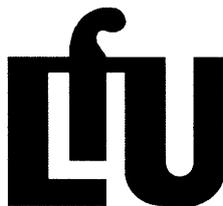
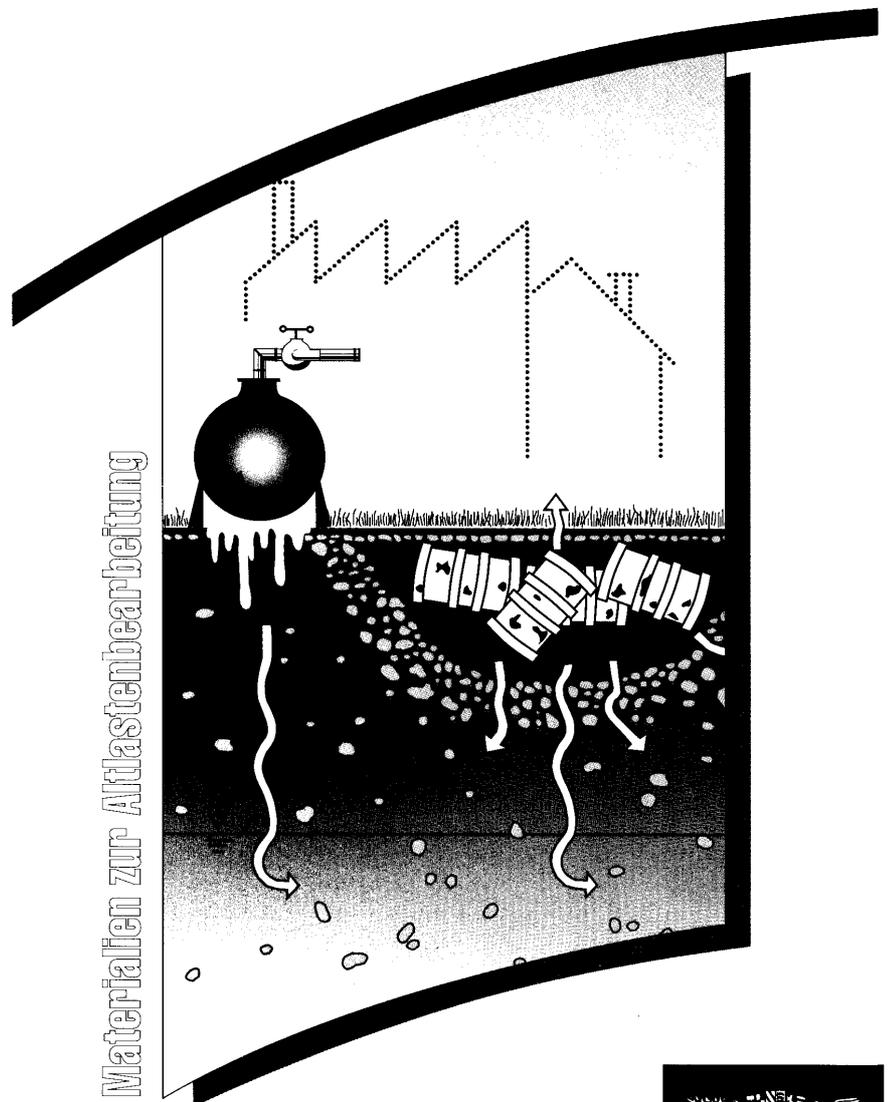


**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

**Handbuch
Bodenwäsche**

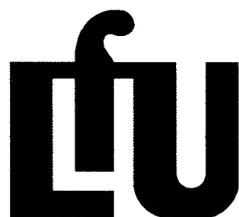
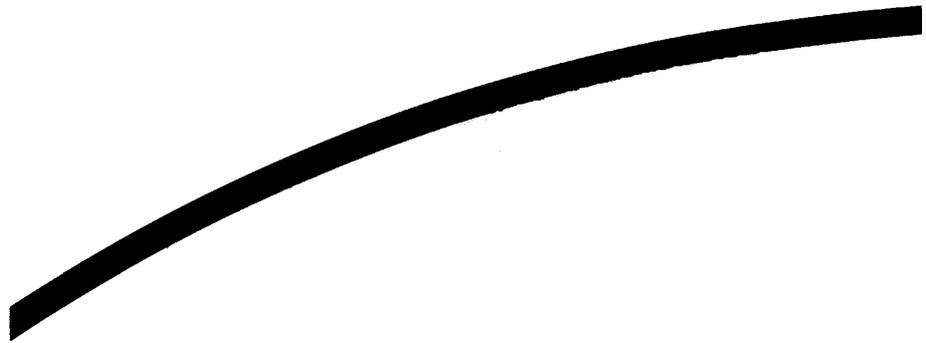


**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Handbuch Bodenwäsche



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

Karlsruhe 1993



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Projektbearbeitung: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54 – Altlastensanierung
Dr.-Ing. W. Kohler

Verfasser: Gesellschaft für Umweltverfahrenstechnik und Recycling;
Freiberg/Sachsen
Ingenieurbüro für Altlastensanierung
– Dr. Sonnen; Berlin
Trischler und Partner GmbH – Beratende Ingenieure Geotechnik,
Umweltschutz; Darmstadt und Karlsruhe

Karlsruhe, April 1993

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

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	1
1 EINFÜHRUNG	2
2 GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICHE DER BODENWÄSCHE	4
2.1 ANWENDUNGSBEREICHE DER BODENWÄSCHE.....	4
2.1.1 Überblick über die Bodenreinigungsverfahren.....	4
2.1.2 Ziel der Bodenwäsche.....	6
2.1.3 Einsatzbereiche und Grenzen für Bodenwaschverfahren.....	7
2.2 BODENMECHANISCHE UND BODENKUNDLICHE GRUNDLAGEN.....	10
2.2.1 Erläuterungen zum Begriff Boden.....	10
2.2.2 Lockergesteinsarten und ihre Verbreitung.....	10
2.2.3 Aufbau und Zusammensetzung von Böden.....	17
2.2.4 Einteilung der Böden nach der Korngröße.....	22
2.2.5 Die Eignung von Lockergesteinen für Bodenwaschverfahren.....	27
2.3 GEOCHEMISCHE GRUNDLAGEN.....	28
2.3.1 Sorption und Austauschkapazität.....	28
2.3.2 Bodenreaktion.....	30
2.3.3 Pufferkapazität.....	30
2.3.4 Redox-Reaktionen/Redox-Potential.....	31
2.4 ERKUNDUNGSUMFANG, VORUNTERSUCHUNGEN.....	31
2.4.1 Anforderungsprofil der Erkundung.....	31
2.4.2 Voruntersuchungen zur Bodenwäsche.....	33
3 EINFÜHRUNG IN DIE VERFAHRENSTECHNIK DER BODENWÄSCHE	34
3.1 VERFAHRENSTECHNISCHE ZIELE UND EINSETZBARE VERFAHRENSTECHNIKEN.....	34
3.2 VERFAHRENSTECHNISCHE GRUNDOPERATIONEN.....	39
3.2.1 Zerkleinerung.....	39
3.2.2 Waschen und Läutern.....	43
3.2.3 Klassierung.....	55
3.2.4 Sortierverfahren.....	69
3.2.5 Mechanische Flüssigkeitsabtrennung.....	89
3.3 KOMBINATION VERFAHRENSTECHNISCHER GRUNDOPERATIONEN.....	96
3.4 CHEMISCHE PROZESSE IN DER SEKUNDÄRTECHNIK.....	105
3.4.1 Prozeßwasser/Abwasserbehandlung.....	105
3.4.2 Schlammbehandlung.....	108
3.4.3 Abluftbehandlung.....	109
4 STAND DER TECHNIK	110
4.1 MOBILE BODENWASCHANLAGEN (ON SITE).....	112
4.1.1 Das Trommelwasch-Verfahren System ContraCon.....	112
4.1.2 Das CBBR-Verfahren System Possehl.....	118
4.1.3 Weitere Verfahren.....	123
4.2 SEMIMOBILE BODENWASCHANLAGEN (ON SITE / OFF SITE).....	134
4.2.1 Hochdruckstrahl-Verfahren System Klöckner Oecotec.....	134
4.2.2 Vibrations-Verfahren System Harbauer.....	141
4.2.3 Das Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik.....	148
4.2.4 Weitere Verfahren.....	154
4.3 STATIONÄRE BODENWASCHANLAGEN (OFF SITE).....	179
4.3.1 Entsorgungszentrum Hamburg.....	180
4.3.2 Weitere Anlagen.....	184
4.4 IN-SITU-BODENWASCHVERFAHREN.....	185
4.4.1 Das Spülverfahren System Holzmann.....	186
4.4.2 Das Soilcrete Verfahren System Keller.....	189
4.4.3 Weitere Verfahren.....	192

4.5 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG DER BODENWASCHVERFAHREN.....	192
4.5.1 On-site-Verfahren	196
4.5.2 Off-site-Verfahren	196
4.5.3 In-situ-Verfahren.....	197
4.6 LEISTUNGSDATEN DER IN BETRIEB BEFINDLICHEN BODENWASCHANLAGEN	197
5 ENTWICKLUNGSSTAND UND -TENDENZEN	201
5.1 GRENZEN DES VERFAHRENS.....	201
5.2 VERFAHREN IN DER ENTWICKLUNG, F+E-VORHABEN	203
5.3 ERFOLGSAUSSICHTEN UND BEWERTUNG	206
6 PRAKTISCHE VORGEHENSWEISE BIS ZUR ANWENDUNG EINER BODENWÄSCHE, ENTSCHEIDUNGSHILFEN.....	207
6.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE VORGEHENSWEISE	207
6.2 GRUNDLAGENERMITTLUNG	210
6.3 SANIERUNGSVORPLANUNG	210
6.3.1 Verfahrensvorauswahl, Firmenanfragen, Kostenschätzung	210
6.3.2 Fachdiskussion der Sanierungsziele	213
6.3.3 Kosten-Nutzen-Betrachtung	214
6.3.4 Nicht-monetäre Bewertung	215
6.3.5 Gesamtbewertung, Sanierungsvorschlag	218
6.4 SANIERUNGSENTSCHEIDUNG	222
6.5 SANIERUNGSHAUPTPLANUNG	223
6.5.1 Ausführungsplanung	223
6.5.2 Genehmigungsplanung, behördliche Zulassungsverfahren	227
6.5.3 Ausschreibung und Vergabe	232
6.6 SANIERUNGSDURCHFÜHRUNG	241
7 VERWENDETE LITERATUR	244
GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICHE DER BODENWÄSCHE (KAP.2)	244
EINFÜHRUNG IN DIE VERFAHRENSTECHNIK DER BODENWÄSCHE (KAP. 3)	244
STAND DER TECHNIK (KAP. 4).....	246
Mobile Bodenwaschanlagen (on site; Kap. 4.1)	246
Semimobile Bodenwaschanlagen (on site / off site; Kap. 4.2)	247
Stationäre Bodenwaschanlagen (off site; Kap. 4.3).....	248
In-situ Bodenwaschverfahren (Kap. 4.4)	248
Zusammenfassende Bewertung der Bodenwaschverfahren (Kap. 4.5)	249
ENTWICKLUNGSSTAND UND -TENDENZEN (KAP. 5)	249
Grenzen des Verfahrens (Kap. 5.1).....	249
Verfahren in der Entwicklung, F+E-Vorhaben (Kap. 5.2)	249
Erfolgsaussichten und Bewertung (Kap. 5.3).....	249
PRAKTISCHE VORGEHENSWEISE BIS ZUR ANWENDUNG EINER BODENWÄSCHE, ENTSCHEIDUNGSHILFEN (KAP. 6)	250
Sanierungsvorplanung (Kap. 6.3).....	250
Sanierungshauptplanung (Kap. 6.5).....	250
Sanierungsdurchführung (Kap. 6.6)	251
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	252
TABELLENVERZEICHNIS	254
INDEXVERZEICHNIS.....	256

Vorwort

Die Sanierung von Altlasten erfordert ein breites Spektrum einsatzfähiger Sanierungstechniken. Die fortschreitende Verknappung von Deponieraum zwingt immer mehr dazu, eine bloße Ablagerung von kontaminierten Böden möglichst zu minimieren. Mit der Bodenwäsche läßt sich durch Separierungsprozesse die Menge des zu deponierenden Bodens in der Regel erheblich reduzieren und somit eine Schonung der Deponie erreichen.

Bodenwaschverfahren eignen sich zudem in besonderem Maße für eine Kombination mit anderen Verfahren. So erscheint die Bodenwäsche, kombiniert mit einem nachgeschalteten thermischen Verfahren, sowohl aus wirtschaftlichen wie auch aus ökologischen Gesichtspunkten in vielen Fällen eine empfehlenswerte Strategie zu sein.

Auch einer nachgeschalteten mikrobiologischen Dekontamination der Restschlämme muß in Zukunft mehr Beachtung geschenkt werden. Die an zahlreichen Orten in der Bundesrepublik geplanten Bodensanierungszentren werden in der Regel mit einer Bodenwäsche als wesentliche Verfahrensstufe ausgestattet sein. Auch dies macht deutlich, daß die Bodenwäsche zukünftig zur Sanierung kontaminierter Böden einen ganz erheblichen Beitrag leisten wird.

Die Landesanstalt für Umweltschutz sah sich daher veranlaßt, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt verfügbaren Erfahrungen hinsichtlich der Bodenwäsche kritisch und anwendergerecht aufzuarbeiten. Hinter dem Sammelbegriff "Bodenwäsche", die in der Fachwelt oft auch als "naßmechanische Aufbereitung" bezeichnet wird, verbergen sich die unterschiedlichsten verfahrenstechnischen Varianten. Neben der stofflichen Zusammensetzung der Kontamination müssen auch die Eigenschaften des zu reinigenden Bodens in besonderem Maße berücksichtigt werden.

Das vorliegende "Handbuch Bodenwäsche" soll dem Personenkreis, der mit dieser Technik in Berührung kommt, als Wegweiser durch den oben skizzierten komplexen Problembereich dienen. Der Anwender erhält Hinweise bezüglich der grundsätzlichen Einsatzfähigkeit von Bodenwäsche bis hin zur planerischen Umsetzung eines solchen Vorhabens. Dies wird zu einer größeren Sicherheit bei der Anwendung der Bodenwäsche führen. Wir erhoffen uns dadurch eine erhöhte Bereitschaft der Sanierungsträger, Bodenwaschverfahren anzuwenden. Die Praxis ihrerseits ist aufgefordert, über Anwendungsverfahren zu berichten, so daß zu gegebener Zeit eine Fortschreibung dieses Handbuchs in Angriff genommen werden kann.

Karlsruhe, im März 1993

Dr.-Ing. Seng
(Abt. Direktor)

1 Einführung

Der anschauliche Begriff "Bodenwäsche" wird im vorliegenden Handbuch als Sammelbezeichnung für eine Vielzahl verfahrenstechnisch unterschiedlicher Bodenwaschverfahren zur Reinigung kontaminierter Böden verwendet.

Den unterschiedlichen Bodenwaschverfahren gemeinsam ist, daß der Reinigungseffekt in erster Linie auf physikalischen Wirkprinzipien beruht. Bodenwaschverfahren sind daher von Extraktionsverfahren abzugrenzen, bei denen chemische Prozesse dominieren. Extraktionsverfahren und Bodenwaschverfahren werden allerdings häufig unter dem Oberbegriff chemisch-physikalische Bodenreinigungsverfahren zusammengefaßt.

Aufgrund des Einsatzes von Wasch- bzw. Extraktionsflüssigkeiten und mechanischer Klassier- und Sortiereinrichtungen zur Abtrennung einer gereinigten Bodenfraktion von einer Schadstofffraktion (Bodenfeinanteil und Wasch- bzw. Extraktionsflüssigkeit) ist auch der Begriff naßmechanische Bodenreinigungsverfahren geläufig.

Das vorliegende Handbuch "Bodenwäsche" behandelt in erster Linie die vielfältige Verfahrenstechnik, Verfahrenstypen, Leistungsfähigkeit und Grenzen auf dem Markt befindlicher Bodenwaschverfahren sowie deren Anwendung im konkreten Fall. Extraktionsverfahren sind nicht Gegenstand des Handbuchs.

Der Einsatzbereich der "Bodenwäsche" ist die Sanierung von Umweltschadensfällen, insbesondere die Altlastensanierung. Das vorliegende Handbuch "Bodenwäsche" richtet sich daher an alle behördlichen Institutionen, die mit entsprechenden Sanierungsfällen befaßt sind, wie z. B. Wasserwirtschaftsämter, Landkreise, Kommunen, aber auch an mit der Beratung und Planung von Sanierungsmaßnahmen betraute Fachbüros. Ziel des Handbuchs ist es, eine optimale Beurteilungsgrundlage für die Bodenwäsche als Sanierungsverfahren gegenüber konkurrierenden, z. B. thermischen oder biologischen, Bodenreinigungsverfahren zu schaffen.

Das Kapitel 2 soll zunächst über eine nähere Erläuterung der Anwendungsbereiche sowie der bodenmechanisch-bodenkundlichen und geochemischen Grundlagen der "Bodenwäsche" auch den weniger fachkundigen Leser an die Thematik heranführen.

Das Kapitel 3 beinhaltet danach eine Einführung in die Verfahrenstechnik der "Bodenwäsche" und behandelt im Detail die in einem Bodenwaschverfahren einsetzbaren verfahrenstechnischen Grundoperationen, deren Kombination sowie auftretende chemische Prozesse in der Sekundärtechnik.

Darauf aufbauend wird innerhalb des Kapitels 4 exemplarisch in Form einer detaillierten Verfahrensbeschreibung im großtechnischen Einsatz befindlicher Bodenwaschanlagen ein Marktüberblick vermittelt und der Stand der Technik herausgearbeitet. Stand der Datenerhebung ist 1991/1992.

Das Kapitel 5 zeigt die derzeitigen Perspektiven in der weiteren Entwicklung von Techniken der "Bodenwäsche" auf.

Abschließend soll das Kapitel 6 aus der Praxiserfahrung heraus eine konkrete Hilfestellung für den Fall geben, daß die "Bodenwäsche" als mögliches Sanierungsverfahren in Betracht kommt und ggf. in das Planungsstadium und zur Ausführung gelangt.

Das Literaturverzeichnis im Anhang liefert kapitelbezogen eine Literaturliste zur vertiefenden Lektüre.

Das Handbuch "Bodenwäsche" ist im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg erarbeitet worden von der Autorengemeinschaft:

- Gesellschaft für Umweltverfahrenstechnik und Recycling; Freiberg/Sachsen
- Ingenieurbüro für Altlastensanierung - Dr. Sonnen; Berlin
- Trischler und Partner GmbH - Beratende Ingenieure Geotechnik, Umweltschutz; Darmstadt und Karlsruhe.

2 Grundlagen und Anwendungsbereiche der Bodenwäsche

2.1 Anwendungsbereiche der Bodenwäsche

Folgende **Anwendungsbereiche** lassen sich unterscheiden:

- **Altlastensanierung**
Einen weiten Anwendungsbereich stellt die Altlastensanierung dar. Unter Altlasten werden sowohl Altablagerungen, kontaminierte Auffüllungen aus Bauschutt, Haus- und Industriemüll verstanden als auch Altstandorte von Industrie-, Energiegewinnungs- oder Verkehrsbetrieben, an denen mit umweltschädlichen Stoffen nach heutigen Maßstäben unsachgemäß umgegangen und der Untergrund belastet wurde. Bekannte Altlasten werden i. d. R. systematisch erfaßt (Altlastenkataster).
- **Bodenentsorgung bei Baumaßnahmen**
Im Zuge von Baumaßnahmen können bis dahin unbekannte Kontaminationen bzw. Altlasten aufgedeckt werden und somit überraschend kontaminierte Bodenmassen anfallen, die gereinigt oder unter erheblichen Kosten ordnungsgemäß gelagert und deponiert werden müssen.
- **Abriß- und Bauschuttentsorgung**
Das gleiche gilt für Bauschutt, der beim Abbruch alter Industrieanlagen anfällt. Fußböden, Decken und Wände aber auch Anlagenteile sind oft mit Schadstoffen belastet.
- **Unfälle**
Nicht zuletzt gelangen täglich schädliche Stoffe durch Unfälle im Straßenverkehr oder beim Umschlagen und Abfüllen in den Untergrund.

Aufgrund der vielfältigen Einsatzbereiche sind unterschiedliche Varianten hinsichtlich Verfahrenstechnik und Einsatzkonzeption auf dem Markt: das Spektrum reicht von einfachen Low-cost- bis zu aufwendigen High-Tech-Anlagen, die mobil (Container-Bauweise) oder ortsfest sein können (Entsorgungs-/Recyclingzentrum).

2.1.1 Überblick über die Bodenreinigungsverfahren

Bei der Sanierung kontaminierter Standorte wird grundsätzlich zwischen Sicherungsmaßnahmen und Reinigungsmaßnahmen unterschieden. Zu den Reinigungsmaßnahmen gehören neben Grundwasser- und Bodenluft- auch die Bodenreinigung. Ziel ist es jeweils, die Schadstoffe vom Umweltmedium zu trennen, um einen sauberen Boden zu gewinnen. Die angereicherten Schadstoffe können einer Nutzung zugeführt oder ordnungsgemäß entsorgt werden, wenn die Nutzung ausgeschlossen ist.

Im Zusammenhang mit Bodenreinigungsverfahren werden häufig Begriffe verwandt, die eine Systematisierung nach dem Ort der Durchführung beinhalten, unabhängig vom angewandten technischen Verfahren:

In-situ-Verfahren sind alle Verfahren, bei denen die Reinigung des Bodens in seiner natürlichen Lagerungsumgebung ohne Aushub von Material erfolgt, d. h. der natürlich vorliegende Boden stellt selbst den Reaktorraum für das Reinigungsverfahren dar. Dabei bieten sich neben verfahrenstechnischen (z. B. parallel mögliche Geländenutzung) auch verfahrensrechtliche Vorteile (Genehmigungsverfahren).

Die Behandlung des Bodens nach vorherigem Aushub, **ex situ**, kann entweder auf dem Gelände der Altlast selbst, d.h. **on site**, oder außerhalb des kontaminierten Bereichs, **off site**, z. B. in einer zentralen Reinigungsanlage (Bodensanierungszentrum) oder zusammen mit einer anderen Sanierungsmaßnahme erfolgen.

Was die Verfahrenstechnik angeht, so gibt es derzeit bereits eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren, die im wesentlichen auf bewährten Grundtechniken aus dem Bauwesen und der bergbaulichen Aufbereitungstechnik fußen. Ergänzt werden diese Grundverfahren durch nachgeschaltete Anlagen zur Wasseraufbereitung, Schlammbehandlung sowie Abluftreinigung, die im kommunalen und industriellen Bereich üblich sind. Die wichtigsten Grundverfahren zur Bodensanierung sind:

- **Spülverfahren**

Spülverfahren sind gekennzeichnet durch die Trennung der Schadstoffe vom Boden mit Hilfe eines Spülfluides (Gas, Flüssigkeit). Die Bodenwäsche ist ein solches Spülverfahren, das Wasser als Medium nutzt. Zur Verbesserung der Wascheigenschaften können dem Wasser geringe Mengen oberflächenaktiver Substanzen zugesetzt werden. Der Boden selbst kann im begrenzten Umfang verändert werden (z. B. Feinfraktiondefizit).

- **Extraktionsverfahren**

Auch wenn die Abgrenzung aus phänomenologischer Sicht z. T. schwerfällt, unterscheidet man die Bodenwäsche mit Wasser, denn auch das Wasser wirkt im Prinzip als ein polares Lösungsmittel, von den extraktiven Reinigungsverfahren, die mit konzentrierten, stoffspezifischen Laugen oder Lösungsmitteln arbeiten. Das wesentliche Unterscheidungskriterium zu Waschverfahren dürfte der Einsatz natürlich nicht vorkommender z. T. aggressiver chemischer Agenzien sein, deren ökologische Auswirkung z. T. umstritten ist.

- **Thermische Verfahren**

Hierbei ist grundsätzlich zwischen Verschwelung (Pyrolyse) und Verbrennung zu unterscheiden. Bei der Pyrolyse wird der Boden unter Sauerstoffabschluß thermisch behandelt und die Schadstoffe werden zerstört oder verdampft. Das Verfahren eignet sich vor allem für die Behandlung von Böden mit schwer bis leichtflüchtigen Schadstoffen (z. B. PAK, Kohlenwasserstoffe). Die Verbrennung ist dagegen eine thermische Behandlung unter Sauerstoffzufuhr (Sauerstoffüberschuß). Sie bewirkt eine thermische Zerstörung und/oder Oxidation insbesondere von organischen Schadstoffen. Bei den thermischen Verfahren kann in Abhängigkeit von der Temperatur die Zerstörung der organischen Bodenanteile (Humus) und eine Veränderung des Mineralbestandes (z. B. Tonminerale, Kalk, Gips) erfolgen.

Bei allen thermischen Anlagen bedarf die Abluftreinigung einer z. T. aufwendigen Sekundärtechnologie (Emissionsschutz), so daß die Verfahren genehmigungsrechtlich sehr aufwendig werden.

- **Biologische Verfahren**

Diese Verfahren sind naturgemäß auf abbaubare organische Substanzen beschränkt. Durch technische Maßnahmen wie Optimierung des Bodensubstrats, Belüftung, Nährstoffversorgung, Befeuchtung sowie anaerobe Reaktoren werden auch solche Abbau-mechanismen gezielt genutzt, die in der Natur nicht oder selten vorkommen. Biologische Verfahren gelten als sehr bodenschonend, weisen jedoch bei der Sanierung bis- weilen unbefriedigende Ergebnisse auf (z. B. Sanierungsdauer, Restkontamination, Metabolitenbildung).

2.1.2 Ziel der Bodenwäsche

Mit der Bodenwäsche soll das vorhandene Gefahrenpotential beseitigt, mindestens jedoch reduziert werden.

Der Reinigungsgrad des Materials sollte im Idealfall den Wiedereinbau an Ort und Stelle oder die Rückführung in den Wirtschaftskreislauf (Baustoffrecycling) gestatten.

Mindestens aber sollte erreicht werden, daß die belasteten Massen nach der Behandlung nicht mehr als Sonderabfall kostspielig entsorgt werden müssen, sondern als Bauschutt oder gering bis nicht kontaminierte Böden verwendet oder in geringerer Deponieklasse deponiert werden können.

Neben der Gefahrenabwehr sind es also in erheblichem Umfang Wirtschaftlichkeitserwägungen (Deponiekosten), die Art und Umfang der Sanierungsverfahren bestimmen.

Verfahrensziel ist die Aufkonzentrierung der Schadstoffe einerseits durch Ablösung der unerwünschten Stoffe von den Bodenpartikeln und andererseits durch die mechanische Trennung geringer belasteter Bodenbestandteile von den stärker mit Schadstoffen belasteten.

Wegen der im Verhältnis zum Volumen sehr großen Oberflächen der Feinbestandteile im Boden besteht die wesentliche Reinigungsleistung in der Korngrößenklassierung zur Trennung möglichst großer, schwach belasteter Bodenanteile von einer deutlich kleineren, hochbelasteten Feinkornfraktion. Ein zusätzlicher Reinigungseffekt wird durch die Übertragung der Schadstoffe bzw. schadstoffbelasteter Bodenpartikel in die Medien Wasser oder Luft erzielt, aus denen sie mit nachgeschalteter und auch andernorts bewährter Aufbereitungstechnik entfernt werden können.

Bei der Bodenreinigung mit dem Spülmedium Wasser kommen in erster Linie physikalische und nur untergeordnet chemische Vorgänge zur Wirkung.

Bei dem Trennprozeß entsteht dann zum einen der gereinigte Boden und der Reststoff mit dem aufkonzentrierten Schadstoff. Während für den gereinigten Boden i. d. R. eine Verwertung angestrebt wird, muß die Schadstofffraktion kostenintensiv als Sonderabfall entsorgt werden. Sie kann entweder deponiert, aber auch biologisch, chemisch oder thermisch weiterbehandelt werden. Verwertungsmöglichkeiten sind bisher auf Einzelfälle beschränkt. Ohne ein geschlossenes Konzept für die Reststoffbehandlung bzw. Reststoffentsorgung/-verwertung sind Bodenwaschverfahren nicht sinnvoll einsetzbar. Wenn sie einsetzbar sind, liegt ihr we-

sentlicher Vorteil in der Reduktion von zu entsorgenden Mengen und somit in der Schonung von Deponieraum.

2.1.3 Einsatzbereiche und Grenzen für Bodenwaschverfahren

In Frage kommen Bodenwaschverfahren u. a. bei der Dekontamination folgender Standorte:

- Gaswerke
- Kokereien
- Schrottplätze
- Metallverarbeitende Betriebe
- Tankstellen
- Chemiebetriebe
- Erdölverarbeitende Industrie
- Militärstandorte

Bodenwaschverfahren sind nicht auf alle Schadensfälle anwendbar und auch nicht für jeden Boden geeignet.

Einschränkungen aus technischer Sicht ergeben sich durch:

- Art und Eigenschaften der Böden und
- Art und Eigenschaften der Schadstoffe,

wobei als entscheidende zusätzliche Randbedingung das Sanierungsziel (z. B. Restkonzentration, Sanierungsdauer) einhergeht.

Weitere Einschränkungen können sich aus genehmigungsrechtlicher Sicht ergeben (Kap. 6).

2.1.3.1 Einschränkungen durch den Boden

Probleme hinsichtlich der Bodeneigenschaften ergeben sich aus der Kornzusammensetzung (Bodenart) und dem Bestandteil an organischem Material.

Die Bodenwäsche eignet sich gut für nichtbindige (rollige) Böden. Damit sind Böden gemeint, die über große Anteile von Sand und grobkörnigerem Material verfügen. Schluff und Ton, die feinkörnige Bodenbestandteile mit Durchmessern kleiner als 0,06 mm beinhalten, können die größeren Bodenkörner miteinander verbinden, so daß der Boden in größeren Klumpen zusammenhält (bindige Böden). Diese feinen Bodenpartikel, auch als abschlämmbare Bestandteile bezeichnet, sind für die Bodenwäsche nicht oder nur sehr schlecht zugänglich, da sie aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche und ihrer Mineralzusammensetzung (Tonminerale) ein sehr hohes Schadstoffbindungsvermögen aufweisen. Sie müssen deshalb nach Abtrennung von den übrigen Kornfraktionen gesondert behandelt oder entsorgt werden.

Viele Schadstoffe werden von organischen Bodenbestandteilen sehr fest gebunden, so daß die überwiegend mechanischen und nur schwachen chemischen Wirkungsmechanismen der Bodenwäsche die Kontaminanten nicht entfernen können. In natürlichen Böden kommt organisches Material vor allem als Humus im Oberboden vor. In feuchten Senken und Flußauen

steigt der Humusanteil wegen der geringeren Abbauraten (Anmoor). Die vollständig aus unzersetzten Pflanzenresten bestehenden Hochmoore bilden den extremsten Fall.

Als Humus wird das gesamte organische Material im Boden bezeichnet. Die Schadstoffbindung geschieht jedoch nur durch die sog. Huminstoffe, das sind die Zersetzungsprodukte des überwiegend pflanzlichen Materials. Bei den Huminstoffen handelt es sich um hochmolekulare, organische Verbindungen von meist dunkler Farbe (Mutterboden). Sie bilden Teilchen von geringer Größe ($< 0,002$ mm), besitzen eine große spezifische Oberfläche, und können Wasser und andere Moleküle sowie Ionen reversibel anlagern. Im Boden kommen sie als Einzelteilchen, mit Streuresten und mineralischen Bodenbestandteilen zu Aggregaten verklebt und adsorbiert an die Oberfläche von Tonmineralen vor. Die Bestimmung des organischen Anteils im Boden geschieht durch die Ermittlung des Glühverlustes nach DIN 19 684.

Organisches Material kommt als Faulschlamm verlandeter Flußarme, eingeschaltet in die Sande und Kiese der Flußtäler, häufig vor; ebenso in Form von Holzresten aus Hochwasserereignissen. Holzreste oder Bauschutt sind oft in Auffüllungen enthalten.

Die Wirtschaftlichkeitsgrenze der Bodenwäsche wird durch die Menge und Beschaffenheit des Reststoffanteils (Feinkorn-, Humus-Anteil) bestimmt. Auch wenn die Entwicklungen dahin gehen, diesen Reststoffanteil möglichst klein zu halten, wird nach heutigem Stand der Technik (1991) als Wirtschaftlichkeitskriterium angesehen, daß der Reststoffanteil 20 bis 30 % des Eingangsmaterials nicht überschreitet.

Möglicherweise bietet die Kombination verschiedener Bodenreinigungsverfahren wie zum Beispiel die Bodenwäsche mit einer nachgeschalteten Behandlung der Feinkornfraktion (thermische Behandlung, Mikrobiologie, Immobilisierung) die Möglichkeit, Kosten und Nutzen einer Sanierungsmaßnahme zu optimieren.

2.1.3.2 Entfernbare Schadstoffe

Anhand der bisherigen Erfahrungen mit im Einsatz befindlichen Bodenwaschanlagen (vgl. Kap. 4 und 5) ist es schwierig, eine generelle Aussage darüber zu treffen, welche Schadstoffe entfernbar sind. Der Reinigungserfolg im Sinne der Erzielung einer ausreichenden Reinigungsleistung ist in erster Linie von den Bodeneigenschaften abhängig, d. h. von der Trennbarkeit einer schadstoffbelasteten Feinfraktion von einer weitgehend unbelasteten Grobfraktion.

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften eines Schadstoffes, wie Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit, beeinflussen den Schadstoffübergang vom Boden in die wäßrige Phase oder in die Abluft und unterstützen zusätzlich den Reinigungseffekt durch die Separierung.

Berücksichtigt man, daß Bodenwaschverfahren in gewissem Umfang modifizierbar sind, z. B. durch

- Zugabe unterschiedlicher Waschlösungsmittel,
- Intensivierung des eigentlichen Waschprozesses (vgl. Kap. 3.2.2.3),
- ergänzende verfahrenstechnische Operationen bzw. Anlagenteile,

lassen sich Bodenwaschverfahren an die jeweilige Kontaminationssituation anpassen, so daß letztlich alle Schadstoffe in bestimmtem Maße entfernbar sind. Entscheidend für einen standortspezifischen Reinigungserfolg sind nicht zuletzt die jeweiligen Ausgangskonzentrationen und die jeweiligen Sanierungsgrenzwerte (vgl. Kap. 6.3.2).

In der Tabelle 2.1-1 sind Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen nach abnehmender Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit aufgeführt. Je weniger wasserlöslich oder flüchtig ein Schadstoff ist, desto mehr beruht die Reinigungsleistung einer Bodenwäsche auf dem Separierungseffekt.

Stoff/Stoffgruppe	Flüchtigkeit	Wasserlöslichkeit	Abtrennbarkeit	Kommentar
Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW)	gut	gut	gut	Abluftbehandlung ggf. Tensidzugabe
Einkernige leichtflüchtige Aromaten (BTX/AKW)	gut	gut	gut	Abluftbehandlung ggf. Tensidzugabe
Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	mittel	mäßig	gut	ggf. Abluftbehandlung Tensidzugabe
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	gering	mäßig	mittel	ggf. Tensidzugabe
Schwerflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (HKW, z.B. PCB)	gering	gering	mittel	ggf. Tensidzugabe
Pestizide	i.d.R. gering	variabel	variabel	—
Cyanide	frel gut im sauren Milieu	i.d.R. gut	gut	ggf. pH-Wert-Einstellung
	komplexgebunden keine	gering	gut	—
Phenolverbindungen	i.d.R. gering Ausnahme: Phenol	gut im basischen Milieu	gut	ggf. pH-Wert-Einstellung
Schwermetalle	i.d.R. keine	variabel	variabel	ggf. pH-Wert-Einstellung
Primär an Oberflächen der Feinfraktion gebundene Kontaminanten	variabel	variabel	gut	—

Tabelle 2.1-1 Mobilisierbare Schadstoffe

Gute Erfahrungen mit Bodenwaschverfahren liegen für organische Schadstoffe wie Mineralöle (MKW), aliphatische Kohlenwasserstoffe und einkernige aromatische Verbindungen (BTX, BTXE, AKW) vor. Bei den leichtflüchtigen Aromaten kann wie bei den leichtflüchtigen chlorierten bzw. halogenisierten Kohlenwasserstoffen (CKW, LHKW) die Einhaltung von Immissionschutzvorgaben Probleme mit sich bringen. Ansonsten ist die Anwendbarkeit wegen der guten Schadstoffmobilisierbarkeit gegeben.

Schwerflüchtige chlorierte und polyzyklische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Phenole lassen sich ebenfalls aus nichtbindigen Böden entfernen. Wichtig ist jedoch, in welcher Form die Kontamination im Boden vorliegt. Dispergiert oder gelöst im Bodenwasser und in Phase im Porenraum sind diese Stoffe gut entfernbar. Von der Oberfläche von Bodenteilchen sind sie aber nur durch hohen Eintrag von mechanischer Energie oder durch Zugabe von Chemikalien (oberflächenaktive Agenzien) zu lösen.

Die Anwendbarkeit von Bodenwaschverfahren für Schwermetalle (SM) ist schwerer zu bewerten. Hier ist die Bindungsart wesentlich. Wenn es sich um gutlösliche Metallsalze oder primär an Feinkornanteile (Tonminerale) gebundene Schadstoffe handelt, ist die Anwendung aussichtsreich. Für schwerlösliche Bindungen sind extraktive Verfahren mit Prozeßwasser-konditionierung (EDTA-Zugabe, Ansäuerung) in der Diskussion.

2.2 Bodenmechanische und bodenkundliche Grundlagen

2.2.1 Erläuterungen zum Begriff Boden

Die Bodenwäsche zielt nicht auf den Boden im Sinne der Bodenkunde (Pedologie) ab, sondern faßt ihn weiter im Sinne der einschlägigen Ingenieurwissenschaften, das heißt nach bodenmechanischen Gesichtspunkten.

In der Bodenkunde versteht man unter Boden den belebten oberen Teil der Verwitterungszone, dessen Entwicklung durch Ausgangssubstrat (Lithosphäre), Wasser (Hydrosphäre), Luft (Atmosphäre) sowie Tiere und Pflanzen (Biosphäre) bestimmt wird.

Die Ingenieurwissenschaften dagegen verstehen unter Boden ganz allgemein alle Lockergesteine, also unverfestigte Sedimente.

2.2.2 Lockergesteinsarten und ihre Verbreitung

Nach ihrer Entstehung sind in Deutschland die am weitesten verbreiteten **Lockersedimente**:

- äolische Sedimente (Löß und Flugsande),
- die Talschotter (Terrassenkiese) und Hochwassersedimente (Auenlehm) der Flußtäler,
- die kaltzeitlichen, durch Frostsprengung und Bodenfließen entstandenen Solifluktsdecken über dem Festgestein.

Hieraus wird deutlich, daß vor allem während der Kaltzeiten sehr viel Lockermaterial bereitgestellt worden ist. Die Ursache ist vor allem die hohe mechanische Verwitterungsleistung durch häufige Frostwechsel, Auftau- und Gefriervorgänge im tageszeitlichen Wechsel. Während der Eiszeiten muß man sich das Gebiet der Bundesrepublik als eine vegetationsarme Tundrenlandschaft zwischen den gewaltigen Eismassen des nordischen Inlandeises und der alpinen Vergletscherung vorstellen. Wind und Wasser (Schneesmelze) konnten ungehindert große Mengen des zerkleinerten Materials aufnehmen und transportieren.

Neben den quartären Sedimenten stellen die Kiese, Sande und Tone der tertiären Vorlandmassen (wenig verfestigter Abtragungsschutt aus den Alpen) große Lockergesteinsbereiche im

Alpenvorland dar. Gleiches gilt für die tertiären Ablagerungen im Oberrheingraben und der Hessischen Senke.

Von den geogenen Böden sind anthropogenen Auffüllungen und aufgefüllte Böden zu unterscheiden.

Auf die Festgesteine wird in diesem Handbuch nicht eingegangen, da die Bodenwäsche auf die Reinigung von Lockergesteinen ausgerichtet ist.

