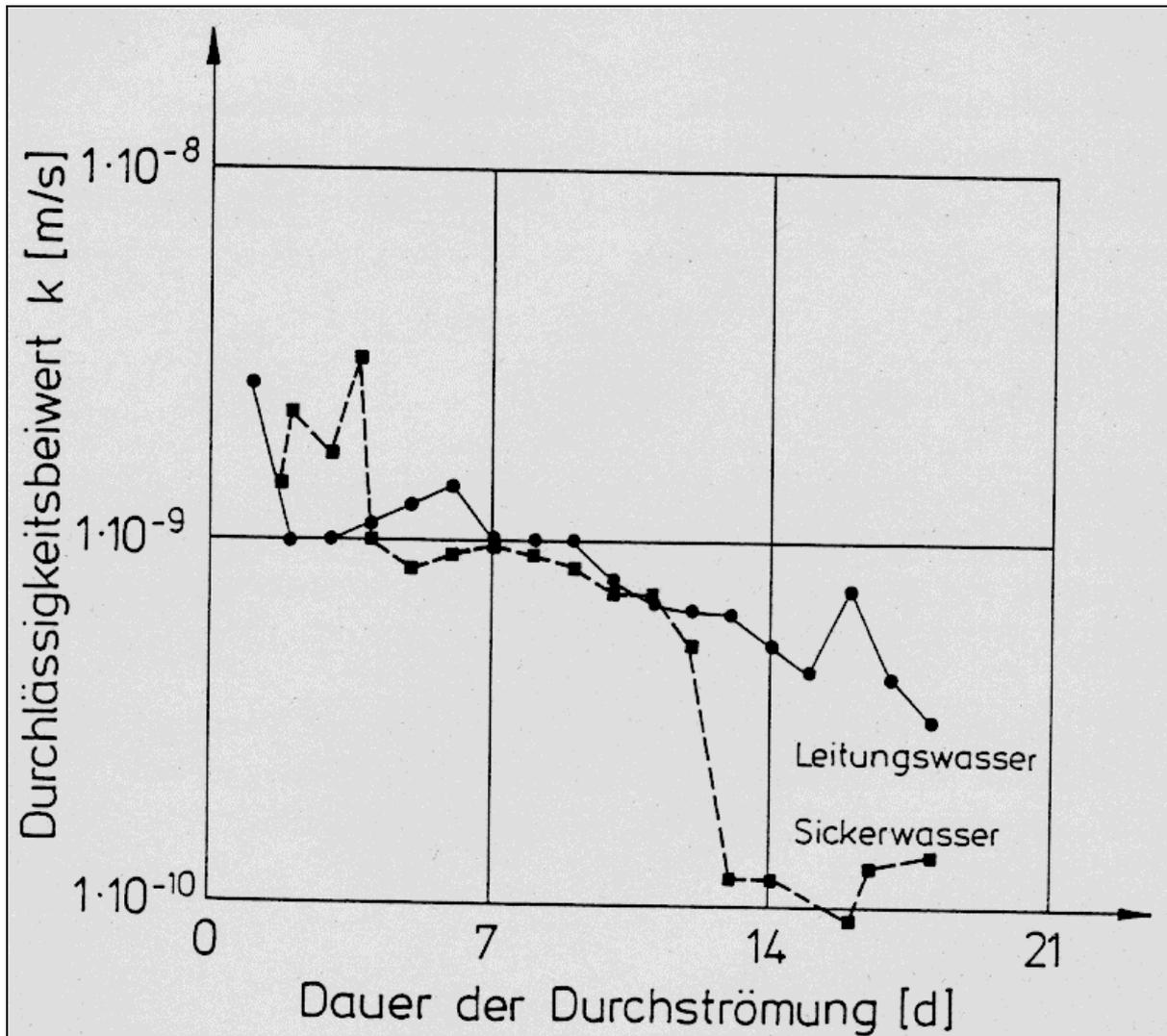
## 7.4.2 Ca-Bentonit-Zement-Suspension

Soll die Durchlässigkeit der aushärtenden Dichtwandmasse so gering wie möglich sein und ist ein Angriff des Na-Bentonits durch austauschbare Kationen zu befürchten, so sind feststoffreichere Ca-BZS mit ggf. geringem Anteil von Na-Bentonit zu verwenden. Gegenüber Na-BZS können hier höhere Bentonit-Konzentrationen verarbeitet werden. Der Ca-Bentonit bindet zwar nicht so viel Wasser wie ein Na-Bentonit, bietet aber den Vorteil, daß im Bentonit das  $\text{Ca}^{2+}$ -Ion weniger austauschbar ist als das  $\text{Na}^{+}$ -Ion.

Da bei Verwendung beständiger BZS meist ein hochgeschlackter Zement zum Einsatz kommt, kann die Bentonit-Konzentration nicht beliebig erhöht werden, ohne daß die Dichtwandmasse zu spröde wird. Günstige Ca-Bentonit-Konzentrationen liegen bei 200 kg Bentonit pro  $\text{m}^3$ . Wird eine feststoffreichere Suspension benötigt, so sind Verflüssiger für die Verarbeitung notwendig.

Die Eigenschaften der Ca-BZS hängen stark von der Bentonit-Konzentration ab. Das Erstarrungsende liegt bei etwa 22 Stunden (Bild 7.6). Auf der anderen Seite ist bei erhärtenden Suspensionen zu beachten, daß der k-Wert zwischen dem 14. und 28. Tag Probenalter bei Na-BZS und Ca-BZS je nach der Zementkonzentration gleich sein kann. Mit zunehmendem Probenalter tritt bei Ca-BZS aber meist eine rapide Verringerung der Durchlässigkeit ein (Bild 7.7).

Ca-BZS erreichen wegen der Feststoffgehalte einaxiale Druckfestigkeiten bis zu Werten über  $3000 \text{ kN/m}^2$ .



**Bild 7.7: Durchlässigkeitswerte von Ca-BZS (200/175) über Dauer der Durchströmung mit Sickerwasser und Leitungswasser**

Beständigkeitsversuche an erhärtenden Ca-BZS zeigen, daß diese bei der Durchströmung mit

- Aqua dest
- NH<sub>4</sub>Cl.
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- NaOH

je nach dem Lösungsvermögen k-Werte zwischen  $10^{-10}$  m/s und  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s nach 80tägiger Durchströmung aufweisen. Bei der Durchströmung mit der Säure bilden sich an der Anströmseite Korrosionsschichten aus, die abdichten.

Die Ursache kann in der Bildung von mehrfach hydratisierten Ca- und Magnesium-Aluminat-Sulfaten liegen, die in den Porenraum "hineinwachsen" und somit die Durchströmung verhindern.

### 7.4.3 Schmalwandmassen

**Schmalwandmassen** bestehen meist aus einer Na-Bentonit-Zement-Steinmehl-Mischung mit Portlandzement. Sie sind gegen Sickerwässer aus Hausmülldeponien beständig und erreichen k-Werte zwischen  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s und  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s.

Wenn beständigere Komponenten als Na-Bentonit und Portland-Zement gewählt werden müssen, hat sich die nachfolgend angegebene Mischung aus Ca-Bentonit und HOZ als wirksam erwiesen:

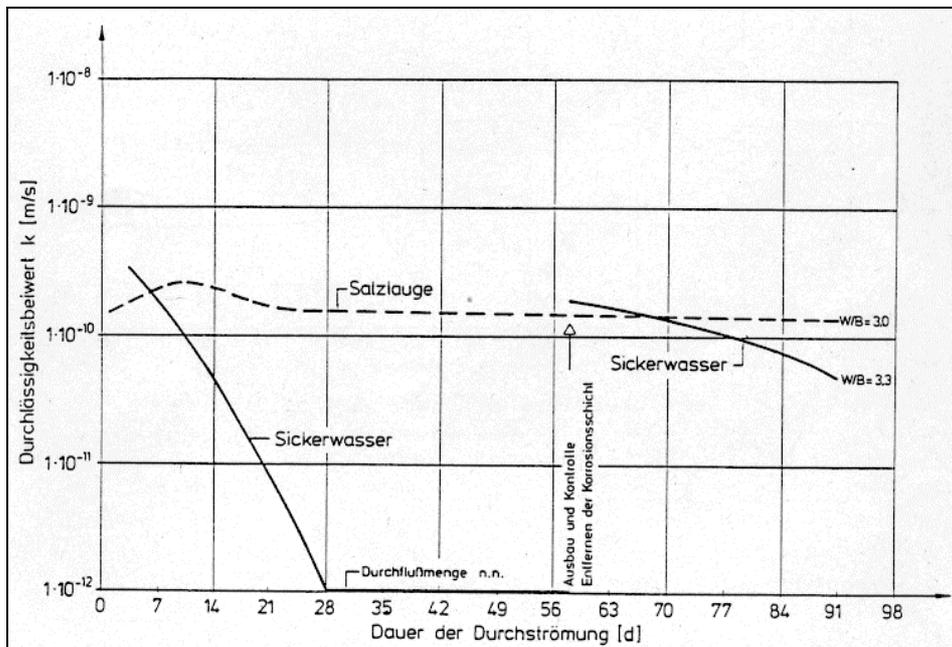
Ca-Bentonit	115	
Zement HOZ 35 L	138	
Steinmehl	576	je in kg/m <sup>3</sup>
Wasser	645	
1,2% DynagROUT DWR-C		

Wegen der hohen Feststoffkomponente ist hier ein Verflüssiger notwendig.

### 7.4.4 Neuentwicklungen

#### a) DiWa-mix

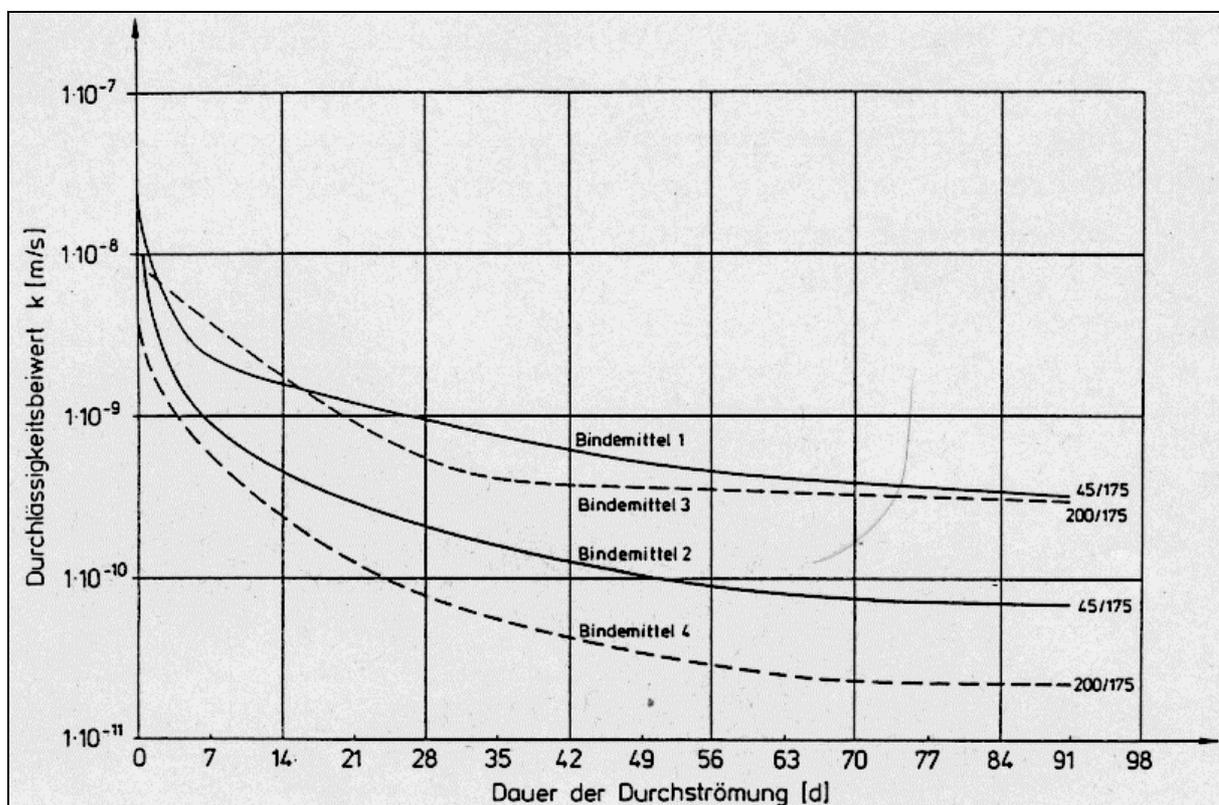
Seit kurzem ist ein Fertigprodukt auf der Basis von Na-Bentonit und speziellen hydraulischen Bindemitteln auf dem Markt. Dieses Fertigprodukt kann ohne Quellzeit des Bentonits sofort verarbeitet werden. Es bietet den Vorteil, daß es sehr lange verarbeitbar ist und geringe Filtratwasserabgaben aufweist. Es ist gegenüber Sickerwässern und Salzlauge sehr beständig, wobei k-Werte von  $< 10^{-10}$  m/s gemessen werden (Bild 7.8).



**Bild 7.8 : Durchlässigkeitsbeiwerte von DiWa-mix über die Dauer der Durchströmung mit Sickerwasser und Leitungswasser;  
Probenalter: W/B = 3,3 18 Tage (Sickerwasser), W/B = 3,0 28 Tage (Salzlauge)**

## b) Bentonit-Bindemittel-Suspensionen

Als Beispiel für eine weitere Entwicklung sei hier die Verwendung resistenter Bindemittel (Sonderzemente) in Dichtwandmassen genannt, die wiederum geringe Durchlässigkeiten bei der Durchströmung mit Sickerwässern bewirken (Bild 7.9) /50/.



**Bild 7.9: Durchlässigkeitsbeiwerte von Bentonit-Bindemittel-Proben über die Dauer der Durchströmung mit Sickerwasser**

\_\_\_\_\_ Na-Bentonit

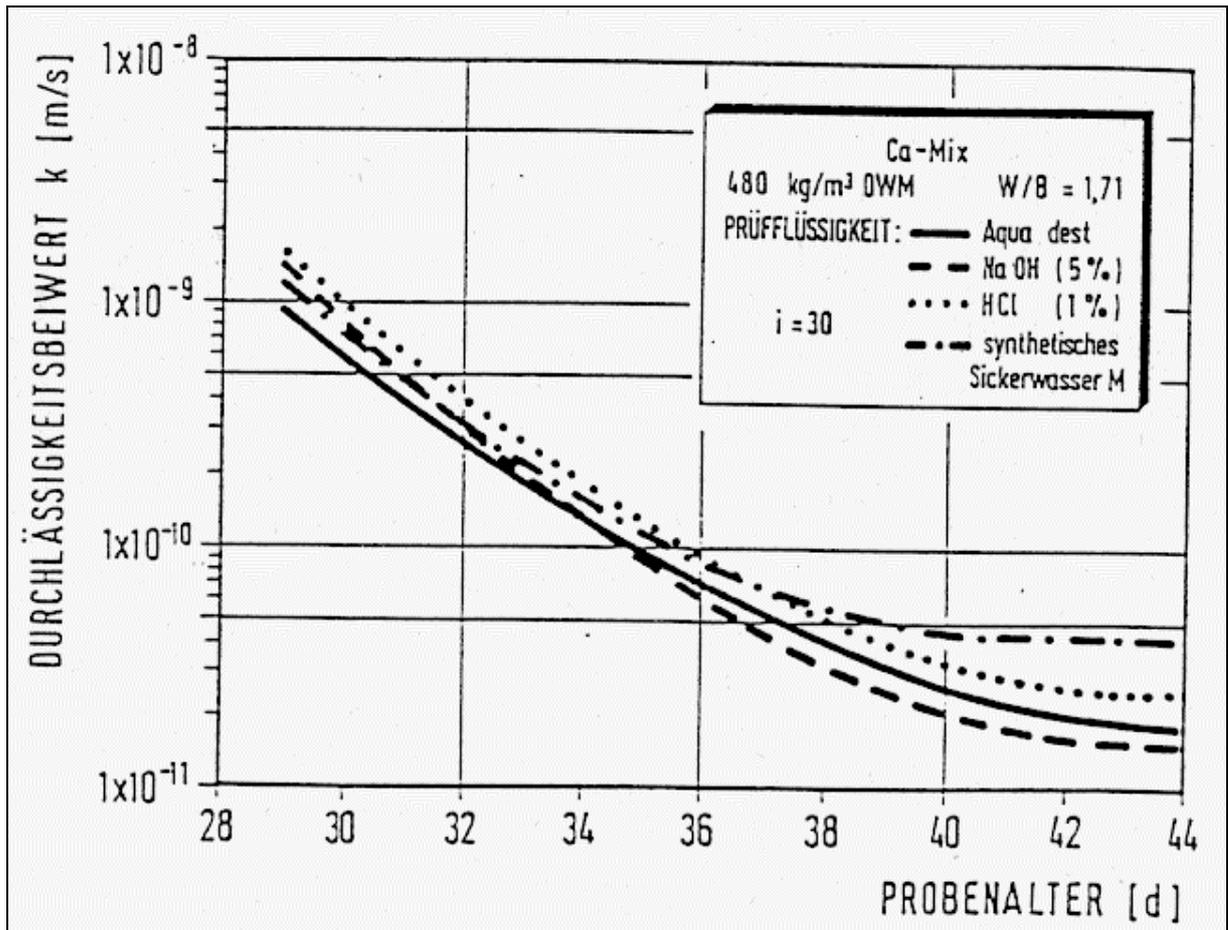
- - - - - Ca-Bentonit

## c) DynagROUT-Zweiphasen-Dichtungsmassen

Um die stark korrosiven Einflüsse der Schadstofffracht aus Altlasten auf die Baustoffe zu reduzieren wurde eine zementfreie Dichtungsmasse entwickelt, die gegenüber stark aggressiven Sickerwässern und Kohlenwasserstoffen sehr beständig ist und k-Werte zwischen  $10^{-10}$  und  $10^{-11}$  m/s bei der Durchströmung mit diesen Wässern aufweist /37/.

## d) Camix

Als Weiterentwicklung wurde von der Herstellerfirma ein Fertigprodukt auf Ca-Bentonit-Basis getestet. Beständigkeitsversuche mit dem Sickerwasser aus der Industriemülldeponie Spremlingen zeigten eine größere Instabilität als bei DiWa-mix. Im ausgehärteten Zustand lagen die k-Werte im Bereich von  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s bei der Durchströmung mit dem synthetischen Sickerwasser M (Bild 7.10).