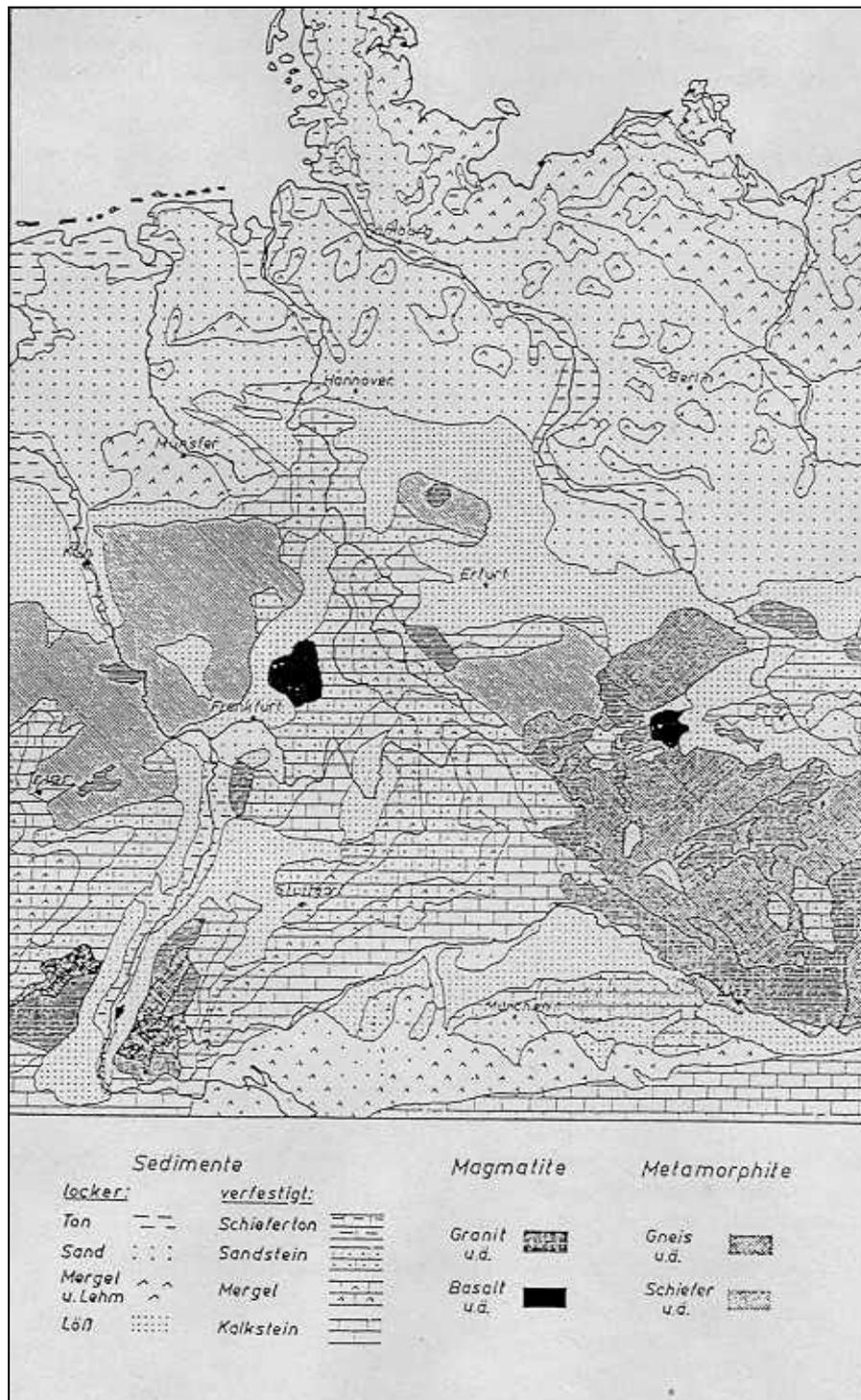


Abb. 2.2-1 Verbreitung von Locker- und Festgesteinen in Mitteleuropa (nach E. SCHLICHTING)

2.2.2.1 Löß

Löß ist ein kalkhaltiges, gelbliches Lockersediment mit einem Schluffanteil von 70 bis 80 %, 10 bis 15 % Feinsand und einem Tongehalt zwischen 10 und 25 %. Der Kalkgehalt der mitteleuropäischen Lössen liegt bei ca. 10 %, die Voralpenlössen enthalten bis zu 35 % Kalk.

Der Löß wurde vom Wind aus den vom Eis freigegebenen Moränen- und Sanderflächen sowie den breiten Schotterflächen der Flüsse und Urstromtäler ausgeweht und vor allem am Nordrand der Mittelgebirge (Börden) und in den großen Flußtäälern abgelagert. Die Mächtigkeit der Lößdecken reicht von wenigen Dezimetern bis zu 30 Metern im Oberrheingebiet. Auch in den Mittelgebirgen hat sich eine unterschiedlich dicke Lößschicht vor allem auf den windabgewandten Osthängen gebildet.

Unter den humiden Bedingungen (Niederschlagsüberschuß) der derzeitigen Warmzeit wurden die Carbonate aus den oberen Horizonten vollständig ausgewaschen und so entstand gelbbrauner **Lößlehm**.

In einigen inselartigen Gebieten Nord- und Süddeutschlands ist eine grobkörnigere Variante des Lösses vorhanden, der **Sandlöß** oder auch **Flottsand**.

Aufgrund der hohen Fein- und Feinstkornanteile ist Löß i. d. R. für die gängigen Bodenwaschanlagen nicht geeignet.

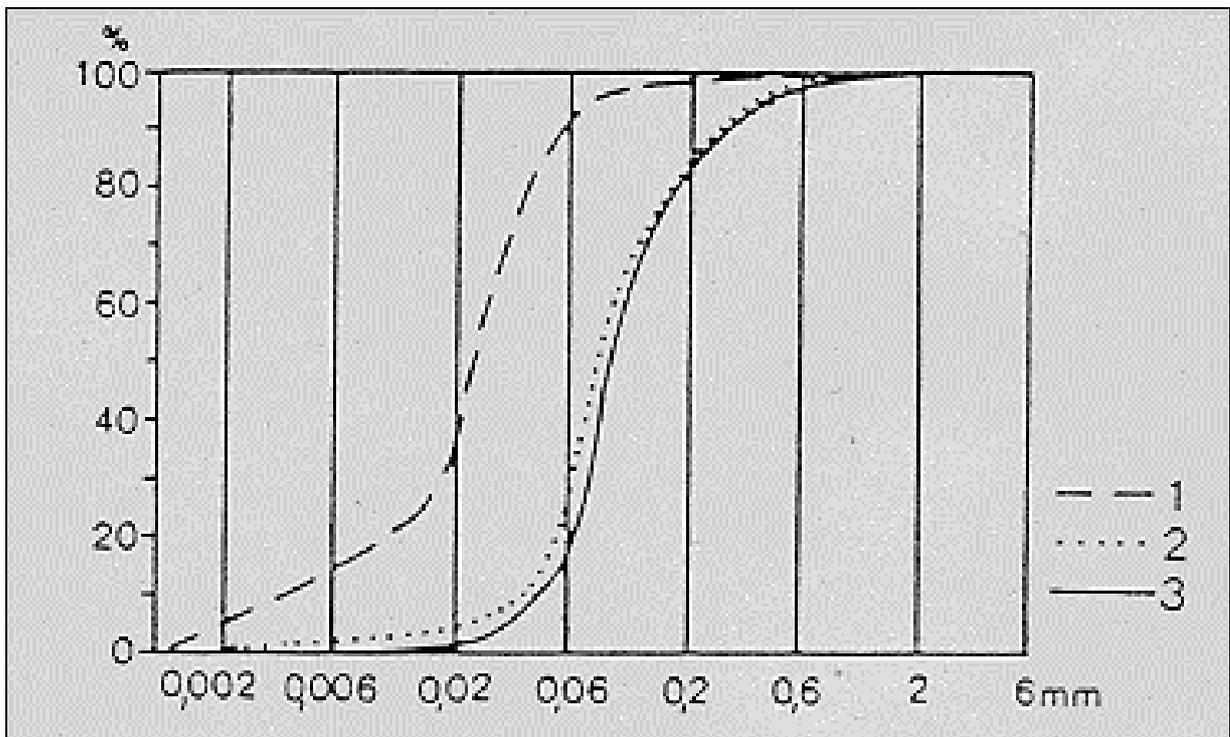


Abb. 2.2-2 Summenkurve von Lößkorngrößen (nach MÜLLER 1962)

- 1 mitteleuropäischer kaltzeitlicher Löß
 2,3 rezente isländische Lössen

2.2.2.2 Flugsande und Dünen

Im Norddeutschen Tiefland sind **Flugsanddecken und Dünen** weit verbreitet. Sie kommen aber auch in den weiten Flußniederungen Mittel- und Süddeutschlands vor. Häufig liegen die Dünen östlich von Deflationswannen (Ausblasungsmulden), so daß westliche Winde als Ursache zu vermuten sind.

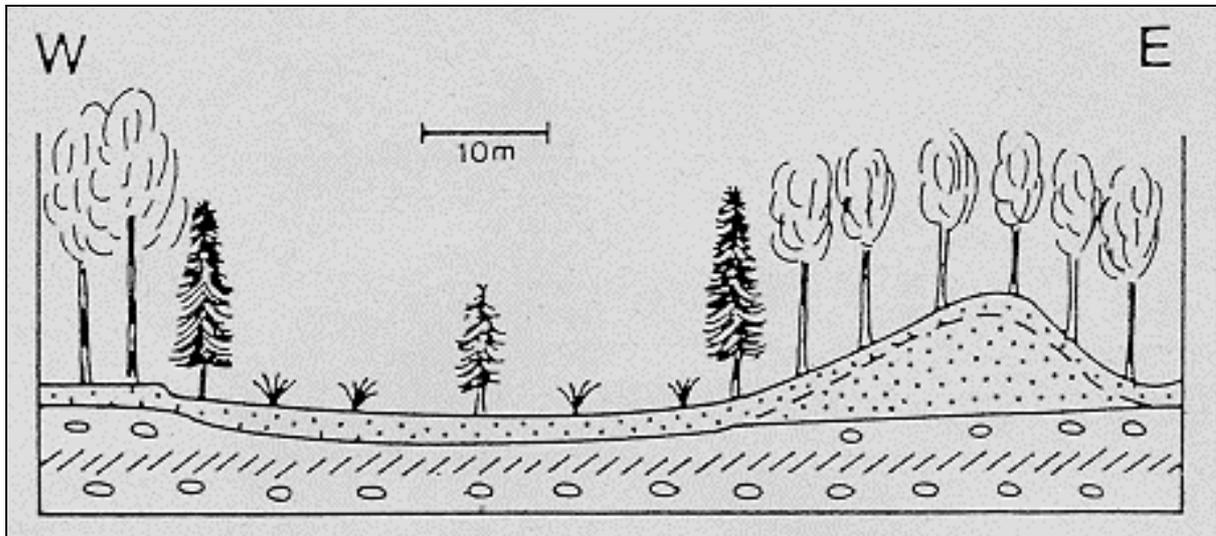


Abb. 2.2-3 Deflationswanne und Düne am Frankfurter Flughafen über kaltzeitlichen Flußschottern mit einer Tonlage (nach SEMMEL 1985)

Das Korngrößenmaximum der Flugsande liegt zwischen 0,1 und 0,2 mm. Die Verbreitung der Dünen ist auf einen wenige Kilometer breiten Streifen beiderseits der Flüsse beschränkt. Die geringe Entfernung von den Liefergebieten resultiert aus der mit der Korngröße stark abnehmenden Transportleistung des Windes.

In Norddeutschland kam es bis ins letzte Jahrhundert hinein zu einer neuerlichen Dünenbildung, als die ausgedehnten Heideflächen durch Überweidung und Plaggengewinnung ihre schützende Vegetationsdecke verloren.

Flugsande sind von der Korngrößenverteilung her für die meisten gängigen Bodenwaschverfahren zugänglich.

2.2.2.3 Fließerden und Solifluktionsschutt

Fließerden sind Lockersedimente, die ab Hangneigungen von ca. 2° im sommerlichen Auftauzustand und wassergesättigt, über dem noch gefrorenen Untergrund in Bewegung gerieten. In den Hanglagen der Mittelgebirge bilden sie eine geschlossene, mehrere Meter dicke Decke über den verschiedensten Ausgangsgesteinen. Körnung und Mineralbestand dieser Decken werden von den liegenden Gesteinen bestimmt. Fließerden mit überwiegend grobem Material werden als Solifluktions- oder Hangschutt bezeichnet.

Für Bodenwaschverfahren sind Fließerden und Solifluktionsschutt nicht geeignet.

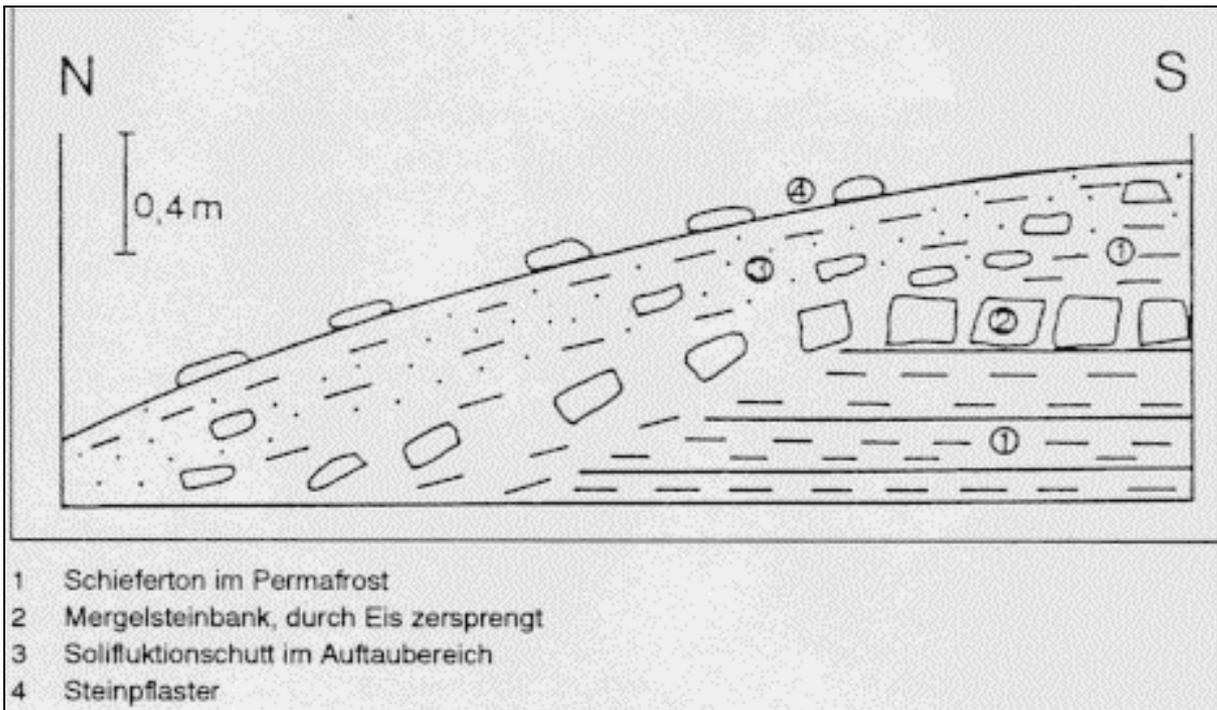


Abb. 2.2-4 Dauerfrostboden und Solifluktionsschutt (nach SEMMEL 1985)

- 1 Schiefer-ton im Permafrost
- 2 Mergelsteinbank, durch Eis zersprengt
- 3 Solifluktionsschutt im Auftaubereich
- 4 Steinpflaster

2.2.2.4 Talschotter und Terrassen

Für die hauptsächlich in den Kaltzeiten geprägten **Täler** Mitteleuropas sind breite, ebene Talböden typisch (Sohlentäler). Diese Talböden werden von einem in den Eiszeiten abgelagerten Schotterkörper gebildet. Das Ausgangsmaterial für diese Sedimente war der Solifluktionsschutt, der in den Auftauphasen hangabwärts in Bewegung geriet. Während der kurzen Schneeschmelze nahmen die hochwasserführenden Flüsse das Material auf. Es erfolgte hierbei eine Sortierung, bei der insbesondere die Fein- und Feinstkornanteile ausgetragen wurden und somit überwiegend die Grobfraktionen übrigblieben. In den Warmzeiten zwischen den mindestens vier nachgewiesenen Kaltzeiten konnten sich die Flüsse wieder eintiefen. Wegen der auch heute noch anhaltenden tektonischen Hebung in Mitteleuropa setzte sich diese Eintiefung bis unter die Basis der kaltzeitlichen Schotter fort. Deshalb liegen die von der Abtragung nicht erfaßten Schotterkörper der älteren Vereisungen weit oberhalb der heutigen Talböden. Oft treten sie als deutliche Hangverflachungen (**Terrassen**) in Erscheinung.

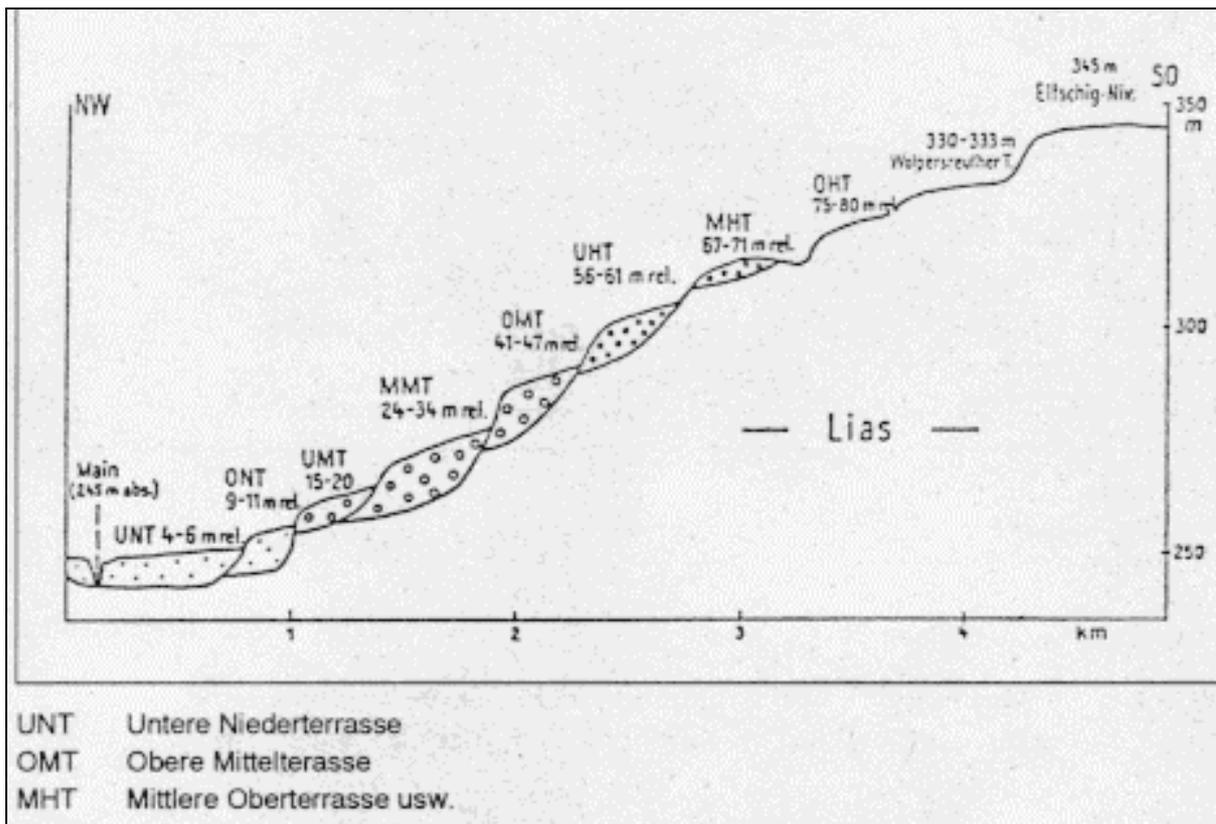


Abb. 2.2-5 Profil durch das obere Maintal mit seinem Terrassensystem (nach KÖRBER 1962)

UNT Untere Niederterrasse
 OMT Obere Mittelterrasse
 MHT Mittlere Oberterrasse usw.

Wegen ihrer breiten Verebnungen wurden und werden Täler als bevorzugte Siedlungsstandorte genutzt und dienen als Leitlinien der Besiedlungs- und Verkehrsinfrastruktur. Deshalb sind hier auch die meisten Umweltbeeinträchtigungen zu erwarten.

Bedenkt man, daß die Talschotter auch als ergiebiger Grundwasserleiter für Industrie und Bevölkerung genutzt werden, so ergibt sich hier ein erheblicher Nutzungskonflikt. Dieser Konflikt wird dann besonders schwerwiegend, wenn ehemalige Kiesabbauflächen durch Verfüllung mit Abfällen diese Nutzung gefährden.

Die Talschotter und Terrassen zeigen i. d. R. ausgesprochen sandige bis kiesige Korngrößenverteilungen; nur selten treten Fein- und Feinstkornanteile als Einlagerungen auf. Talschotter und Terrassen sind daher der Bodenwäsche zugänglich.

2.2.2.5 Auenlehm

Auenlehm ist ein Hochwassersediment, das während der derzeitigen Warmzeit in den Flußtälern abgelagert wurde. Zum Teil handelt es sich um Löß, der am Ende der Eiszeit von den vegetationsarmen Hängen abgespült wurde, überwiegend jedoch um erodiertes Bodenmaterial, das mit der jungsteinzeitlichen Rodung der mitteleuropäischen Wälder infolge der Einführung des Ackerbaues abgespült wurde.

Der Auenlehm liegt als geschlossene Decke über den Terrassenschottern der letzten Kaltzeit, allerdings nur im Hochwasserflußbett, das die Flüsse im Holozän (heutige Warmzeit) in ihre kaltzeitlichen Schottermassen gegraben haben.

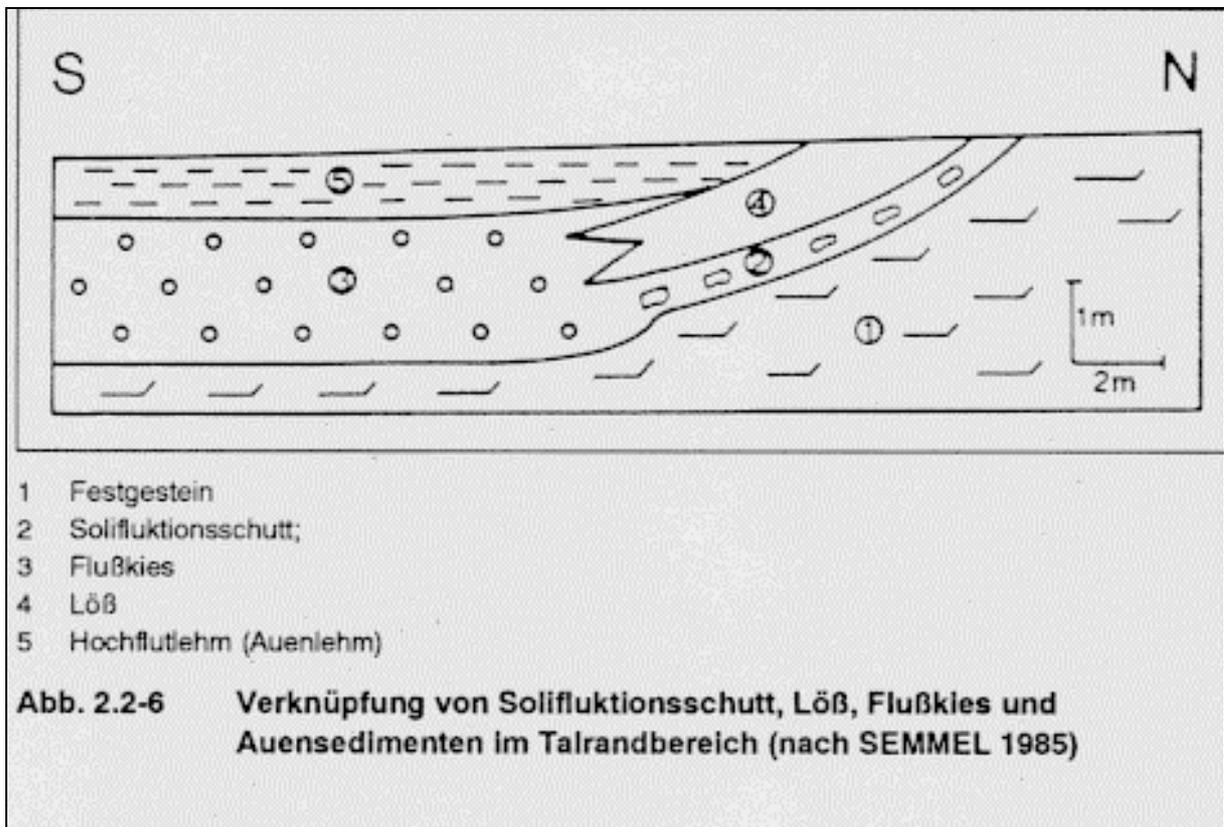


Abb. 2.2-6 Verknüpfung von Solifluktionsschutt, Löß, Flußkies und Auensedimenten im Talrandbereich (nach SEMMEL 1985)

- 1 Festgestein
- 2 Solifluktionsschutt;
- 3 Flußkies
- 4 Löß
- 5 Hochflutlehm (Auenlehm)

Der Auenlehm als Sediment mit hohem Feinkornanteil ist für Bodenwäsche i. d. R. ungeeignet. In der Praxis werden häufig sowohl kontaminierte Terrassen (Sand, Kies) als auch Auenlehm angetroffen. Hier ist häufig eine unterschiedliche Behandlung dieser Bodenarten erforderlich und bei einer Sanierungskonzeption zu berücksichtigen.

2.2.2.6 Moränen und Sanderflächen

Im Alpenvorland und im Norddeutschen Tiefland sind weite Bereiche mit Lockergesteinen bedeckt, die unmittelbar durch die Gletscher transportiert oder aufbereitet wurden. Die Grundmoränen bestehen überwiegend aus kalk- und tonreichen Geschiebemergeln. Endmoränen bestanden ursprünglich aus dem gleichen Material wie die Grundmoränen. Wegen ihres bewegten Reliefs sind im Laufe der Zeit aber die Feinbestandteile ausgewaschen worden, so daß sie sich aus dem verbliebenen grobkörnigeren Material aufbauen.

Moränen und Sanderflächen sind zum Teil für die Bodenwäsche geeignet.

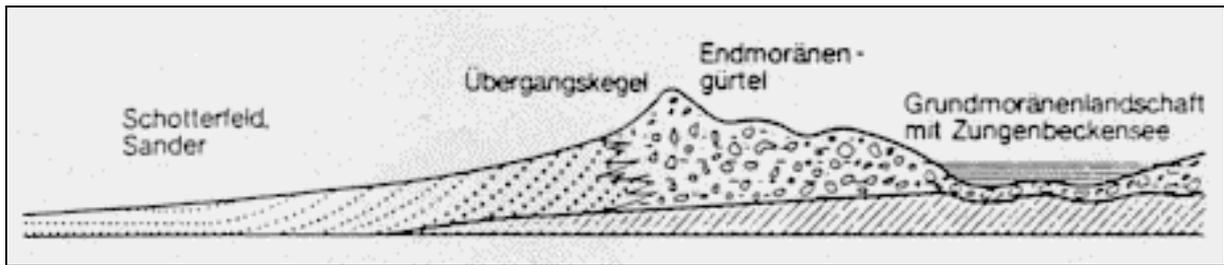


Abb. 2.2-7 Glaziale Serie (nach PENCK und BRÜCKNER 1906)

2.2.2.7 Molasse

Unter **Molasse** (lat. molis: weich) wird der unverfestigte Abtragungsschutt im Vorland von Gebirgen verstanden. In Süddeutschland reichen diese Ablagerungen vom Nordrand der Alpen bis zur Donau (Alpenvorland). Sie wurden in der zweiten Hälfte des Tertiärs aus den in Hebung begriffenen Alpen ins Vorland geschüttet.

Am Gebirgsrand besteht die Molasse aus locker verkitteten Konglomeraten (Nagelfluh). Mit zunehmender Entfernung dominieren jedoch mürbe Sandsteine und sandige Mergel. Ein erheblicher Anteil besteht aus fluviatilen Kieseln. Von der Korngrößenzusammensetzung ist ein Großteil der Molasse für Bodenwaschverfahren zugänglich.

In weiten Bereichen sind die Gesteine der Molasse von eiszeitlichen Sedimenten überdeckt; sie bilden jedoch den natürlichen Untergrund unter dem Lössschleier der donaanahen Hochgebiete (z. B. Holledau).

2.2.2.8 Auffüllungen

Auffüllungen haben den Zweck, die Tragfähigkeit des Untergrundes oder die Hochwassersicherheit von Baugrundstücken zu verbessern und dabei gleichzeitig ein Planum, z. B. für Industrie- und Gewerbeflächen, herzustellen. Auffüllungen können aus umgelagerten natürlichen Lockergesteinen wie Flußsedimenten, Steinbruchmaterial oder Lehm bestehen. Oft sind es Gemische mit weitem Korngrößenbereich, die für den Einsatz der Bodenwäsche gute Voraussetzungen bieten.

Daneben wurden für den gleichen Zweck auch anthropogene Abfallstoffe verschiedenster Herkunft verwendet wie Schlacken, Aschen, Bauschutt, Müll, Industrie- und Hafenschlämme. Auf diese Weise wurden in der Vergangenheit oft auch die Probleme der Abfallbeseitigung gelöst. Auffüllungen aus Abfallstoffen (Altablagerungen) zeichnen sich häufig durch eine besondere Heterogenität aus; ihre Eignung für die Bodenwäsche läßt sich daher nur im Einzelfall beurteilen.

2.2.3 Aufbau und Zusammensetzung von Böden

Auf die oben genannten Eigenschaften des Bodens und die Beeinflussung der Vorgänge beim Bodenwaschverfahren soll in den folgenden Abschnitten näher eingegangen werden. Böden stellen ein Gemisch aus einer festen, einer flüssigen und einer gasförmigen Komponente dar. Die feste Komponente besteht fast vollständig aus mineralischen Einzelkörnern unterschied-

lichster Größe. Die zwischen den Körnern verbleibenden Hohlräume sind entweder von Flüssigkeit (Bodenwasser, Sickerwasser) oder Gas (Bodenluft) erfüllt. Die Schadstoffe sind an die Kornoberflächen, an das Bodenwasser bzw. Sickerwasser und an das Bodengas gebunden.

2.2.3.1 Bodenteilchen

Bodenteilchen bilden die feste Bodenkomponente. Sie liegen in unterschiedlichen Formen vor. Am häufigsten sind Körner und Plättchen.

Körner sind etwa zwischen 0,002 mm und 60 mm groß. Sie bestehen überwiegend aus Quarz, Feldspat oder Calcit. Für bodenmechanische Zwecke genügt meistens eine Klassifikation nach der Größe. Die mechanischen Bodeneigenschaften werden allerdings auch durch die Form und die Mineralart der Körner beeinflusst.

Plättchen werden durch Tonminerale gebildet und entstehen überwiegend bei der Verwitterung (mechanischen und chemischen Zerkleinerung von Fels) aus überwiegend Feldspäten und verwandten Mineralien. Diese Plättchen werden im Boden nicht weiter zerkleinert. Sie bilden im Regelfall die feste Komponente des Tons oder des Tonanteils im Boden. Tonminerale werden, abhängig von der Schichtstruktur, unterschieden. Am häufigsten sind Kaolinit, Illit und Montmorillonit. Auf die Bedeutung der Tonminerale hinsichtlich geochemischer Effekte wird in Kapitel 2.3 eingegangen. In Ausnahmefällen wird die Tonfraktion durch andere Mineralien gebildet und verhält sich physikalisch und chemisch anders als die Tonminerale (z. B. feinste Quarzkörner).

Wichtig für die Betrachtungen hier sind noch die organischen Beimengungen des Bodens, also z. B. Torf, mehr oder weniger zersetzte Pflanzenreste oder amorphe Humussäure. Organische Teilchen binden ähnlich wie Tonplättchen relativ viel Wasser, was sich auf die mechanischen Eigenschaften der Böden auswirkt.

Die in der Hydrogeologie und im Bauwesen gebräuchliche Einteilung der Lockergesteine (Böden) beruht auf der Korngröße ihrer mineralischen Einzelkomponenten. Die organischen und mineralischen Bestandteile werden in der Korngrößenklassifikation nicht berücksichtigt.

2.2.3.2 Porensystem

Unter **Porensystem** werden das Porenvolumen, die Porengrößenverteilung, Porenform und Kontinuität der Poren verstanden.

Das **Porenvolumen** des Bodens hängt ab von der Lagerungsdichte. Unter Porenvolumen wird der Raum, der mit Luft bzw. Gas und Wasser ausgefüllt ist, verstanden. Es wird kapillares und überkapillares Porenvolumen (Groporen) unterschieden. Bei Wassersättigung wird das kapillare Porenvolumen ganz mit Wasser ausgefüllt, während das überkapillare Porenvolumen von Luft erfüllt bleibt. Aus dem Porenvolumen kann man aber noch nicht die Durchlässigkeit des Bodens für Luft und Wasser ableiten, da auch die Porengestalt, die Porengrößenverteilung und die Porenkontinuität auf die Durchlässigkeit Einfluß nehmen.

Die Porengrößen (Porendurchmesser) werden meist in 4 Porengrößenbereiche eingeteilt, die im Boden mit wechselnden Anteilen vorliegen können (Porengrößenverteilung). Zwischen

Porengröße und Wasserspannung des Bodens (Kapillarität) besteht strenge Abhängigkeit, so daß über die Wasserspannung die vorhandenen Porengrößenbereiche festgestellt werden können.

Bodenkontaminationen, die in einer Kontamination des Porenhalts (Gas, Wasser, Schadstoffphasen) begründet sind, sind für Bodenwaschverfahren prinzipiell gut zugänglich. So werden häufig Kohlenwasserstoffe im Porenraum des Bodens gebunden. Bereits die Zerstörung der Bodenstruktur kann einen erheblichen Anteil der Schadstoffe aus den Porenräumen freisetzen.

Tabelle 2.2-1 Einteilung der Porengrößen nach Porendurchmesser und der Wasserspannung (cm Wassersäule bzw. pF-Wert)

Porengrößenbereiche	Porendurchmesser (µm)	Wassersäule (cm)	pF
Grobporen, weite	> 50	1 bis 60	0 bis 1,8
Grobporen, enge	50 bis 10	60 bis 300	1,8 bis 2,5
Mittelporen	10 bis 0,2	300 bis 15 000	2,5 bis 4,2
Feinporen	< 0,2	> 15 000	> 4,2

2.2.3.3 Bodenwasser

Das **Bodenwasser** wird je nach Verhalten und Aufenthaltsort im Boden verschiedenen Begriffen zugeordnet (Abb. 2.2-8):

Grundwasser ist das auf einer dichten Schicht (Grundwassersohle) aufgestaute, alle Poren füllende Wasser ohne Saugspannung.

Das **kapillare Grundwasser** ist das über dem Grundwasserspiegel vorhandene durch Kapillarkräfte gegen die Erdanziehungskraft gehaltene Wasser. Der Bereich, in dem sämtliche Poren ganz mit Kapillarwasser ausgefüllt sind, wird als **geschlossener Kapillarraum**, der mit nur teilweiser Porenfüllung als **offener Kapillarraum** bezeichnet.

Unter **Sickerwasser** wird das im Boden versickernde, also der Schwerkraft folgende Wasser, soweit es nicht als Grundwasser zu bezeichnen ist, verstanden.

Haftwasser ist das vom Boden gegen die Schwerkraft festgehaltene, im Boden haftende Wasser: Kapillarwasser wird in den Kapillaren festgehalten, und Adsorptionswasser ist als Wasserhülle an die Oberflächen der Bodenteilchen gebunden.

An das Bodenwasser gebundene Schadstoffe lassen sich bei der Bodenwäsche leicht entfernen. Hinsichtlich der Schadstoffbindung kann das Bodenwasser bzw. die Bodenfeuchte ebenfalls wichtige Hinweise liefern. So ist für die Schadstoffverteilung/-ausbreitung das Bodenwasser bzw. die Bodenfeuchte für die Benetzbarkeit mit hydrophoben oder hydrophilen

Schadstoffphasen entscheidend. Bei entsprechendem Bodenwasseraufkommen kann eine natürliche Auswaschung von Schadstoffen aus Böden stattfinden; eine hohe Beladung des Bodenwassers mit den entsprechenden Schadstoffen kann daher als Maß für die gute Mobilisierbarkeit im wässrigen Milieu gewertet werden.

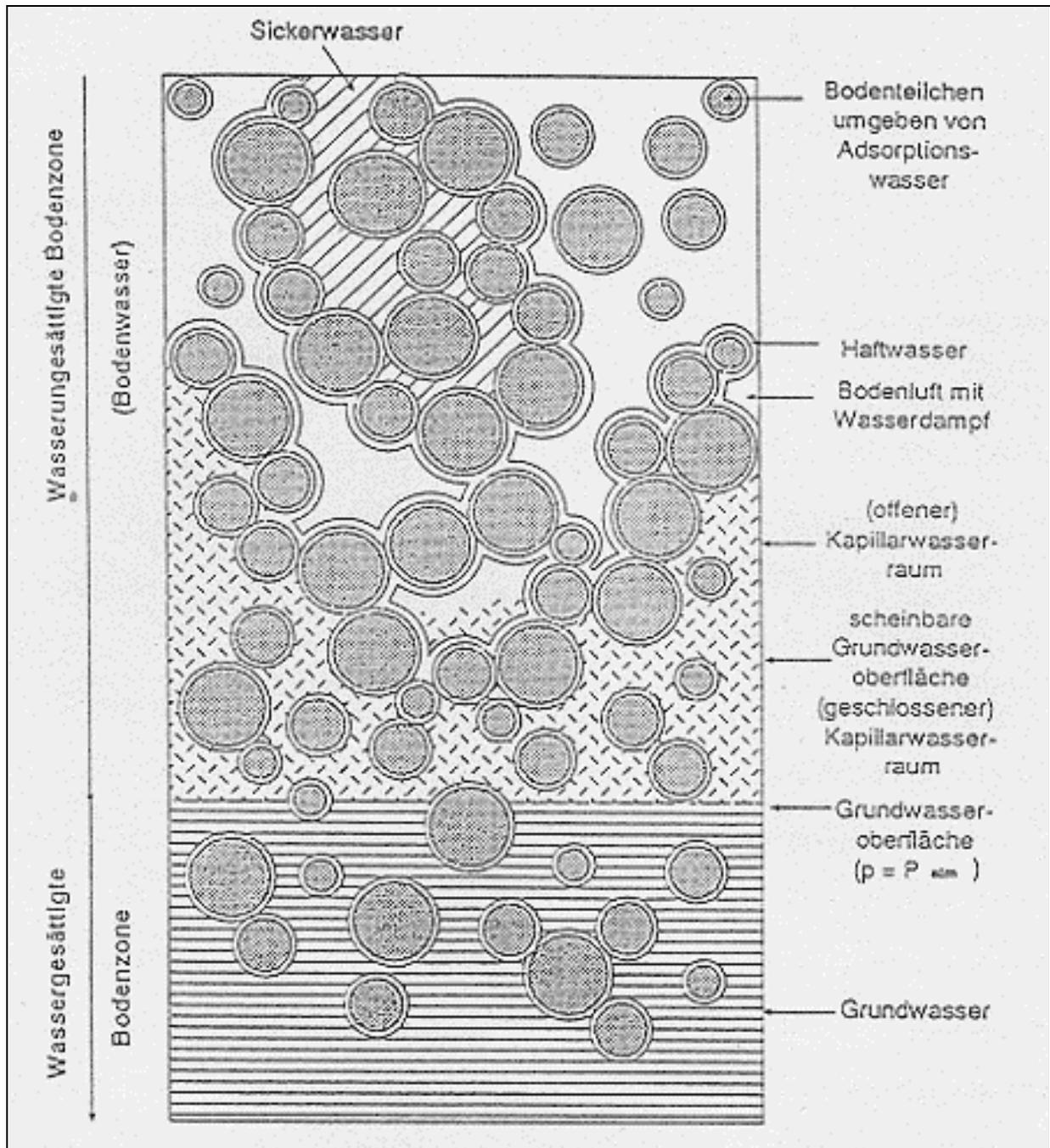


Abb. 2.2-8 Erscheinungsformen des Unterirdischen Wassers (nach HÖLTING 1984)

Tabelle 2.2-2 Kapillare Steighöhe von Wasser in Lockergesteinen (nach HABETHA 1969)

Bodenart	Korndurchmesser (mm)	Kapillare Steighöhe (mm)
Kies	> 2	< 20
Kies grob	2,0 - 0,6	50 - 150
Sand mittel	0,6 - 0,2	100 - 300
Sand fein	0,2 - 0,06	150 - 1 000
Schluff	0,06 - 0,002	1 000 - 10 000
Ton	< 0,002	> 10 000

2.2.3.4 Bodenluft

Der jeweilige **Luftgehalt** des Bodens entspricht seinem Porenvolumen abzüglich des Wassergehaltes. Unter **Luftkapazität** wird das überkapillare Porenvolumen (Groporen) verstanden, das auch bei wässergesättigtem Boden mit Luft erfüllt bleibt.

Häufig ist eine Bodenkontamination durch eine Kontamination der Bodenluft begründet. Im Zuge der Bodenwäsche wird die Bodenluft freigesetzt, so daß Sekundärtechniken (Abluftreinigung) zum Emissionsschutz erforderlich werden. Liegen ausschließlich Bodenluftkontaminationen vor, ist die In-situ-Bodenluftsanierung trotz geringerer Reinigungswirkungsgrade der Bodenwäsche vorzuziehen.

2.2.3.5 Bodenstruktur

Unter **Bodenstruktur** wird die räumliche Anordnung der Teilchen in einem Bodenkörper verstanden. Von einem **Korngerüst** wird gesprochen, wenn sich die Körner in einer Bodenprobe gegenseitig stützen. Die Einzelkörner berühren sich nur an wenigen Punkten; der Hohlraum ist zusammenhängend. Eine vorgegebene Menge von Körner kann verschieden dicht gelagert sein; damit ist der Porenanteil ein wichtiges Maß für Struktur und Lagerungsdichte.

Bei gleichförmigen Substraten ist der Porenanteil relativ hoch, kommen verschiedene Korngrößen in einer Probe vor, so können die kleinen Kornfraktionen die Hohlräume zwischen den großen Körnern auffüllen und damit das Porenvolumen vermindern. Die Größe der verbleibenden Poren entspricht etwa derjenigen der kleinsten Körner, was sich auf die Durchlässigkeit auswirkt. Wenn mehr kleine Körner vorhanden sind, als in den Zwischenräumen zwischen den großen Platz finden können, bilden die großen Körner unter sich kein Korngerüst mehr aus. Maßgebend für das mechanische Verhalten sind dann die kleineren Körner.

Tone haben wegen der Form (Plättchen) und wegen der relativ zu ihrer Größe dicken Wasserhüllen eine Struktur, die nicht als Korngerüst bezeichnet werden kann.

Die Bodenstruktur des gewachsenen Bodens ist häufig entscheidend für die jeweilige Schadstoffbindung. Insbesondere Schadstoffphasen können bei einer dichten Lagerung überwiegend in den Porenräumen gebunden sein. Im Zuge der Bodenwäsche kann eine Freisetzung dieser Schadstoffe bereits bei der Zerstörung der Bodenstruktur erfolgen. Unabhängig davon ist anschließend die Ablösung der Schadstoffe von den Kornoberflächen zu realisieren.

2.2.4 Einteilung der Böden nach der Korngröße

Im Bauwesen und in der Bodenmechanik werden Lockergesteine allgemein als Böden (im weitesten Sinne) bezeichnet und entsprechend ihrer **Korngrößenbereiche**, plastischen Eigenschaften und organischen Bestandteilen in Bodengruppen (nach DIN 18196) und Bodenarten eingeteilt.

Im vorliegenden Handbuch werden - sofern nicht anders erwähnt - die bodenmechanischen Bezeichnungen verwendet. Die entsprechenden Bezeichnungen gleichen vielfach Bezeichnungen aus der Verfahrenstechnik bzw. Aufbereitungstechnik, wenngleich die Klassifizierungen unterschiedlich sind.

Die Klassifikation erfolgt nach DIN 4022 Teil 1, die sich dem internationalen Körnungssystem anschließt.

Tabelle 2.2-3 Einteilung der Lockergesteine nach DIN 4022

Korndurchmesser (mm)		Benennung	Symbol
>	63	Steine	X
63	- 20	Kies grob	gG
20	- 6,3	Kies mittel	mG
6,3	- 2	Kies fein	fG
2	- 0,6	Sand grob	gS
0,6	- 0,2	Sand mittel	mS
0,2	- 0,06	Sand fein	fS
0,06	- 0,02	Schluff grob	gU
0,02	- 0,006	Schluff mittel	mU
0,006	- 0,002	Schluff fein	fU
<	0,002	Ton	T

Unter **Korngrößenverteilung** werden die relativen Massenanteile verschiedener Kornfraktionen im Boden verstanden. Die Korngrößen oberhalb der Schlufffraktion mit Korngrößen >

2.2.4.1 Bodenklassifikation nach DIN 18196

Die Grundlage der **Bodenklassifikation** für bautechnische Zwecke nach dieser Norm ist die stoffliche Zusammensetzung. Berücksichtigt werden:

- Korngrößenbereiche und -verteilung
- organische Bestandteile
- plastische Eigenschaften

Die Bodenarten werden mit Kürzeln aus 2 Großbuchstaben bezeichnet: der erste bezeichnet die Hauptbodenart, z. B. S = Sand, der zweite die Nebenbodenart oder eine Eigenschaft, z. B. U = Schluff oder schluffig oder W = weitgestuft.

In der nachfolgend abgebildeten Tabelle aus DIN 18196 werden Beispiele für die einzelnen Bodengruppen beschrieben und in Spalte 7 typische geologische und anthropogene Lockergesteine genannt. In Hinblick auf die Bodenwäsche sind vor allem die grob- und gemischtkörnigen Böden von Interesse und natürlich die Auffüllungen, die auf Industriearealen häufig anzutreffen sind.

Die Benennung der **grobkörnigen Böden** erfolgt nach den Gewichtsanteilen. Der erste Buchstabe in den Kürzeln bezeichnet die Hauptbodenart, der zweite die Nebenbestandteile, die bis zu 40 % ausmachen können. Der Feinkornanteil (Ton und Schluff) ist auf 5 % begrenzt. Beispiel: GS = Kies, sandig kann im Extremfall aus höchstens 55 % Kies, höchstens 40 % Sand und maximal 5 % Feinkorn bestehen.

Gemischtkörnige Böden sind grobkörnige Böden mit einem erhöhten Feinkornanteil. Die Unterteilung erfolgt in % Trockenmasse:

- 5 - 15 % Schluff und Ton = schluffig/tonig
- 15 - 40 % Schluff und Ton = stark schluffig/tonig

Feinkörnige Böden wie Löß, Lößlehm oder Auenlehm sind als Deckschichten über grobkörnigen Böden wie Flußschottern oder Hangschutt fast immer vorhanden. Sie enthalten mehr als 40 % Feinanteile und werden aufgrund ihrer plastischen Eigenschaften unterteilt.

Bei den Auffüllungen werden solche aus natürlichen oder aufgefüllten Böden unterschieden von Auffüllungen mit Fremdstoffen wie Bauschutt, Müll oder Schlacke.

Hauptgruppen	Korngrößenanteile in Gew.-%		Definition und Bezeichnung		Kurzeichen Gruppensymbol	Erkennungsmerkmale	Beispiele			
	IIA 0,06 mm	V 2 mm	Gruppen							
grobkörnige Böden	IIA 5	V 40	Kies	enggestufte Kiese	GE	steile Körnungslinie infolge Vorherrschens eines Korngrößenbereichs	Fluß- und Strandkies Terrassenschotter Moränenkies vulkanische Schlacke und Asche			
				weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW	über mehrere Korngrößenbereiche kontinuierlich verlaufende Körnungslinie				
				intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GI	treppenartig verlaufende Körnungslinie infolge Fehlens eines oder mehrerer Korngrößenbereiche				
	IIA 40	Sand	enggestufte Sande	SE	steile Körnungslinie infolge Vorherrschens eines Korngrößenbereichs	Dünen- und Flugsand Talsand (Berliner Sand) Beckensand Tertiärsand				
			weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SW	über mehrere Korngrößenbereiche kontinuierlich verlaufende Körnungslinie					
			intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SI	treppenartig verlaufende Körnungslinie infolge Fehlens eines oder mehrerer Korngrößenbereiche					
gemischtkörnige Böden	5 bis 40	V 40	Kies-Schluff-	5 bis 15 Gew.-%	IIA 0,06 mm	GU	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie; Feinkornanteil ist schluffig	Verwitterungskies, Hangschutt, lehmiger Kies, Geschiebelehm		
				15 bis 40 Gew.-%		GÜ				
			Kies-Ton-	5 bis 15 Gew.-%		GT			weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie; Feinkornanteil ist tonig	
				15 bis 40 Gew.-%		G \bar{T}				
		IIA 40	Gemische	Sand-Schluff-	5 bis 15 Gew.-%	IIA 0,06 mm	SU		weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie; Feinkornanteil ist schluffig	Flottsand
					15 bis 40 Gew.-%		SÜ			Auelehm Sandlöß
	Sand-Ton-			5 bis 15 Gew.-%	ST		weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie; Feinkornanteil ist tonig	lehmiger Sand, Schleichsand		
				15 bis 40 Gew.-%	S \bar{T}			Geschiebelehm Geschiebemergel		

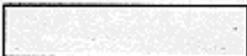
	geeignet zur Bodenwäsche
	bedingt geeignet zur Bodenwäsche
	wenig geeignet zur Bodenwäsche

Tabelle 2.2-4 Gruppeneinteilung der Lockergesteine nach DIN 18196

Hauptgruppen	Feinkornanteile $V \leq 0,06$ mm in Gew.-%	Definition und Bezeichnung			Erkennungsmerkmale			Beispiele	
		Gruppen	W_L in Gew.-%	Kurzzeichen Gruppensymbol	Trocken- festig- keit	Reaktion beim Schüttel- versuch	Plastizität beim Knet- versuch		
feinkörnige Böden	V 40	Schluff	leicht plastische Schluffe	≤ 35	UL	niedrige	schnelle	keine bis leichte ²⁾	Löß Hochflutlehm
			mittelpastische Schluffe	35 bis 50	UM	niedrige bis mittlere	langsame	leichte bis mittlere ²⁾	Seeton Beckenschluff
		Ton	leicht plastische Tone	≤ 35	TL	mittlere bis hohe	keine bis langsame	leichte ³⁾	Geschiebemergel, Bänderton
			mittelpastische Tone	35 bis 50	TM	hohe	keine	mittlere ³⁾	Lößlehm Beckenton Keupermergel
			ausgeprägt plastische Tone	> 50	TA	sehr hohe	keine	ausgeprägte ³⁾	Tarras, Septarienton Juraton
organogene ¹⁾ und Böden mit organischen Beimengungen	V 40	nicht brenn- und nicht schmelzbar	Schluffe m. organ. Beimeng. u. organogene ¹⁾ Schluffe	35 bis 50	OU	mittlere	langsame bis sehr schnelle	mittlere ⁴⁾	Seekreide Kieselgur Mutterboden
			Tone mit organ. Beimengungen u. organog. ¹⁾ Tone	> 50	OT	hohe	keine	ausgeprägte ⁴⁾	Schlick Klei
			gröb- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art		OH	Beimengungen pflanzl. Art, meist dunkle Färbung, Modergeruch, Glühverlust bis ≈ 20 Gew.-%			Mutterboden
			gröb- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen		OK	Beimengungen nicht pflanzlicher Art, meist helle Färbung, leichtes Gewicht, große Porosität			Kalksand Tuffsand
organische Böden		brenn- oder schmelzbar	nicht bis mäßig zersetzte Torfe		HN	an Ort und Stelle aufgewachsene (sedentäre)	Zersetzungsgrad 1–5, faserig, holzreich, hellbraun bis braun		Niedermoor-, Hochmoor-, Bruchwaldtorf
			zersetzte Torfe		HZ	Humusbildungen	Zersetzungsgrad 6 bis 10, schwarzbraun bis schwarz		
			Mudden (Sammelbegriff für Faulschlamm, Gytja, Dy, Sapropel)		F	unter Wasser abgesetzte (sedimentäre) Schlamme aus Pflanzenresten, Kot und Mikroorganismen, oft von Sand, Ton und Kalk durchsetzt; blauschwarz oder grünlich bis gelbbraun, gelegentl. dunkelgraubraun bis blauschwarz; federnd, weichschwammig			Mudde Faulschlamm
Auffüllung			Auffüll. aus nat. Böden; jeweil. Gruppensymb. in eck. Klamm.		()				
			Auffüllung aus Fremdstoffen		A				Müll, Schlacke, Bauschutt, Industrieabfall

- 1) unter Mitwirkung von Organismen gebildete Böden
- 2) $I_p \leq 4$ Gewichtsprozent oder unterhalb A-Linie Casagrande-Diagramm
- 3) $I_p \geq 7$ Gewichtsprozent und oberhalb A-Linie Casagrande-Diagramm
- 4) $I_p \geq 7$ Gewichtsprozent und unterhalb A-Linie Casagrande-Diagramm

Tabelle 2.2-4a Gruppeneinteilung der Lockergesteine nach DIN 18196 (Fortsetzung)

2.2.5 Die Eignung von Lockergesteinen für Bodenwaschverfahren

Ausprägung und Eigenschaften der Lockergesteine sowie der Böden im pedologischen Sinne haben Einfluß auf die technische Auslegung und Effektivität von Bodenwaschverfahren. Von Interesse sind dabei:

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung beschreibt die Zusammensetzung eines Bodens aus den verschiedenen Korngrößenklassen. Der graphischen Darstellung in Form einer Kornverteilungskurve kann sehr einfach der prozentuale Anteil der nicht behandelbaren Feinkornfraktion entnommen werden, bzw. umgekehrt eine Anforderung an das Trennvermögen der Bodenwaschanlage aufgestellt werden, um die zu entsorgenden Restmassen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

In der Regel wird derzeit ein Schluff- und Tonanteil von 30 % als wirtschaftliche Obergrenze für die Bodenwäsche angesehen (Kap. 3). Hieraus resultiert, daß insbesondere Talschotter und Terrassen sich meist gut für Bodenwaschverfahren eignen, während Löß und Auenlehm ungünstig hierfür sind.

pH - Wert des Bodens

Der Säurezustand (pH-Wert) des Bodens bestimmt auch die Löslichkeit der zu entfernenden Schadstoffe und den Übergang dieser Stoffe aus dem Boden in die Waschflüssigkeit. Durch Zugabe geeigneter chemischer Agenzien kann der pH - Wert ggf. gesteuert werden.

Gehalt des Bodens an organischen Stoffen

Die Huminstoffe bilden mit verschiedenen Schadstoffen Komplexverbindungen, die im Waschverfahren nicht aufgelöst werden können. Außerdem besitzen diese Stoffe eine hohe Kationenaustauschkapazität, die den pH - Wert stabilisiert und damit der Einstellung eines für den Waschprozeß günstigen pH - Wertes entgegensteht.

Bereits einige Gewichtsprozent von organischen Anteilen können sich deutlich nachteilig auswirken (Kap. 2.3). Grobe organische Anteile können aussortiert werden. Humusböden selbst sind i. d. R. ungeeignet für die Bodenwäsche.

Tonfraktion

Die Tonfraktion, der Bodenanteil mit der kleinsten Korngröße, besitzt die Eigenschaft des Ionenaustausches und damit die Möglichkeit, pH-Wert-Veränderungen entgegenzuwirken und die gelösten Schadstoffe elektrochemisch auf der Partikeloberfläche zu binden.

Hoher Anteil an Tonfraktion kann ein Ausschlußkriterium für Bodenwaschverfahren sein, da sich die Tone im Residuum wiederfinden. Geringe Anteile hingegen können ein Hinweis für gute Reinigungsergebnisse sein, da an diesen i. d. R. überproportional viele Schadstoffe gebunden sind.

2.3 Geochemische Grundlagen

2.3.1 Sorption und Austauschkapazität

Die **Ton- und Humusanteile** des Bodens sind in der Lage, auf ihren Oberflächen Moleküle, organische Stoffe und Ionen zu sorbieren (binden). Ihr Anteil ist ein wesentliches Maß für die Anwendbarkeit von Bodenwaschverfahren. Da sorptiv gebundene Schadstoffe praktisch kaum abzutrennen sind, bleiben Ton- und Humusanteile als belasteter Reststoff zurück. Zu hoher Reststoffanteil führt zur Unwirtschaftlichkeit der Bodenwäsche.

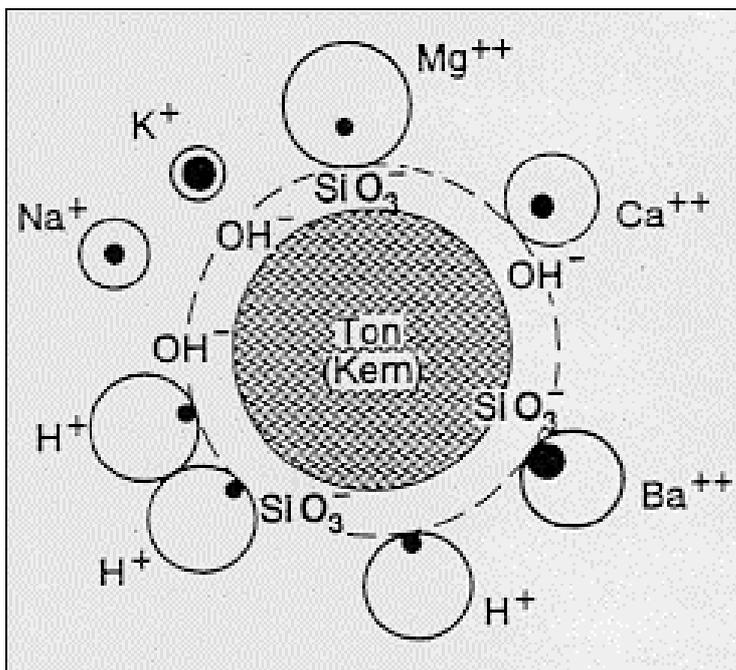


Abb. 2.3- 1 Tonteilchen mit Kationenbelag (schematisch nach PALLMANN 1938)

Vor allem aus der wäßrigen Bodenlösung werden Ionen angelagert. Bei der Anlagerung neuer Ionen werden entsprechende Mengen vorher sorbierter Ionen wieder in die Lösung abgegeben. Dieser Vorgang wird als Ionenaustausch bezeichnet. Vor allem Kationen wie Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Kalium (K^+), Natrium (Na^+) und Wasserstoff (H^+) sowie Ammoniak (NH_4^+) werden ausgetauscht.

Die Austauschkapazität kann die chemischen Vorgänge im wäßrigen Milieu wesentlich beeinflussen und ist bei einer Prozeßwasserkonditionierung ggf. zu berücksichtigen.

Die Summe aller austauschbaren Kationen wird Austauschkapazität genannt. Die Austauschkapazität ist abhängig von der Zusammensetzung der Tonfraktion und von der Größe der zur Reaktion zur Verfügung stehenden Grenzfläche. Die unterschiedlichen Tonminerale haben Austauschkapazitäten von 3 bis 150 mVal für 100 g Substanz (Definition: 1 mVal Säure oder Base ist so viel Substanz, wie 1 mg H^+ -Ionen abzugeben bzw. aufzunehmen imstande ist). Sind überwiegend Alkali- und Erdalkali-Ionen an den Oberflächen sorbiert, so wird von einer hohen Basensättigung gesprochen.

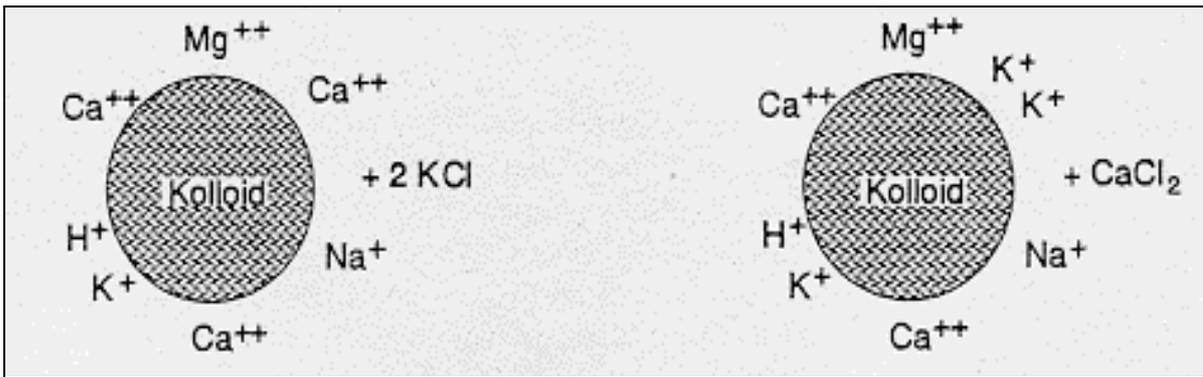
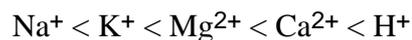


Abb. 2.3- 2 Der Ionenaustausch (schematisch nach ROEMER und SCHEFFER 1949)

Der Humus besitzt mit 350 bis 500 mVal je 100 g organische Trockensubstanz die höchste Austauschkapazität.

Der Ionenaustausch hängt ab von der Wertigkeit des Kations: Je höher die Wertigkeit des Kations, desto leichter erfolgt die Bindung an die Oberfläche des Kolloids (Tonmineral- oder Humuskolloid) und desto schwerer geht dieses Kation in die Lösung zurück. Für die am häufigsten im Boden vorkommenden Kationen gilt folgende Eintauschreihe:



Die Bindungsenergie, Lösungsgleichgewicht nimmt also in der Reihenfolge dieser Aufzählung zu.

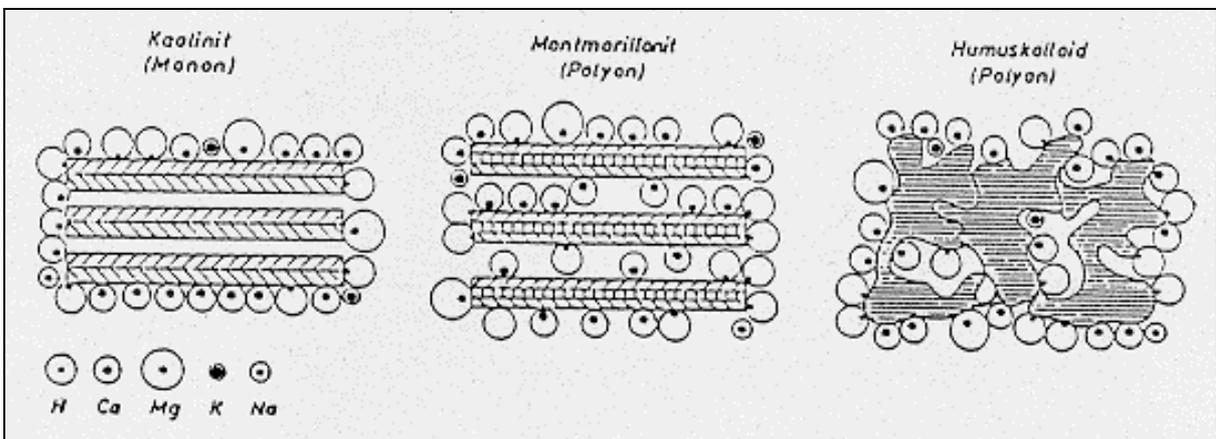


Abb. 2.3- 3 Die Sorptionsfähigkeit von Kolloiden in Abhängigkeit von ihrem Aufbau

Der Kationenaustausch hängt weiter vom Bau der Kolloide sowie vom Grad der bereits vorhandenen Kationenbelegung ab.

Neben den Kationen werden aber auch Anionen von den Kolloiden sorbiert, d. h. daß außer den vielen negativ geladenen Plätzen auch positive Ladungen an der Grenzfläche existieren müssen.

2.3.2 Bodenreaktion

Unter **Bodenreaktion** wird der Säuregrad des Bodens verstanden. Dieser hängt von der Menge der vorhandenen Hydronium H_3O^+ -Ionen ab. Die OH^- -Ionen können sich in der Bodenlösung befinden oder an den Oberflächen der Kolloide gebunden sein. Das Maß für den Säuregrad ist der negative dekadische Hydroniumionenexponent, der sog. **pH-Wert**. Neutral ist ein pH-Wert von 7, das bedeutet, daß H_3O^+ - und OH^- -Ionen in gleicher Konzentration, nämlich jeweils 10^{-7} mol/l, im Bodenwasser vorkommen. Verschiebt sich das Verhältnis zu Gunsten der H_3O^+ -Ionen, so wird die Bodenreaktion als sauer bezeichnet; der pH-Wert sinkt dann unter 7. Überwiegen die OH^- -Ionen, so nennt man die Lösung alkalisch. Der pH-Wert ist dann größer als 7. Für Bodenleben und Vegetation ist der pH-Bereich von 6 (schwach sauer) bis 8 (schwach alkalisch) ideal.

Tabelle 2.3-1 Einstufung der Böden nach dem pH-Wert

pH		Bezeichnung
<	3,0	extrem sauer
3,0	- 3,9	sehr stark sauer
4,0	- 4,9	stark sauer
5,0	- 5,9	mäßig sauer
6,0	- 6,9	schwach sauer
	7,0	neutral
7,1	- 8,0	schwach alkalisch
8,1	- 9,0	mäßig alkalisch
9,1	- 10,0	stark alkalisch
>	10,0	sehr stark alkalisch

Der pH-Wert ist eine entscheidende Einflußgröße bei der Kontaminantenmobilisierung. So werden Schwermetalle im sauren Milieu gut mobilisiert. Eine Freisetzung der Metalle im basischen Milieu erfolgt in Form von Hydroxiden oder Komplexen. Arsen als Halbmetall ist im basischen Milieu besser mobilisierbar als im sauren Milieu.

2.3.3 Pufferkapazität

Die **Pufferkapazität** ist die Fähigkeit eines Stoffes plötzliche Verschiebungen in der Reaktion, d. h. Zugaben von Säuren oder Basen auszugleichen oder abzupuffern. Schwache Säuren und Salze bilden ein sogenanntes Puffersystem. Im Boden bilden Carbonat-Bicarbonat-Kohlensäure das wichtigste Puffersystem. Wichtig sind auch die Kolloide und ihre Aus-

tauschkapazität. So werden bei einem Säureschub (Eintrag von H^+ -Ionen) von den Kolloidoberflächen so viele H^+ -Ionen sorbiert bis ein Gleichgewicht mit der Bodenlösung erreicht ist. Je höher die Austauschkapazität des Bodens ist, umso besser funktioniert dieser Ausgleich.

2.3.4 Redox-Reaktionen/Redox-Potential

Reduktions-Oxidationsreaktionen (Redoxreaktionen) der Elemente Fe, Mn, C, N und S sind an einer Vielzahl chemischer und biologischer Vorgänge im Boden beteiligt. Oxidation bedeutet dabei die Abgabe, Reduktion die Aufnahme von Elektronen. Die Oxidation eines Stoffes ist dabei stets mit der Reduktion eines anderen Stoffes gekoppelt.

Das Maß für das Verhältnis der Aktivität der oxidierten und reduzierten Stoffe in einem System ist das Redoxpotential E (in Volt). Es wird in einer Lösung mit verschiedene Oxidationsstufen eines Stoffes als elektrisches Potential (Spannung) zwischen einer elektronenübertragenden Edelmetallelektrode und einer Bezugs elektrode gemessen, weil Redoxpotentiale nur als Potentialdifferenzen meßbar sind.

2.4 Erkundungsumfang, Voruntersuchungen

Die Entscheidung für ein Sanierungsverfahren setzt genaue Kenntnisse voraus, sowohl über Art und Ausmaß der Bodenkontamination als auch über alle Bodenparameter, die auf das Sanierungsverfahren Einfluß haben.

In den nachfolgenden Abschnitten sind wichtige Fragestellungen in bezug auf die Erkundung eines kontaminierten Standortes aufgeführt, die zur Beurteilung einer Bodenwäsche als Sanierungsverfahren möglichst geklärt sein sollten.

2.4.1 Anforderungsprofil der Erkundung

Art der Kontamination

Die Frage nach der Art der Kontamination beinhaltet die Frage nach dem vorliegenden Schadstoff bzw. der Schadstoffpalette. Hierzu liefert die historische Erkundung häufig bereits wichtige Anhaltspunkte, z. B. wenn die Produktionsprozesse auf einem industriellen Altstandort recherchiert werden konnten.

Verdachtsmomente aus der historischen Erkundung sind durch die häufig stufenweise technische Erkundung zu überprüfen. Für die Aussagekraft der technischen Erkundung in bezug auf die Art der Kontamination ist das chemische Analysenprogramm entscheidend. Neben Bodenanalysen in Form von sogenannten Bruttoanalysen sind zur Beurteilung einer Bodenwäsche besonders auch Eluatanalysen wertvoll. Bei der Bruttoanalyse werden die Feststoffproben z. B. mit Hilfe von Säuren (Königswasseraufschluß) oder Lösungsmitteln aufgeschlossen bzw. extrahiert und der Gesamtschadstoffgehalt in der Originalsubstanz bestimmt. Bei der Eluatanalyse werden die Feststoffproben nach einem genormten Verfahren (DEV-S4) mit Wasser ausgelaugt (eluiert) und die Schadstoffkonzentration im Eluat ermittelt. Die Eluatanalyse bestimmt damit nur den mittels Wasser mobilisierbaren Schadstoffanteil.

Spielen auch leichtflüchtige Schadstoffe (z. B. LCKW) eine Rolle, sind neben Bodenanalysen auch Bodenluftanalysen sinnvoll. Die Ergebnisse von Bodenluftanalysen geben Hinweise auf eine mögliche Schadstofffreisetzung über die Gasphase während eines Erdaushubs und einer Bodenwäsche (Arbeits- und Emissionsschutz).

Ausmaß der Kontamination

Die Frage nach dem Ausmaß der Kontamination beinhaltet die Frage nach ihrer räumlichen Abgrenzung, woraus sich die zu behandelnden Massen ergeben.

Vorliegende Erkundungsergebnisse sind dahingehend zu prüfen, ob ein Kontaminationsbereich durch eine entsprechende Probennahme und Analytik seitlich und in die Tiefe abgegrenzt werden kann. Außerdem ist zu beurteilen, ob das Erkundungsraster ausreichend dicht gewählt wurde, so daß z. B. eine Separierung in einen Kontaminationsherd und einen geringer belasteten Randbereich möglich ist oder unbelastete Zwischenbereiche erkannt werden können.

Bodenmechanische Parameter

Eine wesentliche bodenmechanische Kenngröße für die Anwendbarkeit einer Bodenwäsche ist der Feinkornanteil des Bodens ($< 0,06$ mm), der sich aus der Korngrößenanalyse im Labor ergibt. Daneben ist bei Auffüllungen auch der Anteil an Fremdstoffen (z. B. Schlacken, Holz), die als Leichtstoffe aufschwimmen, wichtig.

Als weitere nützliche bodenmechanische Standardparameter sind der natürliche Wassergehalt des Bodens und sein Wasseraufnahmevermögen (nach NEFF) zu nennen.

Qualitativ zu beurteilen sind ggf. eine Verkittung der Bodenkörner und ihre Porosität; beides kann einen nachteiligen Einfluß auf die Reinigungsleistung einer Bodenwäsche haben.

Physikalisch-chemische Parameter

Die Kenntnis physikalisch-chemischer Parameter wie pH-Wert, Pufferkapazität oder Kationenaustauschkapazität eines Bodens ist für eine erste Beurteilung der Bodenwäsche nicht unbedingt erforderlich. Diese Parameter wirken sich automatisch bei den i. d. R. später noch durchzuführenden Waschversuchen aus und werden bei der Anpassung des Verfahrens auf den Einzelfall entsprechend berücksichtigt.

Geologisch-hydrogeologische Standortsituation

Die geologisch-hydrogeologische Standortsituation ist für die Beurteilung von In-situ-Verfahren, aber auch für einen Erdaushub, relevant.

Im Hinblick auf den Grundwasserschutz ist die Frage nach möglichen Schadstoffverschleppungen entscheidend. In diesem Zusammenhang zu klärende Punkte sind:

- Grundwasservorkommen, -stockwerke
- Durchlässigkeit des Untergrundes
- Fließgeschwindigkeit
- Wasserwirtschaftliche Nutzungen

Wird das Anforderungsprofil an die Erkundung eines kontaminierten Standortes nicht erfüllt, ist die Anwendbarkeit einer Bodenwäsche und auch anderer Sanierungsverfahren nur unzulänglich zu beurteilen.

Für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes und die weitere Sanierungsplanung werden daher ergänzende Erkundungsmaßnahmen erforderlich sein.

2.4.2 Voruntersuchungen zur Bodenwäsche

Sollen im Rahmen der Erkundung bereits auf eine Bodenwäsche ausgerichtete **Vorversuche** durchgeführt werden, so kann eine fraktionsdifferenzierte chemische Analytik mit verhältnismäßig geringem Aufwand wertvolle Hinweise geben: die Analytik einzelner durch (nasse) Siebung gewonnener Fraktionen gibt Orientierungswerte bezüglich der möglichen Reinigungsergebnisse bei Anwendung von Bodenwaschverfahren.

Hiervon zu unterscheiden sind **Waschversuche**, die im Labor- oder Technikumsmaßstab i. d. R. von den Anbietern selbst durchgeführt werden. Solche Waschversuche sind mit größerem organisatorischem und finanziellem Aufwand verbunden, so daß sie in der Erkundungsphase selbst nicht systematisch vorgesehen werden sollten. Im Rahmen der Sanierungsplanung oder im Rahmen von Angebotseinholungen werden sie jedoch häufig unerlässlich sein.

3 Einführung in die Verfahrenstechnik der Bodenwäsche

3.1 Verfahrenstechnische Ziele und einsetzbare Verfahrenstechniken

Bodenwaschverfahren werden in der Literatur oft unter dem Begriff Extraktions- oder chemisch-physikalische Verfahren behandelt. Es ist aus technologischer Sicht zweckmäßig, zwischen eigentlichen **Bodenwaschverfahren** und **Extraktionsverfahren** zu unterscheiden und beide unter dem Oberbegriff **chemisch-physikalische Verfahren** zusammenzufassen.

Der Unterschied zwischen Waschverfahren und chemischen Extraktionsverfahren besteht im Mechanismus des Schadstofftransportes.

Kennzeichnend für den Waschprozeß ist die Überführung von partikulärem Schadstoff in die Waschlösung und seine Dispergierung bzw. Emulgierung.

Dispergieren ist das Zer- und Verteilen von in einer bestimmten Art gebundenen festen Bodenbestandteilen in einem Dispersionsmedium (Wasser).

Unter Emulgieren versteht man das Verteilen einer Flüssigkeit in einem mit ihr nicht mischbaren Dispersionsmedium (Wasser).

Demgegenüber wird bei den Extraktionsverfahren der Schadstoff in der Extraktionslösung echt gelöst (molekular oder ionogen). Für letzteren Prozeß spielt die Verweilzeit eine wesentliche Rolle. Der Einsatz von Chemikalien ist kein ausreichendes Kriterium für die Zuordnung zu Waschverfahren oder Extraktionsverfahren. So ist die Entfernung von unpolaren Kohlenwasserstoffen mit Tensidzusatz eindeutig ein Waschverfahren, da das Öl in der Waschlösung nicht gelöst, sondern emulgiert wird.

Tabelle 3.1-1 Physikalisch-chemische Behandlungsverfahren für Böden

Verfahren	Prinzip	Behandlungsmittel
Bodenwaschverfahren	Ablösen des Schadstoffes von Bodenpartikeln durch mechanische Energie, Überführung des Schadstoffs ins Reinigungsmedium als Suspension oder Emulsion, Schadstoffseparation	Wasser; Wasser und Tenside
Extraktionsverfahren	Molekulares Lösen und Überführung des Schadstoffs in das Extraktionsmedium	Wäßrige Lösungen von Säuren, Laugen, Komplexbildner, organische Lösungsmittel

Naturgemäß wird jeder Waschprozeß von Lösungsvorgängen begleitet. Dieser Vorgang ist aber für den Gesamtprozeß von untergeordneter Bedeutung. Die Bodenwäsche kann als physikalisches Verfahren weder einen Schadstoff vernichten, noch in eine ökologisch unbedenkliche Form umwandeln. Obwohl für die Bodenwäsche chemische Prozesse eher unerwünscht sind, ist in der Praxis eine Überschneidung gegeben. Wird der gewünschte Reinigungseffekt mit Bodenwaschverfahren allein nicht erreicht, so ist eine Kombination mit anderen Verfahren zu prüfen (z. B. mikrobiologische und thermische Verfahren, siehe Kap. 5.3).

Das Ziel der Bodenwäsche ist das Freisetzen der im Ausgangsmaterial enthaltenen Schadstoffteilchen und das Abtrennen des Schadstoffs von dem Boden. Dabei soll der Schadstoff in einer im Vergleich zum gereinigten Boden massenmäßig geringen Fraktion konzentriert werden (5 bis 20 %). Die Schadstofffraktion muß entweder als Sonderabfall entsorgt werden oder weiter behandelt werden (siehe Kap. 3.4).

Neben dieser verfahrenstechnischen Zielstellung sind die ökologischen und wirtschaftlichen Ziele zu berücksichtigen, d. h. die im Sanierungsziel festgelegten Grenzwerte für den Schadstoff im gereinigten Boden sind zu sichern und die Qualität des gereinigten Bodens darf sich nur unwesentlich ändern.

Aus dem Mechanismus der Bodenwäsche folgen auch unmittelbar die Grenzen des Verfahrens. Immer dann, wenn der Schadstoff in der Bodenmatrix eingeschlossen ist und durch vorbereitende Operationen nicht aufgeschlossen werden kann, wird die Bodenwäsche wirkungslos sein. Schwierigkeiten sind auch zu erwarten, wenn Schadstoffe und Boden in ähnlicher Korngrößenverteilung vorliegen. Gleiches trifft für bindige Böden mit einem hohen Körnungsanteil $< 0,06 \text{ mm} > 30 \%$ zu. In solchen Fällen müssen andere Behandlungsverfahren angewandt werden. Andererseits erlaubt die Bodenwäsche gegenüber den konkurrierenden Verfahren z. B. nicht biologisch abbaubare Schwermetalle aus Böden zu eliminieren.

Um die angegebene Zielstellung zu erreichen, bedient sich die Verfahrenstechnik verschiedener, auf den speziellen Einsatz abgestimmte Kombinationen verfahrenstechnischer Grundoperationen, wie sie in Abb. 3.1-1 für die üblichen Verfahrensschritte zusammengestellt sind.

Der erste Schritt ist üblicherweise die **Bodenvorbereitung**. Damit soll das zu behandelnde Material in die für den Waschprozeß erforderliche Form gebracht werden.

Typische Operationen der Bodenvorbereitung sind:

- Transport des ausgekofferten Bodens
- (Vor)Zerkleinern
- (Vor)Klassieren
- Eisenabscheidung durch Magnetscheidung
- Vorbunkern oder Zwischenlagern
- Bodenluftabsaugung

In der Regel wird bei der Bodenvorbereitung trocken gearbeitet. Die dafür auszuwählenden Aggregate orientieren sich an den gestellten Anforderungen. So müssen die vorgesehenen Bunker für bunkerschwieriges, feuchtes Material ausgelegt sein und über eine geeignete Abzugseinrichtung verfügen. Um grobe, bei der weiteren Behandlung störende Eisenteile abzu-

trennen, bedient man sich üblicher Überbandmagnete. Die (Vor)Brecher- und (Vor)Siebstufen dienen zur Einstellung der für die folgenden Verfahrensschritte erforderlichen Korngröße des Materials.

Eine nicht unerhebliche Bedeutung für den Gesamtprozeß kommt den Transport- und Lagerreinrichtungen zu. Es muß darauf geachtet werden, daß dabei unterschiedlich kontaminierte Aushübe nicht miteinander vermischt werden und die Lagerung den Kontaminationen entsprechend erfolgt.