**Bild 7.10:** Durchlässigkeitsbeiwerte von Ca-mix bei verschiedenen Prüfflüssigkeiten, Einbaualter 28 Tage, aus : Prüfbericht der Firma Anneliese Zementwerke, Januar 1988

#### e) Solidur

In Bild 7.11 sind die Entwicklungen der einaxialen Druckfestigkeiten und Durchlässigkeiten von Proben mit 175 kg Fertigmischung Solidur pro m<sup>3</sup> Dichtwandmasse dargestellt. Auch dieses Produkt ist für Dichtwände einsetzbar und wird vom Hersteller auch für Schmalwände geliefert.

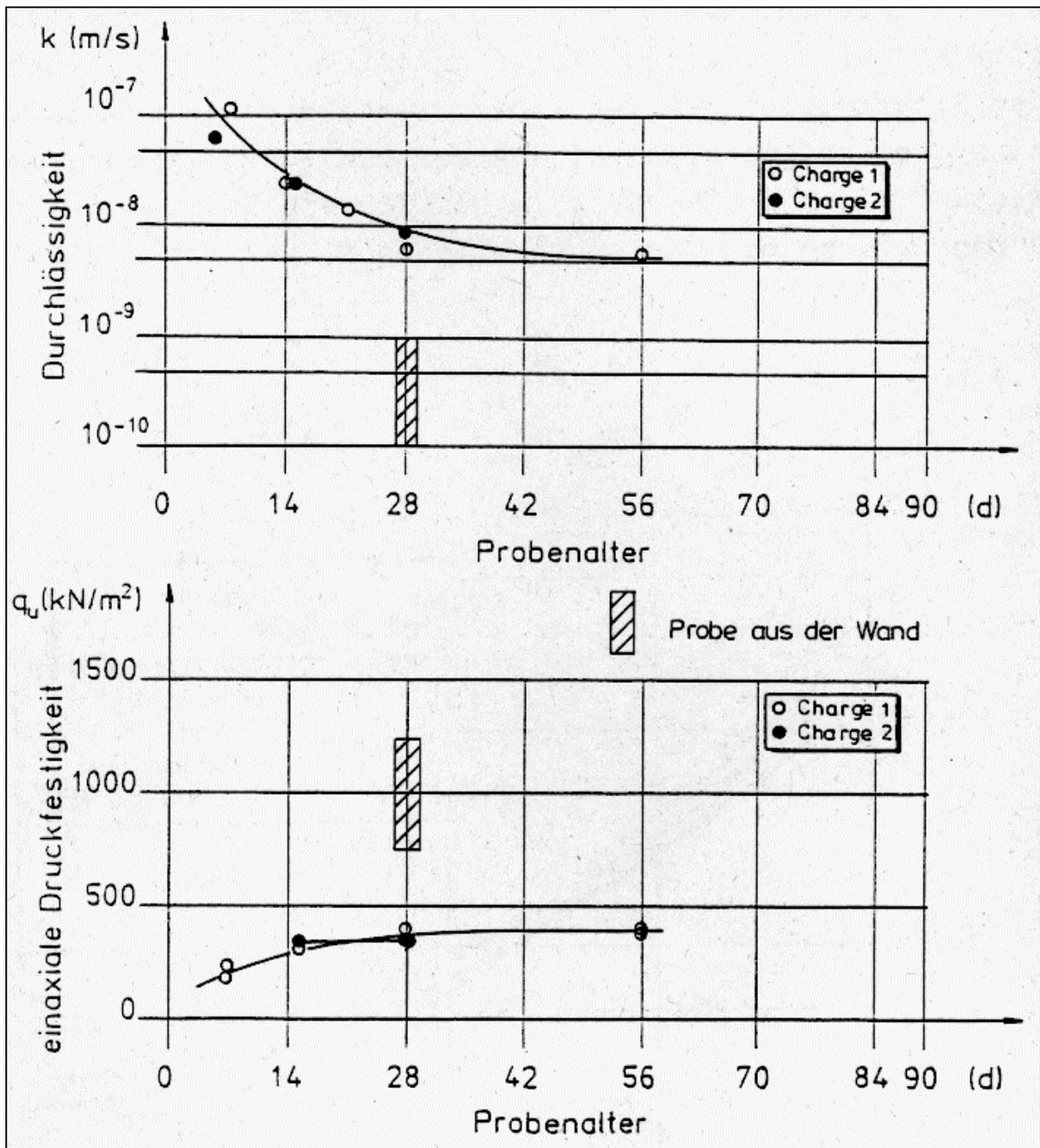


Bild 7.11: Einaxiale Druckfestigkeiten und Durchlässigkeiten in Abhängigkeit vom Probenalter - Fertigmischung Solidur

## 8. Sohlabdichtungen

### 8.1 Konzeption

Unter Sohlabdichtungen sind hier nachträglich eingebrachte horizontale Barrieren gemeint.

Es gibt einige Vorschläge für nachträglich eingebrachte Sohlabdichtungen, die derzeit diskutiert und weiterentwickelt werden. Die Konzepte gehen entweder von der Herstellung einer injizierten Sohle oder der flächendeckenden Auffahrung eines Hohlraumes und anschließender Verfüllung mit Dichtmaterial aus. Mineralische Baustoffe für Injektionen und durchgehende Sohlabdichtungen sind Bentonit-Zement-Mischungen. Als Füllmassen für Stollen kommen plastische Tonbetone unter Verwendung von Kies-Sand-Gemischen mit Schluff-, Tonmehl-, Bentonit- und Zementzusätzen in Betracht. In Bild 8.1 sind die Verwendung bodenspezifischer Injektionsmittel sowie die Anwendungsmöglichkeiten nach DIN 4093 aufgelistet.

**Bild 8.1: Arten und Anwendungsmöglichkeiten der Injektionsmittel nach DIN 4093**

	Hohlräume in		Abdichtung	Verfestigung
1	Lockergestein	Kies	Tonzementsuspension Tonzementsuspension und Silikatgel <sup>1)</sup>	Zementsuspension Tonzementsuspension Tonzementsuspension und Silikatgel <sup>1)</sup>
2		Sand	Silikatgel Tonsuspension	Silikatgel
3		schluffiger Sand	Silikatgel Kunststofflösung (wäßriges oder nichtwäßriges System)	Silikatgel Kunststofflösung (nichtwäßriges System)
4	Fels	Hohlräume (Karst, große Klüfte)	Zementpaste Zementmörtel Zementsuspension Tonzementsuspension Schaumstoff	Zementpaste Zementmörtel Zementsuspension Tonzementsuspension
5		Klüfte (> 0,1 mm)	Zementsuspension Tonzementsuspension Tonzementsuspension und Silikatgel <sup>1)</sup>	Zementsuspension Tonzementsuspension Tonzementsuspension und Silikatgel <sup>1)</sup>
6		Klüfte (≥ 0,1 mm)	Silikatgel	Silikatgel Kunststofflösung (nicht wäßriges System)
7	Bauwerke	Hohlräume (Stollen, Kanäle)	Zementpaste Zementmörtel Zementsuspension	Zementpaste Zementmörtel Zementsuspension
8		Fugen und Risse (> 0,1 mm)	Zementsuspension Tonzementsuspension	Zementsuspension Tonzementsuspension
9		Risse (≤ 0,1 mm)	Kunststofflösung (wäßriges oder nichtwäßriges System)	Kunststofflösung (wäßriges oder nichtwäßriges System)

<sup>1)</sup> Zweiphaseninjektion

## 8.2 Anforderungen an Materialien

Sohlabdichtungen haben die Aufgabe, den Untergrund der Altlasten nachträglich gegen Sickerwasser bzw. Kontaminationen abzudichten. Die Abdichtung muß ihre Funktionsfähigkeit, Dauerbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit über lange Zeit behalten. Die Anforderungen an das einzubringende Dichtmaterial sind entsprechend dem jeweiligen Bauverfahren

- auf das Herstellungsverfahren abgestimmte physikalische Eigenschaften,
- rasche Wirksamkeit (Dichtigkeit nach dem Einbau, Festigkeit),
- Beständigkeit gegen Kontamination im frischen und erhärteten Zustand,
- Erstarrung und Erhärtung im teilweise kontaminierten Boden,
- Dichtigkeit sowohl gegen Wasser als auch gegen Stoffe aus dem Deponiekörper, die schwerer sind als Wasser und nach unten sinken.

Die Herstellung der Injektionssohlen unterscheidet sich nicht grundsätzlich von der Herstellung der Injektionswände (s. Abschnitt 4.1.3). Die Anwendungsbereiche einsetzbarer Mischungen sind bereits dort genannt. Meist wird der anstehende Boden in seiner Struktur aufgelöst und mit der Injektionsmischung vermischt. Die Einpressung von Bentonit-Zement-Suspensionen bzw. von Silikat-Gelen in den anstehenden Boden ist ebenfalls von Stollen aus möglich. Die Anforderungen sind daher zu unterscheiden in

- Anforderungen an die einzubringende Injektionsmischung (Suspension),
- Anforderungen an die hergestellte Injektionsmasse aus Injektionsmischung und Boden (erhärtende und ausgehärtete Masse).

Die einzubringenden Injektionsmischungen müssen je nach Komponentenauswahl fließfähig sein und ggf. geringe Sedimentation (Dekantation) aufweisen sowie eine lange Verarbeitungszeit garantieren.

Bei dem Bauverfahren der nachträglichen Verfüllung von Stollen mit einer mineralischen Füllmasse müssen sich die Materialeigenschaften grundsätzlich von denen der Injektionssohlen unterscheiden und sich auf die Anforderungen beziehen, die sich aus dem Vorgang eines drucklosen Verfüllens eines Hohlraumes ergeben. Wenn die Stollen vorher mit einem Korngerüst aufgefüllt werden, kann für das nachträgliche Verpressen eine Injektionsmischung entsprechend den o.g. Angaben verwendet werden.

Eine Besonderheit bei der Lockergesteinsinjektion ist der lagenweise Wechsel der Bodendurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Kornzusammensetzung. Eine Wechselfolge von kiesigen, sandigen, schluffigen und tonigen Schichten erfordert praktisch in jeder Schicht ein anderes Injektionsmittel (Bild 8.2). Deshalb wird zunächst mit solchen Pasten oder Suspensionen injiziert, die die Kies-Sandlagen schließen. Anschließend wird mit Chemikal-Injektionen in den gleichen Bohrungen nochmals injiziert und damit auch die feinkörnigen Schichten abgedichtet bzw. verfestigt.

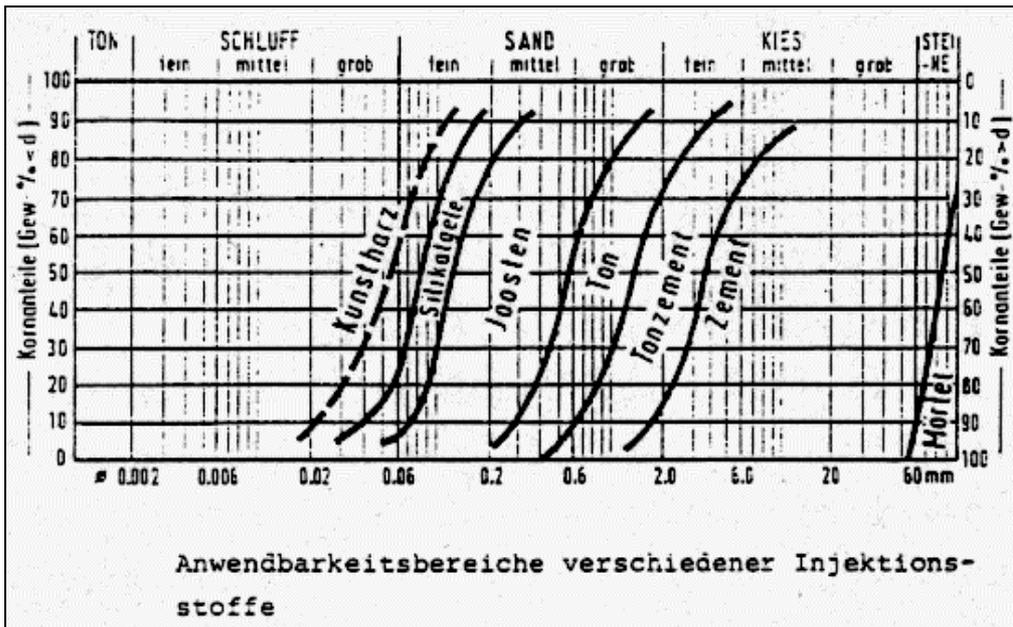


Bild 8.2a: Injektionsmöglichkeiten und Anwendungsbereiche verschiedener Injektionsstoffe

INJEKTIONS-MÖGLICHKEITEN						
GESTEINART	K-WERT m/s	ART DER DURCHLASSIGKEIT	INJEKTIONS- VERFAHREN	INJEKTIONS- MITTEL		
				ABDICHTUNG	VERFESTIGUNG	
LOCKERGESTEINE	10 <sup>-1</sup>  5 · 10 <sup>-2</sup>  10 <sup>-3</sup>  10 <sup>-5</sup>  10 <sup>-7</sup>	Porendurchlässigkeit	Injektionsstanzen, Manschettentröhre, Vibro-Ventil  (Elektrophorese)	Mörtel, Paste	Mörtel, Paste	
				Zement-Suspension	Zement-Suspension	
				Ton-Zement-Suspension	Ton-Zement-Suspension	
				Na-Wasserglas und Formamid (Weichgel), Emulsion	Na-Wasserglas und Organ Säuren (Mörtel)	
				Kunststoff	Kunststoff	
				Jet-grouting	Ton-Zement-Suspension	Zement-Suspension
HALBFESTE bis WEICHE FESTE GEST.	Mergelsteine, Tonsteine, Tuffite etc.	meist röhrenförmige Wasserwege	Packer, Manschettentröhre	Ton-Zement-Suspension	Ton-Zement-Suspension	
FESTGESTEINE	Nicht-verkarstungsfähige Festgest. Sedimentite, Magmatite und Metamorphite	- 10 <sup>-6</sup> (Öffnung ~ 0,1 mm)	Trennflächendurchlässigkeit	Packer	Ton-Zement-Suspension	Ton-Zement-Suspension
	Verkarstungsfähige Festgest. Karb., Evaporite, Basalte etc.	- 10 <sup>-6</sup> (Öffnung ~ 0,1 mm)	Trennflächendurchlässigkeit u. Lösungs-hohlräume	Packer, Schlitzröhre	Mörtel, Paste, Schaum-kunststoff	Mörtel, Paste, Schaum-kunststoff (Vorinjektion)

Bild 8.2b: Injektionsmöglichkeiten und Anwendungsbereiche verschiedener Injektionsstoffe

## 8.3 Eignungsprüfungen

Für die Suspensionen, die bei der nachträglichen Herstellung von Sohlabdichtungen verwendet werden, müssen grundsätzlich die gleichen Eignungsprüfungen wie für Dichtmassen bei der Herstellung von vertikalen Dichtwänden durchgeführt werden (s. Tabelle 7.3 und 7.4).

Bei den Verfahren, die eine Zumischung des anstehenden u.U. kontaminierten Bodens für die eingebrachte Dichtmasse beinhalten, sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Diese beziehen sich einmal auf die Mischfähigkeit des anstehenden Bodens in der Dichtmasse und insbesondere auf die Eigenschaften der Mischungen selbst. Man wird eine Bandbreite möglicher Mischungsverhältnisse erstellen, die sich an dem verwendeten und in einem Feldversuch vorab ermittelten tatsächlichen Mischungsverhältnis orientieren wird.

Für Massen zum Verfüllen von Stollen werden sich die Eignungsprüfungen aus dem Entwicklungsstand des jeweiligen Verfahrens ergeben. Dabei sind die Grundsätze, die für mineralische Basis- und Oberflächenabdichtungen sowie für vertikale Dichtwände gelten, zu beachten. Von Bedeutung ist hierbei, ob und in welchem Maße ein vom Bindemittelgehalt abhängiges Erhärten der Verfüllmasse eintritt, bzw. wie das Langzeitverhalten und insbesondere die Volumenbeständigkeit eingeschätzt werden kann.

## 8.4 Materialien

### 8.4.1 Injektionsmischungen

Die **Injektionsmischungen** auf der Basis von BZS, die unter Druck in den Boden injiziert werden, müssen eine niedrige Viskosität haben, damit sie fließfähig und auch über weite Strecken pumpbar sind. Die Zeitdauer der Verarbeitbarkeit muß in Verbindung mit dem Bauablauf und Herstellungsvorgang einstellbar sein. Durch Wahl der Bentonitsorte und -menge sowie der Zementsorte und -menge können Massen mit geringer Dekantation und niedriger Viskosität hergestellt werden. Das Absetzmaß ist umgekehrt proportional der Viskosität, das heißt, bei hoher Viskosität verringert sich der Wasserverlust infolge Dekantation.

BZS mit W/Z zwischen 3 und 6,2 sowie 3 bis 5% Bentonit führen bei einem Bentonit-Zement-Verhältnis über 0,18 mit mindestens 40 kg Bentonit pro m<sup>3</sup> Wasser zu keinem Absetzen. Durch Verwendung eines Zementes mit ca. 50% HOS können BZS mit niedriger Viskosität auch bei höherer Bentonitkonzentration verwendet werden. Bei feinkörnigen Böden mit geringem Porenvolumen ist ein Zement mit hohem Blaine-Wert zu verwenden. Er erhöht die Stabilität und dringt in die feinen Porenräume ein. Auch hier ist die Dekantation über die Bentonitzugabe steuerbar.

Die Suspensionen müssen bei Elektrolytangriff stabil bleiben. Hierfür sind zementstabile Bentonite einsetzbar. Daraus hergestellte Bentonitsuspensionen haben ein schnelles Quellvermögen sowie höhere Viskositäten und Fließgrenzen als Bentonitsuspensionen für die Schlitzwandbauweise. Die Verflüssigung der BZS, hervorgerufen durch die hier verwendeten höheren

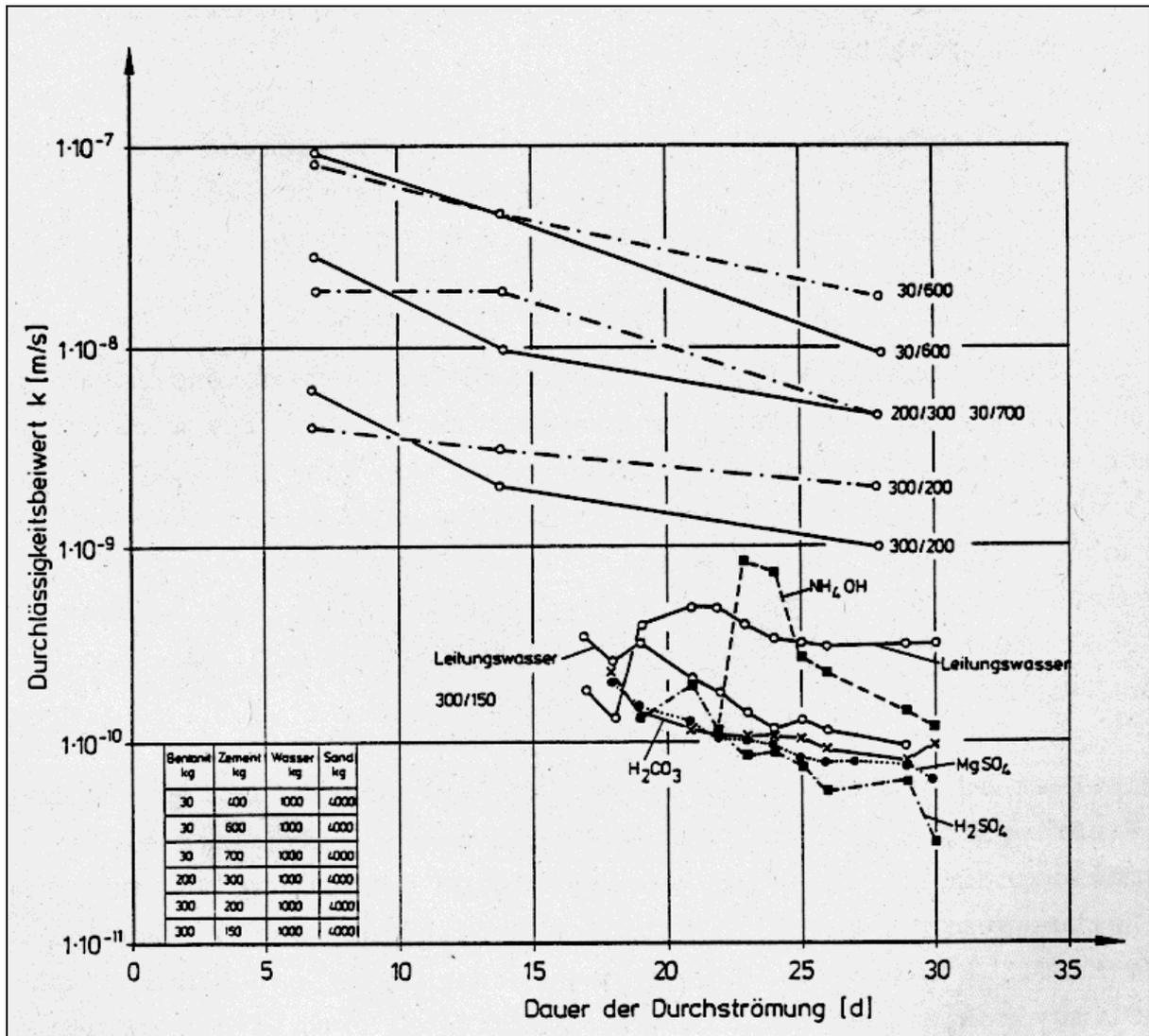
Zementmengen als bei Dichtwandmassen, wird dadurch vermindert. Um ein unkontrolliertes Abfließen in den Untergrund zu vermeiden, müssen die BZS eine ausreichende Fließgrenze haben. Hier sind für die Stoffauswahl die gleichen Erfahrungen wie bei Dichtwandmassen anwendbar.

Beim Einpressen von BZS in den Boden können feststoffreichere Suspensionen als z.B. für Dichtwände verwendet werden, da sie meist mit hohen Drücken verpreßt werden. Daher sind hier auch größere Mengen an zementstabilen Na-Bentonit und Ca-Bentonit sowie höhere Zementgehalte einsetzbar.

Werden Injektionsgele auf Wasserglasbasis statt Zement als Bindemittel verwendet, so ist durch Einsatz leicht aktivierter Ca-Bentonite gleichzeitig ein Härter im Bentonit vorhanden, der mit dem Wasserglas reagiert.

Das im Boden durch die Injektion entstehende Suspensions-Boden-Gemisch weist ein geringes Porenvolumen auf. Durch die Erhärtung ergibt sich eine rasche Dichtwirkung, die den Eintrag von Kontamination weiter minimiert. Die entstehende Masse muß bei möglichen Verformungen rißfrei bleiben, erosionssicher und setzungsunempfindlich sein. Dies ist neben der Injizierbarkeit der Böden auch bei der Entscheidung der Stoffauswahl zu berücksichtigen.

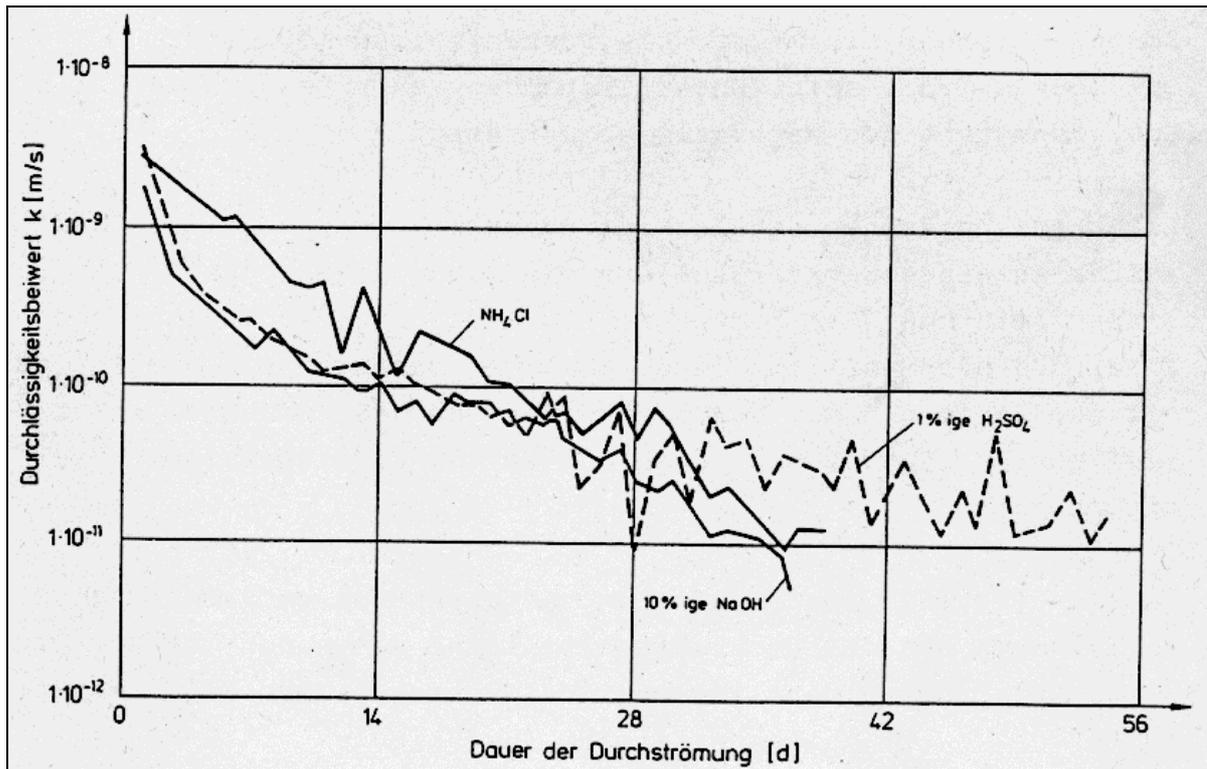
Um die Beständigkeit von BZS zu testen, wurden aushärtende Proben mit Prüfflüssigkeiten nach DIN 4030 und mit Sickerwasser einer Hausmülldeponie durchströmt. Zum Vergleich wurden die Proben auch mit Leitungswasser beaufschlagt. Die Prüfflüssigkeiten Schwefelsäure  $H_2SO_4$ , Kohlensäure  $H_2CO_3$ , Magnesiumsulfat-Lösung  $MgSO_4$  und Ammoniumhydroxid sind sehr betonaggressiv. Nach Bild 8.2 wurden Durchlässigkeiten unter  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s gemessen. Der hohe Ca-Bentonit-Gehalt in der Probe verringert die Durchlässigkeit erheblich.



**Bild 8.3: Durchlässigkeitsbeiwerte von Bentonit-Zement-Boden-Gemischen (Sohlabdichtungen) über die Dauer der Durchströmung mit Leitungswasser, Sickerwasser und sehr stark betonaggressiven Prüfflüssigkeiten /24/**

Zement-Suspensionen mit  $W/Z = 0,5$ , die unter 360 bar in schluffige Böden verpreßt werden, bilden ein Zement-Schluff-Gemisch. Auf einer Baustelle entnommene Proben wurden im Alter von 28 Tagen mit Prüfflüssigkeiten 60 Tage lang durchströmt. Bei den Prüfflüssigkeiten der in Bild 20 dargestellten Ergebnisse handelt es sich um

- 1%ige Schwefelsäure,
- Ammoniumchlorid ( $\text{NH}_4^+$  + 300 mg/l),
- 10%ige Natronlauge.



**Bild 8. 4: Durchlässigkeitsbeiwerte von Zement-Schluff-Mischungen über die Dauer der Durchströmung mit Schwefelsäure, Ammoniumchlorid und Natronlauge /78/**

Nach 28tägiger Durchströmung bzw. 56 Tagen Probenalter scheint die Durchlässigkeit einen Grenzwert anzustreben. Das Durchlässigkeitsverhalten ist also dem der Ca-Bentonit-Zement-Mischungen ähnlich.

## 8.4.2 Füllmassen für Stollen

Durch die Auswahl der Tone, Bentonite, Zemente und mineralischer Füllmassen werden fließfähige, flüssige oder pastenförmige Mischungen hergestellt. Es werden feststoffreiche Pasten verpreßt oder in die hergestellten Stollen verbracht. Durch Erhärtung ergibt sich eine rasche Dichtwirkung, die den Eintrag von Kontaminationen minimiert. Die Pasten sollen möglichst volumenbeständig sein. Unter Umständen ist eine gewisse Quellfähigkeit des Materials anzustreben.

Bei überschnittenen Stollen ist zu berücksichtigen, daß beim Auffahren eines Nachbarstollens die Masse noch schneid- und lösbar sein muß. Das bedeutet, daß die ansonsten angestrebte Erhärtung der Masse in diesem Fall nur beschränkt einsetzen darf mit dem Ziel, daß der Vortriebswiderstand bei der Stollenherstellung in gewachsenen Böden und in der Dichtwandmasse etwa gleich ist.

Hinsichtlich der Materialeigenschaften können entsprechende Erfahrungen aus der Dichtwandherstellung verwendet werden. Die Wirksamkeit der mineralischen Dichtungsmasse wird im wesentlichen durch den  $k$ -Wert charakterisiert. Ausführungen mit  $k$ -Werten zwischen  $1 \cdot 10^{-9}$  und  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s sind machbar.

Die Prüfung der Beständigkeit geeigneter Verfüllmassen wurde an Proben durchgeführt, die nach folgender Rezeptur hergestellt sind :

12,5 kg	Tonmehl
0,5 kg	Zement HOZ 35 L NW/HS
82,9 kg	Kies/Sand 0/16 mm
21,0 kg	Wasser

Die sehr feststoffreiche Mischung mit  $\rho = 2,065 \text{ t/m}^3$  ergab einen k-Wert um  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ , allerdings auch eine 28 - Tage Festigkeit von  $2,054 \text{ kN/m}^2$ . Nach 87 Tagen Beaufschlagung mit Natronlauge war die Durchflußmenge nicht mehr meßbar /78/.

Die Abdichtungswirkung wird verstärkt durch die zeitliche Verzögerung der Durchströmungsvorgänge proportional dem Durchlässigkeitsbeiwert, der Sohldicke, der Materialauswahl und der Verdichtung bei der Stollenfüllung. Die Beständigkeit gegenüber chlorierten Kohlenwasserstoffen kann z.B. durch Zugabe spezieller Bentonitsorten, die diese teilweise adsorbieren und durch Zugabe sulfatbeständiger Zementsorten erhöht werden. Darüber hinaus ist die Beständigkeit durch Zugabe von zementfreien Stoffen wie z.B. Silikatgel herstellbar.

## 9. Qualitätslenkung

### 9.1 Qualitätssicherung der Systeme

Das Einkapselungssystem einer Altdeponie kann sämtliche Abdichtungselemente von der Deponiebasis bis zur Deponieoberfläche umfassen. Ein Einkapselungssystem besteht aus mehreren der folgenden Elemente (Tabelle 9). Jedes Element unterliegt der Qualitätssicherung.

**Tabelle 9: Mögliche Abdichtungselemente der Einkapselungssysteme bei einer Qualitätsüberprüfung**

<b>System</b>	<b>Elemente</b>
Oberflächenabdichtung	Dichtungsaufleger mineralische Abdichtung Kunststoffdichtungsbahn Kombinationsdichtung Schutzschicht/Trennschicht Entwässerungsschicht Entgasungsschicht Kontrollschicht
Dichtwand	mineralische Dichtwandmasse mit/ohne Kunststoffdichtungsbahn Stahl Glas Beobachtungspegel
Sohlabdichtung	mineralische Abdichtung Kunststoffdichtungsbahn Kombinationsdichtung Stahl Entwässerungsschicht Kontrollschicht/-schächte

### 9.2 Qualitätssicherung der Materialien

Die Qualität des Gesamtbauwerkes einer Deponie kann nur durch die ordnungsgemäße Qualität der Einzelbauteile erreicht werden. Die Qualitätssicherung hat hierbei zu überprüfen, ob die dem Stand der Technik entsprechenden und in den Genehmigungsbescheiden festgelegten Qualitätskriterien eingehalten werden. Sie muß sich sowohl auf die Qualität des eingesetzten Materials, als auch auf die Qualität der Arbeit beziehen.

Aufbauend auf den Festlegungen des Genehmigungsbescheides ist ein Qualitätssicherungsprogramm aufzustellen. Im Programm sind Anforderungen an das Dichtungsmaterial und die Bauausführung festzulegen.

Die Genehmigungsbehörde legt im Genehmigungsbescheid die Eckwerte der Bauüberwachung und die Anzahl sowie die Art der Abnahmenachweise fest.

Vor Baubeginn sind als qualitätssichernde Maßnahmen für das Dichtungsmaterial die Eignungsprüfungen nach E 3-1 bis E 3-3 durchzuführen.

Die Ergebnisse dieser Eignungsprüfungen werden in das Qualitätssicherungsprogramm der Bauausführung aufgenommen.

## 9.3 Qualitätssicherungsprogramm bei Bauausführung

Für die Bauausführung sind in diesem Programm festzulegen :

- Verantwortlichkeiten und Aufgaben der Bauüberwachung,
- Herstellungsbeschreibung des Abdichtungssystems, mit Angabe der zu überwachenden Vorgänge,
- Art und Anzahl der Qualitätsprüfungen an den angelieferten Baustoffen (Eingangskontrolle), bei ihrer Verarbeitung (Verarbeitungskontrolle) und am fertigen Abdichtungssystem (Abnahmeprüfung).

Die Qualitätssicherung hat zweistufig zu erfolgen :

- Eigenüberwachung des Herstellers,
- Fremdüberwachung durch ein unabhängiges Institut, das im Einvernehmen zwischen Auftraggeber und Genehmigungsbehörde beauftragt wird.

Sowohl Eigenüberwachung als auch Fremdüberwachung müssen von fachlich qualifizierten Stellen durchgeführt werden.

Die Eigenüberwachung umfaßt :

- Die Eingangskontrolle der zu verarbeitenden Baustoffe,
- Kontrollen bei der Verarbeitung der Baustoffe,
- Die Überwachung aller qualitätsbestimmenden Arbeiten,
- Überprüfung der einzuhaltenden Eigenschaften.

Die Fremdüberwachung hat die Aufgabe, durch die Überwachung des Bauablaufes die Qualität der Ausführung zu überprüfen. Die Fremdüberwachung führt die Abnahmeprüfungen durch. Sie schlägt bei positivem Ergebnis der Überwachungsbehörde die Abnahme vor.

Dabei ist sicherzustellen, daß eine ständige fachtechnische Beaufsichtigung durch den Auftraggeber oder den Fremdüberwacher gegeben ist.

Jedes Element eines Abdichtungssystems ist einzeln abzunehmen (s. auch E 2-1).

Sämtliche Kontrolluntersuchungen und Prüfungen der Eigen- und Fremdüberwachung sind vollständig zu dokumentieren. Die Dokumentation ist Bestandteil der Bauabnahme. Umfassende Prüfungen enthalten die E 5-1 bis E 5-4 der GDA-Empfehlungen.

## 10. Langzeitkontrolle

Bei der **Langzeitkontrolle** ist zu unterscheiden zwischen

- der Kontrolle der Materialien,
- der Kontrolle der Funktionsfähigkeit von Bauteilen,
- der Kontrolle von Komponenten (z.B. Dichtungselementen, Entwässerungssystemen, Entgasungssystemen).

Eine Langzeitkontrolle von Materialien ist schwierig durchzuführen. Es ist zu überlegen, ob eine Kontrolle über Rückstellproben oder über ausgebaute Proben des vorhandenen Materials durchgeführt wird. Dabei sind dann z.B. Alterungs- bzw. Restfestigkeitskennwerte zu bestimmen.

Die Funktionstüchtigkeit von Bauteilen ist z.B. mittels kontrollierbaren Ausführungen von

- Oberflächenabdichtungen
- Dichtwänden
- Sohlabdichtungen
- Entwässerungs- bzw. Entgasungssystemen

zu erzielen. Hier sind Ausführungen in Anlehnung an neue Entwicklungen im Deponiebau möglich.