An die Bodenvorbereitung schließt sich als nächster Verfahrensschritt der **Naßaufschluß** an.

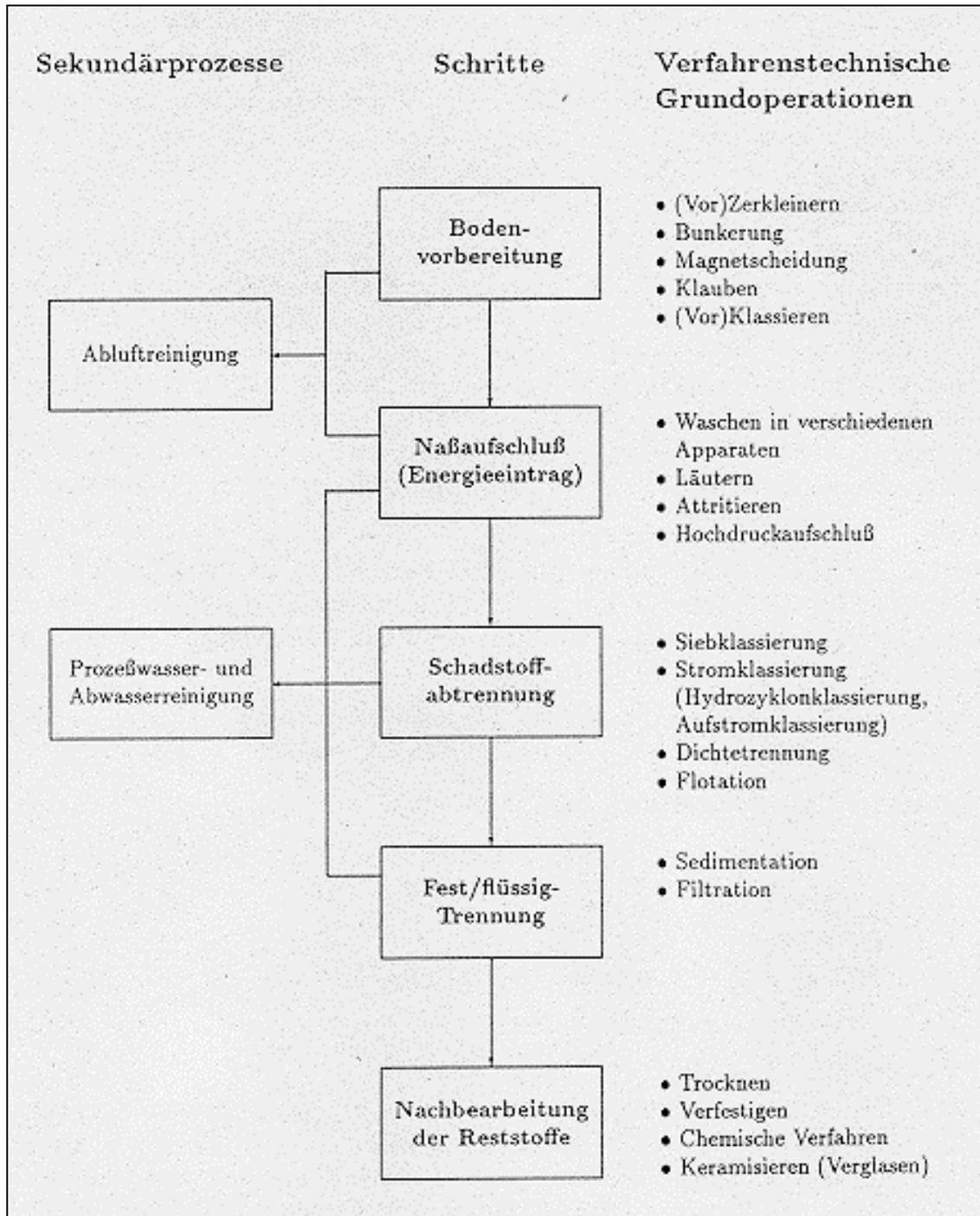


Abb. 3.1-1 Verfahrensschritte bei der Bodenwäsche

Unter dem Naßaufschluß wird das Lösen der zwischen dem Schadstoff und dem Boden bestehenden Bindung verstanden. Entsprechend der Definition für den Läuterprozeß (siehe Kap. 3.2.2) erfolgt dies durch Eintrag mechanischer Energie in die Suspension. In der Praxis wird eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden der Energiezufuhr angewendet. Der Naßaufschluß läßt sich durch die Operation Läufern beschreiben. Zusätze von Tensiden zum Aufschluß dienen i. d. R. zur Benetzungsverbesserung und zur Stabilisierung der Suspension. Einen ähnlichen Effekt können auch pH-Wert-Veränderungen haben, obwohl dadurch auch Lösevorgänge initiiert werden können. Nach erfolgter Freisetzung des Schadstoffes wird im folgenden Verfahrensschritt die Schadstofffraktion durch geeignete Grundoperationen von dem gereinigten Boden getrennt. Übliche Grundoperationen dafür sind die in der Abb.3.1-1 aufgeführten Klassierprozesse, die Dichtentrennung und die Flotation. Die Auswahl der Operationen richtet sich nach den vorhandenen Unterschieden in den Eigenschaften von Schadstoff und Boden. Kann die Trennung auf Grund von Korngrößenunterschieden durchgeführt werden, setzt man Klassierverfahren ein. Für den Kornbereich (< 1 mm) sind die Stromklassierverfahren günstig. Bei größeren Körnungen wird die Siebklassierung bevorzugt.

Bestehen Dichteunterschiede, so kann die Trennung durch **Dichtesortierung** (Herdwäsche, Wendelrinnen) erfolgen.

Die **Flotation** beruht auf Benetzungsunterschieden zwischen Boden und Schadstoff. Gegebenenfalls kann durch Zusatz von sogenannten Sammlern (z. B. Fettsäuren u. a.) die Hydrophobie verstärkt bzw. über eine selektive Sammleradsorption erst erzeugt werden. Die Flotation ist ebenfalls ein Sortierverfahren für den Feinkornbereich.

Bei allen Sortierverfahren fallen Suspensionen an, die im nachfolgenden Verfahrensschritt entwässert werden müssen. Dazu dienen die bekannten Prozesse der **Fest/flüssig-Trennung**. In der Regel werden verschiedene Formen der Filtration und Sedimentation bevorzugt. Gegebenenfalls können Zusätze von Filtrationsmitteln oder Flokkungsmitteln zugefügt werden, um den Prozeß zu intensivieren. Der Schadstoff wird nach der Fest/flüssig-Trennung als Filterkuchen mit unterschiedlichem Wassergehalt erhalten. Entsprechend der weiteren Verwendung muß dieser nachbehandelt werden. Die Art der Behandlung hängt davon ab, ob das Schadstoffkonzentrat weiterverarbeitet wird oder entsorgt werden soll. Für die Reststoffverwertung kommen z. B. biologische, chemische oder thermische Prozesse in Frage.

Die Ablagerung auf Sondermülldeponien erfordert oft eine Verfestigung, Trocknung oder Keramisierung (Verglasung). Letzteres wird stets dann notwendig sein, wenn bei der Ablagerung eine Freisetzung des Schadstoffes durch Auslaugungsvorgänge zu erwarten ist.

Die vorgenommene Zerlegung des Bodenwaschens in einzelne Verfahrensschritte ist als Grundmuster zu bewerten. Je nach Erfordernis wird in der Praxis davon abgewichen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Verfahrensstufen sind fließend und überschneiden sich in der Praxis. So ist zwischen Naßaufschluß und Schadstoffabtrennung eine klare Abgrenzung nicht möglich. Eine Siebklassierung oder eine Hydrozyklontrennung kann sowohl einen Klassier- als auch einen Sortierprozeß darstellen.

Neben den Hauptverfahrensschritten der Bodenwäsche gibt es weitere, die in Abb. 3.1-1 als **Sekundärprozesse** bezeichnet sind. Sie sind Bestandteil einer jeden Bodenwaschanlage und dienen zur Behandlung der anfallenden sekundären Stoffströme, wie belastete Abluft und

Wässer. Die Abluftbehandlung erfordert i. d. R. Staubabscheidung und Adsorption bzw. Absorption gasförmiger Schadstoffe.

Bei der Wasserbehandlung ist zwischen **Prozeßwasser- und Abwasserbehandlung** zu unterscheiden. Die Prozeßwasserbehandlung beinhaltet die Reinigung des im Kreislauf befindlichen kontaminierten Waschwassers, die Abwasserbehandlung betrifft die Reinigung des aus dem Prozeß ausgeschleusten Wassers. Beide Behandlungen unterscheiden sich weniger in den angewandten Grundoperationen als in den Anforderungen an die Restschadstoffgehalte. Da es sich um Sekundärmaßnahmen handelt, soll an dieser Stelle auf eine Beschreibung der Grundoperationen nicht weiter eingegangen werden.

In Abb. 3.1-2 sind die Grundoperationen innerhalb eines beispielhaften Verfahrensschemas für die Bodenwäsche dargestellt.

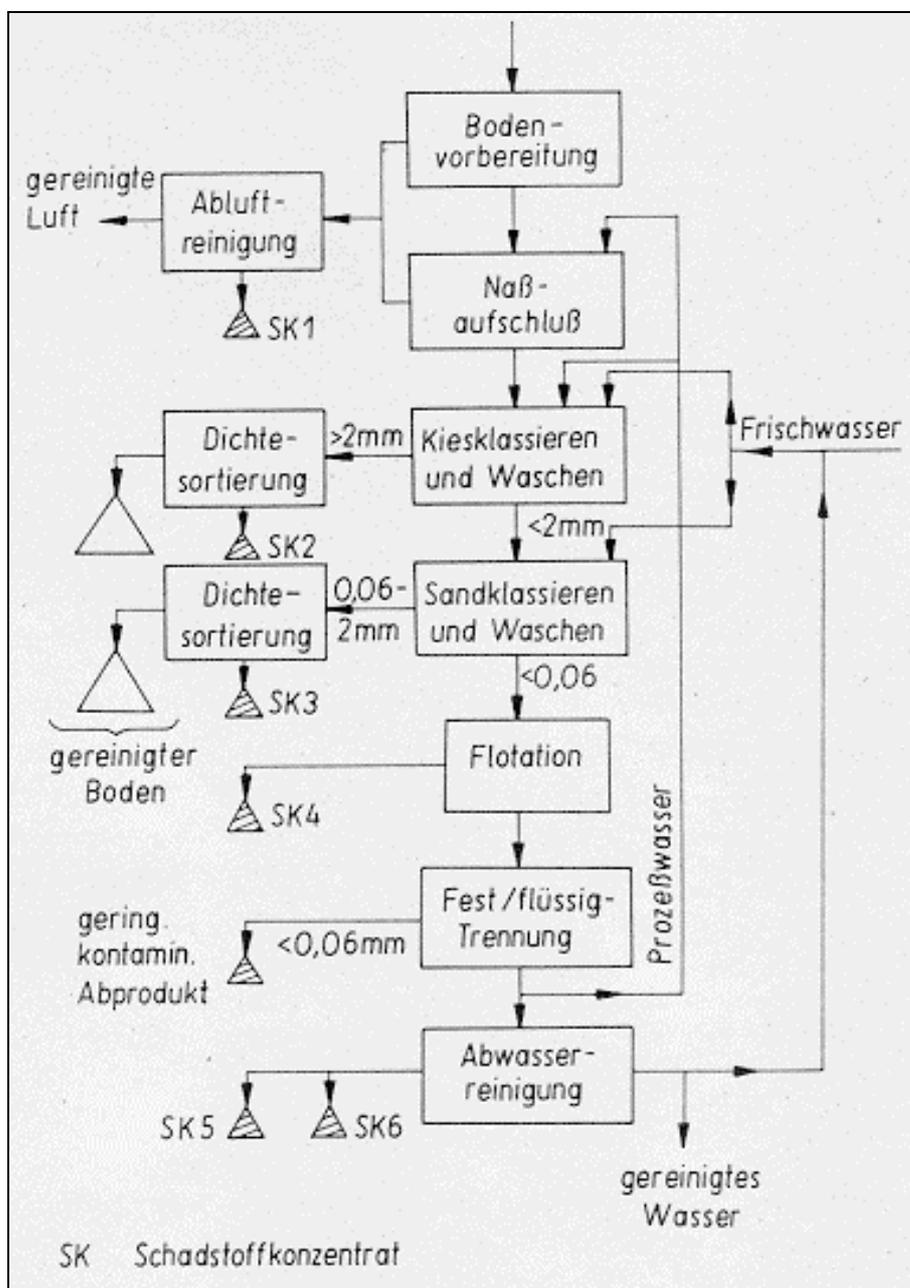


Abb. 3.1-2 Verfahrensschema einer Bodenwaschanlage (Beispiel)

3.2 Verfahrenstechnische Grundoperationen

Im folgenden Abschnitt werden die **verfahrenstechnischen Grundoperationen**, d. h. die bei der Bodenwäsche eingesetzten mechanischen Trennprozesse nach den im Schema (Abb. 3.1-1) angegebenen Verfahrensschritten, gegliedert nach technologischem Ziel, Prozeßmechanismus und Apparat, abgehandelt. Grundoperationen, die in mehreren Verfahrensschritten auftauchen, werden nur einmal erläutert.

Der Prozeß Magnetscheidung wird erst unter den Sortierverfahren behandelt, obwohl er in der Bodenvorbereitung eine der ersten Vorbehandlungsoperationen darstellt.

Auf eine Darstellung der Prozesse zur Boden- und Reststoffnachbehandlung (Trocknen, Verfestigen, Keramisieren u.ä.) wurde bewußt verzichtet.

3.2.1 Zerkleinerung

Technologisches Ziel

Im Hinblick auf eine Bodenwäsche kann eine **Zerkleinerung** im wesentlichen zwei Ziele verfolgen.

- Begrenzung der oberen Korngröße für das Aufschlußaggregat beim nachfolgenden Naßaufschluß. Das zu zerkleinernde Überkorn kann aus fremden (z. B. Mauerbruchstücke) und/oder natürlichen Bodenbestandteilen herrühren.
- Freilegen (Aufschließen) von Schadstoffphasen aus ihren "Verwachsungen", bzw. Verbindungen mit anderen Phasen. Bei hohen Anteilen an porösen Bestandteilen (Mauerwerk, Ziegel, Sandstein, Schalenkalk u. a.) können sich die Schadstoffe in den Poren bzw. Phasengrenzen befinden. In diesem Falle ist eine Vorzerkleinerung die Voraussetzung für einen effektiven Naßaufschluß.

Definitionsgemäß wird beim Zerkleinern ein mechanischer Zerteilprozeß von Feststoffen realisiert.

Prozeßmechanismus

Das Zerkleinern bzw. Zerteilen von Festkörpern in Teilstücke erfolgt durch das Überwinden der Bindungskräfte durch Einwirken von Spannungen im Innern dieser Körper. Dadurch wird die Korngrößenverteilung des Ausgangsmaterials derart verändert, daß kleinere Teilchen entstehen.

Die Stoffumwandlung im Prozeßraum des Zerkleinerungsapparates erfolgt durch gleichartige oder auch durch verschiedenartige im folgenden dargestellte Mikroprozesse.

In bestimmten Zerkleinerungsmaschinen sind oft bestimmte Beanspruchungsarten vorherrschend, vielfach wirken auch mehrere Beanspruchungsarten gleichzeitig.

Für die Zerkleinerungstechnik spielen eine wesentliche Rolle

a) die Beanspruchung zwischen zwei Festkörperflächen und

b) die Beanspruchung an einer Festkörperfläche.

Beanspruchung zwischen zwei Festkörperoberflächen

Bei diesen Beanspruchungsarten können Beanspruchungsintensität und Beanspruchungsgeschwindigkeit voneinander unabhängig variiert werden. Die Beanspruchung durch **Druck** (Abb. 3.2-1/a) ist in vielen Zerkleinerungsmaschinen (z. B. Backenbrecher, Kegelbrecher, Walzenbrecher) anzutreffen. Die Körner werden zwischen zwei Flächen zerdrückt.

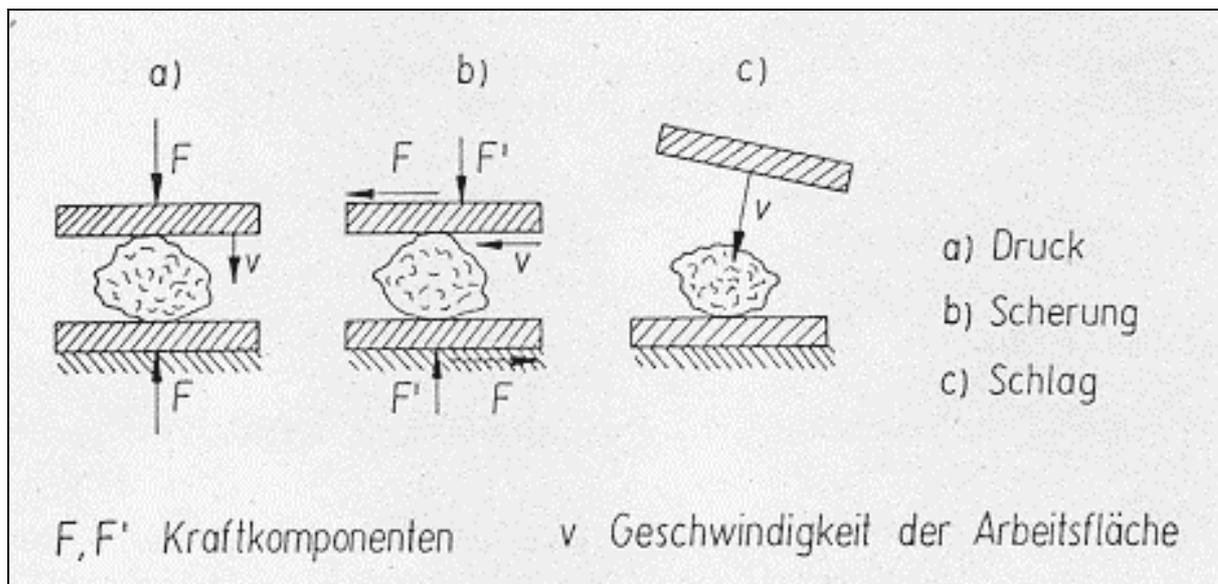


Abb. 3.2-1 Beanspruchung zwischen zwei Flächen

Wesentlich für diese Beanspruchung ist neben dem Formzwang die relativ niedrige Beanspruchungsgeschwindigkeit.

Die Beanspruchung durch **Scherung** ist in einigen Zerkleinerungsmaschinen besonders in Form des durch in Abb. 3.2-1/b schematisch angedeuteten Beanspruchungsmechanismus vorhanden. Die Körner sind zwischen zwei Arbeitsflächen, die eine Relativbewegung zueinander ausführen, mehr oder weniger eingespannt. Die Scherung stellt eine komplexe Beanspruchung dar. Sie ist hinsichtlich der Kräfteverhältnisse sehr variabel.

Für die Beanspruchung durch **Schlag** ist kennzeichnend, daß eine Arbeitsfläche, die zwangsgeführt (z. B. Brechkegel im Flachkegelbrecher) oder frei beweglich ist (z. B. Mahlkugel in der Trommelmühle) mit relativ hoher Geschwindigkeit auf das zu zerkleinernde Gut trifft, das mit einer festen Arbeitsfläche in Kontakt ist (Abb. 3.2-1/c).

Die Beanspruchungsgeschwindigkeit ist im Vergleich zur Druckbeanspruchung höher.

Beanspruchung an einer Festkörperoberfläche

Diese Beanspruchung wird gewöhnlich als **Prallbeanspruchung** bezeichnet. Beanspruchungsintensität und -geschwindigkeit hängen hier voneinander ab, wobei die letztere mehr als eine Zehnerpotenz höher als bei der Druckbeanspruchung liegt. Beim Prall treffen die Körner mit

hoher Geschwindigkeit auf eine feste Arbeitsfläche (a), werden von einer bewegten Arbeitsfläche erfaßt (b) oder treffen aufeinander (c), so daß kein Formzwang gegeben ist (Abb.3.2-2).

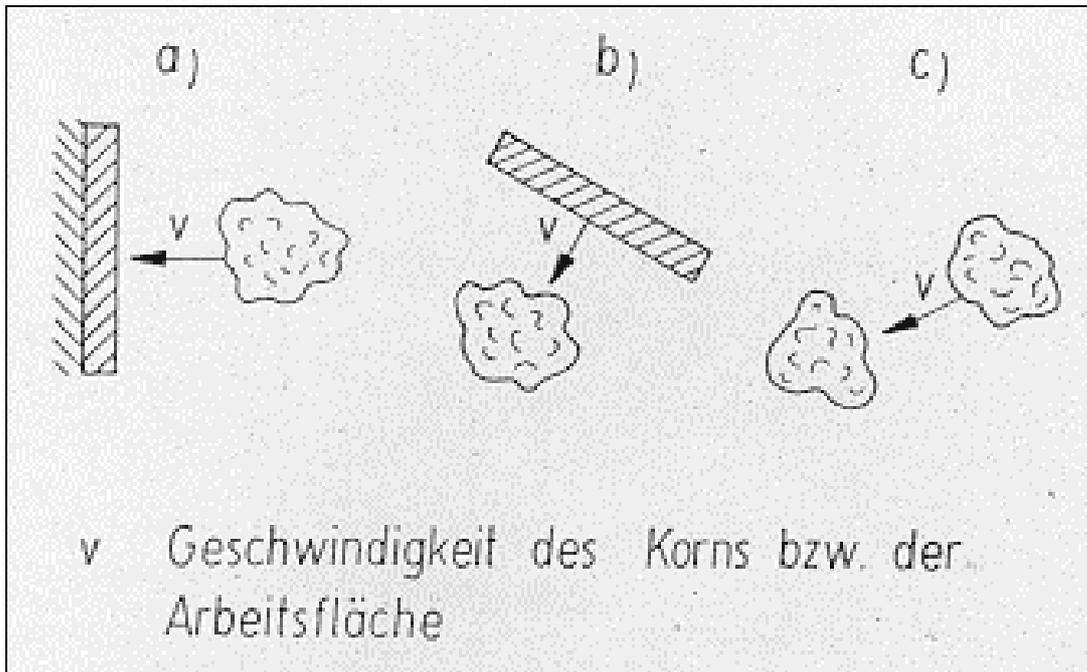


Abb. 3.2-2 Beanspruchung an einer Festkörperoberfläche (Prall)

Beim Einstellen von Prallzerkleinerungsmaschinen ist das Anpassen der Prallgeschwindigkeit an die Kornfestigkeit besonders wichtig.

Apparat

In Zerkleinerungsmaschinen werden im allgemeinen Körnerkollektive kontinuierlich verarbeitet.

Die vielfältigen Aufgaben der Zerkleinerungstechnik haben zur Entwicklung einer großen Zahl von Zerkleinerungsmaschinen geführt, die sich z. B. nach den Festigkeitseigenschaften und Korngrößenbereichen der zu zerkleinernden Stoffe gliedern (Abb. 3.2-3).

In dieser Abbildung wird von der Einteilung nach konstruktiven Gesichtspunkten ausgegangen, weil sich dahinter teilweise auch jene nach den Festigkeitseigenschaften sowie nach den verarbeitbaren Korngrößenbereichen verbirgt. Die Abstufung der Korngrößen hat sich von der Apparatetechnik her eingeführt und steht nicht im Widerspruch zur geologischen Korngrößenklassifizierung nach DIN 4022 Teil 1 (siehe Kap. 2.2.4).

Das Zerkleinerungsverhältnis n dient neben anderen Kennziffern der Kennzeichnung des Zerkleinerungserfolges:

- Das Zerkleinerungsverhältnis n_0 stellt die Relation obere Korngröße des Aufgabegutes zu der oberen Korngröße des zerkleinerten Gutes.
- Das scheinbare Zerkleinerungsverhältnis n_s stellt das Verhältnis der Maschinenparameter Maulweite zu Austragsspaltweite der Zerkleinerungsmaschine dar. Das scheinbare Zerkleinerungsverhältnis n_s gilt nur für Backen- und Kegelbrecher.

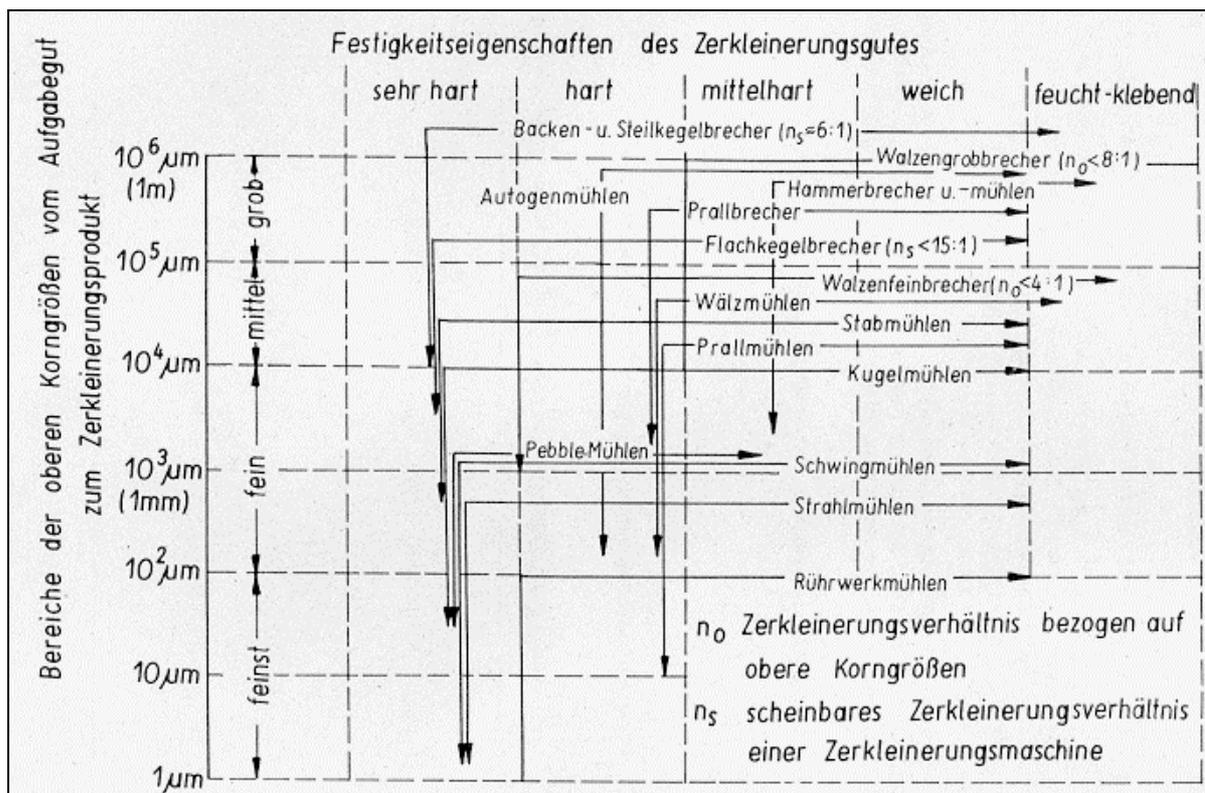


Abb. 3.2-3 Einsatzbereiche von Zerkleinerungsmaschinen (SCHUBERT 1989)

Für die Bodenaufbereitung können insbesondere im Verfahrensschritt der Bodenvorbereitung folgende Zerkleinerungsapparate zur Anwendung kommen:

- Backenbrecher
- Steil- und Flachkegelbrecher
- Walzen(Grob)brecher
- Prall- und Hammerbrecher

Die Funktionsweise dieser Brechapparate werden in (SCHUBERT 1989) detailliert dargestellt und erläutert.

Der Einsatz bzw. die Auswahl einer bestimmten Zerkleinerungsmaschine ist von der physikalischen Beschaffenheit des vorlaufenden Bodenmaterials (maximale Korngröße, Korngrößenverteilung, Festigkeit der Bestandteile, Gefügeart) und vom technologischen Ziel der Zerkleinerung abhängig.

Jede Zerkleinerungsmaschine weist Vor- und Nachteile auf. Deshalb ist die Entscheidung für eine von grundsätzlich zwei geeigneten Maschinen durch Abwägen der Vor- und Nachteile gegeneinander von Fall zu Fall vorzunehmen.

Der Prallbrecher ist u. U. vorteilhaft bei Vorliegen ausgeprägt inhomogener Gefüge. Der bevorzugte Bruchverlauf längs der Korngrenzen fördert den Aufschluß. Bei unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften der verwachsenen Bestandteile ist die Zerkleinerung selektiv, wobei weniger feste Gefüge fast völlig zerstört werden.

3.2.2 Waschen und Läutern

3.2.2.1 Zielstellung, Definition

Das technologische Ziel der verfahrenstechnischen Grundoperationen Waschen und Läutern innerhalb von Bodenwaschverfahren ist der Naßaufschluß, d. h. das Freilegen der kontaminierten Bodenbestandteile und deren Abtrennung von den gröberen Bodenanteilen.

Waschen und Läutern sind verfahrenstechnisch adäquate Vorgänge, wobei die Begriffsnutzung traditionell verwurzelt ist. Im allgemeinen spricht man bei der Aufbereitung bergbaulicher Rohstoffe vom **Läutern** und in anderen Industriezweigen vom **Waschen**. Im Folgenden soll einheitlich der Begriff Läutern verwendet werden.

Ausgehend von der verfahrenstechnischen Definition werden beim **Läutern** in einem ersten Teilprozeß agglomerativ verbundene Bodenbestandteile in eine Trübe zerteilt (dispergiert) und diese in einem gleichzeitigen oder vorzugsweise nachfolgenden zweiten Teilprozeß von den nicht zerteilten, kristallin gebundenen (gröberen) Stoffanteilen klassiert. In dem einen Austragsprodukt fällt immer das in einer Trübe zerteilte Feinkorn, in dem anderen ein entfeuchtetes Grobkorn an, wobei der Gehalt an einem interessierenden Stoffanteil, wie z. B. die kontaminierten Bestandteile, in einem von beiden Austrägen gegenüber dem Eingangsgut reicher oder ärmer wird und sich so im Ergebnis ein Sortierprozeß ergibt. Gleichzeitig mit der Feststoffdispergierung erfolgt auch der Schadstoffaufschluß, schematisch in Abb. 3.2-4 dargestellt.

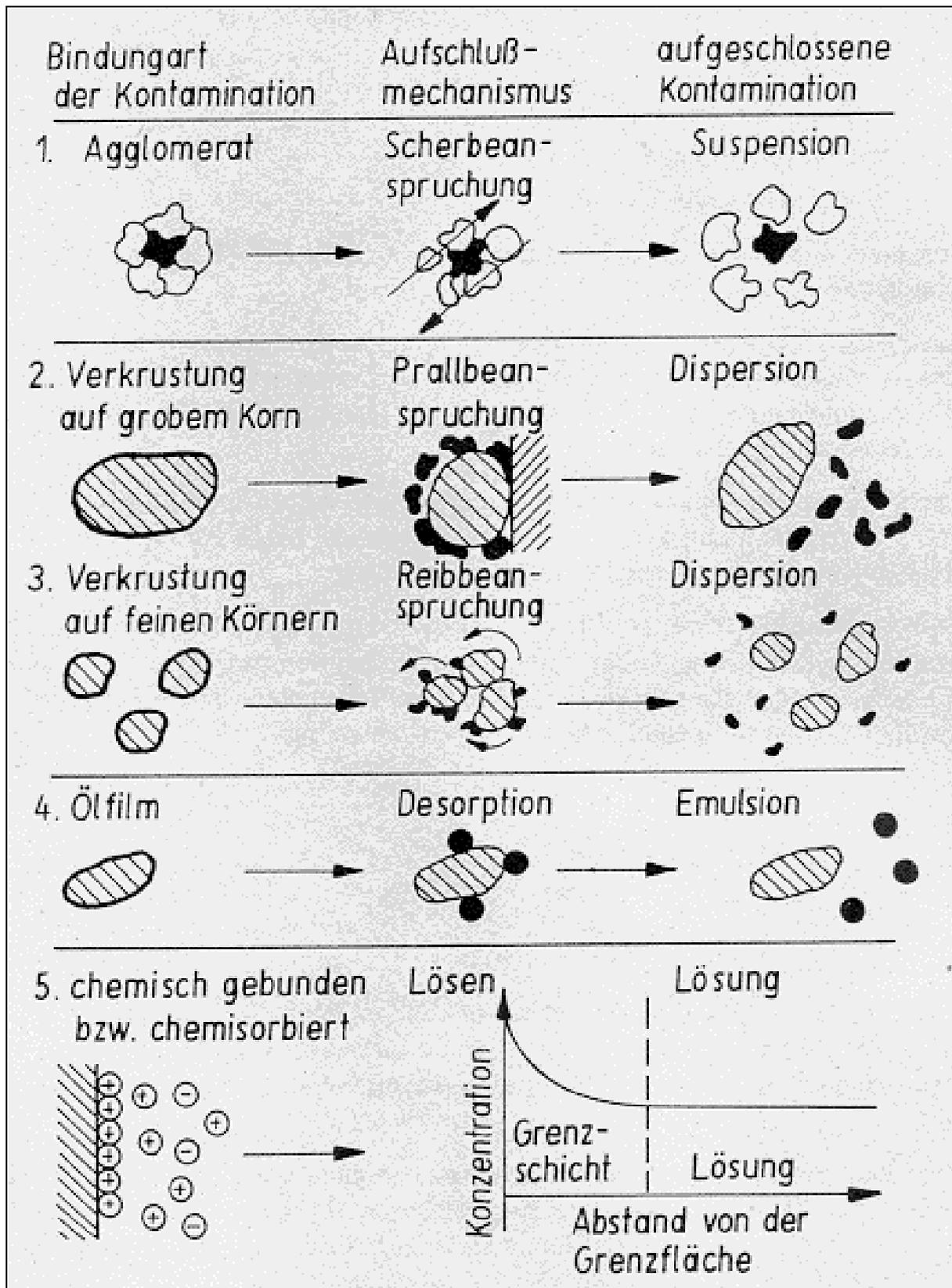


Abb. 3.2-4 Schadstoffaufschluß beim Läutern (NEESSE und GROHS 1990)

Der Schadstoff liegt dann dispers (als suspendiertes Feststoffpartikel, als emulgierte Flüssigkeit) oder gelöst in der Läuterflüssigkeit vor. Als Dispersionsmittel kommt im allgemeinen Wasser zum Einsatz, dem im konkreten Fall auch Chemikalien, wie z. B. Dispergierhilfsmittel, Lösungsmittel, Emulgatoren und Säuren, zugesetzt werden können (BINDER 1991).

Voraussetzung für das Läutern ist, daß die durch Klassieren abzutrennenden, feinkörnigen Stoffanteile einschließlich der Kontaminanten in der Waschflüssigkeit - als Trübe - zerteilt (dispergiert) vorliegen. Zerteilt werden sollen sogenannte Agglomerate, d. h. durch interpartikuläre Bindungskräfte zusammenhaltende Aggregate von zwei, mehreren oder vielen Körnern.

3.2.2.2 Prozeßmechanismen

Die bei der technischen Realisierung des Läuterns zur Anwendung kommenden Wirkprinzipien der Bodenbeanspruchung und die damit verbundenen Mikroprozesse werden bestimmt durch:

- die Art des Bodens,
- die Art der Schadstoffe und deren Bindung an die Bodenpartikel,
- das System Dispersionsmittel (Extraktions- bzw. Spülflüssigkeit) / Schadstoff.

Der Naßaufschluß als ein bestimmender Verfahrensschritt bei der Aufbereitung kontaminierter Böden ist ein Komplex physikalischer, physiko-chemischer und chemischer Vorgänge und muß auf die oben genannten Einflußgrößen abgestimmt werden.

Der prozeßbestimmende Übergang des Schadstoffes vom Bodenpartikel in die flüssige Phase wird im wesentlichen von drei Mechanismen bestimmt, die beim Läutern gleichzeitig in unterschiedlicher Intensität ablaufen:

- Schadstoffseparierung bzw. -anreicherung
- Schadstoffablösung bzw. -abspülung
- Schadstoffauflösung bzw. -extraktion

Die **Schadstoffseparierung** ist dann sinnvoll, wenn die Kontamination in stark unterschiedlicher Konzentration an definierten Bodenfraktionen angelagert sind. Die Separation in bestimmte Bodenfraktionen erfolgt durch Anreicherung nach unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften, wie z. B. Korngröße und Dichte. In der Regel führt eine Separation der Schlufffraktionen zu einer weitgehenden Reinigung des Bodens.

Die **Schadstoffablösung** erfordert als notwendige Voraussetzung den Eintrag von Energie, der eine Fluidströmung und eine Teilchenbewegung bzw. Relativbewegung zwischen den Bodenbestandteilen erzeugt. Die Effizienz des Ablösevorganges ist abhängig von der Größe der wirkenden Scherkräfte und damit eine Funktion der Relativgeschwindigkeit in der Phasengrenzfläche. Hohe Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Bodenpartikeln und der Flüssigkeit erzeugen große Schubspannungen an der Partikeloberfläche und sind somit neben einer Verringerung der Bindungskräfte durch Tenside die Voraussetzung für das wirkungsvolle Ablösen. Die Ablösung wird zusätzlich durch die direkte Reibung zwischen benachbarten Bodenpartikeln verstärkt.

Das **Lösen der Schadstoffe** erfolgt durch molekularen Transport bei vorausgesetzter vollständiger Löslichkeit des Schadstoffes in der Flüssigkeit. Der Konzentrationsgradient an der Phasengrenzfläche nimmt mit fortschreitender Zeit, bis zum Erreichen der Gleichgewichtskonzentration, ab. Eine Intensivierung des Lösevorganges erreicht man durch Zugabe geeigneter Chemikalien und durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit (turbulente Schubspannung).

Prinzipiell sollte man bei der Dekontamination verunreinigter Böden in mehreren **Stufen** bei unterschiedlicher Intensität des Energieeintrages in getrennten Apparaten (verschiedene Wirkprinzipien) läutern. Der Schadstoffseparation ist dabei der Vorrang gegeben, da mit Hilfe einer schonenden aber "scharfen" (hohe Trennschärfe bei geringer Trennkorngröße) Klassierung sehr gute Anreicherungseffekte bei geringem Energieaufwand erreichbar sind. Schadstoffbindung und -art sowie die Korngröße der Bodenfraktion bestimmen den Einsatz weiterer Läuterapparate.

Schwierigkeiten bereiten die Feinkorndispersierung und die Schadstoffablösung von sehr kleinen Partikeln (Schluff), da keine Möglichkeit besteht genügend Energie in das System einzutragen, um ausreichend große Scherkräfte zu übertragen. Ein hoher Feinkornanteil beeinträchtigt weiterhin die Fließeigenschaften der Trübe und erfordert somit hohe Energieeinträge. Die Abtrennung aufgeschlossener Schadstoffe (Schadstoffseparierung) bzw. die Feinkornabtrennung wird entscheidend beeinträchtigt und eine Rekontamination ist nicht auszuschließen. Man geht davon aus, daß der Schluffanteil ($< 0,06$ mm) i. d. R. 30 % nicht überschreiten soll. Dieser Grenzwert ist durch die Mikroturbulenz gegeben und bedeutet, daß Partikel dieser Größe und kleinere den turbulenten Schubspannungen nicht mehr ausgesetzt sind. Der Einfluß der suspendierten Partikel auf das turbulente Strömungssystem ist um so größer, je kleiner die Partikel und je größer deren Anteil ist.

Das Lösen der Schadstoffe wird prinzipiell nicht durch die Partikelgröße nach unten begrenzt, ist aber eine Funktion der Zeit. Eine Begrenzung der Partikelgröße ist aber durch die sich anschließenden Trennprozesse gegeben. Beachtet werden muß bei der Auswahl der "Lösemittel", daß durch diese die Bodensubstanz (insbesondere der organische Anteil) durch chemischen Angriff beeinträchtigt werden, diese selbst eine Kontamination darstellen und sie deshalb rückstandsfrei auswaschbar bzw. biologisch abbaubar sein müssen.

3.2.2.3 Aufschlußapparate

Die Art der Aufschlußapparate und die damit erreichbaren Beanspruchungsbedingungen bestimmen die Hydrodynamik des Läuterns und somit den mechanischen Aufschluß.