Einzelne Komponenten wie z.B. das Oberflächenabdichtungssystem sind vorzugsweise über Meß- bzw. Beobachtungsprogramme zu kontrollieren. Gedacht wird dabei u.a. an ein Überwachungsprogramm zum Wasserhaushalt des Deponiebereiches.

In Abhängigkeit von den im spezifischen Fall maßgebenden Emissionspfaden sind zyklische Messungen für das betroffene Medium notwendig. Die Dauer dieser Langzeitkontrolle ist z.B. daran zu orientieren, nach welcher Zeitdauer sich Restemissionen durch die (technisch dichte) Sohlabdichtung einstellen können.

Weiterhin ist es möglich, durch eine entsprechende Konzeption der Sanierungselemente eine inhärente Langzeitsicherheit zu erzielen. So sind z.B. Bioindikatoren (Speicherbecken für Oberflächenwasser, deponiegasempfindliche Pflanzen) geeignet, zusätzliche Sicherheitsreserven zu den technischen Maßnahmen zu schaffen.

Dichtwände sind nach Regeln der Technik zu erstellen. Hier liegen über 10-jährige Erfahrungen vor. Bei Sohlabdichtungen handelt es sich um in der Beprobung befindliche Verfahren. Bei Injektionsverfahren liegen jedoch aus den Abdichtungen von Talsperren langjährige Erfahrungen vor, so daß sie z.Zt. für nachträgliche Sohlabdichtungen als gut geeignet erscheinen.

Bei den verfügbaren Überwachungsmöglichkeiten für Einkapselungen muß kritisch vermerkt werden, daß es bislang noch keine zufriedenstellenden Lösungen für Langzeitkontrollen gibt. Einige Beispiele sind in Tabelle 10 aufgeführt. Im Zusammenhang mit der Kontrollierbarkeit ist auch die Reparierbarkeit zu sehen. Sie ist bei Oberflächenabdichtungen und Dichtwänden

möglich. Die Kontrollierbarkeit ist bei Injektionsmaßnahmen mit Schwierigkeiten verbunden, da eine lokale Fehlstelle nur bedingt mit z.B. durchgeführten Wasserabpreßversuchen auffindbar ist. Die Kontrollierbarkeit und somit auch Reparierbarkeit ist daher nur mit erheblicher Aufwendung machbar.

**Tabelle 10 : Kontrollen und Nachweise für die Dichtelemente - Beispiele**

Oberflächenabdichtung	Verdichtungskontrollen vor Ort Kontrolle des versickerten Niederschlagswassers Herstellungskontrolle (s. Kap. 3)						
Dichtwände	<p>Lagerung von Proben innerhalb und außerhalb der eingekapselten Altablagerung in Brunnen</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center; width: 60%;"><b>Herstellung</b></th> <th style="text-align: center;"><b>Kontrolle Langzeituntersuchung Möglichkeiten</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Einbringung einer Dichtungsmasse mit ausreichender Stützwirkung im Boden</li> <li>● Herstellung einer durchgehenden Dichtungswand, die durch eine je nach Tiefe ausreichende Überschneidung und Anbindung an noch nicht abgebautes Dichtwandmaterial gegeben ist</li> </ul> </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchskasten</li> <li>Bohrung im Fugenbereich</li> <li>Pegel</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <p>Herstellung einer Wand mit ausreichender</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Dicke, die abhängig von dem zu erwartenden hydraulischen Gefälle und anstehender Kontamination der Wasser ist</li> <li>● Tiefe, die abhängig von den geologischen Verhältnissen (Einbindung in eine undurchlässige Schicht) ist</li> <li>● Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigung (Erosion und Temperatur)</li> <li>● geringer Durchlässigkeit, die keine Fehlstellen oder Risse enthält</li> </ul> </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pegel</li> <li>Pegel</li> <li>Pegel</li> <li>Probelamelle</li> <li>Pegel</li> <li>Probelamelle</li> <li>Versuchshkasten</li> <li>Bohrung in der Wand</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	<b>Herstellung</b>	<b>Kontrolle Langzeituntersuchung Möglichkeiten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Einbringung einer Dichtungsmasse mit ausreichender Stützwirkung im Boden</li> <li>● Herstellung einer durchgehenden Dichtungswand, die durch eine je nach Tiefe ausreichende Überschneidung und Anbindung an noch nicht abgebautes Dichtwandmaterial gegeben ist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchskasten</li> <li>Bohrung im Fugenbereich</li> <li>Pegel</li> </ul>	<p>Herstellung einer Wand mit ausreichender</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Dicke, die abhängig von dem zu erwartenden hydraulischen Gefälle und anstehender Kontamination der Wasser ist</li> <li>● Tiefe, die abhängig von den geologischen Verhältnissen (Einbindung in eine undurchlässige Schicht) ist</li> <li>● Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigung (Erosion und Temperatur)</li> <li>● geringer Durchlässigkeit, die keine Fehlstellen oder Risse enthält</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pegel</li> <li>Pegel</li> <li>Pegel</li> <li>Probelamelle</li> <li>Pegel</li> <li>Probelamelle</li> <li>Versuchshkasten</li> <li>Bohrung in der Wand</li> </ul>
<b>Herstellung</b>	<b>Kontrolle Langzeituntersuchung Möglichkeiten</b>						
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Einbringung einer Dichtungsmasse mit ausreichender Stützwirkung im Boden</li> <li>● Herstellung einer durchgehenden Dichtungswand, die durch eine je nach Tiefe ausreichende Überschneidung und Anbindung an noch nicht abgebautes Dichtwandmaterial gegeben ist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchskasten</li> <li>Bohrung im Fugenbereich</li> <li>Pegel</li> </ul>						
<p>Herstellung einer Wand mit ausreichender</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Dicke, die abhängig von dem zu erwartenden hydraulischen Gefälle und anstehender Kontamination der Wasser ist</li> <li>● Tiefe, die abhängig von den geologischen Verhältnissen (Einbindung in eine undurchlässige Schicht) ist</li> <li>● Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigung (Erosion und Temperatur)</li> <li>● geringer Durchlässigkeit, die keine Fehlstellen oder Risse enthält</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pegel</li> <li>Pegel</li> <li>Pegel</li> <li>Probelamelle</li> <li>Pegel</li> <li>Probelamelle</li> <li>Versuchshkasten</li> <li>Bohrung in der Wand</li> </ul>						

Für die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit der fertigen Wand stehen Proben aus der Wand, entnommen aus der Suspension nach Aushubende in verschiedenen Wandtiefen, zur Verfügung. Des weiteren sind Bohrungen mit Durchlässigkeitsversuchen in der Wand oder an Versuchskästen möglich. Nachteilig sind durch Bohrungen in der Wand entstehende Fugen bei Gewinnung von für Laborversuchen oft ungeeigneten Proben.

## 11. Fallbeispiele

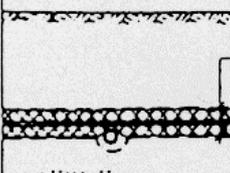
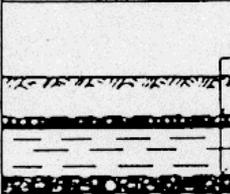
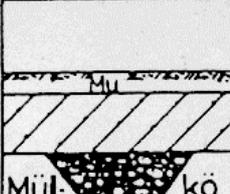
### 11.1 Sonderabfalldeponie Gerolsheim in Rheinland-Pfalz (Dichtwand und Oberflächenabdichtung).

Ein Beispiel zur Einkapselung mit einer Dichtwand und einem Oberflächenabdichtungssystem stellt die Sonderabfalldeponie (SAD) Gerolsheim dar. Nach anfänglichen gemischten Ablagerungen von Hausmüll und Sondermüll wird seit Mitte der 70er Jahre nur noch reiner Sondermüll deponiert. Zum größten Teil bindet der Deponiekörper in einen quartären, weitgehend undurchlässigen Schluffhorizont ein; in einem Teilbereich liegt der Müll allerdings direkt auf einer durchlässigen Sand- und Kiesschicht auf. Eine künstliche Basisabdichtung besteht bei der SAD Gerolsheim nicht. Ebenso sind keine Systeme zur Sickerwasserfassung vorhanden.

Eine absehbare, offensichtliche Grundwasserbeeinträchtigung aufgrund des Sickerwassereintrages soll durch eine allseitige Umschließung des Deponieraumes durch eine Dichtwand und eine Oberflächenabdichtung verhindert werden. Die Dichtwand, das wichtigste Element dieser Sanierungsmaßnahme, muß zur völligen Abschirmung der Deponie zum Grundwasser in den in einer Tiefe von bis zu 50 m vorgefundenen tertiären Schluff einbinden. Erfahrungen von Dichtwänden im Einmassenverfahren für Tiefen über 30 m waren bis dahin nicht vorhanden. Außerdem gelangten erstmals vollautomatische und programmierbare Dosier- und Mischanlagen zum Einsatz.

Die wichtigsten Anforderungen neben einem k-Wert von höchstens  $10^{-9}$  bis  $10^{-10}$  m/s ist ein möglichst optimales resistentes Verhalten gegenüber chemischen Angriffen (Sondermüll !) sowie rheologische Eigenschaften, die die Herstellung der Schlitzwand in großen Tiefen ermöglichen. Nach zahlreichen Eignungsprüfungen erwies sich eine Mischung aus Calcium-Bentonit und Tonmehl, Spezialzement und Wasser unter Zugabe eines Dichtwandadditivs zur Verflüssigung und somit zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften als geeignet. Durch eine 300 m lange Testwand, die Bestandteil der gesamten Einkapselung ist, wurden Mischungen und Herstellungsverfahren in-situ geprüft. Gleichzeitig wurden sogenannte Dichtwandkästen erstellt, um Brunnen und Pegel zwecks Beprobungen zu installieren. In zwei Testkästen wurde die Dichtwand bis zu einer Tiefe von 13 m zur langfristigen Beobachtung freigelegt.

Zur vollständigen Einkapselung der SAD Gerolsheim gehört die Abdeckung des Deponiekörpers durch ein Oberflächenabdichtungssystem. Hierzu wurden 1985 vier Testfelder mit dazugehörigen Meßeinrichtungen gebaut, die einen unterschiedlichen Aufbau des Abdichtungssystems hatten (s. Bild 11.1):

System A			System B		
	Decksubstrat	400mm		Decksubstrat	0,40 m
	Filtervliese			Filtervliese	
	Dränmatte	25mm		Flächendrän.	0,15 m
	HDPE-Bahn	2mm		Bewehrung	
	Dränmatte	8mm		miner. Dichtung	0,60 m
Müllkörper		0,44 m	Müllkörper		1,30 m
System C			System D		
	Decksubstrat	0,40 m		Mutterboden	0,20 m
	Filtervliese			Lößlehm	0,60 m
	Dränmatte	0,03 m		Kiesrigolen	(0,60 m)
	HDPE-Bahn			e = 10m	
	miner. Dichtung	0,60 m		Müllkörper	
Flächendrän.	0,15 m			0,86 m	
Müllkörper		1,18 m			

**Bild 11.1: Abdichtungssysteme der Testfelder 1-4 /93/**

System A: HDPE-Dichtungsplatte und flächige Dränagen aus Kunststoff

System B: Bewehrte Tondichtung und flächige Kiesdränagen

System C: HDPE-Dichtungsplatte + Tondichtung und flächige Kies-/ Kunststoffdränagen

System D: Vergleichsfeld mit Tondichtung und Gasdränagen in Filterkiesgräben.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem zeigte die kombinierte Ausführung (System C).

Ein weiteres wesentlich größeres Testfeld (27 ha) wurde unter Berücksichtigung der in den 4 kleinen Testfeldern (insgesamt 6 300 m<sup>2</sup>) gewonnenen Erfahrungen konzipiert. Hier ist eine Kombinationsdichtung bestehend aus einer 50 cm dicken mineralischen Dichtung und einer HDPE-Dichtungsbahn gewählt worden (siehe Bild 11.2). Aufgrund der deutlich größeren Abmessungen dieses 5. Feldes wird versucht, die Fragen zu klären, die sich aus dem großen Maßstab ergeben. Insbesondere sind hier das Verhalten der Abdichtung, die gegenseitige Wirkung von Entgasung und Oberflächenabdichtung, Optimierung der Entgasung sowie konstruktive Gesichtspunkte gemeint.

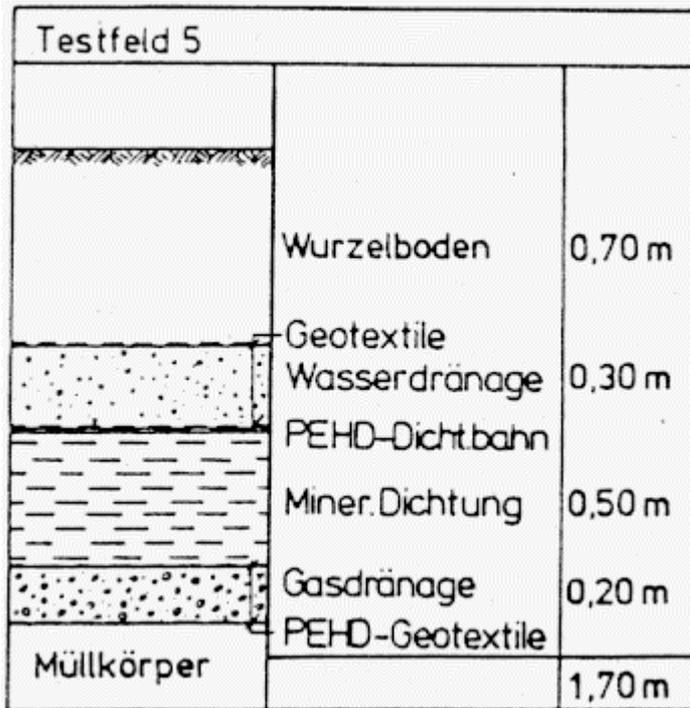


Bild 11.2 : Abdichtungssystem des 5. Testfeldes /93/

Die Anforderung an die Durchlässigkeit der mineralischen Dichtung beträgt  $k_{10} < 1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Die Kunststoffdichtungsbahn besitzt eine Dicke von  $d = 2,5$  mm. Der unterhalb der Kombinationsdichtung angeordnete Flächenfilter besteht aus einem 20 cm dicken Kiespaket der Körnung 2/22. Weitere Erläuterungen hierzu sind in /93/ nachzulesen.

Die konstruktive Ausbildung des Anschlusses der Oberflächenabdichtung an die Dichtwand ist in Bild 11.3 dargestellt.

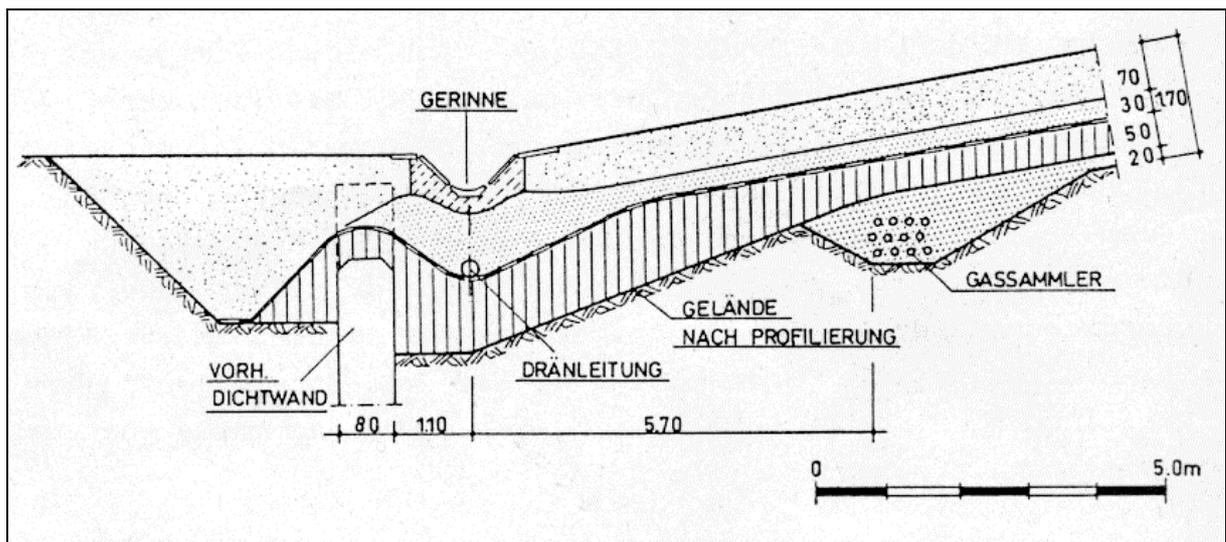


Bild 11.3: Anschluß: Oberflächenabdichtung an die Dichtwand /87/

## 11.2 Deponie Rautenweg, Wien (Dichtwandkammersystem)

Bei der Deponie Rautenweg in Wien handelt es sich wie bei der SAD Gerolsheim um eine wiederbefüllte Kiesgrube ohne eine natürliche oder künstliche Basisabdichtung. Das Sickerwasser konnte somit ungehindert in das Grundwasser abfließen. Im Zuge einer Deponieaufstockung wurde dem Stand der Technik entsprechend eine Einkapselung des Deponieareals durchgeführt.

Eine Umschließung der Deponie durch eine Schlitzwand ist aufgrund der vorgefundenen Bodenverhältnisse hier nicht möglich gewesen. Dazu wäre eine Schlitzwandtiefe von über 50 m erforderlich geworden. Es hätte der 1. GW-Stauer und eine zwischengelagerte Sand-Kies-Schicht mit erfasst werden müssen, um die Dichtwand in den undurchlässigeren 2. GW-Stauer einzubinden (s. Bild 11.4).

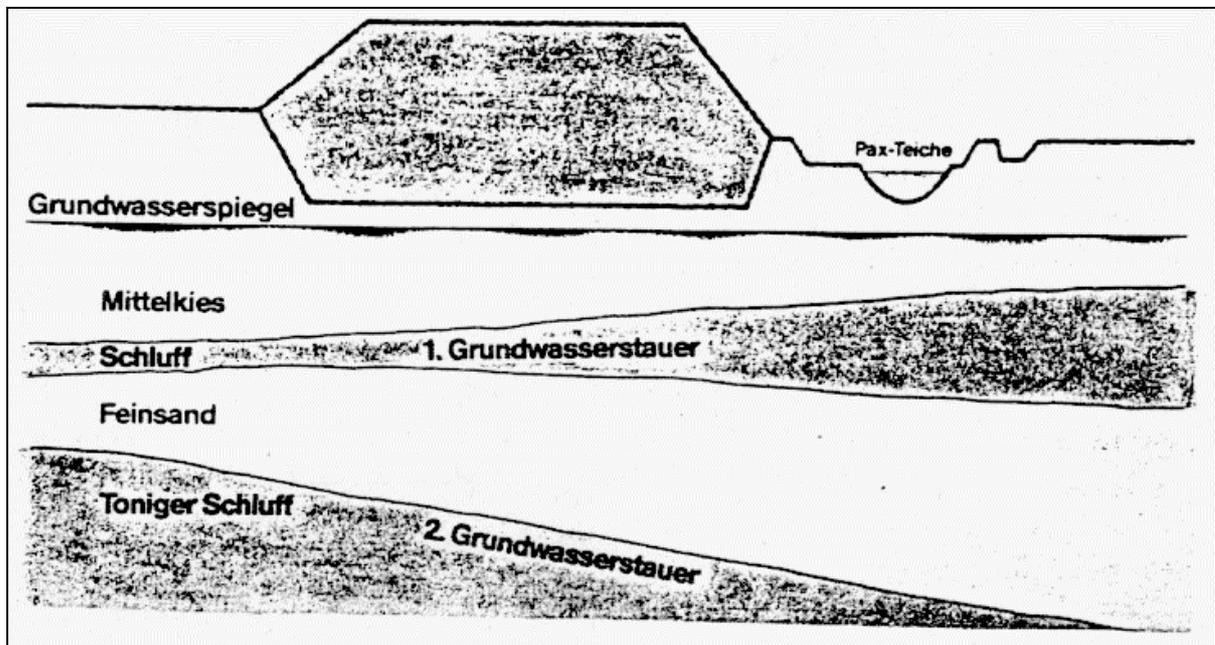
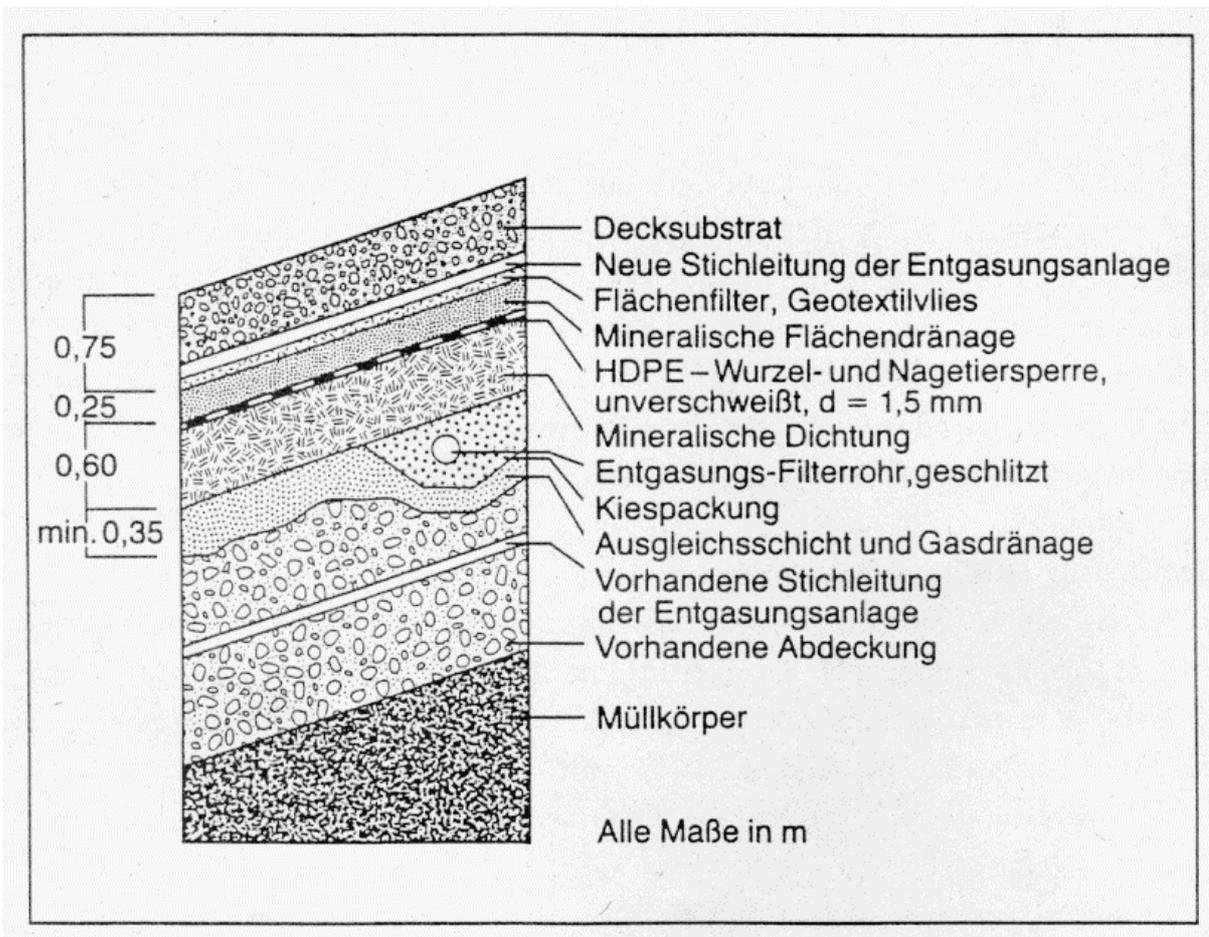


Bild 11.4: Schnitt durch die Deponie mit Grundwasserspiegel /60/

Die Lösung dieser Problematik lag in dem Dichtwandkammersystem. Hierbei handelt es sich um zwei parallele, im Abstand von 8 m niedergebrachte Schmalwände, die alle 50 bis 70 m durch Querschotte miteinander verbunden wurden. So ergaben sich Kammern mit einer 400-560 m<sup>2</sup> großen Grundfläche. Die Tiefe lag max. bei 27 m. Ein Brunnen in jeder Kammer hält den Grundwasserstand ca. 0,30 m tiefer als den niedrigsten Grundwasserstand außerhalb des umschlossenen Deponiegebietes. Der Grundwasserstand unter dem Deponiekörper wird durch ein angeordnetes Brunnen-system um etwa 0,2 m niedriger als der Grundwasserstand in den Kammern gehalten. Durch dieses hydraulische System mit dem erzwungenen Potentialgefälle (siehe Bild 11.5) ist ein ständiger Grundwassereintritt in den Deponieuntergrund gegeben und ein Sickerwasseraustritt in das Grundwasser außerhalb des eingekapselten Gebietes ausgeschlossen.



befindet sich eine HDPE-Kunststoffdichtung mit  $d = 1,5$  mm. Sie dient als Wurzel- und Nagetiersperre. Die verlegten Bahnen sind aufgrund der erwarteten Setzungen unverschweißt und nur dachziegelartig überlappt. Im unteren Bereich des abzudeckenden Deponiehügels wird wegen der festgestellten Sickerwasseraustritte die Dicke der HDPE-Bahn auf 2,5 mm erhöht. In diesem Bereich sind die HDPE-Bahnen verschweißt. Die Kunststoffdichtungsbahn ist auf der Unterseite mit 6 mm hohen Spikes und an der Oberseite mit 1-2 mm hohen Stegen versehen, um ein Ableiten in der Hanglage zu verhindern.



**Bild 11.6 : Schichtaufbau der oberen Abdeckung /87/**

Auf der HDPE-Dichtungsbahn liegen 25 cm grobsandiger Feinkies mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s als Flächendränage zur Regenwasserabfuhr auf. Darüber befindet sich ein Geotextilvlies ( $450 \text{ g/m}^2$ ), das ein Eindringen von Feinteilen aus dem darüber anstehenden kulturfähigen Boden in die Dränschicht verhindert. Als Dicke der Rekultivierungsschicht wurde 75 cm gewählt.

Der gesamte Schichtaufbau erreicht eine Höhe von ca. 2 m. Es muß ein Mindestgefälle von 4% eingehalten werden.

Im Zusammenhang dieser Abdichtungsmaßnahme wurden 6 in sich abgeschlossene Testfelder erstellt, die mit Meßeinrichtungen zur langzeitigen Beobachtung der Wasserverhältnisse versehen sind.

Das Bild 11.7 zeigt die Gestaltung des Fußpunktes des Oberflächenabdichtungssystems mit dem inneren und äußeren Randgraben.

Nähere Einzelheiten zu der Deponie-Georgswerder finden sich in /87/.

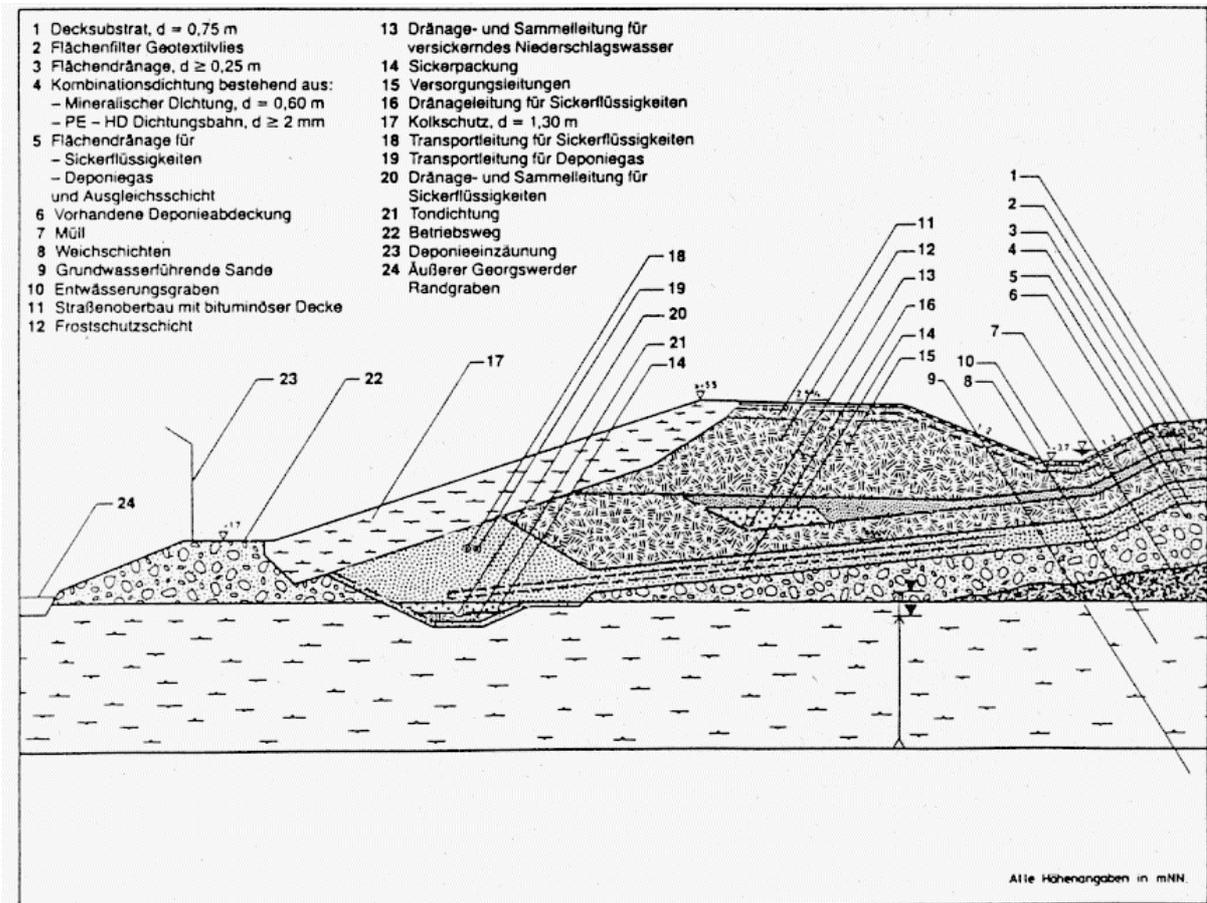


Bild 11.7: Schichtaufbau der unteren Abdichtung mit Fußpunktgestaltung, /87/

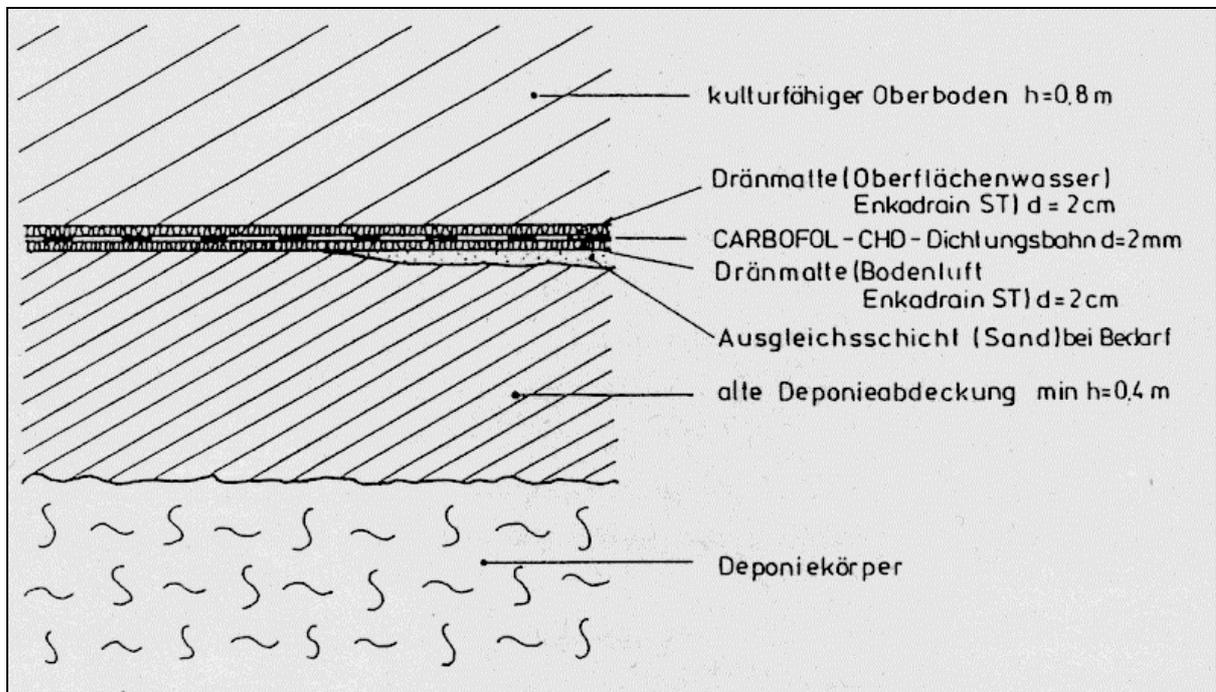
## 11.4 Altdeponie Breite Hille, Bochum-Langendreer

Auf der Altdeponie Breite Hille wurden vorwiegend Abfälle aus der lokalen chemischen Industrie, in Beimengungen auch Hausmüll und Bauschutt verkippt. Die genaue Zusammensetzung bzw. Inhaltsstoffe sind im nachhinein nicht genau anzugeben. Nach Verfüllung wurde die Deponie mit einem Oberboden abgedeckt, dessen mittlere Dicke mit 1,2 m festgestellt wurde.

Die Besonderheit bei der Altdeponie Breite Hille liegt darin, daß der Deponiekörper in einem "Topf" aus undurchlässigen Schichten eingebettet ist. Es ist somit eine natürliche Abdichtung vorhanden, die dazu führt, daß sich im Deponiekörper Stauwasser bildete. Eine Sickerwasserdränage bzw. Stauwasserfassung sind seinerzeit nicht installiert worden. Die Abdeckschicht konnte einen Zutritt von Niederschlagswasser nicht verhindern, so daß sich der Stauwasserspiegel im Laufe der Zeit soweit erhöhte, daß ein Stauwasserübertritt an der tiefsten Stelle des "Topfrandes" erfolgte. Ein Verdacht auf Dioxine führte zu einer Sanierungsuntersuchung. Aufgrund der vorhandenen Kontamination (vorwiegend chlororganische Verbindungen) war eine Sanierung erforderlich.

Ein Oberflächenabdichtungssystem verhindert das Eindringen von Niederschlagswasser in den Deponiekörper und bewirkt daher ein allmähliches Austrocknen der Deponie. Zusätzlich wird das Risiko einer Untergrund- und Grundwasserkontamination durch Abpumpen des Stauwassers vermindert. Eine Folge der Oberflächenabdichtung ist die Notwendigkeit der Gasfassung. Unkontrollierte Gasaustritte und Belastungen der Umwelt und der Anwohner werden dadurch minimiert.

Um eine weitere Erhöhung des Deponiegeländes zu verhindern und die Einpassung in das Landschaftsbild und den Übergang zur direkt angrenzenden Wohnbebauung beizubehalten wurde ein Abdichtungssystem mit geringer Bauhöhe gewählt. Für die Herstellung wurde die vorhandene Abdeckschicht um ca. 80 cm abgetragen. Auf die verbleibende, im Mittel 40 cm dicke Schicht wurden dann die weiteren Schichten, insbesondere die Kunststoffdichtungsbahn aufgebracht (s. Bild 11.8). Die Dichtungsbahn wird am Deponierand bis in 3 m Tiefe in den gewachsenen Untergrund eingebunden.