Die sich aus den Zielstellungen für das Läutern kontaminierter Böden ergebenden aufbereitungstechnischen Problemstellungen sind weitgehend mit denen der Erz- und Mineralaufbereitung vergleichbar. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß die bewährten technischen Ausrüstungen aus diesem Bereich beim Naßaufschluß innerhalb von Bodenwaschverfahren eine gewichtige Rolle spielen.

Ausgehend von den Bedingungen und Zielen des Läuterprozesses bei der Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe erfolgte die Entwicklung einer großen Anzahl von Läuterapparaten, die auch nahezu geschlossen zur Bodenwäsche genutzt werden. Trotz der bestehenden Analo-

gie ist eine direkte Übertragung jedoch nicht möglich. Nach dem Wirkprinzip der mechanischen Energieeinleitung lassen sich diese Apparate, wie Abb. 3.2-5 zeigt, vier Hauptgruppen zuordnen:

- rotierende Prozeßräume,
- Agitationsorgane bzw. rotierende Einbauten
- Schwingungen bzw. Vibration
- durchströmte Schüttungen.

Wirkprinzip der mechanischen Energieeinleitung	Grundtypen von Läuterapparaten	Schema
Rotierende Prozeßräume	Läutertrommeln norm. Bauart	
	Läutertrommeln m. Spezialeinb.	
Agitationsorgane	Trogwäscher	
	Rührwerkwäscher	
	Schlägerwellenwäscher	
Schwingungen (Vibration)	Schwingsiebe (bebraust)	
	Schwingwäscher	
	Ultraschallgerät	
Durchströmung von Schüttungen	Wirbelschicht	
		<p>A Aufgabe L Läutertrübe</p> <p>W Wasser G gewaschenes Gut</p>

Abb. 3.2-5 Einteilung der Läuterapparate (HELFRICHT und SCHATZ 1987)

Das zu reinigende Gut wird in Abhängigkeit vom Wirkprinzip der spezifischen Energieeinleitung (bis zu 10 kWh/t) hauptsächlich auf Scherung und Prall beansprucht. Eine untergeordnete Rolle spielt die Druck- und Schlagbeanspruchung.

Ausgehend von veröffentlichten Angaben zum Einsatz dieser Läuterapparate ist die in Abb. 3.2-6 dargestellte grobe Zuordnung von ausgewählten Apparaten zu den Rohstoffparametern

- obere Korngröße des Aufgabegutes,
- läuterbarer Anteil (Anteil an dispergierbaren Bodenbestandteilen) und
- Läuterbarkeit (Intensität der Bindung)

möglich.

Innerhalb des Dreieckdiagrammes läßt sich wie angedeutet eine grobe Abgrenzung der Läuterapparate nach den Wirkprinzipien der Energieeinleitung vornehmen. Das bedeutet, daß bereits durch die Wahl des Wirkprinzips der Gutbeanspruchung der Einsatzbereich des Läuterapparates vorbestimmt wird. So sind z. B. Schraubenwäscher für gut läuterbare, feinkörnige Böden mit geringen Verunreinigungen (läuterbarer Anteil) bzw. geringem Anteil an Feinkorn einsetzbar. Gute Läuterergebnisse sind erreichbar, wenn bei vorliegendem hohem Schadstoff- (läuterbarer Anteil) und Feinkornanteil sowie geringer Läuterbarkeit (große Beanspruchungsenergien erforderlich) Attritoren zum Einsatz kommen. Mit zunehmender Vergrößerung des Läutergutes, auch bei schwierigen Läuteraufgaben, sollten Läutertrommeln zum Einsatz kommen.

Die richtige Auswahl des Apparates für den Läuterprozeß und dessen optimale Einordnung und Betriebsweise innerhalb eines Bodenwaschverfahrens ist nach wie vor nur auf der Grundlage spezieller verfahrenstechnischer Kenntnisse sowie geeigneter Vorlaufuntersuchungen mit den zu reinigenden Böden möglich.

Die Wahl der optimalen Läuterbedingungen sollte auf den zu reinigenden Boden abgestimmt werden. In der Regel werden die Betriebsbedingungen auf den vorhandenen Apparat abgestimmt.

Im Mittelpunkt der Neu- bzw. Weiterentwicklung von Läuterapparaten stehen:

- die Suche nach neuen Wirkprinzipien, wie z. B. die Energieeinleitung über durchströmte Schüttung sowie
- die Intensivierung der Beanspruchung der Bodenpartikel, wie z. B. mittels Hochdruckwasserstrahl.

Die damit verbundenen Ziele beinhalten Erhöhung des spezifischen Energieeintrages durch die gezielte Nutzung der Beanspruchung auf Prall und die Ausdehnung des naßmechanischen Aufschlusses auf immer feinere Körnungen z. B. mit Hilfe von Zugbeanspruchungen durch Ultraschall.

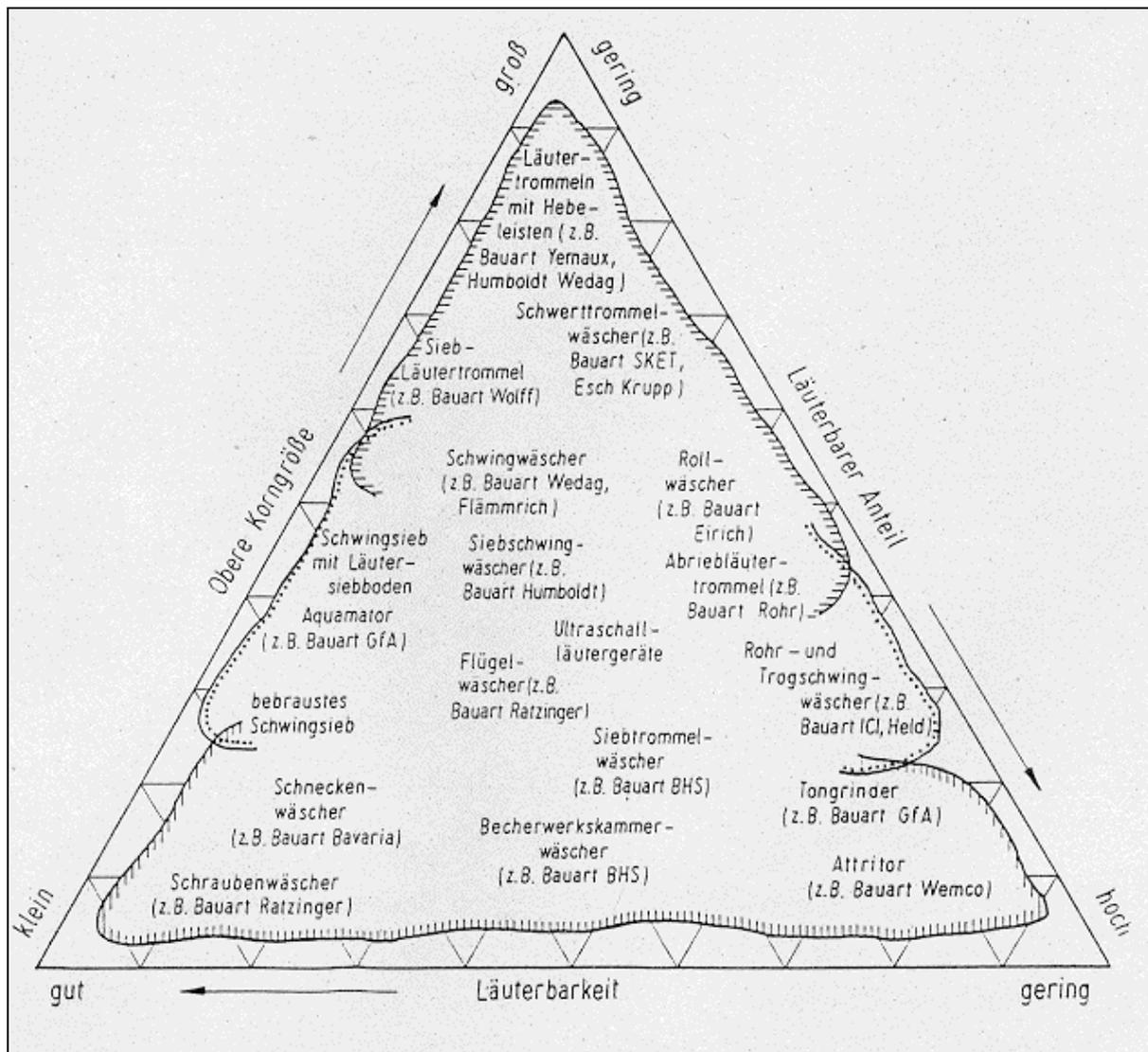


Abb. 3.2-6 Einsatzbereiche bekannter Läuterapparate

Läuterapparate mit rotierendem Prozeßraum

Läuterapparate mit rotierendem Prozeßraum, die Läutertrommeln, haben auf Grund der intensiven Gutbeanspruchung in der Bodenwäsche immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die Bodenbeanspruchung entsteht durch den Bewegungsablauf der Trommelfüllung, der in Abhängigkeit von Drehzahl und Feststoff-Wasser-Verhältnis, siehe Tabelle 3.2-1, durch Abrollen, Abgleiten (Kaskadenwirkung) und Sturz (Kataraktwirkung) des Gutes charakterisiert wird.

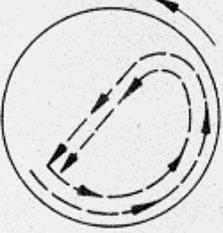
Drehzahl		Feststoffgehalt	Beanspruchung
niedrig ($n < n_{krit}$) Kaskadenwirkung		niedrig hoch	Scherung Scherung, Reibung
hoch ($n > n_{krit}$)		niedrig hoch	Prall Scherung, Prall

Tabelle 3.2-1 Beanspruchungsbedingungen in Läutertrommeln

Zunehmender Feinstkornanteil führt zur bevorzugten Beanspruchung auf Reibung. Neben den bereits genannten Prozeßparametern

- Trommeldrehzahl und
- Feststoffgehalt

sind weitere Maßnahmen zur Beeinflussung der Beanspruchung

- die Zugabe spezieller Aufschlußkörper,
- die Unterteilung der Trommel in Kammern
- der Einbau von Hebeleisten, Schwertern und
- anderen Spezialeinbauten,
- unterschiedliche Längen-Durchmesser-Verhältnisse,
- die Neigung der Trommel (SCHATZ 1990).

Hebeleisten und Schwerter ermöglichen eine gezielte Beeinflussung. So können die Schwerter in Abhängigkeit ihres Einbaus den Bodentransport hemmen bzw. beschleunigen, d. h. die Bodenverweilzeit und die Scherbeanspruchung (Reibung) verändern. Hebeleisten führen demgegenüber zur Erhöhung des Anteils der Prallbeanspruchung.

Läutertrommeln finden im allgemeinen als erste Reinigungsstufe Anwendung. Dies resultiert aus ihrem bevorzugten Einsatz bei größerem Aufgabegut (maximal 100 bis 250 mm). Nicht empfehlenswert ist der Einsatz von Trommeln bei Korngrößen kleiner 1 mm. In diesem Korngrößenbereich nimmt die Gutbeanspruchung stark ab, d. h. hier sind Einbauten zur Beanspruchung aber besonders für den Guttransport dringend erforderlich. Die Drehzahl von Läutertrommeln liegt im allgemeinen unterhalb der kritischen Drehzahl (n_{krit}).

$$n_{\text{krit}} = 42,3 \cdot D^{-0,5} \text{ [in min}^{-1}\text{]}$$

D: Trommeldurchmesser in m

Als Läutertrommeln sind auch Trommelsiebe sowie Freifallmischer, auch als Beton-Fahrmischer bekannt, im Einsatz. Derartige Mischer enthalten spezielle Einbauten, die die für das Vermischen erforderlichen Platzwechsel, d. h. die Relativbewegung der Mischgüter, garantieren. Andere Bezeichnungen, wie z. B. Attritions-Waschtrommel (siehe Kap. 4.2.4.4), weisen auf die Beanspruchung durch Reibung bei hohen Feststoffgehalten hin (Attrition = Reibbeanspruchung).

Bei einer geneigten Trommel ist zu beachten, daß besonders der Transport von Feinkorn aus der Trommel erschwert wird und dieses sich somit in der Trommel anreichert.

Der Trommelfüllungsgrad liegt im Bereich von 15 bis 20 Volumenprozent. Die sich drehende Trommel besitzt immer einen höheren Füllungsgrad als eine stehende, was zu Problemen beim plötzlichen Stillstand der Trommel führt.

Läuterapparate mit rotierenden Einbauten (Agitationsorgane)

Die Läuterapparate dieser Gruppe bestehen aus einem feststehenden Behälter (muldenförmig ausgebildeter Trog mit und ohne Neigung) oder stehende Rührzellen und horizontalen bzw. vertikalen Agitationsorganen zum Eintrag der Beanspruchungsenergie und dem Transport des Läutergutes. Die durch die rotierenden Einbauten erzielte Beanspruchung ist durch Scherung und Reibung charakterisiert.

Läuterapparate mit rotierenden Einbauten unterliegen einem hohen Verschleiß. Das Läutern von gröberem Gut (> 30 mm) ist prinzipiell mit Schwierigkeiten verbunden, da sich dieses zwischen den Beanspruchungsorganen und der Trogwand verklemmen kann. Apparate dieser Gruppe sind meist als zweite bzw. nur dann als erste oder alleinige Waschstufe im Einsatz, wenn eine vorlaufende (Schutz)klassierung erfolgt.

Bezüglich ihrer Reinigungswirksamkeit sind Schrauben-, Flügel- und Schwerterwäscher oft überschätzt worden.

Sehr intensiv beanspruchende Läuterapparate dieser Gruppe sind die Rührwerkswäscher (Attritionszellen). Bei sehr hohen Feststoffgehalten werden in kurzer Zeit, hervorgerufen durch einen intensiven Energieeintrag über Rührer (Rührarme), schwer dispergierbare und höhere Lehm- und Tonanteile des Bodens aufgeschlossen bzw. ablösbare Schadstoffe freigesetzt. Der Aufschluß erfolgt durch die Beanspruchung benachbarter Partikel auf Reibung. Die Rührarme dienen nur der Bewegung und dem Transport des sehr dichten und kompakten Gutbettes. Attritoren werden i. d. R. als Rührkaskade von mehreren, hintereinander geschalteten Zellen eingesetzt.

Eine besondere Ausführung eines Läuterapparates mit rotierenden Einbauten ist die in Abb. 3.2-7 dargestellte **Vibrationswaschschncke**.

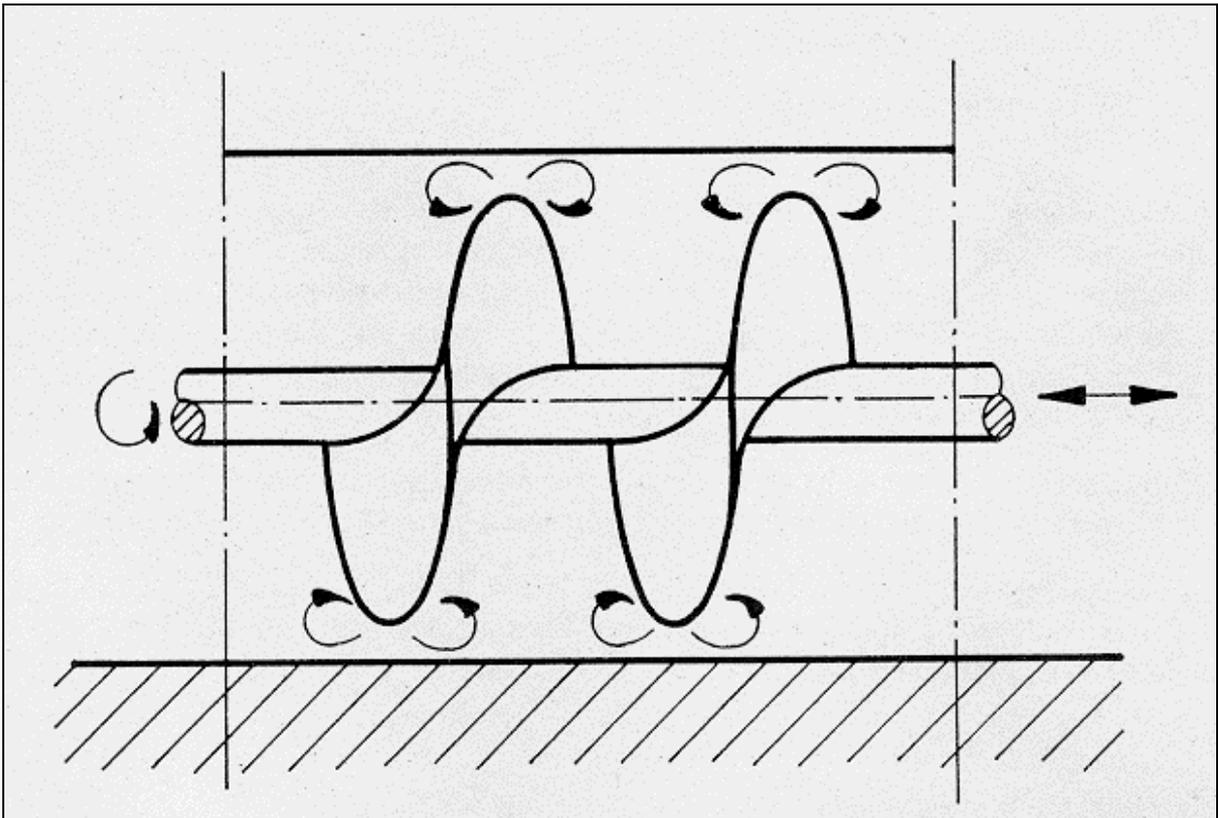


Abb. 3.2-7 Vibrationswaschschnecke

Die Vibration der Transportschnecke erzeugt hohe Scherbeanspruchungen am Schneckenrand. Innerhalb eines Schneckenganges, der eine Art Zelle darstellt, werden intensive Relativbewegungen möglich.

Die Drehzahlen der horizontal eingebauten Agitationsorgane liegen unterhalb 10 min^{-1} . Rührwerke und Attritoren werden mit wesentlich höheren Drehzahlen betrieben. Feststoffgehalt und Schadstoffbindung sowie letztlich die Korngröße bestimmen den zu realisierenden Energieeintrag.

Ist bei trogförmig ausgebildeten Läuterapparaten eine Abtrennung der schadstoffbelasteten Feinstkornsuspension (durch Überlauf) gegeben, so erfolgt in Rührwerken und Attritoren nur der Aufschluß.

Bezüglich der Bezeichnung der Läuterapparate mit rotierenden Einbauten spricht man z. B. auch von Schraubenwäschern, Misch- und Waschschnecken und Anmischbehältern.

Schwingläuterapparate

Bei diesen Apparaten wird die Gutbeanspruchung, d. h. die Gutbewegung mit Hilfe von Schwingungen erzeugt. Diese Schwingungen gehen vom mechanischen bis in den akustischen Bereich hinein. Nach der Schwingungsrichtung relativ zur Waschgutbewegung unterscheidet man zwei Grundtypen von Schwingläuterapparaten.

- Schwingungsrichtung liegt in der Förderrichtung (z. B. bebraustes Schwingsieb, Trogschwingwäscher)
- Schwingungsrichtung liegt quer zur Förderrichtung (z. B. Rohrschwingwäscher)

Die weniger intensiven Läuterapparate der ersten Gruppe sind nur für sehr einfache Waschaufgaben, wie z. B. das Abspülen von kontaminiertem Grobkorn bzw. das Abspülen von Feinstkorn (Hydrozyklonunterlauf), an dem bereits aufgeschlossener Schadstoff haftet, geeignet. Eine intensivere Beanspruchung ist durch die jetzt auch beim Läutern von Böden eingesetzten Spannwellensiebe bzw. Spannwellenbeschleuniger möglich (siehe Kap. 3.2.3.1). Vorzüge besitzen die Rohrschwingwäscher der zweiten Gruppe, deren Einsatz bisher aber nur in der Mineralaufbereitung bekannt ist. Dort haben sie sich aber aufgrund ihrer intensiveren Beanspruchung bewährt.

Eine Ablösung der mechanischen Schwingungen durch Schwingungen im Bereich des Ultraschalls und durch Kavitationsbeanspruchung ist durchaus möglich. Mit Schwingungen im Ultraschallbereich werden sehr intensive Zugbeanspruchungen erzeugt.

Läutern mit Hilfe der Durchströmung von Schüttungen

Das Wirkprinzip der durchströmten Schüttung beim Läutern ist relativ neu. Bedingt durch die geringe Beanspruchung sind dem mechanischen Aufschluß Grenzen gesetzt, die nur durch den Einsatz von Extraktions- bzw. Lösungsmitteln überwunden werden können. Die Bodenspülung und der Schadstoffabtransport erfordern einen großen Wasservolumenstrom bei sehr geringer Schüttdichte.

Sonderbauarten

Sonderentwicklungen bezüglich der Apparatechnik zielen darauf ab, die Prallbeanspruchung zum Aufschluß besonders fester Verkrustungen zu nutzen. Hierbei steht die Zielstellung, eine möglichst hohe Beschleunigung der Bodenpartikel zu erreichen.

Beim **Zentrifugalprallapparat** wird der Boden (siehe Abb. 3.2-8) einem rotierenden Streuteller aufgegeben und durch die Zentrifugalkräfte gegen einen Prallring geschleudert, wo es zu einem Aufschluß der Agglomerate und Verkrustungen kommt.

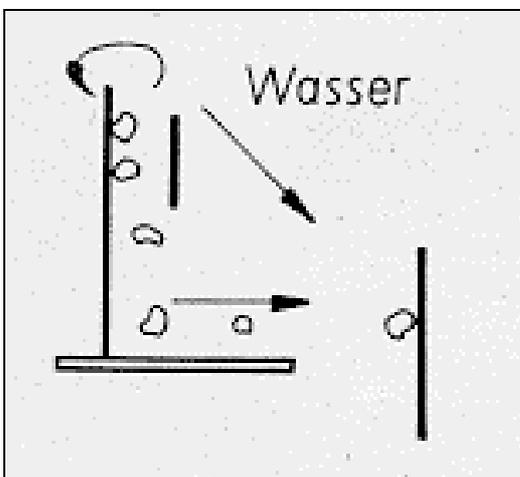


Abb. 3.2-8 Zentrifugalprallapparat

Im **Hochdruckstrahlapparat** tritt Wasser mit sehr hohem Druck (bis 300 bar) aus einem Düsenkranz aus und schießt kegelförmig (der Winkel des Kegels kann variiert werden) in einem Punkt zusammen. Abb. 3.2-9 zeigt diesen Vorgang schematisch.

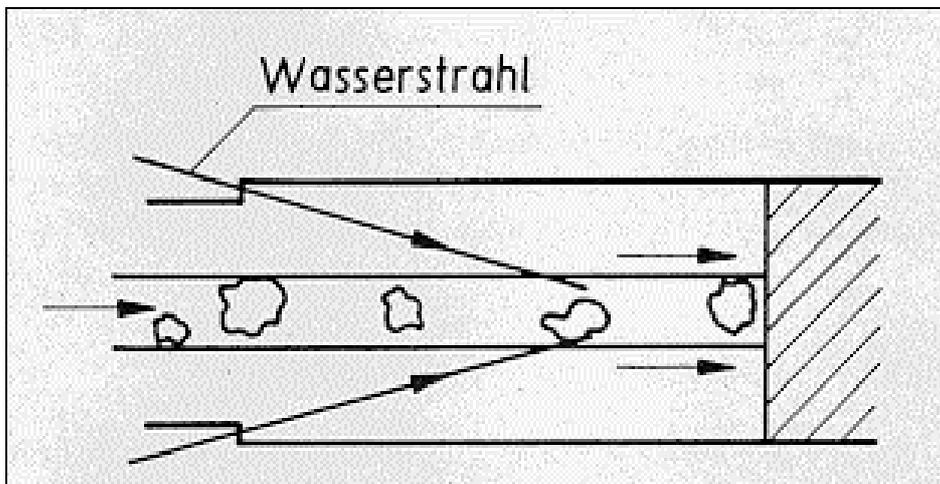


Abb. 3.2-9 Hochdruckstrahlapparat

Der Boden wird durch diese Hochgeschwindigkeitsstrahlen (Geschwindigkeit bis zu 900 km/h) hindurchgesaugt. Dabei kommt es zu einer intensiven mechanischen Beanspruchung durch Strahlerturbulenz und durch den Aufprall auf die Prallplatte am Ende des Strahlrohres. Als problematisch erweist sich bei dieser Apparatur der sehr hohe Verschleiß. Da im Strahlrohr Unterdruck herrscht, wird Luft angesaugt und somit auch ein Strippeffekt erreicht. Beim Strippen werden leichtflüchtige Schadstoffe in die Gasphase überführt und abgesaugt (siehe Kap. 3.4).

3.2.2.4 Das Dispersionsmittel

Die chemischen und physiko-chemischen Vorgänge des Läuterns werden durch die Art des Dispersionsmittels bestimmt. Der mechanische Aufschluß kann somit unterstützt werden. Man unterscheidet Läutern in

- Wasser
- Wasser mit Tensiden als Hilfstoff
- Wasser mit Chemikalien zur Laugung (siehe Kap. 3.4)
- Wasser mit organischen Lösungsmitteln.

Beim Läutern nur mit **Wasser** werden die Schadstoffe im allgemeinen nicht aufgelöst, sondern lediglich von der Partikeloberfläche abgelöst. Der ausschließlich mechanische Aufschluß erfordert hohe Energieeinträge. Der Einsatz von Wasser als Läutermedium ist aber ökologisch unbedenklich.

Wasserlösliche Tenside spielen unter den chemischen Hilfsstoffen eine besondere Rolle. Sie werden für das Waschen kohlenwasserstoffhaltiger Verunreinigungen angewendet. Tenside sind waschaktive Substanzen, die die Grenzflächenspannung des Wassers herabsetzen und die Emulgierung der Kohlenwasserstoffe fördern.

Die komplexen Wirkmechanismen der tensidischen Waschmittel erfordern die Reagensabstimmung für jeden konkreten Einsatzfall. Diesbezüglich gibt es bereits spezielle Waschmittel für das Bodenwaschen. Zu beachten ist, daß derartige Waschmittel nicht schäumen sollen.

Tenside sind nicht regenerierbar. Die erforderliche Tensidmenge steigt mit zunehmendem Feinkornanteil des Bodens. Als schwierig gestaltet sich die Abtrennung der Kohlenwasserstoff-Emulsionen aus dem Waschwasser, da ein Dreiphasengemisch vorliegt.

Bei der Wahl des **chemischen Aufschlußmittels** muß auch der Bodencharakter berücksichtigt werden. Für eine karbonatische Bodensubstanz ist die Anwendung von Säuren auszuschließen, weil sich der Boden selbst auflösen würde.

Organische Lösungsmittel sind bisher für die Bodenreinigung im Labormaßstab getestet worden. Mit diesen Mitteln wird es z. B. möglich, schwer aufschließbare PAKs aufzulösen. Wegen hoher Kosten und schwieriger Handhabung dürften der Anwendung dieser Mittel im industriellen Maßstab aber deutliche Grenzen gesetzt sein (BINDER 1991).

3.2.3 Klassierung

Die Aufgabe des **Klassierens** ist es, polydisperse Körnergemische in einzelne Korngrößenbereiche aufzugliedern. Die zum Erreichen dieses Prozeßzieles möglichen Wirkprinzipien lassen sich in zwei Gruppen - Siebklassieren und Stromklassieren - aufteilen. Definitionsgemäß liegen nach dem Klassierprozeß verschiedene Kornfraktionen mit gleichen chemisch-physikalischen Eigenschaften vor. Voraussetzung dafür ist eine **homogene Verteilung** der Komponenten im Aufgabegut. Dem Klassierprozeß kann bei **nichthomogener Verteilung** im Aufgabegut ein **Sortierprozeß** überlagert sein. Im konkreten Fall ist somit auch ein Sortierprozeß realisierbar durch eine Trennung in zwei oder mehrere Kornfraktionen (Klassieren). Die Zielstellung und verfahrenstechnische Realisierung der Trennprozesse Klassieren und Sortieren kann bei bekannter Verteilung der Inhaltsstoffe im Aufgabegut gezielt aufeinander abgestimmt werden.

Bei den Bodenwaschverfahren wird zum Beispiel durch Abklassieren der groben Fraktionen eine erste Sortierung realisiert. Als weiteres Beispiel ist auch die Klassierung im Hydrozyklon nach dem Läutern eine Sortierung (siehe Kap. 3.3).

3.2.3.1 Siebklassierung

Technologisches Ziel

Die **Siebklassierung** dient der Trennung von Körnerkollektiven in Korngrößenbereiche. Das technologische Ziel der Siebklassierung hängt von den vorgeschalteten Verfahrensstufen (z. B. Zerkleinerung, Naßaufschluß) und den nachfolgenden Prozessen (z. B. Sortierprozesse) ab. Sortierprozesse stellen oft bestimmte Anforderungen an die Breite des zu sortierenden Körnerkollektives. Besonders im Feinkornbereich ist eine enge Vorklassierung eine wichtige Voraussetzung für eine trennscharfe Sortierung. In Hinsicht auf die Bodenwäsche wird die Siebklassierung eingesetzt für

- die Abtrennung (Vorabsiebung) von sperrigen bodenfremden Materialien (wie Wurzelstücke, Bauholz, Metallteile) und monolithischen Stücken (wie Steinstufen), die im Brecher nicht zerkleinbar sind;
- die Ausschleusung schadstoffarmer Kies- und (grober) Sandfraktionen;
- das Waschen und Entwässern von Grobgut der Hydrozyklone und Aufstromklassierer, das Entwässern von Setzmaschinentrennprodukten;
- das Abtrennen von frei aufschwimmenden, feinen und gröberen leichten organischen Bestandteilen (z. B. Kohle- und Teerpartikel, Holz, Fasern) aus Apparaten des Naßaufschlusses und Dichtesortierapparaten (z. B. Aufstromsortierer).

Aus den genannten Zielen geht hervor, daß fast jeder (Sieb-)Klassierprozeß gerade in der Bodenwäsche gleichzeitig auch einen Sortier(Anreicher)prozeß darstellt, da die Schadstoffe i. d. R. in den feineren Körnungen angereichert sind, aber auch in gröberen (organischen) Partikeln angereichert sein können.

Definitionsgemäß ist das Siebklassieren ein mechanischer Trennprozeß nach charakteristischen Längen der Körner (Korngröße).

Prozeßmechanismus

Bei Teilchengrößentrennungen mittels Sieben, d. h. semipermeablen Trennflächen, die geometrisch weitgehend gleichartige Öffnungen besitzen, passieren die feineren Teilchen die Öffnungen, während die gröberen auf dem Siebboden zurückgehalten werden. Mit Hilfe des Siebbodens wird folglich eine entscheidende Beeinflussung des Transportes der zu trennenden Klasse erreicht (Abb. 3.2-10)

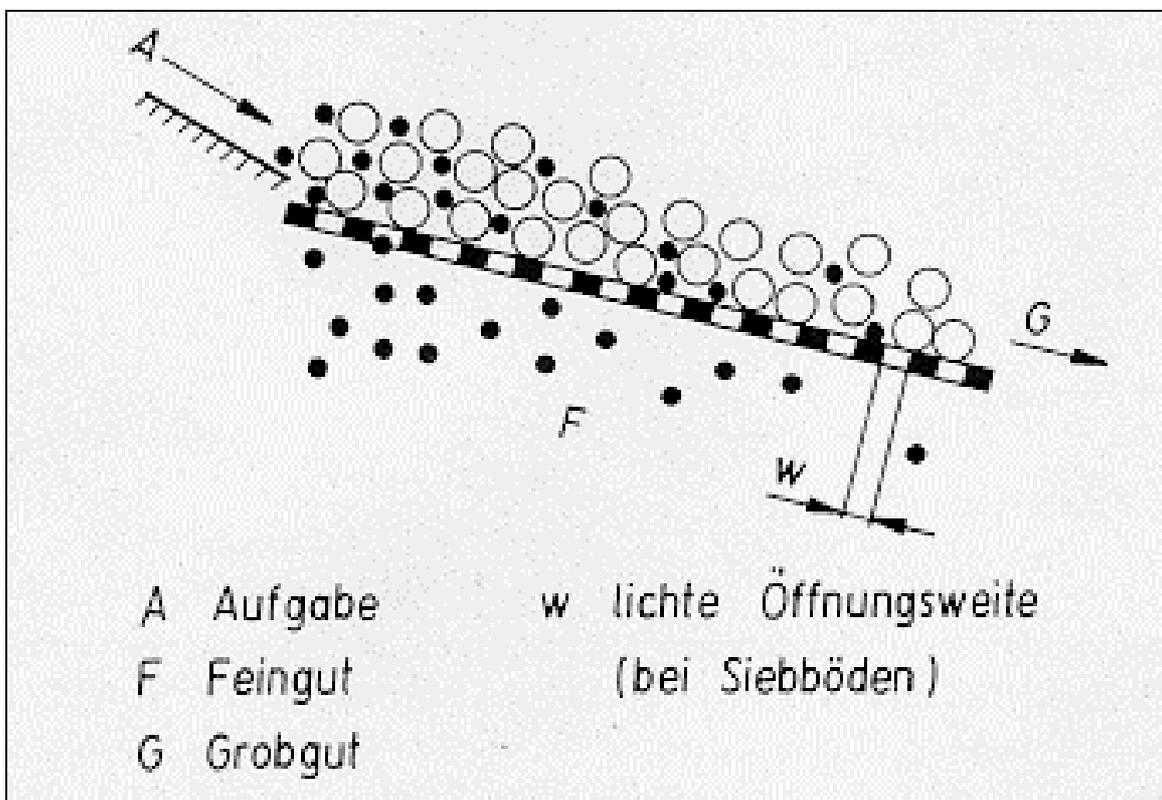


Abb. 3.2-10 Siebprozeß, schematisch

Dabei entstehen zwei **Trennprodukte**:

- Grobgut (Siebüberlauf) und
- Feingut (Siebunterlauf).

Die Absiebung tritt ein, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Das Unterkorn muß sich über den Sieböffnungen einordnen können,
- Es ist eine ausreichend große Kraft notwendig, die das Unterkorn durch die Sieböffnungen treibt.

Durch Auflockern bzw. Umwälzen des Siebgutes sind deshalb die erforderlichen Relativbewegungen des Unterkorns zum Siebboden zu gewährleisten. Die Transportgeschwindigkeit und die Sieblänge bestimmen die für den Sieberfolg mit maßgebende Verweilzeit des Gutes auf dem Siebboden.

Eine technische Siebung stellt keinen vollständigen Trennprozeß dar. Deshalb verbleibt ein gewisser Unterkornanteil im Grobgut und bei Ausbildungsfehlern der Sieböffnungen gelangt auch Überkorn in das Feingut. Diese Anteile werden als **Fehlkorn** bezeichnet. Besondere Schwierigkeiten entstehen durch Korngrößen, die der Siebmaschenweite benachbart sind (Grenzkorn).

Die Siebklassierung kann entweder naß oder trocken erfolgen. Der Einsatz der trockenen oder nassen Siebklassierung ist u. a. abhängig von der Anordnung der Siebklassierung im Gesamtverfahrensgang. Bei allen Naß-Siebprozessen wird das Feingut im wesentlichen vom Spülstrom durch die Sieböffnungen transportiert.

Apparat

Die Aufgaben der Siebmaschine gehen aus der Darstellung des technologischen Zieles und des Prozeßmechanismus hervor.

Vom Gesichtspunkt der Siebgutbewegung auf dem Siebboden kann man die Ausrüstungen für das Siebklassieren in mehrere Gruppen gliedern. Diese sind - von einigen Sonderbauarten abgesehen - in Abb. 3.2-11 dargestellt.

Für einfache Siebprozesse im Grob- und Mittelkornbereich werden teilweise feste Roste oder feste Siebe eingesetzt. Zu den Siebmaschinen zählen Roste, Wälzsiebe, Wurfsiebe und Plansiebe. Stangensizer sind Rostsiebmaschinen (siehe Abb. 3.2-11). Diese zeichnen sich dadurch aus, daß die Elemente des Siebbodens (z. B. Roststangen) relativ zueinander bewegt werden können.

Wurfsiebe sind am weitesten verbreitet. Bei diesen erfolgt der Siebguttransport wurffartig, weil der Siebboden in einer senkrechten Längsebene schwingt. Sie lassen sich nach der Form der Schwingungsbahn weiter untergliedern in Kreisschwinger, Ellipsenschwinger und Linear-schwinger.

Der Siebboden von **Kreisschwingern** muß für den Guttransport genügend geneigt sein. Bei den normalen **Linearschwingern** und **Ellipsenschwingern** ist die Neigung des Siebbodens nicht

erforderlich. Bei den Wurfsieben ist die Ausbildung der Wurfbewegung mitbestimmend für den Durchsatz und den Trennerfolg.

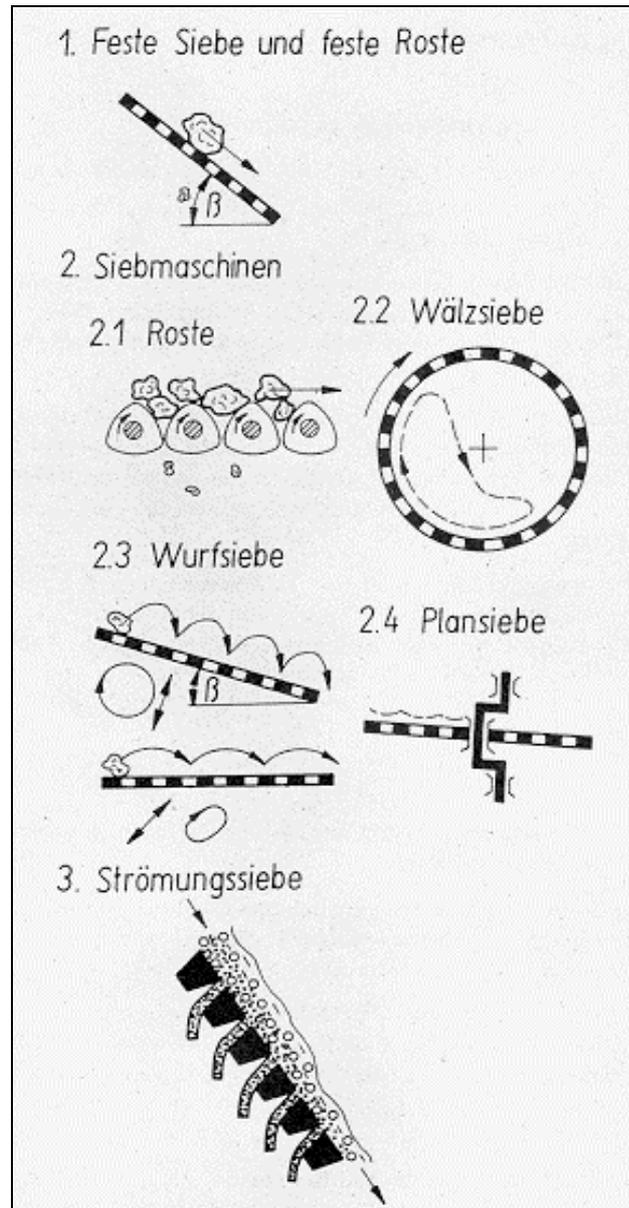


Abb. 3.2-11 Einteilung der Ausrüstungen zum Siebklassieren nach der Siebgutbewegung (SCHUBERT 1989)

Prinzipiell hängt der optimale Klassiereffekt von der richtigen Abstimmung der Siebparameter auf die Aufgabebedingungen ab. Hierzu gehören die Schwingungsparameter (Amplitude, Schwingungszahl), die Siebneigung und die Auswahl des Siebelages hinsichtlich Lochgröße, Lochform und Belagdicke.

Für die Bodenwäsche werden außer den Plansieben sämtliche in der Übersicht genannten Siebe bzw. Siebmaschinen eingesetzt. Im Vergleich zu den Wurfsieben ist allerdings der Einsatz von festen und beweglichen Rosten sowie Wälzsieben (Trommelsieben) auf Ausnahmefälle und Sonderaufgaben beschränkt. Vereinzelt werden auch Bogensiebe (Strömungssiebe) für bestimmte Trennaufgaben vorteilhaft verwendet.

Bei der Auswahl der Siebmaschinen (meist Wurfsiebe) sind die jeweiligen typischen und optimalen Arbeitsbereiche der einzelnen Bauarten und die obengenannten Siebparameter zu berücksichtigen. Die **Siebböden** haben in den letzten Jahren eine beachtliche Entwicklung durchlaufen. Mit der derzeitigen großen Zahl von Siebbodenausführungen können nahezu sämtliche Aufgaben befriedigend gelöst werden. Als Beispiel für Siebböden sollen hier Platten-, Harfen- und Spaltsiebböden genannt werden.

Der zweckmäßigen Wahl des Siebbodens ist, besonders bei schwierigen Feinkornabsiebungen, bei der Siebauswahl besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Die Siebklassierung wird vornehmlich für Trennkorngrößen > 1 mm eingesetzt. In Ausnahmefällen kann auch eine Siebklassierung im technischen Maßstab bis zu einer Trennkorngröße von 0,1 mm erfolgen.

Siebmaschinen werden in jeder (mechanischen) Bodenwäsche verwendet. Siebklassieren ist die einfachste Art der Abtrennung von Kies- und Sandfraktionen (vgl. auch Kap. 3.2.2.3). Ein nicht unbedeutender Vorteil der Siebklassierung besteht darin, daß mehrere technologische Aufgaben in **einem** Siebaggregat durchgeführt werden können, nämlich

- Abtrennen der Hauptmenge des Feingutes mit dem Spülstrom;
- Reinigen (Spülen) des Grobgutes durch Bebrausen oder Besprühen mit (Frisch-)Wasser;
- Entwässerung des (Grob)gutes auf dem letzten Siebabschnitt.

Für die Entwässerung von Sanden werden in Bodenwaschanlagen vorwiegend Schwingentwässerer (Linearschwinger mit hohen Siebkraften), die mit Sprühdüsen bestückt werden können, eingesetzt.

Des Weiteren werden beim Bodenwaschen auch die Spannwellensiebmaschinen (entwickelt für besonders siebschwierige Güter) verwendet (siehe auch Kap. 3.2.2.3).

In Tabelle 3.2-2 werden einige wesentliche für das Bodenwaschen eingesetzte Siebmaschinen und deren Einsatzzweck genannt.

Tabelle 3.2-2 Einsatz von Siebmaschinen in der Bodenwäsche

Einsatz	Apparat
Bodenvorbereitung (Vorabsiebung)	feste oder bewegliche Siebroste oder Siebe, selten Trommelsiebe
Klassieren und Waschen von Sand und Grobsand	Wurfsiebe
Waschen und Entwässern von Feinsanden	Schwingentwässerer
Abtrennen von sperrigen und leichten organischen Bestandteilen	u. a. auch Bogensiebe

3.2.3.2 Hydrozyklonklassierung

Technologisches Ziel

In vielen industriellen Bereichen sind **Hydrozyklone** nicht mehr zu entbehrende Apparate zum Klassieren, Eindicken und Klären. Als Sortierzyklone werden sie außerdem zur Dichtentrennung feiner Körnungen eingesetzt.

Prozeßmechanismus

Die Klassierung im Hydrozyklon erfolgt in **Zentrifugalkraftfeldern**. Zur Kennzeichnung der im Vergleich zum Schwerkraftfeld eintretenden Prozeßintensivierung wird das auf die Schwerebeschleunigung g bezogene Beschleunigungsvielfache z verwendet:

$$z = b_z/g$$

b_z : Zentrifugalbeschleunigung (in $m\ s^{-2}$)

In Abb. 3.2-12 ist ein Hydrozyklon normaler Ausführung dargestellt.

Er besteht aus einem unteren konischen Teil und dem oberen zylindrischen Teil. Die Suspension wird durch die Aufgatedüse (1) mit Druck dem Zykloninneren zugeführt und zu einer äußeren, abwärts gerichteten Umlaufströmung (Außenwirbel) gezwungen. Durch die Drosselwirkung im unteren konischen Teil mit der Unterlaufdüse (2) werden vom Außenwirbel ständig Teile zu einer inneren, aufwärts gerichteten Wirbelströmung (**Innenwirbel**) umgelenkt (Abb. 3.2-13).

Teile des **Außenwirbels**, die in den Hydrozyklonunterteil vordringen, werden weitgehend durch die Unterlaufdüse ausgetragen. Die Teile des Innenwirbels verlassen den Apparat durch die Überlaufdüse (3), auch Wirbelsucher genannt.

Es existiert eine Vielzahl von Modellvorstellungen zur Beschreibung der Klassierwirkung im Hydrozyklon (SCHUBERT 1989).

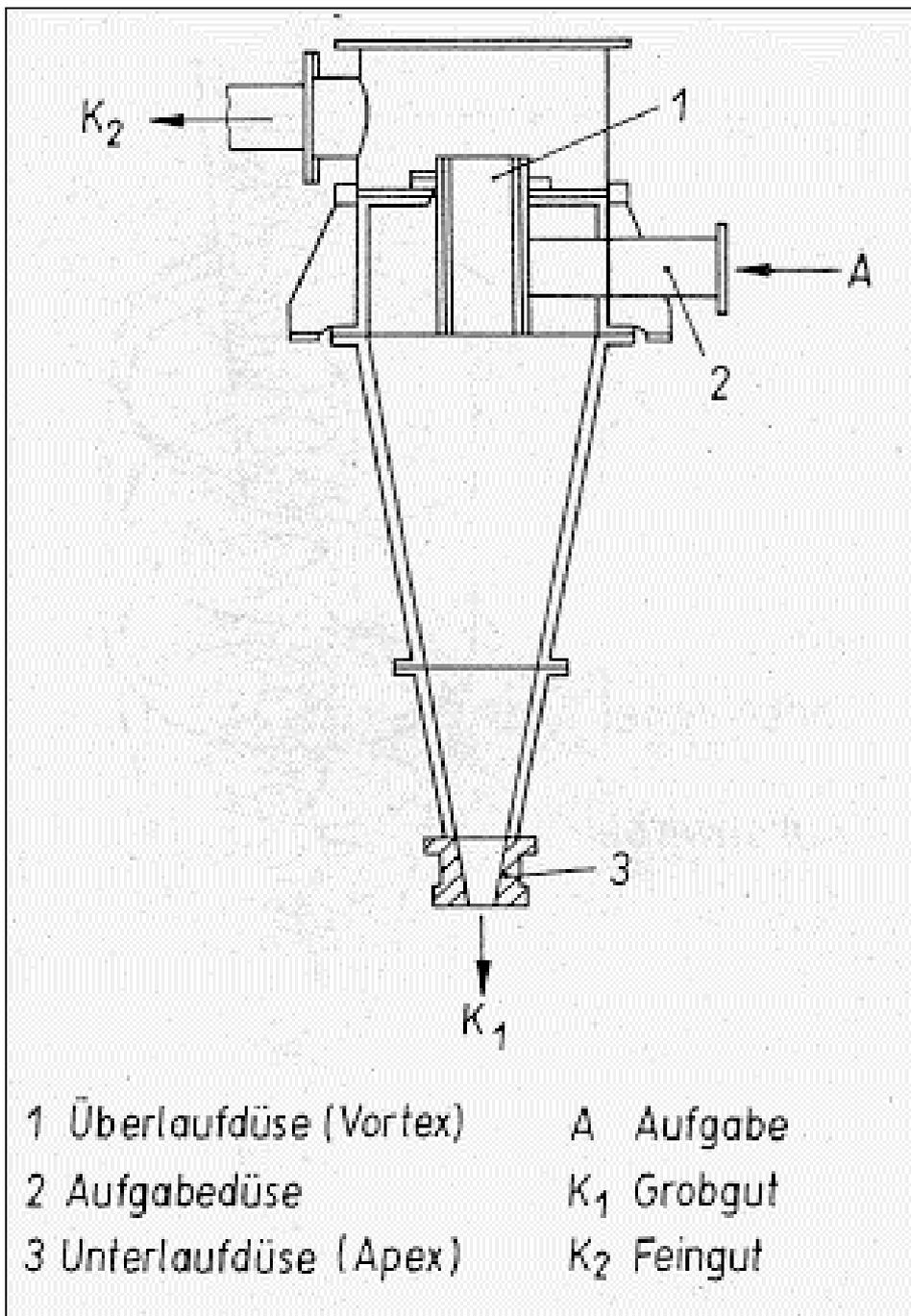


Abb. 3.2-12 Hydrozyklon normaler Bauart (Schauberg Maschinen- und Anlagen-Bau 1991/1)

Von den strömungstechnischen Grundlagen her ist der Hydrozyklon der **Hydrodynamik turbulenter Mehrphasenströmungen** zuzuordnen, d. h. die Turbulenz der Strömung ist prozeßbestimmend.

Diesen physikalischen Vorgängen im Hydrozyklon kommt das Modell der turbulenten Querstromklassierung recht nahe.

Danach existieren zwei unterschiedliche Trennregime, die sogenannte **Dünnstromtrennung** (Schirmaustrag) und die **Dichtstromtrennung** (Strangaustrag) (SCHUBERT 1989).

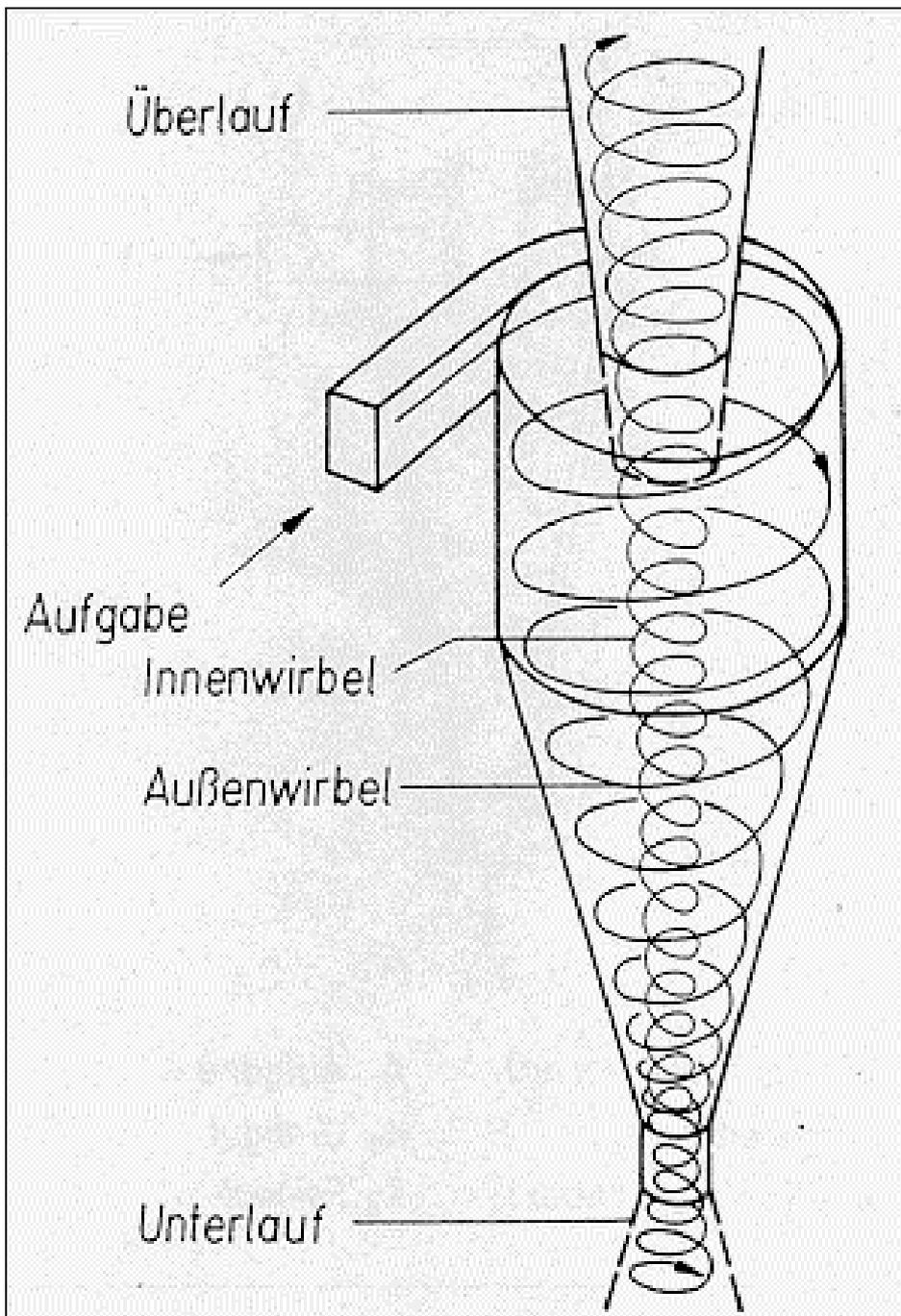


Abb. 3.2-13 Wirbelströmungen im Hydrozyklon (SCHUBERT 1989)

Apparat und Einsatzgebiet

Hydrozyklone nehmen auch beim Klassieren und Waschen von kontaminierten Böden eine wesentliche Stellung ein, da sie den besonderen Gegebenheiten der Bodenaufbereitung entgegenkommen. Mit den Hydrozyklonen sind Trennkorngrößen zwischen 5 bis 300 μm erreichbar (normale Bauart 5 bis 150 μm , Flachbodenzyklone 40 bis 300 μm). Bezogen auf die Bodenklassierung werden vorzugsweise Apparate mit Nenndurchmessern von 40 bis 250 mm eingesetzt.

Die Hydrozyklone stellen bei einer hohen Trennwirkung bezüglich ihrer **konstruktiven Einfachheit** kaum noch zu überbietende Apparate dar. Sie beanspruchen einen **geringen Platzbedarf** und bieten sich aufgrund dessen für Anlagenmodule in stationären und transportablen (Container-)Anlagen an. Bei der Hydrozyklontechnik wird eine konsequente Anwendung des **Baukastensystems** verfolgt. Dadurch ist eine sehr hohe Variabilität der geometrischen Gestaltung gewährleistet, die eine gute Anpassung an die jeweiligen Aufgabebedingungen sichert.

Eine moderne Hydrozyklontechnik garantiert den Erhalt der Einfachheit des Hydrozyklons, gute Kontroll- und Überwachungsmöglichkeiten, eine problemlose Handhabbarkeit, d. h. rasches Auswechseln von Einzelteilen des Hydrozyklons sowie eine strömungstechnisch günstige Gestaltung zur Vermeidung von unerwünschten Turbulenzen.

Durch den Einsatz von **Kunststoffen** (Polyurethan, Polyamid, Vulkollan u. a.) als Hydrozyklonwerkstoff wird die strömungsgerechte Gestaltung, eine hohe Verschleißfestigkeit sowie eine gute Selbstabdichtung der Einzelteile gesichert.

Aufgrund schwankender Stoffeigenschaften der kontaminierten Böden, insbesondere bezüglich der Korngrößenzusammensetzung, des Feststoffgehaltes, der Viskosität und des Anteils organischer Stoffe, aber auch hinsichtlich des Volumenstromes, ergibt sich eine ungleichmäßige Hydrozyklonaufgabe.

Dadurch werden die Trenneigenschaften eines Hydrozyklons beeinflusst. Für bestimmte Probleme sind wirksame technische Lösungen vorhanden. Eine geregelte Teilrezirkulierung des Hydrozyklonoberlaufs ermöglicht einen konstanten Volumenstrom. Schwierigkeiten bereitet wegen der schwankenden Stoffeigenschaften der gleichmäßig hohe Feststoffaustrag im Hydrozyklonunterlauf. Hierzu existieren verschiedene Lösungsvarianten, die sich in der Praxis unterschiedlich durchgesetzt haben. Wenn die Feststoffbetthöhe im Bereich realer Grenzen im Vergleich zum Nenndurchmesser variiert wird, bleibt die Konzentration des Feststoffaustrages auch bei den schwankenden Zulaufbedingungen nahezu konstant, wobei Verstopfungen der Unterlaufdüse verhindert werden (CBC-Hydrozyklonprinzip, **Flachbodenhydrozyklon**, Abb. 3.2-14).

Dieses Prinzip eröffnet Möglichkeiten zur Erweiterung des Trennbereichs zu gröberen Trennschnitten hin.

Das Ziel der Bemühungen weiterhin ist also zweifelsohne ein **Automatisieren der Unterlaufdüsenverstellung**. Hierzu sind eine Vielzahl von apparatetechnischen Ausführungen bekannt, wie beispielsweise eine manuell betätigte, hülsenförmige Unterlaufdüse, ein manuell oder fernbetätigter, quetschbarer Gummiring als Unterlaufdüse.

Mit einem Ausflußviskosimeter erhält man Stellkräfte, die eine Düsenverstellung unmittelbar bewerkstelligen.

Eine weitere Möglichkeit zum Erreichen eines gleichmäßig hohen Feststoffaustrages ist mit einer Unterlauftasche, die sich an dem Hydrozyklonunterlauf anschließt, gegeben (Abb. 3.2-15).

Hierbei mündet der Hydrozyklonaustrag in die flexible Unterlaufftasche aus Kautschuk, die sich entsprechend der Wirkung des Luftkernes selbsttätig öffnet und schließt. Bei niedrigen Feststoffkonzentrationen des Aufgabestromes arbeitet der Hydrozyklon im Dünnstrombereich.

Es kommt zu einem Durchschlagen des Luftkernes, in dem Unterdruck herrscht, bis zur Unterlaufdüse. Mittels Luftheberwirkung des Hydrozyklonüberlaufs wird im Luftkern ein Vakuum erzeugt. Dadurch kann das Durchbrechen der Dünnrübe verhindert werden und es wird Feststoff im Unterlaufbereich angestaut. Diese Arbeitsweise führt bei einem kontinuierlichen Betrieb zu einer Dichtstromklassierung. Der Dichtstrombetrieb wird dabei mit einem relativ großen Durchmesser der Unterlaufdüse erreicht. Eine Verstopfungsgefahr wird weitgehend verhindert.

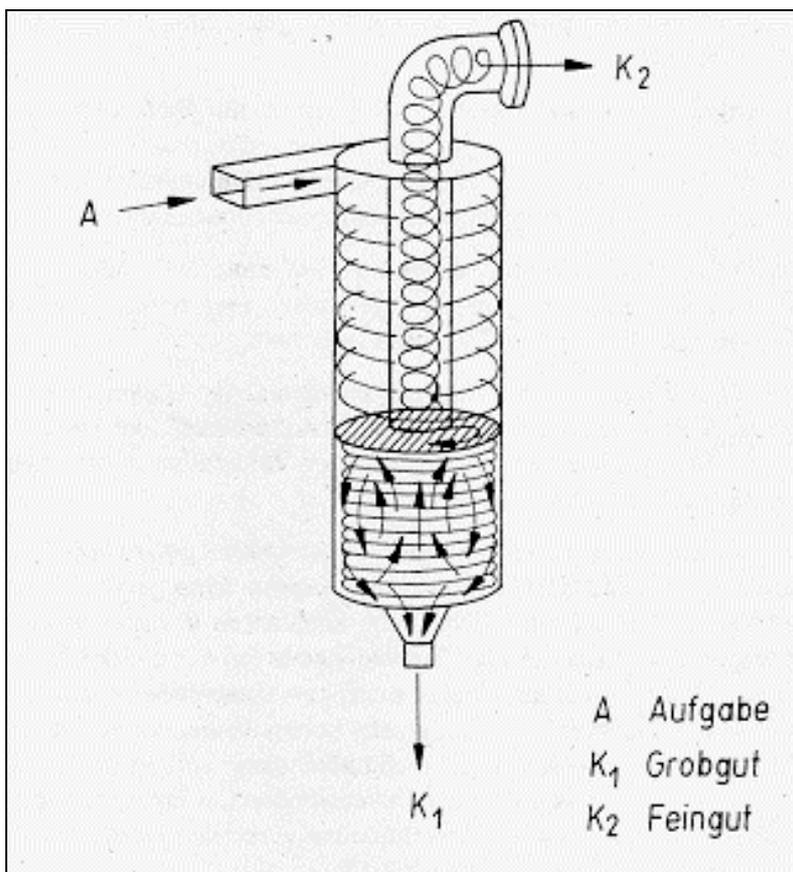


Abb. 3.2-14 Flachbodenhydrozyklon, Bauart Amberger Kaolinwerke (TRAWINSKI 1981)

Es ist zu erwarten, daß bei einer Feststoffabtrennung Hydrozyklone mit freiem Unterlaufaustritt ein günstigeres Trennverhalten aufweisen, als solche mit Unterlauffaschen. Der Feinkornanteil in der groben Fraktion ist bei Hydrozyklonen mit einer Unterlaufftasche zwar geringer als bei Apparaten ohne diese Unterlaufgestaltung, dafür wird jedoch relativ viel Grobkorn (Spritzkorn) im Oberlauf ausgetragen.

Festzustellen ist, daß eine alleinige oder nur einstufige Klassierung im Hydrozyklon oft nicht den gewünschten Trennerfolg bringt. Durch mehrstufige (Nach-)Klassierung der Hydrozyklonunter- oder -überläufe und/oder eine Kombination der verfahrenstechnischen Grundoperationen Klassieren und Sortieren (z. B. Aufstromsortierer) wird das Ergebnis verbessert (siehe Kap. 3.3).

Nur selten tritt der Fall auf, daß in technischen Anlagen ein Hydrozyklon für die Bewältigung des Durchsatzes ausreicht. Es erfolgt eine **Parallelschaltung von Hydrozyklonen**, wobei einmal der sog. **Batterieverteiler**, bei dem jeder Einzelhydrozyklon zugänglich und abschaltbar ist, Anwendung findet. Die andere Möglichkeit stellt der **Multizyklon** mit je einer Druckkammer für die Hydrozyklonaufgabe und Überläufe der Einzelapparate dar.

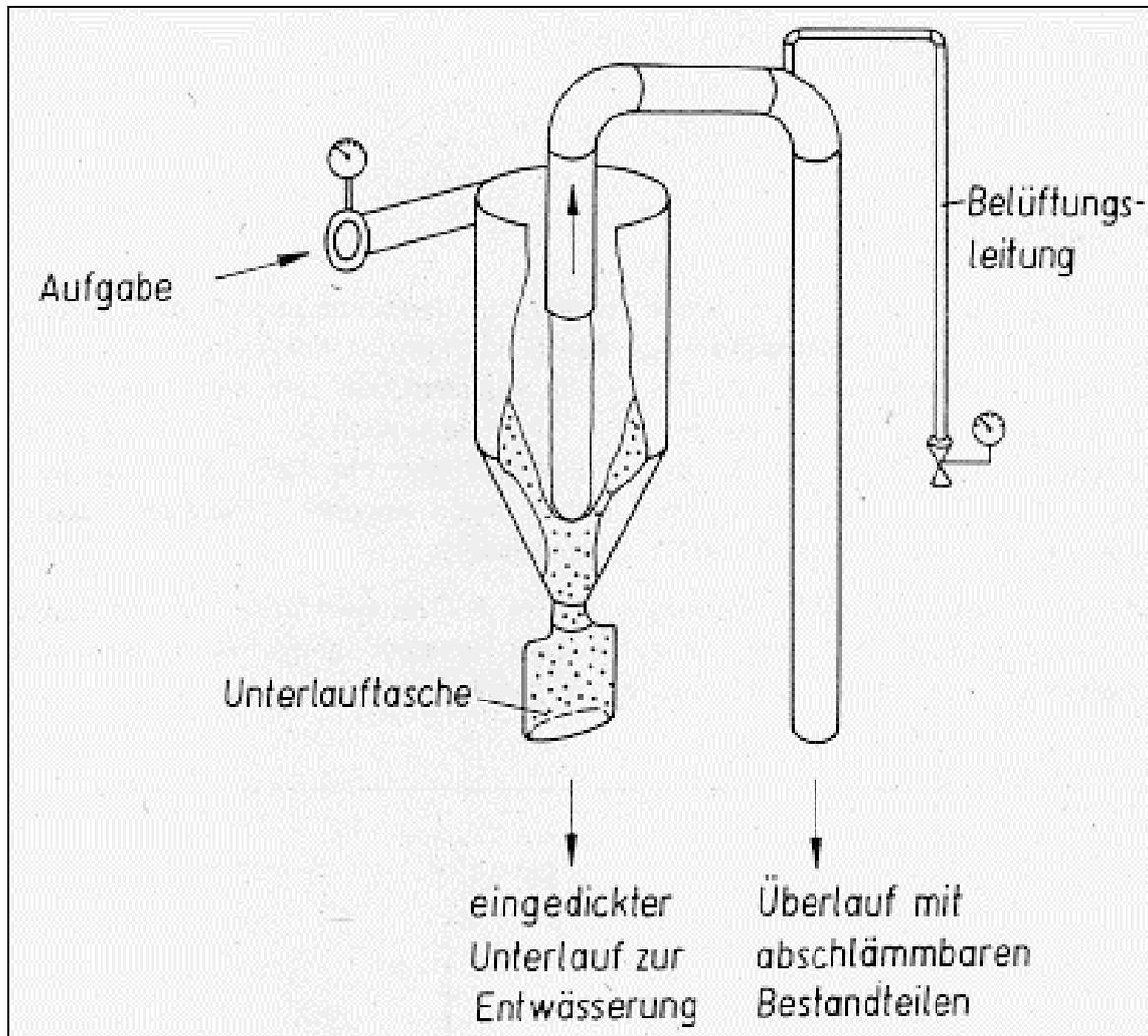


Abb. 3.2-15 Hydrozyklon mit Unterlaufftasche Bauart Schauenburg Maschinen- und Anlagenbau (NEESSE und GROHS 1991/1)

Diese Anordnung ist sehr platzsparend und wird für Hydrozyklone kleiner Nennweiten (bis ca. 50 mm) angewendet. Da das fehlerhafte Arbeiten eines Hydrozyklones zu erheblichen Fehlasträngen führt, ist einer Vorabscheidung (offene Siebe) besonderes Augenmerk zu widmen.

3.2.3.3 Aufstromklassierung/-sortierung

Technologisches Ziel

Durch Einsatz von Aufstromklassierern bzw. -sortierern beim Bodenwaschen im Verfahrensschritt Schadstoffabtrennung soll

- das Nachreinigen bzw. Nachwaschen des Grobgutaustrages der Hydrozyklone zur Abtrennung von mitgerissenen kontaminierten Feinpartikeln und belastetem Wasser bei stark kontaminierten Böden,
- die Abtrennung (größerer) organischer und anderer spezifisch leichter kontaminierter Substanzen (Holz, Wurzeln, Torf)

erreicht werden

Prozeßmechanismus

Das Trennprinzip bei der Aufstromklassierung/Aufstromsortierung beruht auf der Ausnutzung unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeiten (Endfallgeschwindigkeiten), die Körner in einem Fluid unter Wirkung verschiedener Kräfte erreichen, weil diese von der Korngröße, Dichte und von der Kornform abhängen. Man erhält dabei nach der "Gleichfälligkeit" klassierte bzw. sortierte Trennprodukte, sog. "**Gleichfälligkeitsklassen**". Diese Klassierung entspricht nur annähernd derjenigen auf Sieben, wenn sowohl die Dichte wie auch die Kornform für die verschieden großen Körner gleich sind.

Bei der Aufstromklassierung/-sortierung entspricht die Trennwirkung einer **Gegenstromklassierung**, da sich das Grobgut entgegen der Hauptströmungsrichtung bewegt. Die Trennwirkung einer Gegenstromklassierung zeigt Abb. 3.2-16.

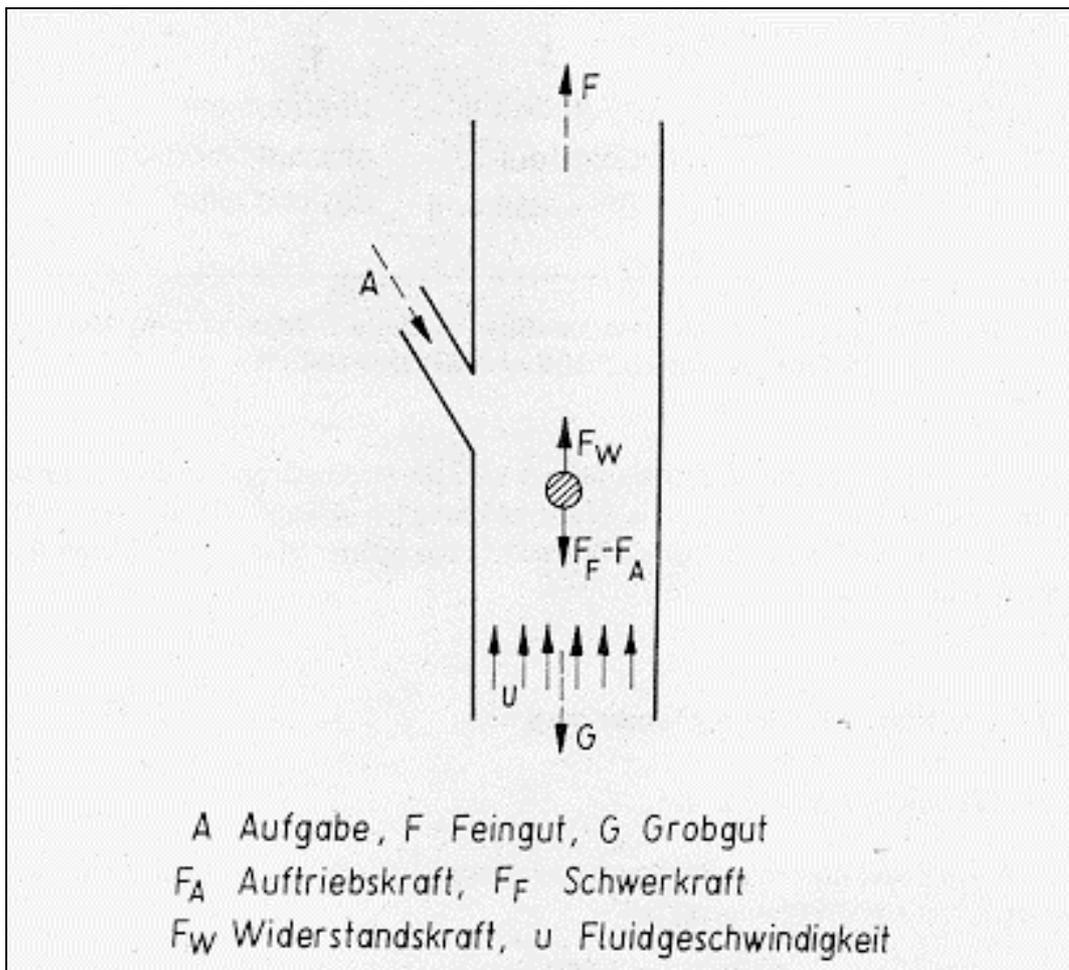


Abb. 3.2-16 Trennwirkung einer Gegenstromklassierung

Im Klassierraum strömt das Fluid mit der Geschwindigkeit u entgegengesetzt zur Richtung des Kraftfeldes. Die Trennkorngröße ist abhängig von der Fluidgeschwindigkeit, die durch Variieren der Aufstromwassermenge definiert geregelt werden kann.

Apparat

Aufstromklassierer

Aufstromklassierer nach dem Dichtstromprinzip haben in neuerer Zeit eine beachtliche Entwicklung durchlaufen. Außer dem Wirbelschichtklassierer existieren eine Reihe ähnlicher Aufstrom(Einkammer)klassierer. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Zuführung des Aufstromwassers und der Art des Grobgutaustrages.

Abb. 3.2-17 zeigt die schematische Darstellung eines Aufstromklassierers.

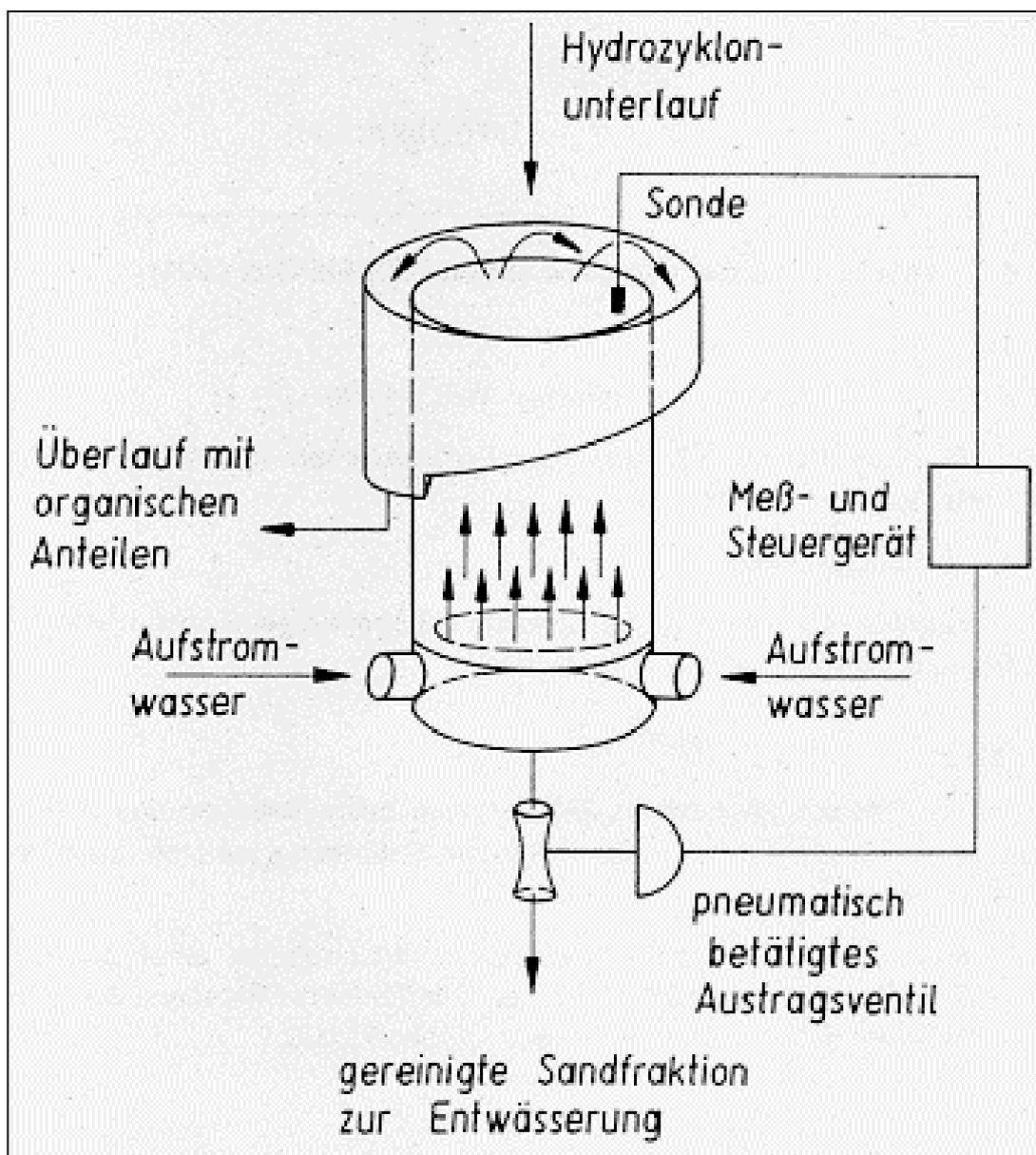


Abb. 3.2-17 Aufstromklassierer, schematisch Bauart Schauenburg Maschinen- und Anlagenbau (NEESSE und GROHS 1991)

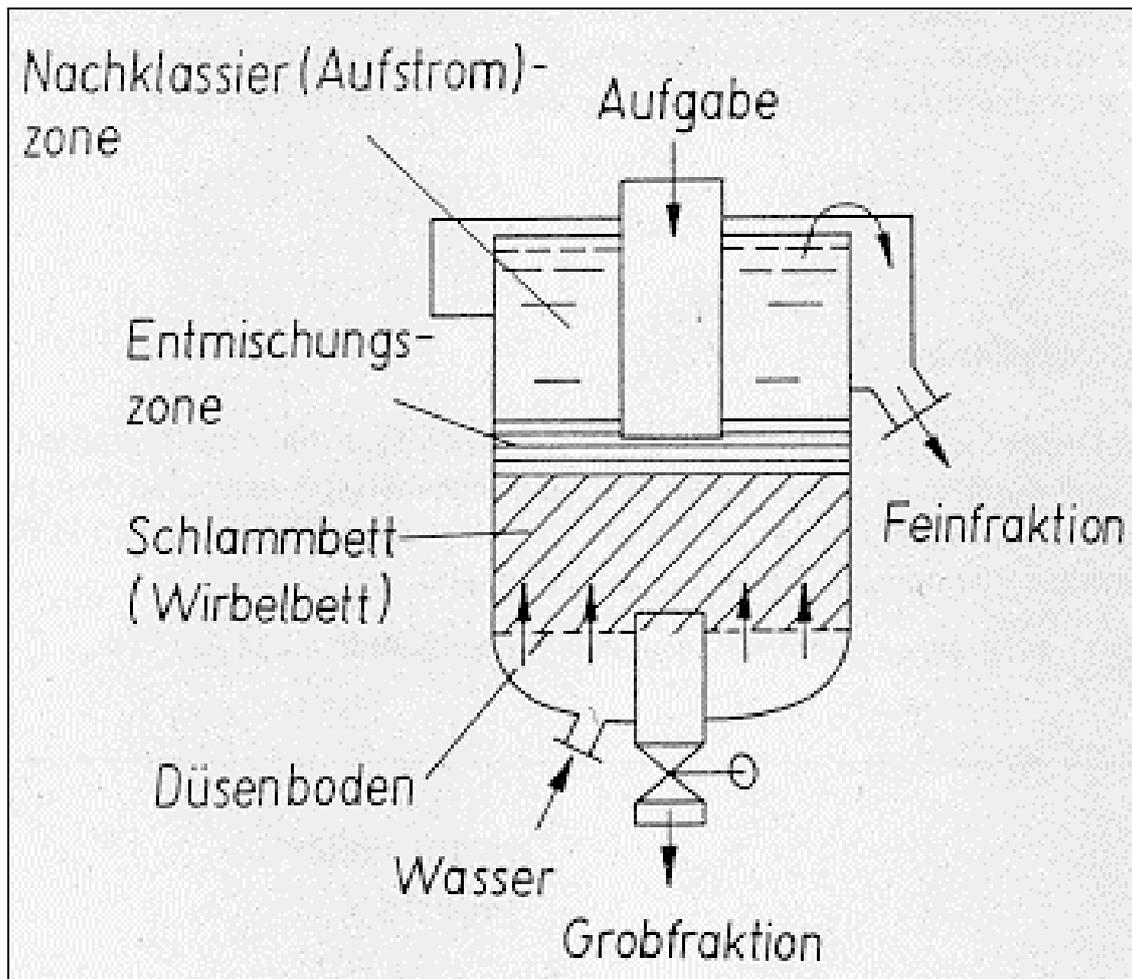


Abb. 3.2-18 Aufstromklassierer, schematisch (HOFFMANN 1991)

Es werden folgende drei Zonen unterschieden (Abb. 3.2-18):

1. Die Wirbelbettzone mit geringem Porenvolumen und höherer Wassergeschwindigkeit als in der
2. Entmischungszone.
3. Die Nachklassier- bzw. Aufstromzone mit überwiegend nach oben gerichteter Strömung des Wassers und der Partikel.

Vorteilhaft ist

- daß die Diffusoröffnungen im Düsenboden beim Abstellen des Aufstromwassers selbstständig schließen, so daß keine Entleerung bei Unterbrechung erforderlich ist.
- der quasikontinuierlich pulsierende Grobgutaustrag mit einer pneumatischen Betätigung von Gummiquetschventilen. Hierfür ist die Messung der Wirbelhöhe im Klassierer mittels Sonde erforderlich (Abb. 3.2-17).

Aufstromsortierer

Aufstromklassierer lassen sich durch wenige strömungs-, meß- und regeltechnische Einbauten in einen Sortierer modifizieren. Der Sortiereffekt wird dabei durch die im Vergleich zu Wasser erhöhte Suspensionsdichte im Wirbelbett erreicht.

Weitere wesentliche Unterschiede zum Aufstromklassierer sind

- die höhere Wirbelbettzone
- die erhöhte Aufstromgeschwindigkeit im Oberteil, die durch Reduzierung der Klassierfläche (ringförmige Einbauten) erreicht wird (Abb. 3.2-19).