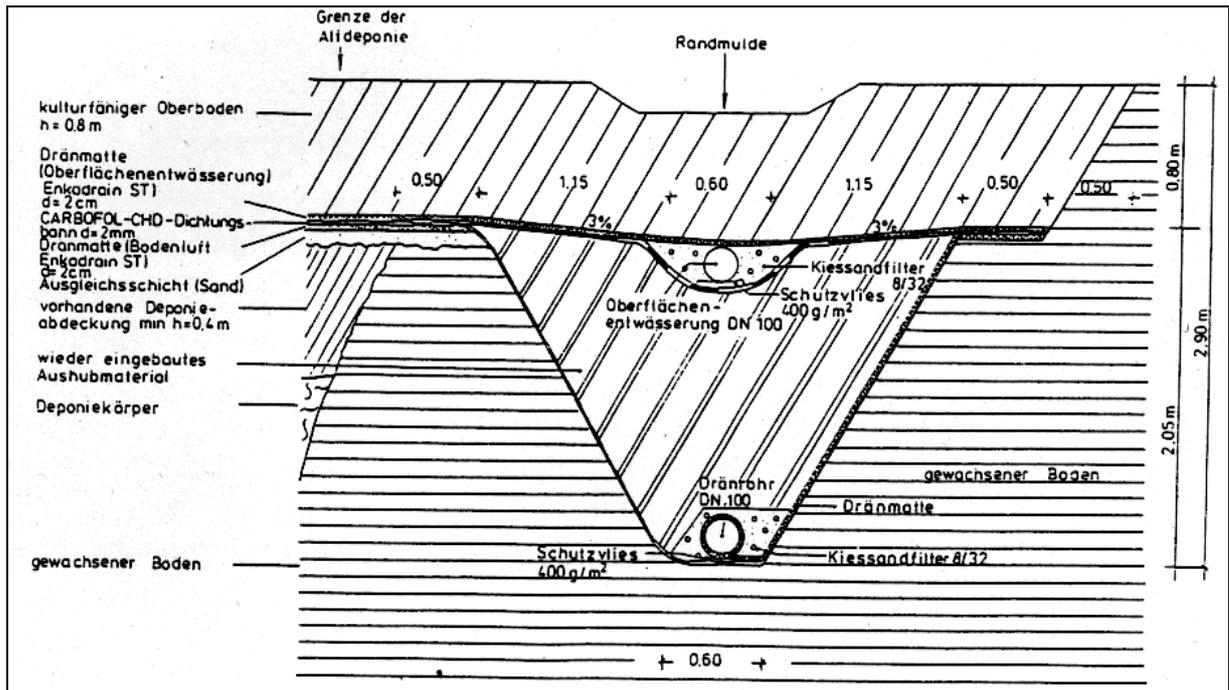


**Bild 11.8: Regelaufbau des Oberflächenabdichtungssystems**

Der Deponiekörper wird somit eingekapselt. Sechs auf der Deponiefläche (2,3 ha) angeordnete Brunnen dienen einerseits zur Gasfassung in der Tiefe und erlauben andererseits das Absaugen des Stau- bzw. Sickerwassers. Unterhalb der Abdichtung ist eine weitere, durch Entgasungsrohre unterstützte Gasfassung über Dränmatten angeordnet.

Für die Entwässerung der kulturfähigen Oberbodenschicht wurden auf der Kunststoffdichtungsbahn Dränmatten in Kombination mit Entwässerungsrohren verlegt.

Eine Detailkonstruktion zur Ausbildung des umlaufenden Randgrabens zeigt Bild 11.9.



**Bild 11.9: Detailkonstruktion des Randgrabens**

Um neben dem unmittelbaren Sicherungseffekt auch einen längerfristigen Sanierungserfolg zu initiieren, wurden (auch unter dem Gesichtspunkt des Objektschutzes) im Bereich der naheliegenden Bebauung zusätzliche Belüftungsbrunnen installiert. Über den auf den Deponiekörper einwirkenden Entgasungs-Unterdruck soll gezielt Fremdluft auf der Sohle des Topfes angesaugt werden können, um eine aerobe mikrobiologische Abbautätigkeit herbeiführen zu können.

Als Randbedingungen waren folgende Aspekte zu beachten:

- Minimierung der Bauzeit im Bereich der Wohngelände
- weitgehende Reinigung des Deponiestauwassers
- Automatisierte Entgasungsüberwachung und Gasreinigung
- Ableitung des Oberflächen- und Wurzelbodenwassers über Rückhaltebecken (Biotopfunktion) und Versickerungsbrunnen
- Begrünung unter Beachtung der deponietechnischen Anforderungen an die Wurzeltiefe und der möglichst weitgehenden Aufrechterhaltung der vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzung

## 12. Verzeichnis

### 12.1 Regelwerke, DIN-Normen

EAU 144	Anwendung und Ausbildung von Schlitzwänden (Arbeitsausschluß "Ufereinfassungen")
EAU 156	Anwendung und Herstellung von Dichtungsschlitz - und Dichtungsschmalwänden (Arbeitsausschluß "Ufereinfassungen")
DVWK	Merkblatt zu Wasserwirtschaft "Dichtungselemente im Wasserbar" Abschnitt E Zweiphasen-Schlitzwand Abschnitt F Einphasen-Schlitzwand
GDA-Empfehlungen	Empfehlungen des Arbeitskreises Ak11 "Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.
<b>DIN</b>	<b>DIN-NORMEN</b>
1164	Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement; November 1968
18121	Wassergehalt; April 1976
18122	Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen); Teil 1: August 1976 Teil 2: Februar 1987
18123	Bestimmung der Korngrößenverteilung; April 1983
18124	Baugrund Untersuchung von Bodenproben, Vornorm; März 1973
18125	Bestimmung der Dichte des Bodens; Mai 1986
18128	Gehalt an organischen Bestandteilen; in Vorbereitung
18129	Kalkgehalt; in Vorbereitung
18130	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte; Vornorm; November 1983
18136	Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit; März 1987
4030	Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase; November 1969
4093	Einpressungen (Injektionen) in Untergrund und Bauwerke, Vornorm; Juli 1981
4126	Ortsbeton-Schlitzwände, Vornorm, Januar 1984
4127	Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten, Vornorm; Januar 1984

## 12.2 Schrifttum

- /1/ August, H.; Tatzky, R.:  
Kombinationsdichtung: Eine Schadstoffbarriere zur totalen Abdichtung von Deponien und Altlasten. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 579
- /2/ Beine, R.A.:  
Oberflächenabdeckung, in: Altlasten und kontaminierte Standorte, Seminar Ruhr-Universität Bochum, 02.04.1986
- /3/ Beine, R.A., Klos, U.:  
Setzungsverhalten von Deponien in Verbindung mit Tiefenverdichtung bei Oberflächen- und Zwischenabdeckungen, Seminar "Neuzeitliche Deponietechnik", Ruhr-Universität Bochum, 12. Nov. 1987
- /4/ Carl, L.; Strobl, T.:  
Dichtungswände aus einer Zement-Bentonit-Suspension. Wasserwirtschaft 66, 1976, H. 9
- /5/ Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.:  
Essen: Berichte von der 5. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie, Fachsektion Ingenieurgeologie, Kiel 1985
- /6/ Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.:  
Vorträge der Baugrundtagung, Düsseldorf, 1984
- /7/ DGEg und Deutsche Geologische Gesellschaft:  
Vorträge der 6. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie, Fachsektion Ingenieurgeologie, Tagungsleitung: Prof. Heitfeld, RWTH Aachen, Aachen 1987
- /8/ DIN 4062  
Dichtstoffe für Bauteile aus Beton, Abschn. 5.7, Wurzelfestigkeit
- /9/ Drescher, J.:  
Deponiedichtungen für Sonderabfalldeponien - Arbeitspapier, in: Müll und Abfall 7/88 und 8/88
- /10/ Drescher, J.:  
Schadstoffadsorptionspotential des Deponieuntergrundes - Ergebnisse des 9 000 ha-Programmes des Landes Niedersachsen. In: Fehlau, K.P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1987", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 137
- /11/ Düllmann, H.:  
Geotechnische Anforderungen an mineralische Deponiebasisabdichtungen. In: Fehlau, K.P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1985", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 39
- /12/ Düllmann, H.:  
Geotechnische und baubetriebliche Einflüsse auf die Dichtigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton Ergebnisse von Praxisversuchen -. In: Fehlau, K.P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1987", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 215
- /13/ EAU 1985:  
Empfehlungen des Arbeitskreises "Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.

- /14/ Ewen, Chr.; Streck, M.:  
Abdichtungen aus Ton und tonigen Gemischen bei Deponien und Altlastensanierungen. In: "Kritische Betrachtungen zu Materialauswahl, Einbau und Qualitätskontrolle", Werkstattreihe Nr. 31, Öko-Institut, Büro Darmstadt, Büro Freiburg
- /15/ Feder, G.:  
Kunstboden und Stahlhaut. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie - Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986
- /16/ Finsterwalder, K.:  
Die Abfall-Lagerstätte für geologische Zeiträume, Workshop Ruhr-Universität Bochum, Nov. 1988
- /17/ Fischer, H.; Haas:  
Entwicklung resistenter Dichtwandmassen und deren Verarbeitung. in: Seminar über Altlasten und kontaminierte Standorte am 2. April 1986, Ruhr-Universität Bochum
- /18/ Floss, R.:  
Zusätzliche technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Kommentar, Kirschbaum-Verlag Bonn-Bad Godesberg, 1979
- /19/ Foik, G., Günther, K.:  
Bemessungsgrundlagen für PE-HD Bahnen auf Böschungen, Vortragsband "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg, 1989
- /20/ Franzius, V.:  
Bedeutung von Oberflächenabdichtungen für Gas- und Wasserhaushalt von Deponien. in: Fehlau, K.P., Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1985, Verlag Erich Schmidt GmbH, Berlin 1986, S. 167-173
- /21/ Gabener, H. G.:  
Untersuchungen über die Anfangsgradienten und Filtergesetze bei bindigen Böden. In: Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Uni Essen; Herausgeber: Prof. H. Nendza, Heft Nr. 6, Essen 1983
- /22/ Geil, M.:  
Entwicklung und Eigenschaften von Dichtwandmassen und deren Überwachung in der Praxis. Süd-Chemie Tagung, Essen 1981
- /23/ Geil, M.:  
Möglichkeiten und Ergebnisse von Langzeituntersuchungen an Dichtwandmaterialien. In: Fehlau, K.P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1986", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 55
- /24/ Geil, M. :  
Untersuchung der Dauerhaftigkeit mineralischer Dichtungen für die Sanierung von Altlasten. In: Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1984, Heft Nr. 13
- /25/ Geil, M.:  
Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand. Diss. 1989
- /26/ GKN Keller  
Firmenprospekt
- /27/ Bodenreinigung, Goldbekhaus Hamburg, Firmenprospekt GKN Keller, Offenbach, 1989

- /28/ Gläser, E.; Beitinger, E.:  
Kombinierte Dichtwände zur Abkapselung von Deponien. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 571
- /29/ Gläser, E.:  
Dichtwand und Folie. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie - Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986
- /30/ Gudehus, G.:  
Bodenmechanik, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1981
- /31/ Günther, K.:  
PE-HD-Dichtungsbahnen in Deponieabdeckungen, Vortrag im Haus der Technik anlässlich der Fachveranstaltung "Umweltschutz durch sichere Deponien" 30.11 und 01.12.1987.
- /32/ Grubinger, H.:  
Bodenverfestigung durch Grünverbau, in: Sonderbauwerke aus Lockergesteinen III, Stabilisierung durch Veränderung der Bodeneigenschaften, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik Studientagung, 4. Nov. 1983, Fribourg
- /33/ Hass, H.-J.; Hitze, R.:  
Chemikalien-beständige Einkapselung von Altlasten. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 543
- /34/ Heerten, G.:  
Geotextilien im Wasserbau - Prüfung, Anwendung, Bewährung -, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 52, 1981
- /35/ Hein, P.:  
Sanierungsziele und -konzepte für die Deponie Georgswerder. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986
- /36/ Hermanns, R.; Meseck, H.; Reuter, E.:  
Sind Dichtwandmassen beständig gegenüber den Sickerwässern aus Altlasten? Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 23, 1987
- /37/ Hitze, R.:  
Einsatz der schadstoffresistenten DYNAGROUT-Abdichtungsmaterialien, geschildert an konkreten Beispielen der Schadstoff-Umschließung durch Schlitzwandbau und Injektionstechnik. Seminar über Altlasten und kontaminierte Standorte, Ruhr-Universität Bochum (1987), S. 171 - 149
- /38/ Hölting, B.:  
Hydrogeologie, Verlag Enke, Stuttgart, 1984
- /39/ Hoffmann, H.:  
Ergebnisse der Eignungsprüfungen von 10 Dichtungsmaterialien bei Feldversuchen (Deponie Geldern-Pont). In: Fehlau, K.P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1986", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 9
- /40/ Hoffmann, H.:  
Untersuchungen an mineralischen Deponiebasisabdichtungen nach über siebenjähriger Beanspruchung. In: Fehlau, K.P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1987", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 183

- /41/ Jessberger, H.L.; Buderus, J.:  
Migration von organischen Schadstoffen durch mineralische Abdichtungen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 588
- /42/ Jessberger, H.L. et al.:  
Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Bautechnik (1985), Heft 9, S. 302-303, (1986) Heft 9, S. 309-316 und (1987), Heft 9, S. 289-303
- /43/ Jessberger, H.L.:  
Flächenabdichtungen für Abfalldeponien in: Abfallentsorgung - Erfahrungen und Perspektiven im Deponiebau, Bauwirtschaft 10/88
- /44/ Jessberger, H.L.:  
Geotechnische Aspekte im Hinblick auf die Entwicklung neuzeitlicher Deponietechnik, Seminar über Neuzeitliche Deponietechnik, Ruhr-Universität Bochum, 12. Nov. 1987
- /45/ Jessberger, H.L.:  
Möglichkeiten der Vermeidung von Sickerwasser, dichte Gestaltung von Deponien. ATV- Informationsveranstaltung, Essen, 1986
- /46/ Jessberger, H.L.:  
Qualitätssicherung beim Einbau von mineralischen Deponieabdichtungen. In: Fehlau, K. P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1985", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 67
- /47/ Jessberger, H.L.:  
Überblick über Sanierungsmöglichkeiten von Altlasten und kontaminierten Standorten, Seminar über Altlasten und kontaminierte Standorte, Erkundung und Sanierung, Ruhr-Universität Bochum, 1986
- /48/ Jessberger + Partner GmbH:  
Untersuchungen an geeigneten Rezepturen für Dichtwände für die Industriemülldeponie Spremlingen. Unveröffentlichtes Gutachten, Bochum (1986)
- /49/ Jessberger + Partner GmbH:  
Untersuchung der Stabilität und Beständigkeit von Dichtwandmassen bei der Herstellung und Abdichtung gegen Kohlenwasserstoffe, Unveröffentlichtes Gutachten, Bochum (1986)
- /50/ Jessberger + Partner GmbH:  
Untersuchungen an Dichtwandmassen aus Bentonit-Bindemittel-Suspensionen, Unveröffentlichtes Gutachten, Bochum (1987)
- /51/ Jessberger, H.L.:  
Verfahren zur Herstellung von Einkapselungen. Seminar über Altlasten und kontaminierte Standorte, Ruhr-Universität Bochum, 10. April 1985, S. 117-135
- /52/ Kinner, U.  
(Ecosystem / Infu), Materialien 1/88. In: "Wegweiser für Altlasten und Bodensanierung UBA", Erich Schmidt Verlag Berlin, Forschungsbericht 10703006 UBA-FB87-032
- /53/ Knipschild, F.W.:  
Kunststoffdichtungsbahnen für multibarriere Systeme. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986

- /54/ Koch, R., Gaube, E., Hessel, J., Gondro, C., Heil, H.:  
Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen, Vortrag im Haus der Technik, anlässlich der Fachveranstaltung "Umweltschutz durch sichere Deponien", 30.11. und 01.12.1987
- /55/ Kohler, E. E.:  
Mineralische Abdichtungen mit Ton oder Bentonit. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie - Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986
- /56/ Kohler, E.:  
Möglichkeiten der Beeinträchtigung der Wirksamkeit mineralischer Deponiebasisabdichtungen durch organische Lösungen. In: Fehlau, K. P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1985", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 109
- /57/ Kohler, E. :  
Untersuchungen zur mineralischen Beständigkeit von mineralischen Dichtungsmaterialien in Deponiebasisabdichtungen. in: Fehlau, K.P., Stief, K (Hg.), Fortschritte der Deponietechnik 1986, Verlag Erich Schmidt GmbH, Berlin 1986, S. 75-88
- /58/ Krenkler, K.:  
Chemie des Bauwesens. Band 1. Anorganische Chemie, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1980
- /59/ Lühr, H.P. :  
Emissionspfade von Altlasten in: Franzius, Stegmann, Wolf (Hrsg.) "Handbuch der Altlastensanierung, 1988
- /60/ Meseck, H.:  
Dichtwände und Dichtsohlen, Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 23, 1987
- /61/ Meseck, H.:  
Geomechanisches Verhalten von Kunststoff-Dichtungsbahnen, Vortragsband "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg, 1987
- /62/ Meseck, H.; Gläser, E.:  
Möglichkeiten der nachträglichen Herstellung horizontaler Dichtungsohlen bei Deponien und Altlasten. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 534
- /63/ Meseck, H.:  
Mechanische Eigenschaften von mineralischen Dichtwandmassen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 25, Braunschweig, 1987
- /64/ Müller-Kirchbauer, H.; Friedrich, W.; Rogner, J.:  
Vertikale Abdichtungssysteme für Einkapselungen am Beispiel der SAD Gerolsheim. In: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft "Zeitgemäße Deponietechnik II", S. 63
- /65/ Neff, H.K.:  
Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte von mineralischen Böden und Stoffen. Bautechnik 1988 (in Vorbereitung)
- /66/ NN: Landesamt für Wasser und Abfall NW:  
"Entwurf einer Richtlinie, Anforderungen an Deponien für Bodenaushub, Bauschutt und bauschuttähnliche Abfälle", Abfallwirtschaft Nr. 12, Düsseldorf, Dez. 1987