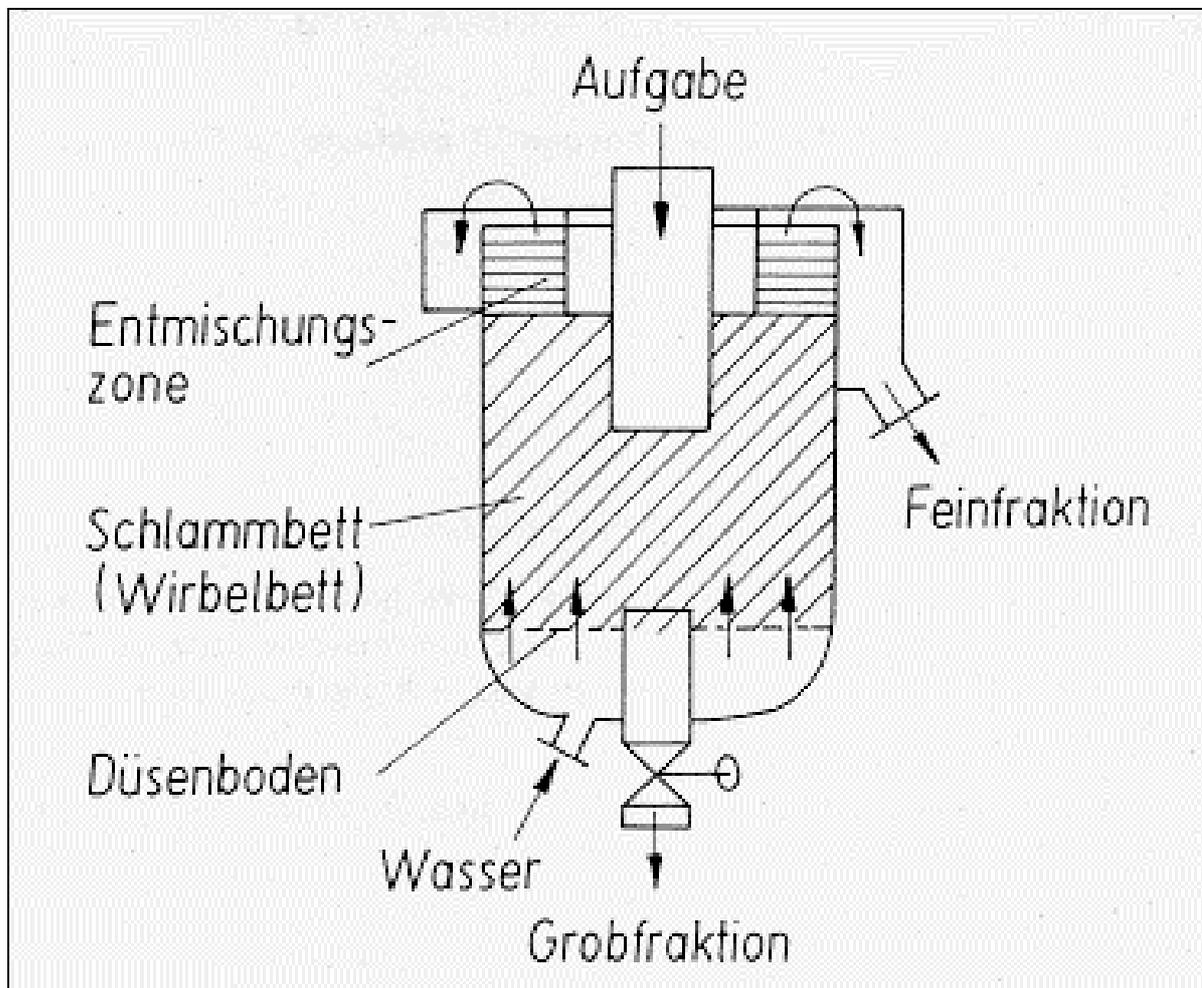


Abb. 3.2-19 Aufstromsortierer, schematisch (HOFFMANN 1991)

Aufstromklassierer/-sortierer nach dem Dichtstromprinzip haben in der Bodenaufbereitung einen festen Platz. Sie werden, wie bereits in der technologischen Zielstellung erwähnt, in Kombination mit Hydrozyklonen im Verfahrensschritt Schadstoffabtrennung eingesetzt. Die Apparatkombinationen werden vorzugsweise in Containerbauweise ausgeführt (z. B. Hydrozyklon, Aufstromklassierer und Schwingentwässerer, siehe Kap. 3.3).

3.2.4 Sortierverfahren

Mit Hilfe von **Sortierprozessen** werden Körnerkollektive, die eine Mischung darstellen, nach **stofflichen Gesichtspunkten** getrennt. Dabei bedient man sich eines Trennmerkmals bezüglich dessen sich die trennenden Bestandteile genügend unterscheiden. Als solche kommen z. B. die **Dichte**, die **Grenzflächeneigenschaften** (Benetzbarkeit) und die **magnetischen Eigenschaften** in Betracht.

3.2.4.1 Dichtesortierung

Zu den **Dichtesortierprozessen**, die in der Bodenwäsche eingesetzt werden, zählen die Setzarbeit, die Rinnen- und Herdsortierung sowie die Aufstromsortierung. Letztere wurde bereits im Kap. 3.2.3.3 behandelt.

Die genannten Prozesse stellen **definitionsgemäß** mechanische Trennprozesse nach der Dichte dar.

Setzarbeit

Technologisches Ziel

Durch Einsatz der Setzarbeit in der Bodenwäsche sollen

- kontaminierte, grob- und mittelkörnige, leichte (meist organische) Bestandteile wie Kohle, Holz u. a. ($< 1,8 \text{ t/m}^3$) und kontaminierte schwere Bestandteile ($> 2,8 \text{ t/m}^3$), die oft stark kontaminiert sind, aus den gröberen Bodenfraktionen (Kies) sowie
- poröse Stoffe (Leichtstoffe), die im Innern trotz Oberflächenreinigung noch Kontaminationen enthalten, abgetrennt werden.

Prozeßmechanismus

Es erfolgt eine Schichtung nach der Dichte in einer pulsierenden, aufgelockerten Kornschüttung. In der durch einen aufwärtsgerichteten Fluidstrom gelockerten Kornschicht ordnen sich die spezifisch leichteren Körner über den spezifisch schwereren ein. Dabei hat sich eine periodische Fluidisierung mittels pulsierenden Aufstroms als am wirkungsvollsten erwiesen.

Abb. 3.2-20 zeigt das Wirkprinzip.

Im Ergebnis des Schichtungsvorganges (Entmischung) entsteht eine Schichtenfolge, in der die Korndichten von oben nach unten abnehmen und die mit Hilfe von Austragsvorrichtungen in Produkte verschiedener Dichte bzw. Qualität zerlegt werden kann.

Den Setzvorgang beeinflussende Parameter sind außer denen, die vom Aufgabegut abhängen (Dichte- und Körnungsaufbau), insbesondere die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnisse des Fluids (Hub, Hubzahl, Zykluscharakter), die Setzbetthöhe, die Aufstrom- und Transportwassermenge sowie der spezifische Durchsatz.

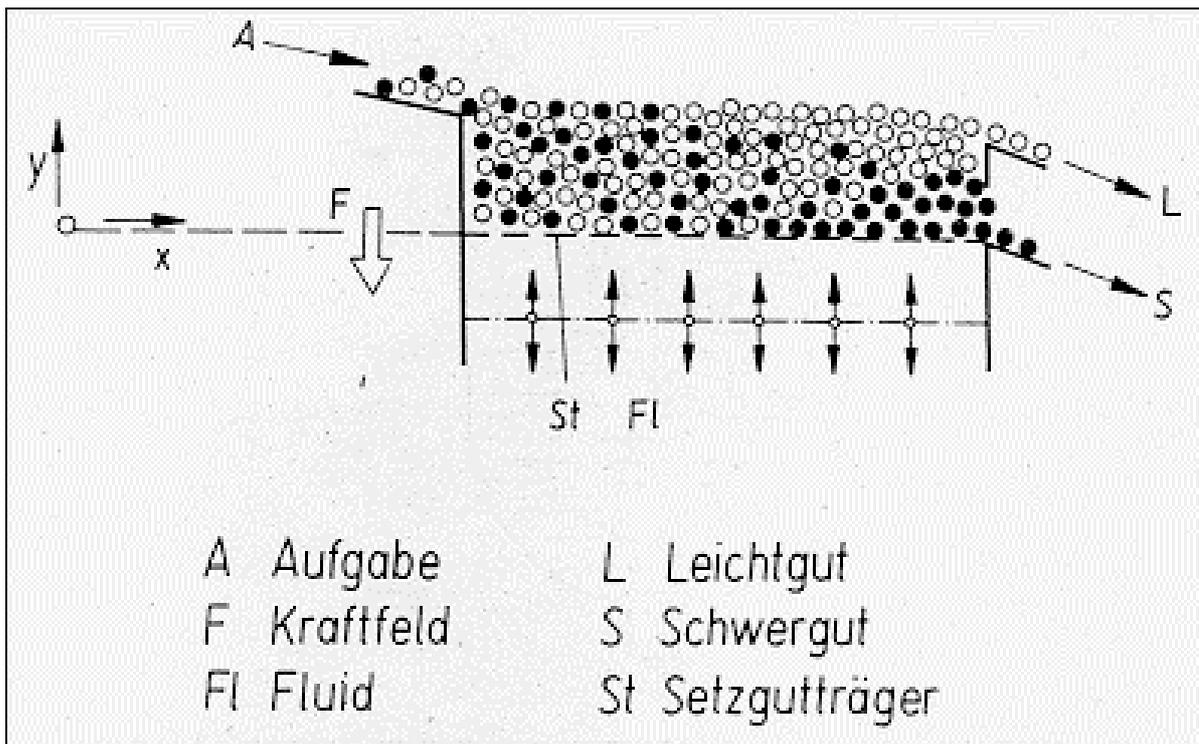


Abb. 3.2-20 Wirkprinzip der Sortierung im pulsierenden Aufstrom (Setzen)

Apparat

Die Aufgabe der Setzmaschine besteht in der

- Schichtenbildung und in der
- Schichtentrennung

In der Bodenaufbereitung werden moderne **luftgesteuerte Setzmaschinen** eingesetzt, die aus der Steinkohlenaufbereitung kommen und dort bereits in bezug auf Kontrolle und Automatisierung der Prozeßführung ein technisch hohes Niveau erreicht haben. Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist noch nicht abgeschlossen. Luftgesteuerte Setzmaschinen haben den Vorteil, daß sich Hub und Hubzahl (in gewissen Bereichen) stufenlos regeln lassen und gegebenenfalls auch der Zykluscharakter veränderbar ist.

Abb. 3.2-21 zeigt schematisch die Wirkungsweise einer luftgesteuerten Setzmaschine.

Die **Grobkornsetzmaschinen** sortieren Material im Körnungsbereich 5 bis 100 mm. Sie arbeiten als sog. Austragssetzmaschinen mit Abzug des Schwergutes oberhalb des Setzgutträgers.

Dagegen wandert beim **Feinkornsetzen** (etwa < 3 bis 5 mm) das Schwergut durch ein auf dem Setzgutträger aufgebrachtes Bettgut hindurch und fällt schließlich ins Unterfaß. Diese Verfahrensweise nennt man Durch- oder Bettsetzen.

Die **automatische Austragsregelung** mittels Schwimmer und entsprechender Regler gehört zur Standardausrüstung von Setzmaschinen. Bei modernen Austragssystemen werden die Schwimmersignale elektronisch verarbeitet. Damit wird eine exakte verzögerungsfreie Ar-

beitsweise der Austragsregelung erreicht. Als Austragsorgane werden eingesetzt: Schwenkbetten, Bodenschieberausträge oder Zellenradschleusen.

Abb. 3.2-22 zeigt die Darstellung des Zellenradaustrages einer Setzmaschine

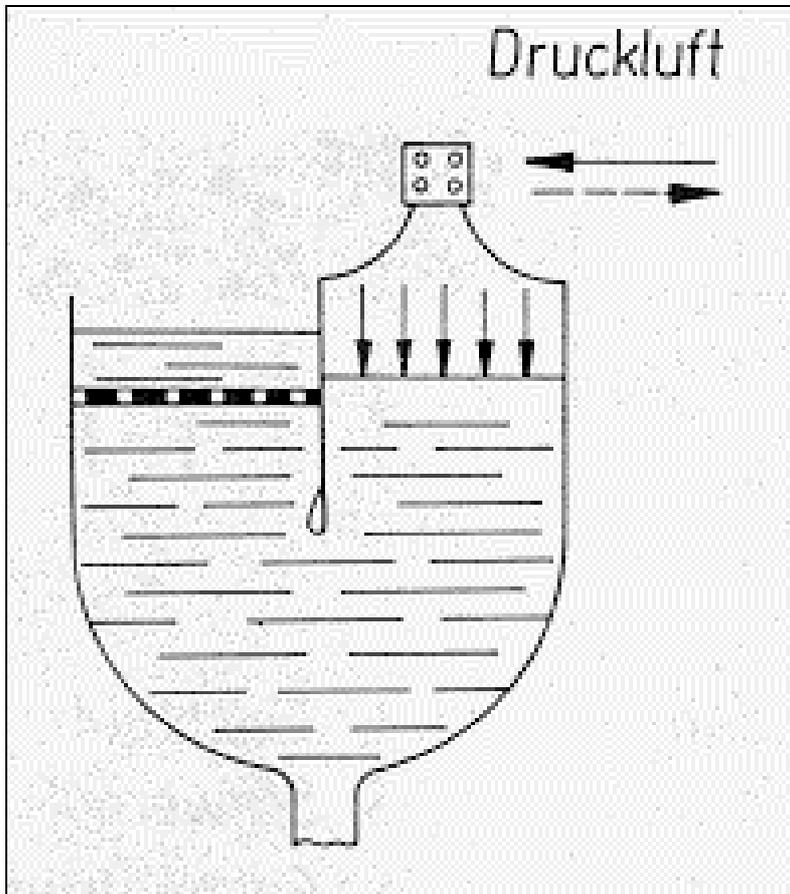


Abb. 3.2-21 Luftgesteuerte Setzmaschine, schematisch

Moderne luftgepulste Setzmaschinen sind seitengepulst, weil dieses System physikalisch stabil arbeitet und eine einwandfreie Setzhubausbildung bei minimalem Energieverbrauch gewährleistet.

Gute Ergebnisse bei der Abtrennung von Holz, Kohle, Koks und Schlacken mit diesem Apparat haben nicht zuletzt dazu beigetragen, daß sich in der Bodenwäsche die Sortierung mittels Setzmaschinen zum Standardverfahren entwickelte (JUNGMANN und NEUMANN 1991).

Bei einer Entscheidung zwischen **Schwertrübesortierung** oder Setzarbeit in der Bodenwäsche sollte der Setzarbeit der Vorzug gegeben werden. Bei der Schwertrübesortierung wird das zu trennende Gut einem Trennmedium (Schwertrübe) aufgegeben, dessen Dichte zwischen den Dichten der spezifisch leichtesten und spezifisch schwersten Bestandteile der Aufgabe liegt. In diesem Medium sinken die spezifisch schweren Körner ab, und die spezifisch leichteren schwimmen auf. Als Faustregel gilt, daß die Trennschärfe der Schwertrübescheidung etwas besser ist, daß aber die Kosten der Setzarbeit deutlich geringer sind, vor allem wegen des Wegfalls der Schwerstoffbeschaffungs- und Regenerierungskosten.

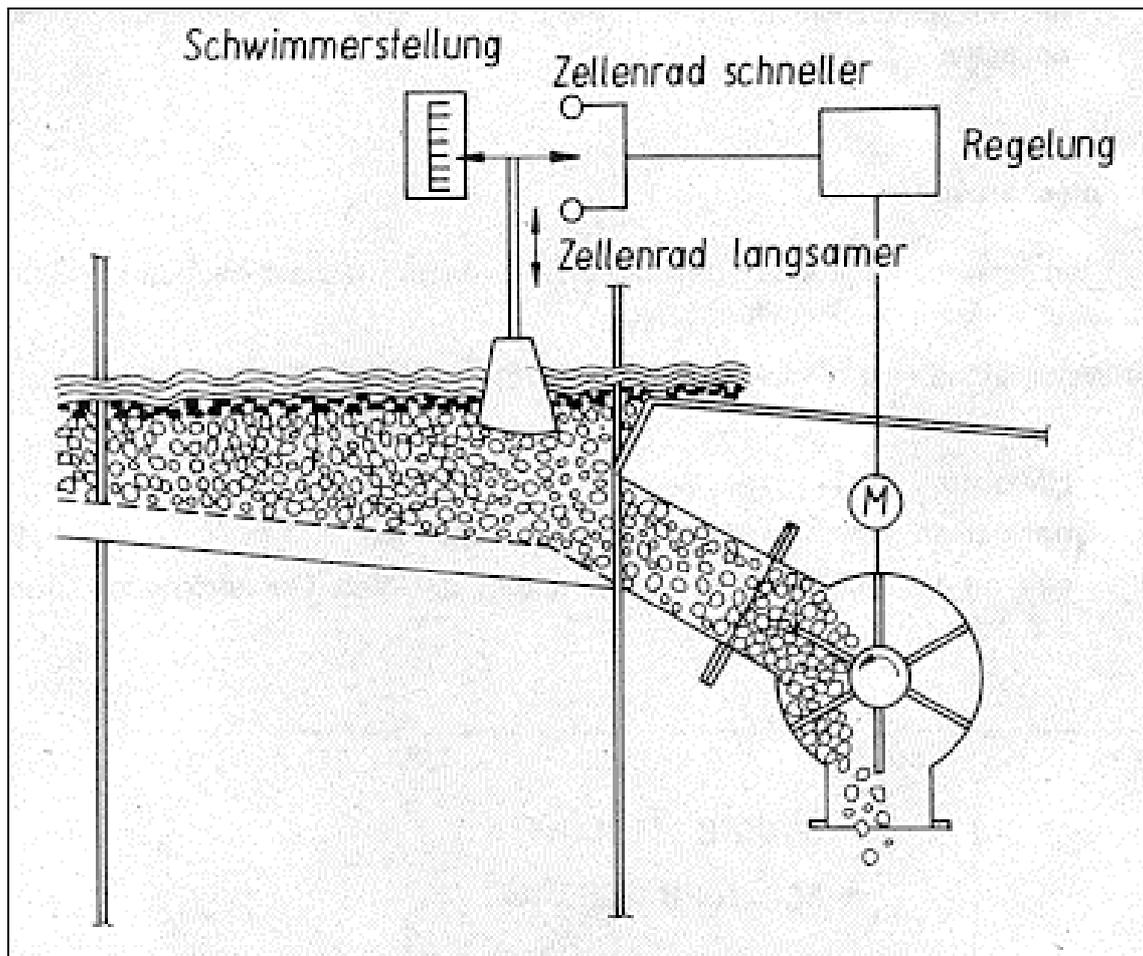


Abb. 3.2-22 Zellenradaustrag einer Setzmaschine, schematisch

Wendelrinnen- und Herdsortierung

In Wendelrinnen und Herden vollzieht sich die Sortierung nach der Dichte in einer strömenden Suspension, und zwar entweder in einer **Strömung durch einen rinnenförmigen Trennapparat** oder in einer **Filmströmung über eine geneigte Fläche**. Der Übergang von der Schichtungstrennung in Rinnen zur Trennung in Filmströmungen auf Herden ist fließend, wobei jedoch auf letzteren ausschließlich feine bis feinste Körnungen sortiert werden können.

Wendelrinnen werden in der Literatur auch als Wendelscheider bezeichnet.

Wendelrinnensortierung

Technologisches Ziel

Der Einsatz von Wendelrinnen beim Bodenwaschen dient zur

- Abscheidung von insbesondere feinkörnigen (0,1 bis 3 mm) kontaminierten organischen, leichten Bestandteilen (z. B. Kohle-, Holz- und Teerpartikel) sowie kontaminierten schweren Fraktionen als auch zur
- Vorreinigung von Böden, die Schwermetalle in elementarer Form enthalten, um nachfolgende Reinigungsverfahren, z. B. eine chemische Dekontaminierung, zu entlasten.

Prozeßmechanismus

In der Wendelrinne erfolgt eine Trennung in strömendem Wasser nach der Dichte unter zusätzlicher Wirkung der Zentrifugalkraft.

In der Wendelrinne sind die folgenden **drei Strömungen** für die Trennung bedeutungsvoll:

- Hauptströmung längs der Wendel
- nach innen gerichtete Strömung am Rinnenboden
- eine an der Trübeoberfläche nach außen gerichtete Querströmung (siehe Abb. 3.2-23).

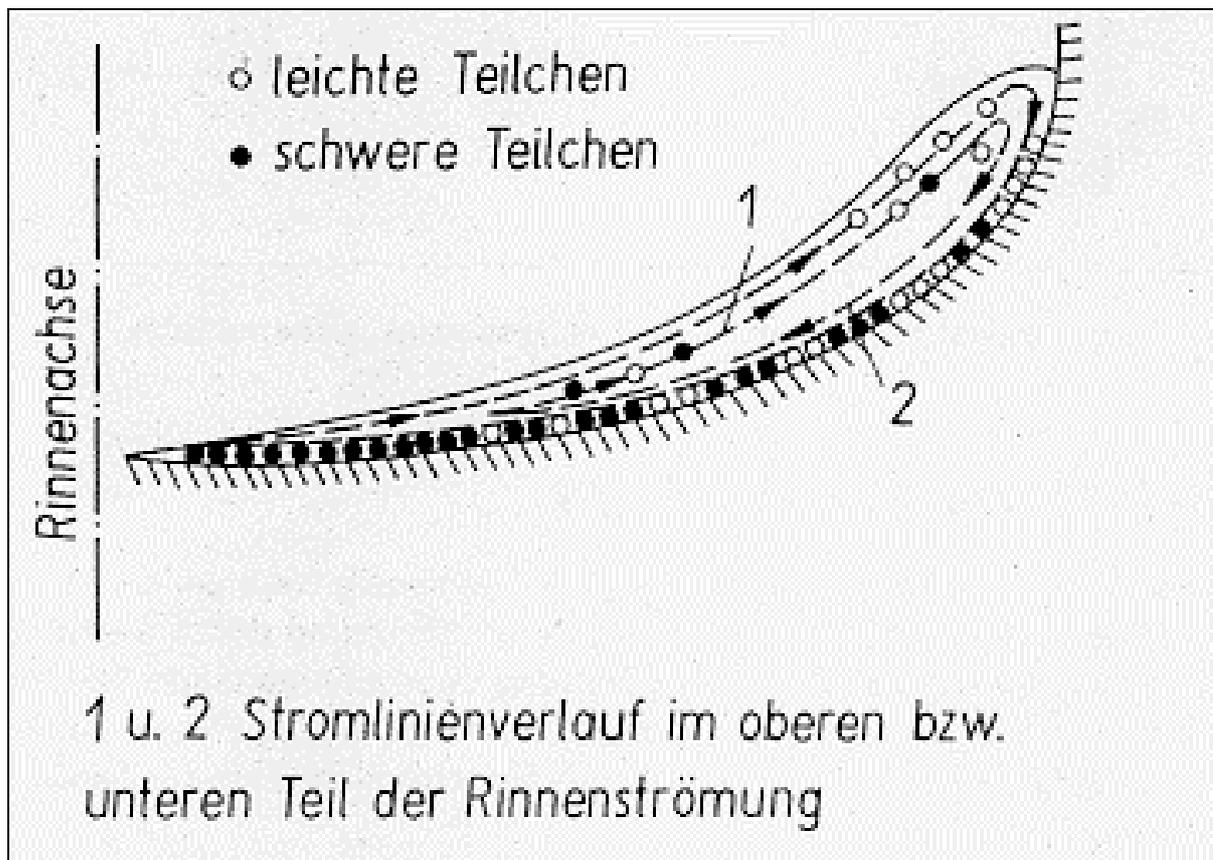


Abb. 3.2-23 Strömung in einer Wendelrinne

Die untere, spezifisch schwerste Schicht fließt infolge der Reibung am Rinnenboden am langsamsten, bleibt also am Rinnentiefsten und der Wendelachse am nächsten. Die darüber liegenden Schichten fließen schneller und geraten dadurch stärker unter den Einfluß der Fliehkraft, die sie von der Wendelachse fort an die Außenseite der Rinne abdrängt. Dadurch entstehen Bänder mit von innen nach außen abnehmender Dichte. Diese können durch unterschiedliche Austragsvorrichtungen aus dem Strom herausgeschnitten werden.

Die Tabelle 3.2-3 zeigt die wesentlichsten Prozeßparameter.

Tabelle 3.2-3 Prozeßparameter bei der Wendelrinnensortierung

Technologische Parameter	Konstruktive Parameter
Korngrößen- und Dichteverteilung der Aufgabe	Rinnenprofil; Rinnendurchmesser
Feststoffgehalt	Windungszahl
Zusatzwassermenge	Neigung
Durchsatz	Art und Anordnung der Produktabnahme

Apparat

Je nach zu sortierendem Material unterscheidet man Kohle- und Erzwendelrinnen sowie Wendelrinnen für schwermineralführende Sande. Der Unterschied zwischen den letzteren ist gering.

Die Kohlewendelrinnen besitzen im Vergleich zu den Erzwendelrinnen einen größeren Wendeldurchmesser und sind stärker geneigt.

Abb. 3.2-24 zeigt die platzsparende Anordnung einzelner Wendelrinnen in einer Batterie.

Durch entsprechende Schaltungen ist eine mehrstufige Reinigung möglich.

Die wesentlichen **Vorteile** (moderner) Wendelrinnen sind:

- Keine mechanisch bewegten Teile
- Verschleißfest (lange Lebensdauer)
- Kein Energieverbrauch (außer Pumpen)
- Leichtgewichtige Konstruktionen (glasfaserverstärktes Polyester)
- Sortieren ohne Waschwasserzusatz möglich, Produktabnahme am unteren Ende durch Trennkeile
- Billige Herstellung
- Bedeutend höherer Durchsatz durch Verwendung mehrgängiger (z. B. zweigängiger) Rinnen und verbesserte Raumausnutzung durch Anordnung in Batterien im Vergleich zu Herden. Der Durchsatz einer modernen Wendelrinne kann bis zu 5 t Feststoff/h betragen.

Nachteilig sind

- die geringere Trennschärfe im Vergleich zum Herd
- der Aufwand bei mehrstufigem Arbeiten durch Pumpen der Trübe zur nächsten Stufe sowie das gleichmäßige Verteilen des Aufgabegutes und das Zusammenfassen der Produkte
- kein Regelmechanismus für die Steuerung des Schwergutaustrages möglich.

Am besten verarbeitbar sind Korngrößen zwischen 0,1 bis 2 mm. Optimale Trennergebnisse sind nur nach entsprechender Vorklassierung erreichbar.

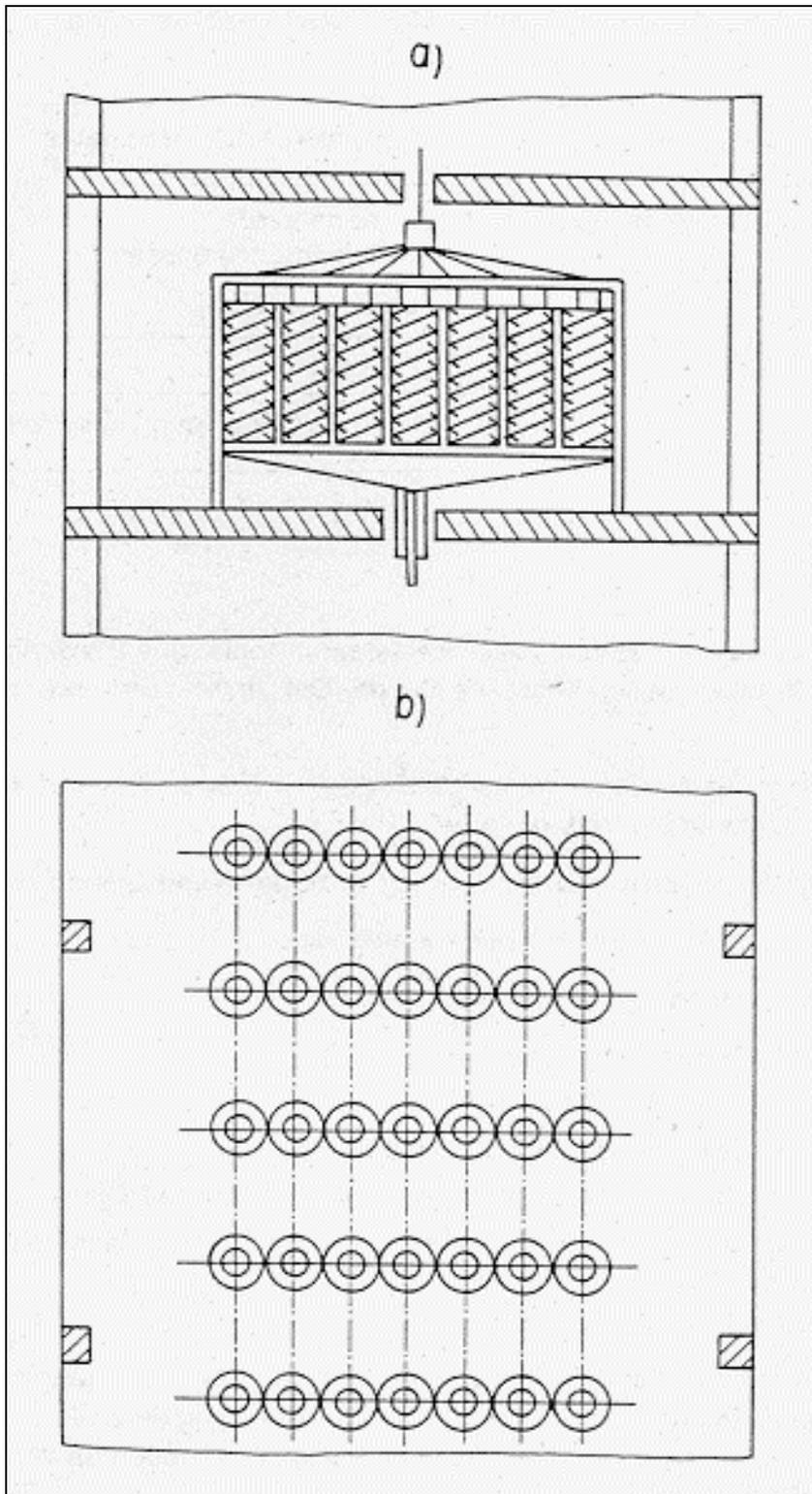


Abb. 3.2-24 Wendelrinnenbatterie

- a Seitenansicht
- b Draufsicht

Prinzipiell sollten für den Fall der Abtrennung leichter Bestandteile Wendelrinnen wegen des viel höheren spezifischen Durchsatzes anstelle von Herden eingesetzt werden.

In der Technologie der Bodenwäsche können auch Wendelrinnen anstelle von Aufstromsortierern zur Nachreinigung von Hydrozyklonunterläufen Verwendung finden.

Herdsortierung

Technologisches Ziel

Das technologische Ziel beim Einsatz von Herden in Bodenwaschanlagen entspricht dem von Wendelrinnen.

Prozeßmechanismus

Bei der Herdsortierung erfolgt eine Trennung feiner bis feinsten Körnungen aufgrund von Dichteunterschieden durch Bewegungen der Körner in einer Filmströmung auf einer schwingenden, schwach geneigten Ebene unter Wirkung unterschiedlicher Kräfte (scheinbares Gewicht, Schleppkräfte, Reibungskraft; Querstromprinzip (KELLERWESSEL 1991).

Den Trennvorgang in einer einzelnen Herdrille auf der Herdoberfläche veranschaulicht Abb. 3.2-25.

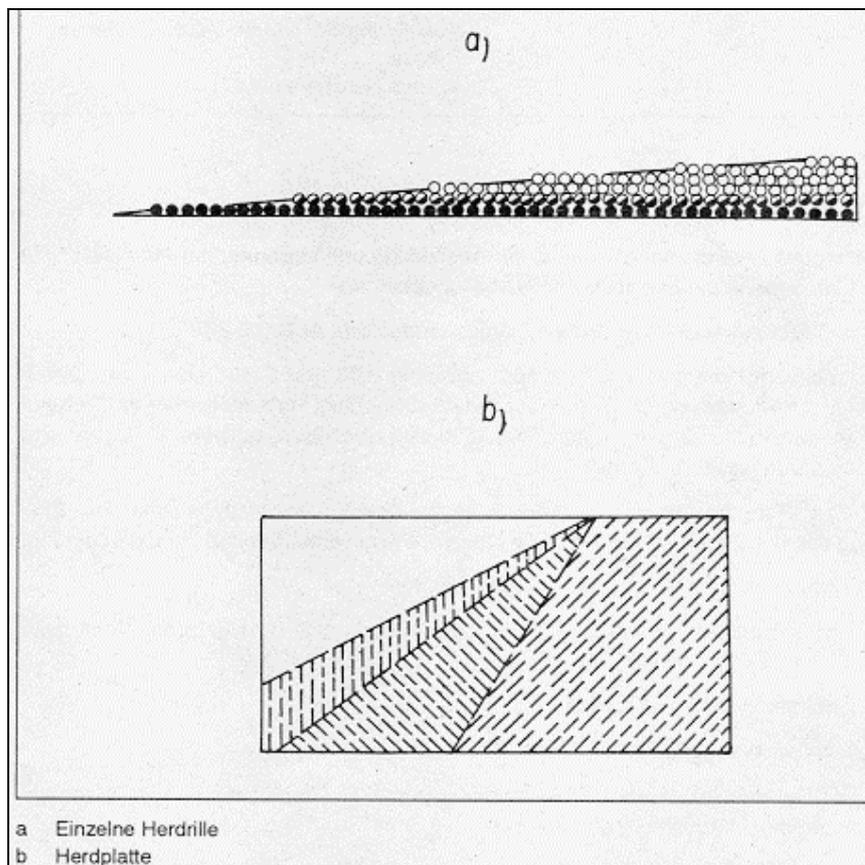


Abb. 3.2-25 Zur Erläuterung des Trennvorganges in einer Herdrille

- a Einzelne Herdrille
b Herdplatte

Die Rille in Abb. 3.2-24/a ist in ihrer Längsrichtung stark verkürzt dargestellt. Das Aufgabegut ist eng klassiert. Die Partikel ordnen sich nach ihrer Dichte. Beim Weiterwandern müssen die Schichten nacheinander über den Rand der ständig flacher werdenden Rille hinweg treten, werden vom Kreuzwasserstrom erfaßt und ausgetragen (siehe auch Abb. 3.2-25). Es ergibt sich dann bei der Aufsicht auf den Herd das in Abb. 3.2-24/b wiedergegebene Bild ziemlich sauber voneinander getrennter Partikelbänder. Bei Aufgabegut mit weiter Siebklassierung kommt es zu einer Überlagerung von Sortierung und Klassierung.

In Tabelle 3.2-4 sind die wichtigsten prozeßbestimmenden Parameter zusammengefaßt.

Tabelle 3.2-4 Prozeßbestimmende Parameter der Herdsortierung

Technologische Parameter	Konstruktive Parameter
Korngrößen- und Dichteaufbau der Aufgabe	Art des Herdantriebs; (Hubdiagramm)
Feststoffgehalt	Hub, Hubzahl
Querwassermenge	Querneigung der Platte
Durchsatz	Ausbildung der Herdbelattung (Rillen und Riffeln)
	Art des Herdbelages

Apparat

Hinsichtlich des Antriebsmechanismus, der Ausbildung und Lagerung der Herdplatte gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Ausbildungsformen.

Aufbau und Arbeitsweise eines Schwingherdes verdeutlicht Abb. 3.2-26.

Der verarbeitbare Korngrößenbereich liegt zwischen 0,03 und 2 mm. Durch eine genügend enge Vorklassierung (z. B. eng stromklassiertes Gut) verhindert man weitgehend eine Überlappung der Bewegungsbahnen gröberer, spezifisch schwererer Körner und feiner, spezifisch leichter Körner.

Hub, Hubzahl und Ausbildung der Rillen sind den Guteigenschaften anzupassen. Eine Regelung der Herdarbeit erfolgt durch die Querstromwassermenge und die Querneigung.

Der **Hauptnachteil** der Herdsortierung besteht in dem

- großen Flächenbedarf bzw. geringen spezifischen Durchsatz pro m² benötigte Grundfläche und im
- höheren Wasserverbrauch

im Vergleich zur Wendelrinne.

Dieser Nachteil wird durch **Mehrdekanordnungen** (z. B. Dreideckherde mit übereinander angeordneten Herdplatten) abgemildert.

Der auf die eingenommene Grundfläche bezogene Durchsatz eines Herdes beträgt nur 1/10 bis 1/40 des Durchsatzes einer Wendelrinne.

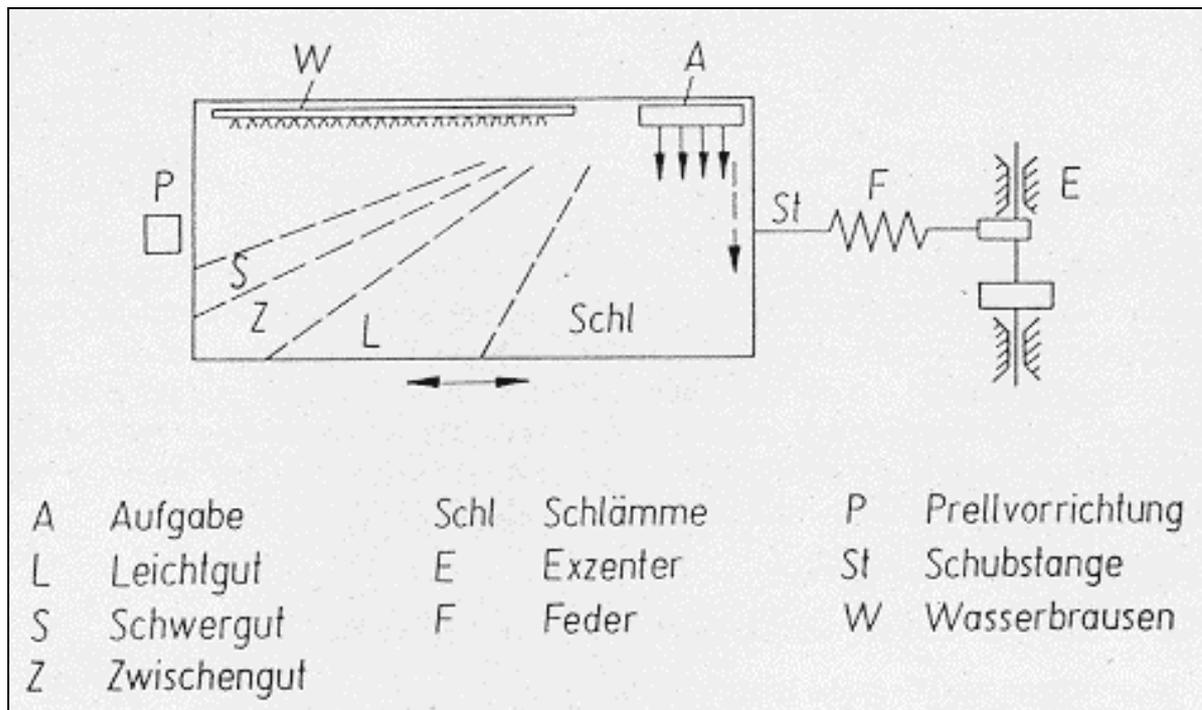


Abb. 3.2-26 Schwingherd, schematisch

Zur Zeit sind in der Bodensanierung keine Herde eingesetzt. Trotz des geringen Durchsatzes von Herdwäschen ist es durchaus nicht überall möglich, Herdarbeit durch andere Verfahren, z. B. die Flotation, zu ersetzen. Es wird eingeschätzt, daß Herde beim Bodenwaschen für bestimmte Sonderfälle, insbesondere wegen ihrer Trennschärfe, vorteilhaft eingesetzt werden können.