- /67/ N.N. Landesamt für Wasser und Abfall NRW:  
Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen, Mai 1985
- /68/ N.N. Minister für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW:  
Runderlaß zu "Deponiebasisabdichtungen aus mineralischen Stoffen; vorläufige Verwaltungsvorschrift über die Durchlässigkeitsbestimmung", 16.07.1986, in: Ministerialblatt-Nr. 67
- /69/ Olzem, R.:  
Anforderungen an die Dichtigkeit von Deponiebasisabdichtungen. In: Fehlau, K. P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1985", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 9
- /70/ Plehm, H.:  
Beitrag zur Frage des Einflusses der Verdichtung auf Berechnungswerte von bindigen und schluffigen Erdstoffen. Mitteilung der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin, 1973, H. 31
- /71/ Reuter, E.:  
Beständigkeit von mineralischen Dichtungen gegenüber anorganischen und organischen Lösungen - Empfehlungen zur Prüfung mineralische Deponieabdichtungen - In: Fehlau, K. P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1985", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 121
- /72/ Reuter, E.  
:Übertragung der Ergebnisse von Durchlässigkeitsversuchen an mineralischen Dichtungsmaterialien im Labor auf die Verhältnisse im Feld. In: Fehlau, K. P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1986", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 31
- /73/ Rumberg, E. et al.:  
Untersuchungen über das Verhalten von Abdichtungsbahnen gegen Nagetiere, Beiheft zu Müll und Abfall Nr. 22 (1985)
- /74/ Saathoff, F.:  
Untersuchungen zur Langzeit-Filterverhalten von Geotextilien, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Uni Hannover, 1987
- /75/ Schneider, W.; Tietze, K.:  
Numerische Schadstofftransportmodelle als Beurteilungsinstrument für die Barrierewirkung des Deponieuntergrundes. In: Fehlau, K. P., Stief (Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1987", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 159
- /76/ Schwennicke, A.:  
Hochdeponie System Rollins und Behälterdeponie System Strabag - zwei Konzepte für die sichere End- und Zwischenlagerung von kontaminierten Materialien. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie - Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986
- /77/ Simons, H.; Reuter, E.:  
Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, 1985, Heft Nr. 18
- /78/ Simons, H.; Schnell, W.; Geil, M.:  
Dauerhaftigkeit mineralischer Abdichtungen aus Zement-Ton-Mischungen gegen Wasser als Ionenträger. DFG-Forschungsbericht, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig (1985), unveröffentlicht

- /79/ von Soos, P.:  
Eigenschaften von Boden und Fels, ihre Ermittlung im Labor in: Grundbau Taschenbuch, Teil 1,  
Verlag Wilhelm Ernst of Sohn, 1980
- /80/ Spundwand-Handbuch Berechnungen, Hoesch Stahl AG, 1985
- /81/ Steffen, H.:  
Feldprüfungen für mineralische Deponieabdichtungen in der Praxis. In : Fehlau, K. P., Stief  
(Hrsg.): "Fortschritte der Deponietechnik 1985", Verlag Erich Schmidt GmbH, S. 93
- /82/ Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft.  
In: "Altlastensanierung und zeitgemäße Deponietechnik (Vertiefersseminar)" Band 22, 1986, Erich  
Schmidt Verlag, Bielefeld
- /83/ Süd-Chemie AG: Firmenprospekt, München 1986
- /84/ Tatzky, R.; August, H.:  
Permeationsverhalten von Kunststoffbahnen: Untersuchung des Verhaltens organischer Abfallin-  
haltsstoffe unter Berücksichtigung synergistischer Effekte. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altla-  
sten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 595
- /85/ Technologie Consult:  
Bochum: Erarbeitung eines Konstruktionskonzeptes zur unterirdischen Herstellung von Basisab-  
dichtungen für Deponien unter Einsatz von Stahl als Trag- und Dichtungselement - Teilbericht  
einer unveröffentlichten Vorstudie des Ing. -Büros Prof. Dr.-Ing. Jessberger + Partner GmbH
- /86/ Thomé-Kozmiensky, K. J.:  
In: „Altlasten“, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1987.
- /87/ Umweltbehörde Hamburg, Amt für Altlastensanierung:  
Sanierung der Deponie Georgswerder, 6. Bericht, April 88
- /88/ Unterberg, J.:  
Neue Wege im Dichtwandbau (Kurzbeschreibung Film). In: IWS Institut für wassergefährdende  
Stoffe an der Technischen Universität Berlin "Die Deponie - Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.09.1986
- /89/ Vroom, A. H.:  
Schwefelbeton, ein hochresistenter Baustoff. In: IWS Institut für wassergefährdende Stoffe an der  
Technischen Universität Berlin "Die Deponie - Ein Bauwerk ?" Aachen, 18.-19.09.1986
- /90/ Wiemer, K.; Wiemer, J.:  
Konsequente Dichtung und Sanierung problematischer Abfallablagerungen. In: Karl J. Thomé-  
Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 4.2, S. 526
- /91/ Wienberg, R.:  
Abschätzung der Mobilität und des Transportes organischer Schadstoffe durch mineralische Ab-  
dichtungsmaterialien. in: Wolf, K., van den Brink, W.J., Colon, F.J. (Hrsg.) Altlastensanierung  
88
- /92/ Wolf, K.:  
Sanierung der Deponie Georgswerder. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky "Altlasten", EF-Verlag für  
Energie- und Umwelttechnik GmbH, Punkt 5, S. 719
- /93/ Wolf, K.; von den Brink, W. J.; Colon, F. J.:  
Altlastensanierung 1988, Band 1 und Band 2. Kluwer Academic Publishers. 2. Intern.  
TNO/BMFT-Kongreß über Altlastensanierung, 11.-15.04.1988, Hamburg

/94/ Zitscher, F.-F. (Hrsg.):  
Empfehlung für die Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erd- und Wasserbau,  
DVWK Schriften, Verlag Paul Parey, Hamburg/Berlin, Heft 76, 1986

## 12.3 Abkürzungen

BZS	Bentonit-Zement-Suspension
Ca	Calcium
HOS	Hochofenschlacke
HOZ	Hochofenzement
Na	Natrium
PZ	Portlandzement
REM	Rasterelektronenmikroskop
W/B	Wasser-Bindemittel-Wert
W/Z	Wasser/Zement-Wert

# Abbildungsverzeichnis

SCHEMASKIZZE: EINKAPSELUNG VON ALTABLAGERUNGEN .....	2
BILD 1.1: PROZESSE BEI ALTABLAGERUNGEN .....	4
BILD 1.2: SCHEMATISCHER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN KOSTEN UND GEFÄHRDUNGSPOTENTIAL .....	7
BILD 1.3: SCHEMATISCHER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ZEITBEDARF UND GEFÄHRDUNGSPOTENTIAL .....	8
BILD 1.4: HOMOGENER GRUNDWASSER-LEITER .....	9
BILD 1.5: INHOMOGENER GRUNDWASSER-LEITER .....	10
BILD 1.6: GRUNDWASSER-LEITER ÜBER GRUNDWASSER-GERINGLEITER.....	11
BILD 1.7A: GRUNDWASSER-LEITER ÜBER INHOMOGENEM GRUNDWASSER-GERINGLEITER.....	12
BILD 1.7B: HERSTELLUNG SEITLICHER ABDICHTUNGEN UND SOHLABDICHTUNGEN DURCH SCHRÄGE INJEKTIONSSCHIRME .....	13
BILD 1.8A: GRUNDWASSER-LEITER ÜBER INHOMOGENEM GRUNDWASSER-GERINGLEITER.....	14
BILD 1.8B: HERSTELLUNG VON OBERFLÄCHENABDICHTUNG UND DICHTWÄNDE BEI GENÜGENDER DICHTIGKEIT DES UNTERGRUNDES .....	14
BILD 1.9: GRUNDWASSER-GERINGLEITER ÜBER GRUNDWASSER-LEITER.....	15
BILD 1.10: GRUNDWASSER-GERINGLEITER ÜBER GESCHICHTETEM GRUNDWASSER-LEITER.....	16
BILD 1.11A: GRUNDWASSER-GERINGLEITER MIT ANGESCHNITTENEM GRUNDWASSER-LEITER.....	17
BILD 1.11B: GRUNDWASSER-GERINGLEITER .....	18
BILD 1.12: ABLAUFDIAGRAMM ZUR BESTIMMUNG NOTWENDIGER ANALYSEPARAMETER ZUR WAHL DER DICHTSYSTEME UND -STOFFE.....	19
BILD 2: STOFFGESETZE UND IHRE BEGRÜNDER /16/ .....	22
BILD 3.1: SYSTEMAUFBAU EINES OBERFLÄCHENABDICHTUNGSSYSTEMS /31/ .....	25
BILD 3.2: ABMESSUNGEN EINES VERSUCHSFELDES .....	32
BILD 3.3: ABHÄNGIGKEIT DER DURCHLÄSSIGKEIT UND DER TROCKENDICHTE VOM EINBAUWASSERGEHALT.....	34
BILD 3.4:ZUSAMMENHANG ZWISCHEN WASSERGEHALT, TROCKENDICHTE UND DURCHLÄSSIGKEITSBEIWERT /70/ 35	
BILD 3.5: KORNERTEILUNG EINES TONIGES SCHLUFFES.....	36
BILD 3.6: ABHÄNGIGKEITEN DER TROCKENDICHTE UND DES DURCHLÄSSIGKEITSWERTES VOM WASSERGEHALT EINES TONIGEN SCHLUFFES.....	37
BILD 3.7: KORNERTEILUNG EINES SCHWACH SANDIGEN SCHLUFFES.....	38
BILD 3.8: ABHÄNGIGKEIT DER TROCKENDICHTE UND DES DURCHLÄSSIGKEITSBEIWERTES VOM WASSERGEHALT EINES MIT 0,5% BENTONIT VERGÜTETEN SCHWACH SANDIGEN SCHLUFFES .....	38
BILD 3.9:DEPONIEABDECKUNG MIT HDPE-DICHTUNG /31/ .....	46
BILD 3.10: SCHUBKRAFTABLEITUNG IN HDPE-DICHTUNGSBAHNEN ÜBER ZUG /31/ .....	48
BILD 3.11: DICHTUNGSBAHNEN MIT STRUKTURIERTER OBERFLÄCHE /61/ .....	49
BILD 3.12: OBERFLÄCHENPROFILIERUNG FÜR DIE GRENZFLÄCHE ZWISCHEN HDPE-DICHTUNGSBAHN UND SAND.50	
BILD 3.13: OBERFLÄCHENPROFILIERUNG FÜR DIE GRENZFLÄCHE ZWISCHEN HDPE-DICHTUNGSBAHN UND VERDICHTETEM BINDIGEN BODEN.....	50
BILD 3.14: SCHERPARAMETER VERSCHIEDENER BÖDEN UND ZUGEHÖRIGEN VERBUNDPARAMETERN ZWISCHEN BODEN UND HDPE-BAHN, ERMITTELT IM DIREKTEN SCHERVERSUCH /19/ .....	51
BILD 3.15: VERBUNDEIGENSCHAFTEN ZWISCHEN EINER MINERALISCHEN DICHTUNG UND HDPE-BAHNEN MIT UNTERSCHIEDLICHER OBERFLÄCHENSTRUKTUR /19/ .....	51
BILD 3.16: VEREINFACHTES FLIEßDIAGRAMM ZUR FILTERBEMESSUNG VON GEOTEXILIEN, NACH /74/, /34/. .....	57
BILD 3.17: BESTIMMUNGSDIAGRAMM FÜR DEN ABMINDERUNGSFAKTOR $C_G$ (GEWEBE UND DÜNNE VLIESTOFFE, D << 2,0 MM) /34/. .....	59
BILD 3.18: BEISPIEL FÜR DIE HORIZONTALE, LASTABHÄNGIGE TRANSMISSIVITÄT EINER KRALLSCHICHT. ....	60
BILD 4.1 : DREIFACHBOHLE MIT DICHTUNGSMATERIALIEN .....	64
BILD 4.2: KOPPLUNG VON SOILCRETE-LAMELLENDICHTWAND UND SOILCRETE-SOHLLE /60/.....	66
BILD 4.3: STICKSTOFFVEREISUNG MIT ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN BEI ALTABLAGERUNGEN .....	67
BILD 4.4: DICHTUNGSSCHLITZWAND IM EINPHASEN-VERFAHREN /25, 60/ .....	68
BILD 4.5: HERSTELLUNG DER DICHTWAND IM ZWEIFHASEN-VERFAHREN .....	69
BILD 4.6: MÖGLICHE FUGENAUSBILDUNGEN /60/ .....	70
BILD 4.7: KOMBINATIONSDICHTWAND.....	71
BILD 4.8: SPUNDBOHLN IN EINER DICHTWAND .....	71
BILD 4.9A: DICHTWAND MIT EINER DOPPELSCHALIGEN GLASBARRIERE .....	72
BILD 4.9B: DICHTWAND MIT EINER MITTIG EINGEBRACHTEN GLASBARRIERE .....	73
BILD 4.9C: DICHTWAND WIRD MIT EINER DOPPELSCHALIGEN GLASBARRIERE.....	74

BILD 4.10: HERSTELLUNG EINES EINZELELEMENTES EINER DÜSENSTRAHLWAND /51/.....	75
BILD 4.11: SOILCRETE-DICHTUNGSELEMENTE.....	76
BILD 4.12: HOCHDRUCKINJEKTIONS-DICHTWAND AUS ÜBERSCHNITTENEN SÄULEN ZUR SCHLIEBUNG VON FENSTERN IN GEGRIFFENEN ODER GEOBOHRTEN DICHTWÄNDEN.....	77
BILD 4.13: EINKAPSELUNG VON LOKAL BEGRENZTEN KONTAMINATIONSBEREICHEN .....	80
BILD 4.14: HORIZONTALE SOHLEN DURCH ANORDNUNG DER ÜBERSCHNITTENEN SOILCRETE-SCHEIBEN IM DREIECKSRASTER.....	81
BILD 4.15: STOLLEN MIT DICHTUNGSTEPPICH .....	82
BILD 4.16: INJEKTIONSSOHL E AUS GENEIGTEN UND HORIZONTALEN INJEKTIONSSCHIRMEN, VON STOLLEN AUS VERPREßT .....	83
BILD 4.17: SCHWERTEINBAUVERFAHREN .....	84
BILD 4.18 : SOHLABDICHTUNGEN AUS STOLLEN .....	85
BILD 4.19: HERSTELLUNG EINER DICHTUNGSSOHL E MIT OFFENER BAUGRUBE, VERBINDUNG DER HORIZONTALEN UND VERTIKALEN DICHTUNGEN /85/ .....	86
BILD 4.20: HERSTELLUNG DER DICHTUNGSSOHL E MIT ARBEITSSTOLLEN, VERBINDUNG DER HORIZONTALEN UND VERTIKALEN DICHTUNGEN /85/.....	87
BILD 5.1: EINTRAG VON KONTAMINATION WÄHREND DER HERSTELLUNG UND IM GEBRAUCHSZUSTAND .....	91
BILD 5.2: SCHADSTOFFEINTRAG IN DIE DICHTWAND BEI DER HERSTELLUNG UND IM GEBRAUCHSZUSTAND AM BEISPIEL EINER ALTABLAGERUNG.....	92
BILD 5.2A: HERSTELLUNG DER DICHTWAND IM EINPHASEN - VERFAHREN MIT MINERALISCHEN BAUSTOFFEN IN DEN GEFÄHRENBEREICHEN A UND B.....	93
BILD 5.2B: HERSTELLUNG DER DICHTWAND IM EINPHASEN-VERFAHREN MIT MINERALISCHEN BAUSTOFFEN IN DEN GEFÄHRENBEREICHEN C, D UND E .....	93
BILD 5.2C: ERSTARREN UND ERHÄRTEN DER DICHTWAND MIT MINERALISCHEN BAUSTOFFEN .....	94
BILD 5.2D: HERSTELLUNG DER DICHTWAND IM EINPHASEN-VERFAHREN MIT KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN ...	94
BILD 6.1: CHEMISCHE ANALYSEN EINES KAOLINITISCHEN TONES NACH BEHANDLUNG A) MIT BASISCHER, B) MIT SAUER, C) NEUTRALER PRÜFFLÜSSIGKEIT .....	102
BILD 6.2: EINFLUß VON MAGNESIUMSULFAT-, KALZIUMHYDROGENKARBONAT- UND KALZIUMSULFATHARTEM WASSER AUF DIE FILTRATWASSERABGABE VON BENTONITSUSPENSIONEN MIT 40 UND 60 KG BENTONIT PRO M <sup>3</sup> WASSER.....	109
BILD 6.3: EINFLUß VON MAGNESIUMSULFAT-, KALZIUMHYDROGENKARBONAT- UND KALZIUMSULFATHARTEM WASSER AUF DIE FLIEBGRENZE VON BENTONITSUSPENSIONEN.....	109
BILD 6.4: SCHLOßVERBINDUNG DER HDPE-FOLIEN MIT QUELLFÄHIGEM DICHTUNGSBAND.....	111
BILD 6.5: STAHLKORROSION DURCH BÖDEN /58/ .....	112
BILD 6.6: EIGNUNG DER SPUNDWANDSYSTEME IN VERGLEICHBAREN PRÜFFLÜSSIGKEITEN .....	115
BILD 7.1: ERREICHBARE TIEFEN UND DICKEN.....	117
BILD 7.2: ANWENDUNGSBEREICHE DES SOILCRETE-VERFAHRENS /26/.....	122
BILD 7.3: EINFLUß VON CaCl <sub>2</sub> -LÖSUNGEN AUF DIE FILTRATWASSERABGABEMENGEN VON BENTONITSUSPENSIONEN MIT ZEMENTSTABILEN UND NICHT ZEMENTSTABILEN BENTONITEN /25/ .....	128
BILD 7.4: AUSLAUFZEITEN BEWEGTER BZS IN ABHÄNGIGKEIT VOM HOS-ANTEIL /25/ .....	129
BILD 7.5: FILTRATWASSERABGABEN ALS FUNKTION DER RÜHRZEIT /25/.....	130
BILD 7.6 : ERSTARRUNGSMESSUNGEN MIT VICAT-NADELGERÄT (TAUCHSTAB) /25/.....	131
BILD 7.7: DURCHLÄSSIGKEITSWERTE VON CA-BZS (200/175) ÜBER DAUER DER DURCHSTRÖMUNG MIT SICKERWASSER UND LEITUNGSWASSER .....	132
BILD 7.8 : DURCHLÄSSIGKEITSWERTE VON DiWa-MIX ÜBER DIE DAUER DER DURCHSTRÖMUNG MIT SICKERWASSER UND LEITUNGSWASSER; PROBENALTER: W/B = 3,3 18 TAGE (SICKERWASSER), W/B = 3,0 28 TAGE (SALZLAUGE).....	133
BILD 7.9: DURCHLÄSSIGKEITSWERTE VON BENTONIT-BINDEMittel-PROBEN ÜBER DIE DAUER DER DURCHSTRÖMUNG MIT SICKERWASSER _____ Na-BENTONIT - - - - - Ca-BENTONIT.....	134
BILD 7.10: DURCHLÄSSIGKEITSWERTE VON Ca-MIX BEI VERSCHIEDENEN PRÜFFLÜSSIGKEITEN, EINBAUALTER 28 TAGE, AUS : PRÜFBERICHT DER FIRMA ANNELIESE ZEMENTWERKE, JANUAR 1988 .....	135
BILD 7.11: EINAXIALE DRUCKFESTIGKEITEN UND DURCHLÄSSIGKEITEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM PROBENALTER - FERTIGMISCHUNG SOLIDUR .....	136
BILD 8.1: ARTEN UND ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER INJEKTIONSMITTEL NACH DIN 4093 .....	137
BILD 8.2A: INJEKTIONSMÖGLICHKEITEN UND ANWENDUNGSBEREICHE VERSCHIEDENER INJEKTIONSSUBSTANZEN.....	139
BILD 8.2B: INJEKTIONSMÖGLICHKEITEN UND ANWENDUNGSBEREICHE VERSCHIEDENER INJEKTIONSSUBSTANZEN.....	139
BILD 8.3: DURCHLÄSSIGKEITSWERTE VON BENTONIT-ZEMENT-BODEN-GEMISCHEN (SOHLABDICHTUNGEN) ÜBER DIE DAUER DER DURCHSTRÖMUNG MIT LEITUNGSWASSER, SICKERWASSER UND SEHR STARK BETONAGGRESSIVEN PRÜFFLÜSSIGKEITEN /24/ .....	142

---

BILD 8. 4: DURCHLÄSSIGKEITSBEIWERTE VON ZEMENT-SCHLUFF-MISCHUNGEN ÜBER DIE DAUER DER DURCHSTRÖMUNG MIT SCHWEFELSÄURE, AMMONIUMCHLORID UND NATRONLAUGE /78/ .....	143
BILD 11.1: ABDICHTUNGSSYSTEME DER TESTFELDER 1-4 /93/ .....	150
BILD 11.2 : ABDICHTUNGSSYSTEM DES 5. TESTFELDES /93/ .....	151
BILD 11.3: ANSCHLUß: OBERFLÄCHENABDICHTUNG AN DIE DICHTWAND /87/.....	151
BILD 11.4: SCHNITT DURCH DIE DEPONIE MIT GRUNDWASSERSPIEGEL /60/ .....	152
BILD 11.5 : HYDRAULISCHES SCHEMA /60/.....	153
BILD 11.6 : SCHICHTAUFBAU DER OBEREN ABDECKUNG /87/.....	154
BILD 11.7: SCHICHTAUFBAU DER UNTEREN ABDICHTUNG MIT FUßPUNKTGESTALTUNG, /87/.....	155
BILD 11.8: REGELAUFBAU DES OBERFLÄCHENABDICHTUNGSSYSTEMS.....	156
BILD 11.9: DETAILKONSTRUKTION DES RANDGRABENS .....	157

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1.1: WIRKUNGSWEISE VON EINKAPSELUNGEN ZUR VERRINGERUNG DES GEFÄHRDUNGSPOTENTIALS .....	7
TABELLE 1.2: BODENKENNWERTE VON BODENARTEN /79/ .....	20
FORTSETZUNG TABELLE 1.2: BODENKENNWERTE VON BODENARTEN /79/ .....	21
TABELLE 3.1: UNTERSUCHUNGEN VON MINERALISCHEN DICHTSTOFFEN .....	30
TABELLE 3.2: ANFORDERUNGEN AN OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN FÜR SONDERABFALLDEPONIEEN /9/ .....	31
TABELLE 3.3: BEISPIELE VON MATERIALIEN FÜR DICHTUNGS- UND DRÄNAGESCHICHTEN .....	35
TABELLE 3.4: KENNWERTE DES TONIGEN SCHLUFFS .....	36
TABELLE 3.5: PHYSIKALISCHE ANFORDERUNGEN AN KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN (BEZUGSDICKE D = 2,5 MM) .....	39
TABELLE 3.6: CHEMISCHE UND BIOLOGISCHE ANFORDERUNGEN AN DEN WERKSTOFF DER KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN .....	42
TABELLE 3.7: EIGNUNGSPRÜFUNGEN FÜR MINERALISCHE DRÄNSTOFFE .....	44
TABELLE 3.8: REIBUNGSBEIWERTE ZWISCHEN VERSCHIEDENEN KOMPONENTEN (S.A. BILD 3.14).....	52
TABELLE 3.9: FILTERKRITERIEN FÜR VERSCHIEDENE ANWENDUNGSFÄLLE.....	56
TABELLE 3.10: WURZELTIEFEN VON KULTURPFLANZEN FÜR REKULTIVIERUNGSSCHICHTEN .....	62
TABELLE 4.1: DICHTWANDSYSTEME .....	63
TABELLE 4.2: DICHTWANDSYSTEM MIT KOSTENÜBERBLICK - RICHTWERTE FÜR WANDTIEFE 15 M .....	78
TABELLE 4.3: SOHLABDICHTUNGSSYSTEME .....	79
TAB. 5.1: MATERIALIEN FÜR DICHTWÄNDE UND DICHTSOHLEN .....	88
TAB. 5.2 : ANFORDERUNGEN DER STANDORTTYPEN AN BAUVERFAHREN.....	89
TABELLE 6.1: KENNWERTE ZUR BODENPHYSIKALISCHEN KLASSIFIZIERUNG VON MINERALISCHEN ABDICHTUNGSMATERIALIEN NACH DEN GDA-EMPFEHLUNGEN.....	99
TABELLE 6.2: MINERALBESTAND, BILDSAMKEITSGRENZEN, WASSERAUFNAHMEFÄHIGKEIT UND SCHRUMPFGRENZE (IN %) VON BÖDEN NACH /30/.....	99
TABELLE 6.3: IONENAUSTAUSCHKAPAZITÄTEN VON VERSCHIEDENEN TONMINERALEN NACH /42/ .....	100
TABELLE 6.4 : HANDELSÜBLICHE BENTONITSORTEN (AUSWAHL, STAND 12/1988).....	105
TABELLE 6.5 : EINSATZMÖGLICHKEITEN VON VERFÜGBAREN BENTONITEN.....	106
TABELLE 6.6: AGGRESSIVE WIRKUNG VON SALZEN AUF ZEMENT UND DESSEN SCHUTZ DURCH BENTONIT IN DICHTWANDMASSEN .....	108
TABELLE 6.7 : BETONAGGRESSIVITÄT VON WÄSSERN NACH DIN 4030.....	110
TABELLE 6.8: KORROSIONSNEIGUNGEN VON UNBESCHICHTETEN UND BESCHICHTETEN STÄHLEN UND SPUNDWANDDICHTUNGEN .....	114
TABELLE 7.1 : BEURTEILUNG DER DICHTWANDMASSEN FÜR VERSCHIEDENE DICHTWANDSYSTEME.....	118
TABELLE 7.2: DICHTWANDMASSEN FÜR VERSCHIEDENE DICHTWANDSYSTEME.....	119
TABELLE 7.3 : EIGNUNGSPRÜFUNGEN AN ZEMENTHALTIGEN DICHTWANDMASSEN .....	123
TABELLE 7.4: BESTIMMUNG DER EIGENSCHAFTEN DER BENTONITSUSPENSIONEN UND FRISCHEN DICHTWANDMASSEN .....	124
TABELLE 7.5 : BESTÄNDIGKEIT VON ZEMENTEN UND BENTONITEN GEGEN VERSCHIEDENE FLÜSSIGKEITEN .....	126
TABELLE 7.6: AUSWAHL BESTÄNDIGER DICHTWANDMASSEN MIT NA-BENTONITEN UND CA-BENTONITEN GEGENÜBER ÖLEN UND SICKERWÄSSERN AUS SAD.....	126
TABELLE 9: MÖGLICHE ABDICHTUNGSELEMENTE DER EINKAPSELUNGSSYSTEME BEI EINER QUALITÄTSÜBERPRÜFUNG .....	145
TABELLE 10 : KONTROLLEN UND NACHWEISE FÜR DIE DICHTELEMENTE - BEISPIELE .....	148

# Indexverzeichnis

## A

Altablagerung	
Standorttypen .....	8
Attapulgit .....	106

## B

Bentonit	
Allgemeines .....	103, 105, 106
Bentonit-Bindemittel-Suspension	
Durchlässigkeitsbeiwert .....	134
Bodenart	
Bodenkennwerte .....	20
Bodenkennwert .....	20
bodenphysikalische Klassifizierung	
Dichtungsmaterialien .....	98

## C

Ca-Bentonit-Zement-Suspension	
Allgemeines .....	131
Durchlässigkeitsbeiwert .....	131, 133
Camix	
Allgemeines .....	134
Durchlässigkeitsbeiwert .....	134

## D

Dichtsysteme und -stoffe	
Allgemeines .....	18
Auswahl Analysenparameter .....	18
Dichtungsmaterialien	
Allgemeines .....	88, 96
Attapulgit .....	106
Bentonit .....	103, 105, 106
Beschleuniger .....	110
bodenphysikalische Klassifizierung .....	98
Dichtwand .....	88, 96
Dichtwandmasse .....	97
hydraulisches Bindemittel .....	107
Ionenaustauschkapazität .....	100
Kalksteinmehl .....	108
Kunststoffdichtung .....	97
Kunststoffdichtungsbahnen .....	110
mineralische Baustoffe .....	101, 108
mineralische Komponenten .....	97
physikalische und chemische Eigenschaften .....	101
Quarzmehl .....	108
Sand-Kies-Gemische .....	108
Sohlabdichtung .....	88, 96, 98
Stahl .....	100
Stahlkorrosion .....	114
Stahlspundwand .....	97
Ton .....	101
Untersuchung .....	97
Untersuchungsparameter .....	99
Verflüssiger .....	110
Verzögerer .....	110
Zusatzmittel .....	110

Dichtungssohle .....	5, 7
Dichtwand	
Allgemeines .....	7, 63
Bauverfahren .....	116
Dichtungsmaterialien .....	88, 96
Dicken .....	116
Düsenstrahlwand .....	74
Einphasen-Schlitzwand .....	68, 120
Gefrierwand .....	66, 67
gerammte Schlitzwand .....	65, 121
Hochdruckinjektionswand .....	65, 76
Injektionswand .....	74, 122
Kombinationsdichtwand .....	69, 71, 121
Kombinationsdichtwand mit Glaswänden .....	72
kombinierte Verfahren .....	76
Kontamination .....	90
Kostenüberblick .....	78
mineralische Dichtung .....	90
Schlitzwand .....	120
Schmalwand .....	64, 122
Sohlabdichtung .....	85
SOILCRETE-Dichtungselemente .....	76
Soilcrete-Lamellendichtwand .....	65
Spundwand .....	64
Standorttypen .....	89
Tiefen .....	116
vertikale .....	5
Zweiphasen-Schlitzwand .....	69, 120
Dichtwandmassen	
Allgemeines .....	117, 120, 125
Auslaufzeiten .....	128
Bentonit-Bindemittel-Probe .....	134
Bentonit-Bindemittel-Suspension .....	134
Beständigkeit .....	125
Ca-Bentonit-Zement-Suspension .....	131
Camix .....	134
DiWa-mix .....	133
Dynagrout-Zweiphasen-Dichtungsmassen .....	134
Eigenschaften der Bentonitsuspension .....	124
Eignungsprüfung .....	123
Einphasen-Schlitzwand .....	120
erhärtete Masse .....	124
Erosionssicherheit .....	125
Erstarrungsmessung .....	130
Festigkeitsverhalten .....	124
Filtratwasserabgabe .....	128, 129
Frischsuspension .....	124
gerammte Schlitzwand .....	121
Injektionswand .....	122
Kombinationsdichtwand .....	121
Na-Bentonit-Zement-Suspension .....	128
Neuentwicklungen .....	133
Schlitzwand .....	120
Schmalwand .....	122
Schmalwandmassen .....	133
Solidur .....	135
Spannungs-Verformungs-Verhalten .....	124

Zweiphasen-Schlitzwand .....	120	Hochdruckinjektionswand .....	65, 76
Dichtwand-Sohlabdichtung		<b>I</b>	
Verbindung .....	85, 86, 87	Injektionssohle .....	82
Dichtwandsysteme .....	117	Injektionswand .....	74, 122
Diffusion .....	22	<b>K</b>	
DiWa-mix .....	133	Kalksteinmehl .....	108
Durchlässigkeit		Kombinationsdichtwand	
Solidur .....	135	Allgemeines .....	69, 121
Durchlässigkeitsbeiwert		Dichtwandmasse .....	121
Bentonit-Bindemittel-Suspension .....	134	Fugenausbildungen .....	69
Ca-Bentonit-Zement-Suspension .....	131, 133	mit Glaswänden .....	72
Düsenstrahlwand .....	74	Konvektion .....	22
DynagROUT-Zweiphasen-Dichtungsmassen .....	134	Kunststoffdichtung	
<b>E</b>		Allgemeines .....	39, 46, 49
Einkapselung		biologische Beanspruchung .....	47
Dichtungsmaterialien .....	88, 96	HDPE-Dichtung .....	48
Dichtwand .....	63	mechanische Beanspruchung .....	47
Dichtwandsysteme .....	63	physikalische und chemische Beanspruchung .....	47
Fallbeispiele .....	149	Reibungsbeiwert .....	52
Füllmassen für Stollen .....	143	Schadstoffpermeation .....	47
Kontamination .....	90	Verbundeigenschaften .....	51
Kontrolle und Nachweis .....	148	Kunststoffdichtungsbahnen	
Langzeitkontrolle .....	147	Allgemeines .....	39
mineralische Dichtung .....	90	Dichtungsmaterialien .....	100
Oberflächenabdichtung .....	24	Kunststoffdränkörper .....	44
Qualitätssicherung .....	145	<b>M</b>	
Sohlabdichtung .....	63, 79	mineralische Dränstoffe .....	43
Sohlabdichtungssysteme .....	79	mineralische Oberflächenabdichtung	
Standorttyp 1 .....	8	Allgemeines .....	52
<b>Standorttyp 2</b> .....	10	biologische Beanspruchung .....	53
Standorttyp 3 .....	11	Dichtstoffe .....	29, 30
Standorttyp 4 .....	12	mechanische Beanspruchung .....	53
Standorttyp 5 .....	15	physikalische und chemische Beanspruchung .....	53
Standorttyp 6 .....	16	<b>N</b>	
Standorttyp 7 .....	17	Na-Bentonit-Zement-Suspension .....	128
Standorttypen .....	89	<b>O</b>	
Wirkungsweise .....	7	Oberflächenabdichtung	
Einphasen-Schlitzwand		Abdeckschichten .....	45
Allgemeines .....	68, 120	Abdichtungsstoffe .....	27
Dichtwandmasse .....	120	Abdichtungswirkung .....	33
Entwässerungs- und Kontrollschächte .....	44	Allgemeines .....	5, 7, 24
<b>F</b>		Anwendung .....	24
Fallbeispiele		Aufbau .....	24
Einkapselung von Ablagerungen .....	149	Ausgleichsschicht .....	45
Filterkriterien .....	55	Bemessungsbeispiele .....	46
<b>G</b>		Bentonit-vergütete Böden .....	37
Gefrierwand .....	66, 67	Einbaukriterien .....	33
Geotextilien		Entgasung .....	28
Abminderungsfaktor .....	58	Entwässerung .....	27
Allgemeines .....	56	Entwässerungs- und Kontrollschächte .....	44
Filterbemessung .....	56	HDPE-Dichtung .....	46
Transmissivität .....	59	Komponenten .....	27
geramnte Schlitzwand .....	65, 121	Kunststoffdichtung .....	39, 46
<b>H</b>		Kunststoffdichtungsbahnen .....	39
HDPE-Dichtung .....	46, 48		

Kunststoffdränkörper.....	44	Materialien .....	138, 140
Materialien .....	27, 29, 35	mineralische Dichtung.....	90
mineralische Dichtstoffe.....	29	Schwerteinbauverfahren.....	83
mineralische Dichtung.....	52	Soilcrete-Sohle.....	65
mineralische Dränstoffe.....	43	Standorttypen .....	89
natürliche Bodenmaterialien.....	36	Stollen .....	84
Rekultivierung.....	28, 61	Stollen mit Dichtungsteppich.....	82
Schutzfunktion .....	28	überschnittene Soilcrete-Scheiben.....	80
Sonderabfalldeponie .....	31	Übersicht .....	79
Systemaufbau .....	25	Sohlabdichtungssysteme.....	79
Oberflächenentwässerung mit Dränmatten		Soilcrete Verfahren	
Allgemeines .....	54	Allgemeines.....	122
Bemessungsvorschlag.....	55	Soilcrete-Lamellendichtwand .....	65
Geotextilauflage .....	54	Soilcrete-Scheiben, überschnittene .....	80
Krallschicht.....	55	Soilcrete-Sohle .....	65
<b>Q</b>		Solidur .....	135
Quarzmehl.....	108	Sorption	
<b>S</b>		Allgemeines.....	22
Sanierung		Spundwand	
Allgemeines .....	6	Allgemeines.....	64, 114
Schadstoffbewegung.....	22	Eignung.....	114
Schlitzwand		Stahlkorrosion .....	114
Allgemeines .....	68, 69, 120	Stahl	
Dichtwandmasse.....	120	Dichtungsmaterialien.....	111
geramnte .....	65	Stahlkorrosion	
Schmalwand		Dichtungsmaterialien.....	114
Allgemeines .....	64, 122	durch Böden .....	111
Dichtwandmasse.....	122	Spundwand.....	114
Schmalwandmassen .....	133	Standorttypen	
Schwerteinbauverfahren.....	83	Altablagerung.....	8
Sicherung und Sanierung von Altlasten		Stofftransport .....	23
Einkapselung.....	6	Stollen mit Dichtungsteppich .....	82
Sohlabdichtung		<b>T</b>	
Allgemeines .....	5, 7, 63, 79, 80, 137	Transportgleichung .....	23
Dichtungsmaterialien .....	88, 96, 98	<b>V</b>	
Dichtwand.....	85	vertikale Dichtungswand.....	5
Durchlässigkeitswert von Bentonit-Zement-		VICAT-Nadelgerät.....	130
Boden-Gemischen.....	141	<b>W</b>	
Durchlässigkeitswert von Zement-Schluff-		Wurzeltiefen von Kulturpflanzen.....	62
Mischungen .....	142	<b>Z</b>	
Eignungsprüfung.....	140	Zweiphasen-Schlitzwand	
Injektion von der Geländeoberfläche.....	80	Allgemeines.....	69, 120
Injektionsmischung .....	140	Dichtwandmasse.....	120
Injektionsmittel .....	137, 138		
Injektionsmöglichkeit .....	138		
Injektionssohle .....	82		
Kontamination .....	90		