3.2.4.2 Flotation

Technologisches Ziel für die Anwendung der **Flotation** im Rahmen von Bodenwaschverfahren kann sein:

- die Trennung der feindispersen Bodenbestandteile (Sand und vor allem Schlufffraktion) in einen gering oder nicht belasteten Feststoffanteil und ein Schadstoffkonzentrat. Angestrebt wird also eine **selektive Trennung des Feststoffes** analog dem klassischen Anwendungsgebiet der Flotation in der Erzaufbereitung
- die Abtrennung aller dispergierten, suspendierten Partikeln aus den Prozeß- bzw. Abwässern, d. h. die Schadstoffentfernung aus den Wässern durch Suspensaentfernung.

Definitionsgemäß ist die Flotation ein mechanischer Trennprozeß bei dem mit Hilfe von Gasblasen in der Flüssigkeit dispergierte Partikeln (Feststoffteilchen, Tropfen, Moleküle, Ionen) Aggregate bilden, die dann aufgrund der geringeren Dichte gegenüber dem umgebenden Medium zur Oberfläche der Flüssigkeit aufsteigen und eine abtrennbare Schaumschicht bilden. Im Schaumprodukt, Flotat, liegen die abzutrennenden Partikeln angereichert vor. In der Abwassertechnik wird teilweise auch der Aufstieg leichterer Phasen ohne Ankopplung von Gasblasen als Flotation bezeichnet; dieser Prozeß wird hier nicht mit betrachtet.

Prozeßmechanismus

Nach dem **Wirkprinzip** handelt es sich bei der Flotation um eine sog. Heterokoagulationstrennung (SCHUBERT 1986). Koagulationspartner sind die abzutrennenden Partikeln (Schadstoffe oder schadstoffbelastete Teilchen) und die Gasblasen. Die sich bildenden Aggregate müssen nun so einen hohen Gasanteil aufweisen, daß aus der Dichtedifferenz zwischen Aggregat und umgebender Flüssigkeit eine ausreichende Aufstiegsgeschwindigkeit resultiert, die eine effektive Abtrennung ermöglicht. Für den Gesamtprozeß sind damit folgende **Prozeßschritte** maßgebend (Abb. 3.2-27):

- Gasblasenerzeugung,
- Modifizierung der abzutrennenden Stoffe und Partikeln,
- Aggregatbildung aus Blase und Partikel,
- Abtrennung der gebildeten Aggregate (Aufstieg, Bildung und Abtrennung der Schaumschicht)

Ein zentraler Schritt ist die Aggregatbildung aus Blase und Partikel. Je nach wirksamen Abmessungen von Partikeln und Gasblasen und der Art und Weise der Gaszufuhr sind verschiedene Mechanismen der Aggregatbildung zu unterscheiden (siehe Abb. 3.2-28).

Der zweckmäßigerweise anzuwendende Aggregatbildungsmechanismus wird bestimmt durch die verfahrenstechnische Zielstellung, aber auch die Eigenschaften der abzutrennenden Stoffe. Für eine selektive Trennung eines Partikelgemisches kommt eigentlich nur der Kollisionsmechanismus in Frage. Bei diesem Prozeß bestimmt eindeutig die Hydrophobie des Teilchens in Wechselwirkung mit den hydrodynamischen Bedingungen, ob es zur stabilen Anlagerung kommt (SCHUBERT 1986, SCHULZE 1984). Der Begriff **Hydrophobie** wird im allgemeinen Sprachgebrauch mit einer wasserabweisenden Wirkung (keine oder nur schwere Benetzbarkeit des Partikels mit Wasser) gleichgesetzt. Die anderen Mechanismen sind besonders für die allgemeine Suspensaentfernung aus Wässern von Bedeutung, meist in Verbindung mit sehr kleinen primären Partikelgrößen und Dichten nahe 1000 kg/m^3 .

Durch den der Aggregatbildung vorausgehenden Prozeßschritt, **Modifizierung der abzutrennenden Stoffe und Partikeln**, sind die stofflichen Voraussetzungen für eine effektive Prozeßdurchführung zu schaffen. Als solche Voraussetzungen sind vor allem zu sehen:

- die Gewährleistung einer ausreichenden Hydrophobie bzw. von Hydrophobieunterschieden bei der selektiven Abtrennung,
- die Gewährleistung eines effektiven Partikeldurchmessers.

Neben den elektrostatischen Wechselwirkungskräften wird die Wahrscheinlichkeit für die erfolgreiche Haftung und die Stabilität vor allem durch die Änderung der freien Energie bei der Anlagerung bestimmt:

$$G = (L/G) (\cos \theta - 1)$$

L/G : Oberflächenspannung (in N m^{-1})

θ : Randwinkel

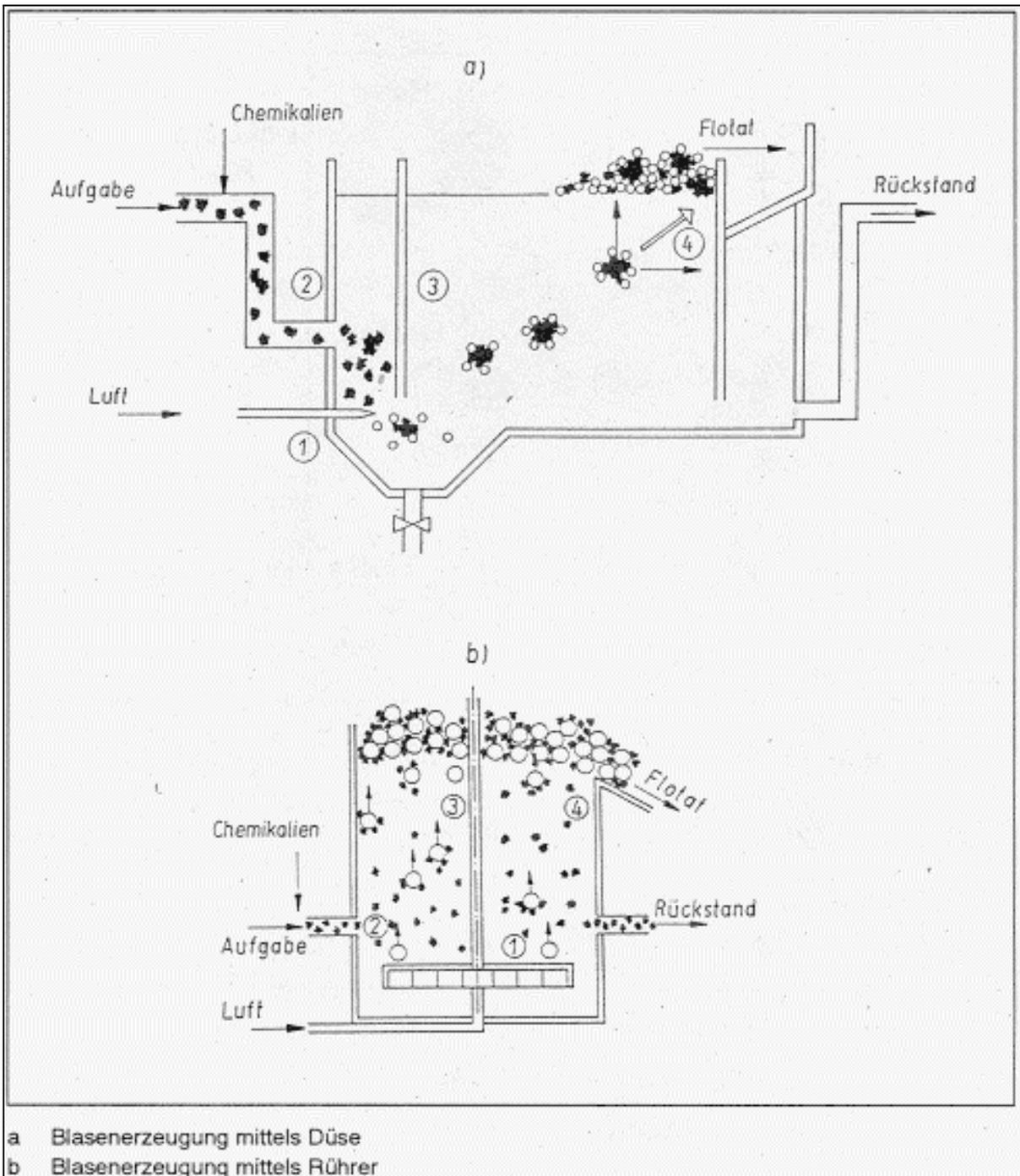


Abb. 3.2-27 Prozeßschritte bei der Flotation

- a Blasenerzeugung mittels Düse
- b Blasenerzeugung mittels Rührer

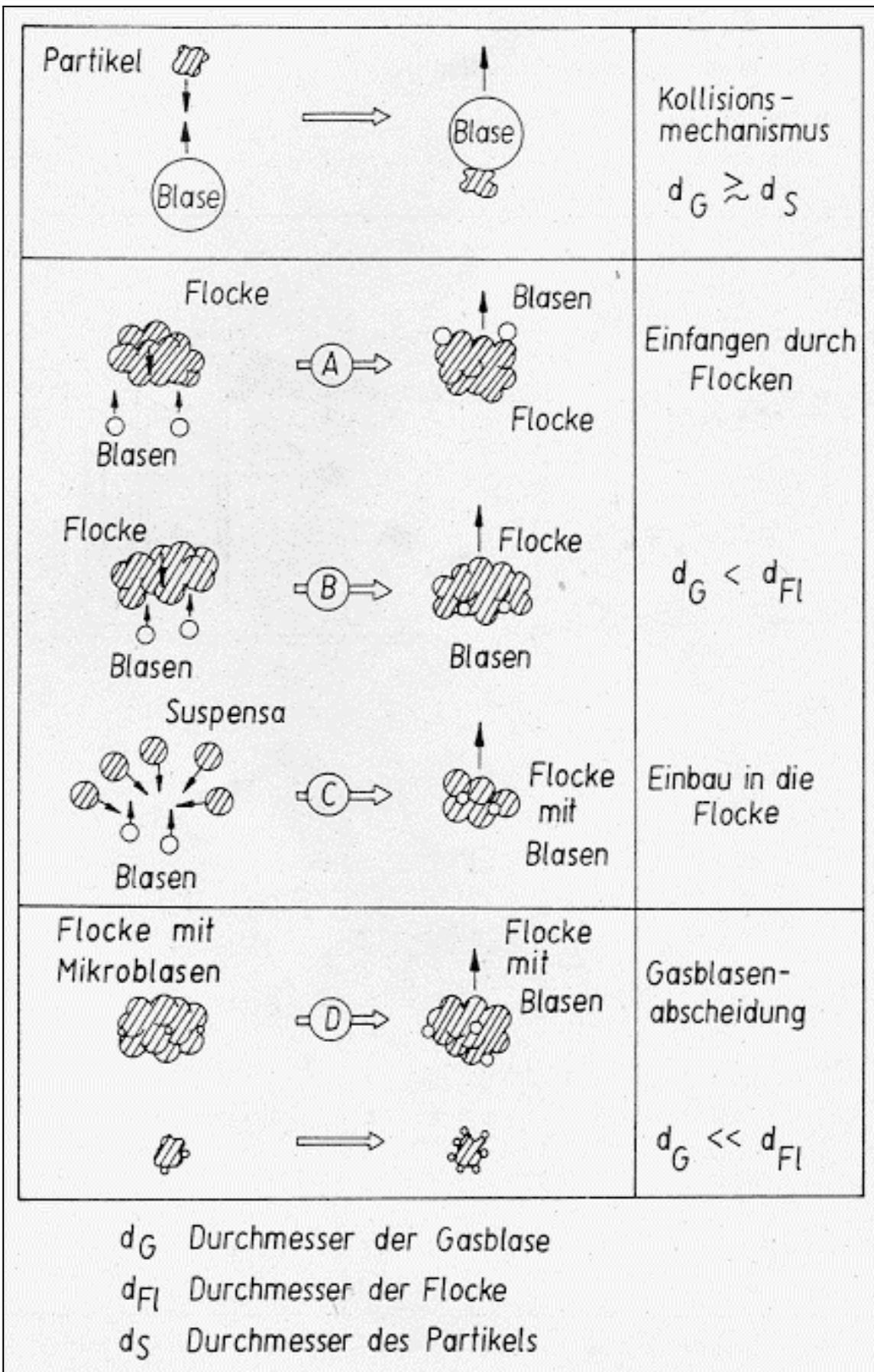


Abb. 3.2-28 Mechanismen der Aggregatbildung (HAHN et. al. 1981)

Um die Hydrophobie gezielt beeinflussen zu können, werden sog. Flotationsreagenzien eingesetzt. Man unterscheidet:

- **Sammler:** allgemein selektiv wirkende, hydrophobierende Reagenzien, organische Stoffe mit polar - unpolarem Aufbau
- **Regler:** die die Adsorption des Sammlers beeinflussende Reagenzien, als Drücker zur Verhinderung der Adsorption bzw. Beleber für eine spätere Aktivierung der Adsorption. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der pH-Wert.
- **Schäumer:** grenzflächenaktives Reagenz zur Erzielung einer geeigneten Schaumschicht.

Der Einsatz von Flotationsreagenzien ist vor allem für die selektive Trennung von Partikelgemischen von Bedeutung (Erzaufbereitung). Bei der Anwendung der Flotation beim Bodenwaschen ist der Einsatz von Reagenzien zur gezielten Beeinflussung der Hydrophobie noch nicht üblich. Man geht von den natürlichen Hydrophobieunterschieden aus (z. B. für Öl, Teerteilchen u. a.) Bei der nicht selektiven Suspensaabtrennung aus Abwässern kompensiert man geringe Hydrophobie durch Anwendung sehr kleiner Blasen (HAHN 1988).

Große Bedeutung für die Anwendung der Flotation beim Bodenwaschen und bei der Abwasserbehandlung haben jedoch die **modifizierenden Maßnahmen zur Erzielung eines effektiven Partikeldurchmessers**. Sie zielen auf eine Partikelvergrößerung, da die Effektivität der Teilchenanlagerung mit fallendem Partikeldurchmesser sinkt. Für Schadstoffe in ungelöster, feindisperser Form kommen als Verfahren zur Partikelvergrößerung in Frage:

- **Flockung** (bevorzugt mit Polymeren als Flockungshilfsmittel). Unter Flocken (Agglomerieren) versteht man das Zusammenlagern von frei beweglichen festen Einzelteilchen in wäßrigen Suspensionen zu Flocken (Agglomeraten) durch unterschiedliche Mechanismen (siehe auch Kap. 3.2.5)
- **Koaleszenz** von Tropfen (Einsatz emulsionsbrechender Reagenzien) Koaleszens führt analog der Flockung (System flüssig/fest) im System flüssig/flüssig bzw. flüssig/gasförmig zu einer Vergrößerung von Tropfen oder Blasen durch Kollisionen.
- Anlagerung an groben Partikeln, Flocken (Trägerflotation).

Für Schadstoffe in gelöster Form kommen in Frage:

- **Fällung, Flockung**
- **Adsorption** an speziellen Adsorptionsmitteln (Aktivkohle, Bentonit), an Flocken und Fällprodukten, an grenzflächenaktiven Stoffen (Ionenflotation).

Zu flotierende Partikelgröße und die modifizierenden Maßnahmen sind auch Grundlage für die Einteilung der Flotationsverfahren, siehe Abb. 3.2-29.

Die Prozeßschritte Blasenbildung und Abtrennung der gebildeten Aggregate sind besonders für die Apparategestaltung von besonderer Bedeutung.

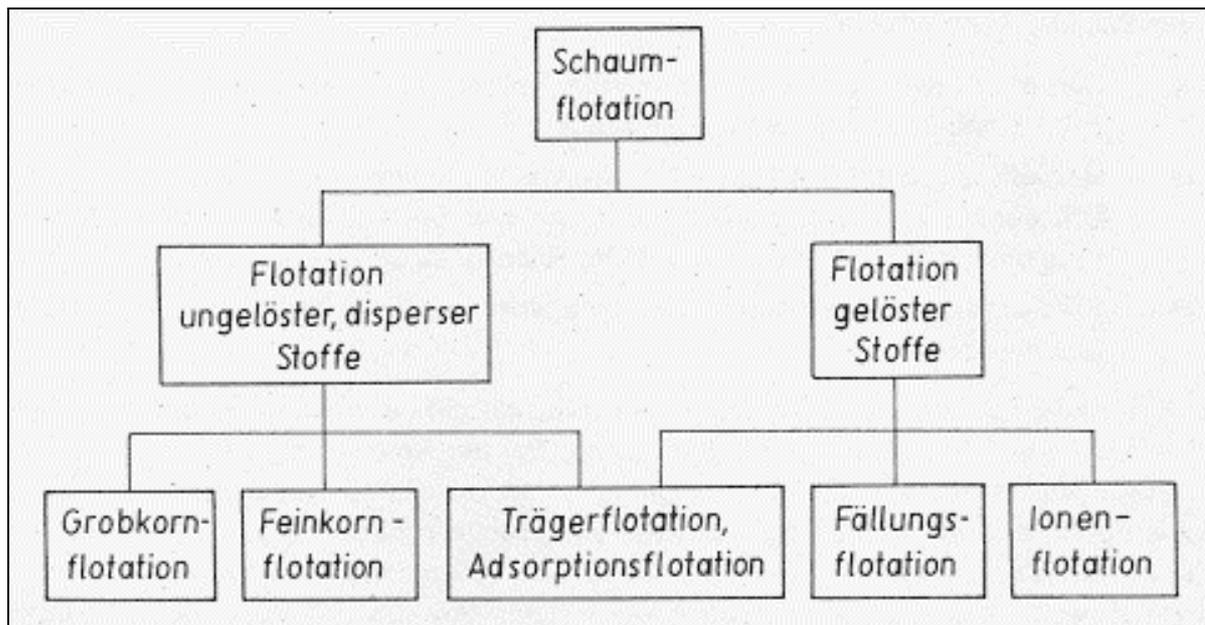


Abb. 3.2-29 Einteilung der Flotationsverfahren

Flotationsapparate

Die Vielzahl der im Flotationsapparat zu realisierenden Prozessschritte und möglichen Prozessmechanismen führten zu einer außerordentlich großen Anzahl an Apparatetypen und Konstruktionen. Abb. 3.2-30 gibt eine Übersicht über die wesentlichsten Apparatetypen.

Kriterium für die **Einteilung der Apparate** ist die Art und Weise der Blasenenerzeugung. Die Prinzipskizzen für zwei wichtige Apparatetypen sind in Abb. 3.2-31 und Abb. 3.2-32 zusammengestellt.

Rührwerksapparate (z. T. als sog. Turboflotationsapparate bezeichnet) finden bevorzugt für die Behandlung der Sand- und gröberen Schlufffraktionen und die Abtrennung ölgiger Bestandteile Anwendung. Durch geeignete Rührer/Statorgestaltung werden günstige Bedingungen für die Blasenenerzeugung (0,2 bis 1 mm), das Suspendieren des Feststoffes, die Tropfenkoaleszenz und Aggregatbildung nach dem Kollisionsmechanismus geschaffen. Damit kommt er vor allem für die selektive Partikeltrennung in Frage. Es handelt sich um äußerst robuste, gegenüber Durchsatzschwankungen unempfindliche Apparate. Sie kommen i. d. R. immer als Apparatefolge zur Anwendung.

Pneumatische Apparate, besonders in Verbindung mit effektiven Begasungssystemen (z. B. Querstrombegasung mit Blasengrößen um 0,05 bis 0,2 mm), dürften gute Bedingungen für eine selektive Trennung bei hohen spezifischen Durchsätzen gewährleisten. Sie sind jedoch weniger robust und empfindlicher bezüglich Durchsatzschwankungen.

Beim **Entspannungsflotationsapparat** handelt es sich um den klassischen Flotationsapparat für die Abwasserbehandlung (HAHN et. al. 1981). Durch die direkte Blasenabscheidung an den Partikeln und die Blasengrößen 0,05 mm ist keine selektive Trennung gegeben, es liegen jedoch beste Voraussetzungen für die komplexe Suspensaabtrennung vor. Gerade für schwierig

durch Sedimentation abtrennbare Partikel werden durch Flotation wesentlich höhere Klärflächenbelastungen und eine höhere Schlammeindickung erreicht.

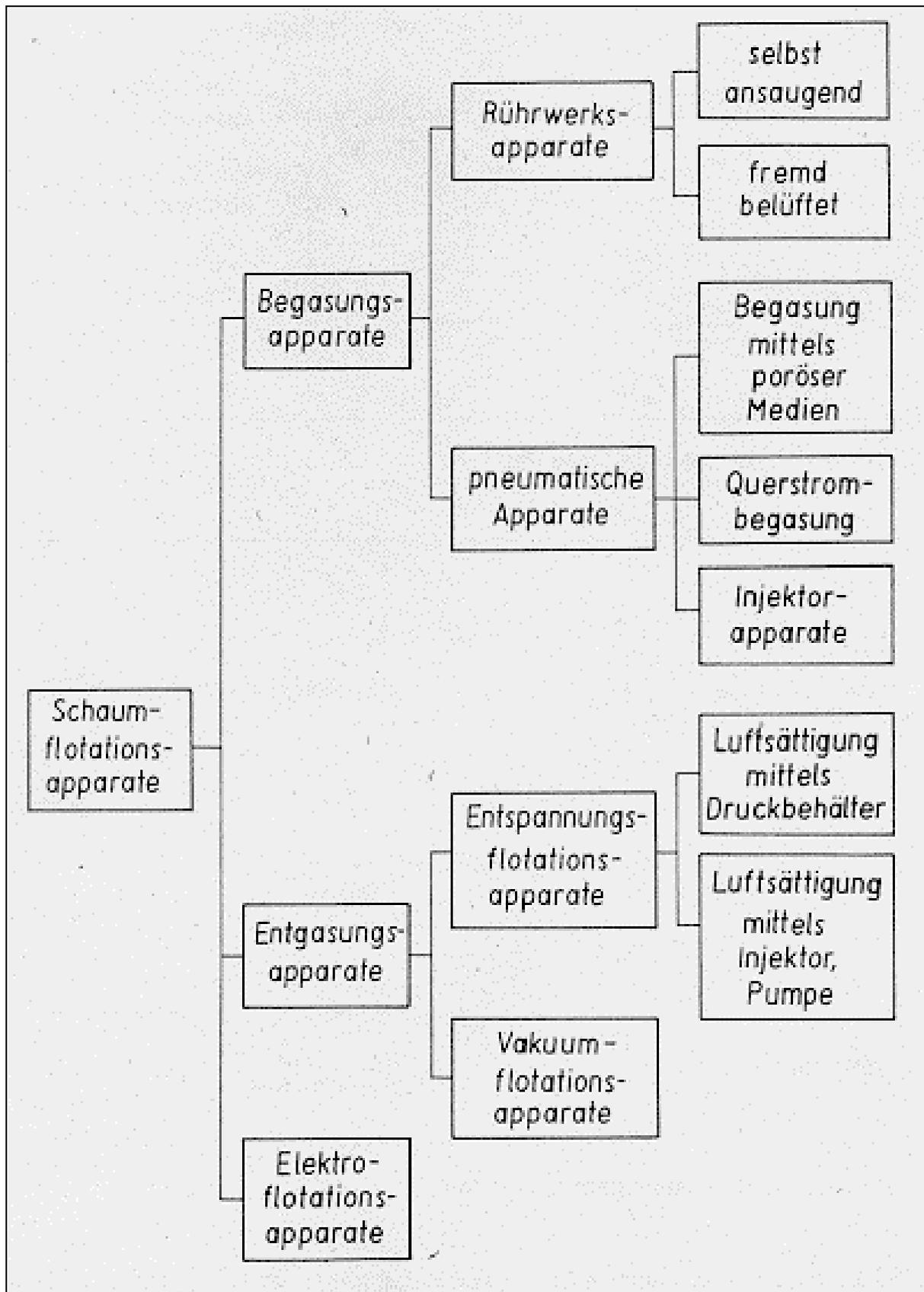


Abb. 3.2-30 Einteilung der Flotationsapparate

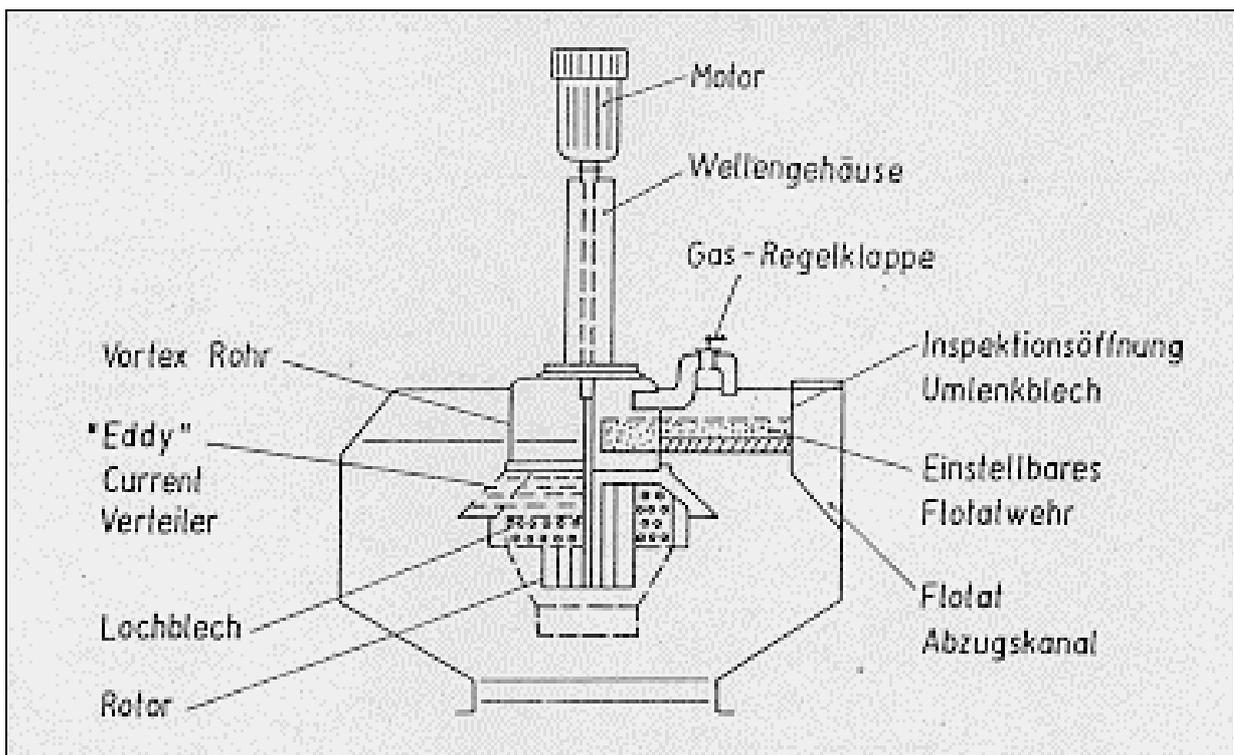


Abb. 3.2-31 Turboflotationsapparat

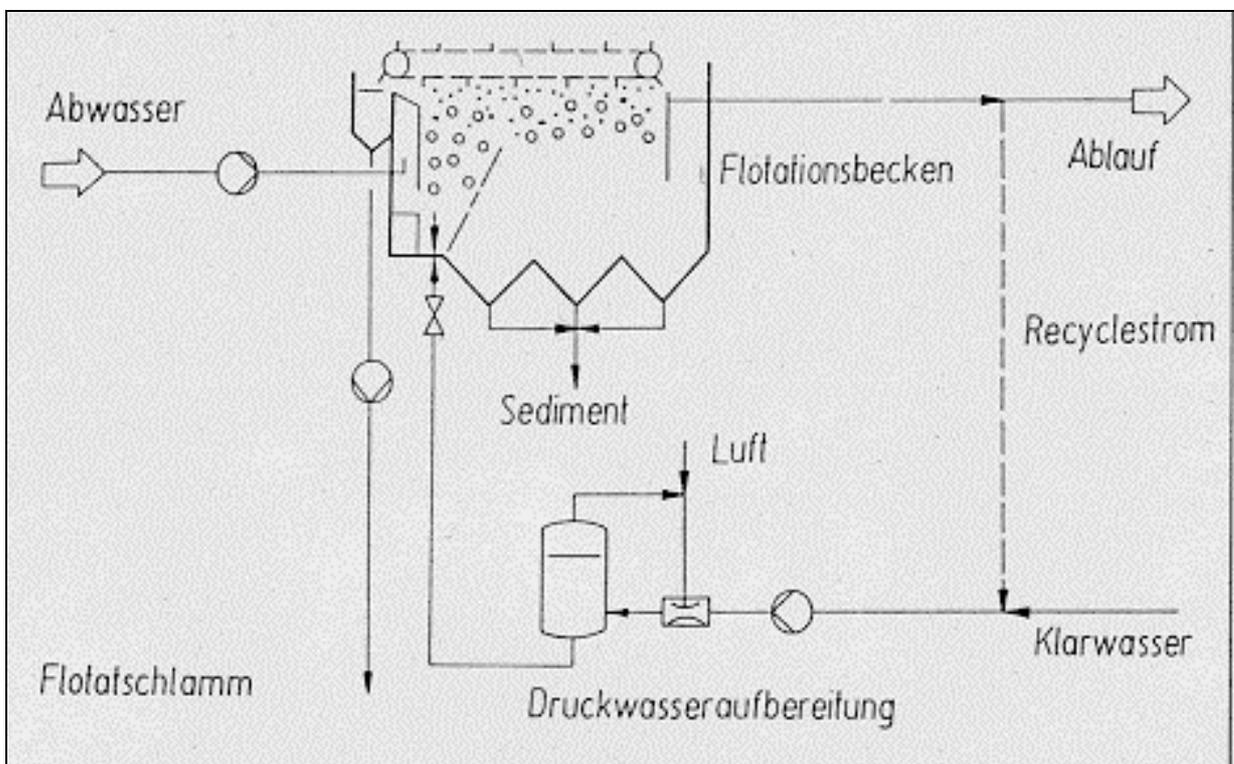


Abb. 3.2-32 Druckentspannungsflotation

Die Sättigung der unter erhöhtem Druck (4 bis 6 bar) stehenden Flüssigkeit erfolgt immer weniger mittels großvolumiger Druckbehälter, sondern mittels spezieller Injektoren oder Pumpen, was zu kompakteren Anlagen und geringeren Investkosten führt.

Aussagefähige, vergleichende Daten und Kennziffern zu bei der Bodenbehandlung eingesetzten Flotationsapparaten wurden noch nicht publiziert. Angaben zum Apparateinsatz in konkreten Anlagen siehe nachfolgender Abschnitt.

Als **Einsatzgebiete** des Flotationsverfahrens im Rahmen von Bodenbehandlungstechnologien lassen sich angeben:

- Abtrennung schadstoffbelasteter Feststoffanteile, bevorzugt Leichtstoffe, Kohle- bzw. KW-haltige Bestandteile, 0,02 bis 2 mm;
- Abtrennung öligler Phasen, Emulsionsspaltung, Aufarbeitung ölhaltiger Schlämme;
- Prozeßwasseraufbereitung - Wasser mit hohen Anteilen an Feststoff (<0,025 bis 0,063 mm) und öligen Phasen, damit hohen Schwimmschlammanteilen, allgemein in Verbindung mit Fällung und Emulsionsspaltung als Vorbehandlung;
- Abwasseraufbereitung, gegebenenfalls in Verbindung mit der Aufbereitung kontaminierten Grundwassers, (Fällung, Flockung als Vorbehandlung).

Das Flotationsverfahren wird i. d. R. immer in Kombination mit anderen Trenn- bzw. Klassierverfahren eingesetzt.

3.2.4.3 Magnetscheidung

Technologisches Ziel

Die Magnetscheidung wird angewendet für die Entfernung von groben Eisenteilen zum Schutz von Zerkleinerungsanlagen oder Aussortierung von eisen- und schwermetallhaltigen Verunreinigungen aus Böden zur Verminderung des Metallgehaltes.

Definitionsgemäß ist die Magnetscheidung ein mechanischer Trennprozeß nach dem Trennmerkmal magnetische Suszeptibilität.

Prozeßmechanismus

Stofflich verschiedene Teilchen unterscheiden sich häufig in ihren magnetischen Eigenschaften so stark, daß Trennprozesse in Magnetfeldern möglich werden. Dabei werden Magnetkräfte dazu benutzt, die Teilchenbahnen im Prozeßraum in Abhängigkeit von der **magnetischen Suszeptibilität** zu modifizieren oder starkmagnetische Teilchen zurückzuhalten. Die Suszeptibilität ist ein Stoffkennwert, der die magnetischen Eigenschaften quantitativ erfaßt. Es gibt die in Abb. 3.2-33 dargestellten **grundlegenden Arbeitsprinzipien**.

Eisen, einige seiner Verbindungen und Legierungen sowie Kobalt und Nickel sind ferromagnetisch, diese Stoffe können durch Schwachfeldscheidung erfaßt werden. Die meisten anderen Stoffe besitzen eine wesentlich geringere Suszeptibilität, ihre Trennung erfolgt durch Mittel- oder Starkfeldscheidung. Neben der Suszeptibilität und der magnetischen Feldstärke sind die Korngröße des zu verarbeitenden Materials, der Durchsatz, die Verweilzeit des Materials im Prozeßraum, Drehzahl (bei Ablenkscheidern) bzw. Aushebehöhe (bei Aushebeschei-

dern) und die Feuchtigkeit des Materials entscheidende Prozeßparameter. Trockene, rieselfähige Stoffe können auf Trockenscheidern trennscharf geschieden werden; suspendierte, feinkörnige Materialien werden auf Naßscheidern getrennt. Bei feuchtem, klebrigem Material leidet die Trennschärfe.

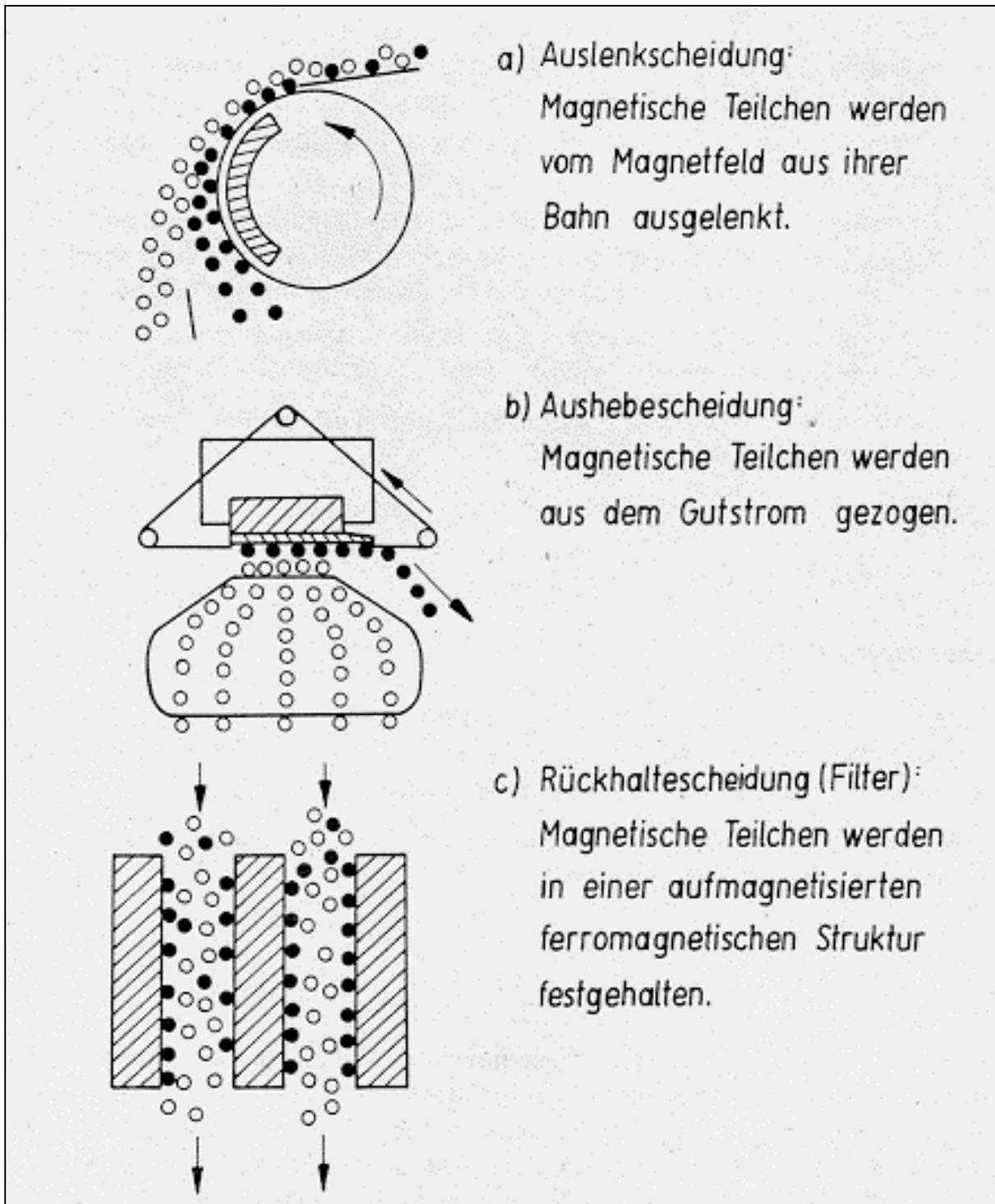


Abb. 3.2-33 Die verschiedenen grundlegenden Verfahren in der Magnetscheidung (UNKEL-BACH 1990)

Voraussetzung für die Magnetscheidung ist, daß magnetische und unmagnetische Teilchen einzeln vorliegen. Bei Trockenscheidung ist daher u. U. eine Trocknung notwendig, bei Naßscheidung eine Dispergierung. Einer Starkfeldscheidung sollte generell eine Schwachfeldscheidung vorgeschaltet werden, da die Starkfeldscheider andernfalls durch starkmagnetisches Material blockiert werden können.

Apparat

Magnetscheider haben die Aufgabe, magnetische Kraftfelder zu erzeugen, das zu trennende Material mit bestimmter Geschwindigkeit dem Prozeßraum zuzuführen und die Produkte der Magnetscheidung getrennt abzuführen.

Die Einteilung der Apparatetypen erfolgt nach der Feldstärke im Prozeßraum (**Schwachfeldscheider**: 0,1 bis 0,2 Tesla; **Mittelfeldscheider**: 0,2 bis 0,8 Tesla; **Starkfeldscheider**: > 0,8 Tesla), nach dem Arbeitsmedium (Luft- bzw. **Trockenscheider**, Wasser- bzw. **Naßscheider**) und nach dem bereits oben erwähnten Arbeitsprinzip. Die wichtigsten Schwachfeldscheider, bei denen das Feld mit Elektro- oder Permanentmagneten erzeugt wird, sind:

- Aushebemagneten, oft mit Austragsband
- Magnettrommeln und Magnetrollen

Bei Starkfeldscheidern wird das Feld meist elektrisch erregt, die wichtigsten Typen sind:

- Induktionswalzenscheider
- Matrixscheider

Schwachfeldscheider können ferromagnetische Stoffe der Korngröße 0,001 mm bis etwa 1 mm bei Naßarbeit bzw. 0,05 mm bis zu 100 mm bei Trockenarbeit verarbeiten. Bei Starkfeldscheidern ist die obere Korngröße auf etwa 2 mm begrenzt, die untere Korngröße entspricht derjenigen der Schwachfeldscheider. Magnetscheider erreichen Durchsätze von einigen Tonnen pro Stunde, der erreichbare Durchsatz wächst mit der Korngröße.

Für die Abscheidung von groben Eisenstücken als Schutz von Zerkleinerungsmaschinen und die Eisenabtrennung aus Böden von Schrottsammelplätzen werden Schwachfeldscheider verwendet.

Die Abtrennung von Schlacken und schwermetallhaltigen Verunreinigungen aus Böden mit Starkfeldscheidern ist erfolgreich erprobt worden, wird aber bisher kaum angewendet.

3.2.5 Mechanische Flüssigkeitsabtrennung

Technologisches Ziel

Bodenwaschverfahren sind als naßmechanische Reinigungsverfahren ohne mechanische Flüssigkeitsabtrennung nicht denkbar. Beim Bodenwaschen fallen auf der einen Seite die gewaschenen Kies- (> 2 mm) und Sandfraktionen (0,06 bis 2 mm) und auf der anderen Seite ein kontaminierter Feinschlamm (Schlufffraktion < 0,06 mm) an.

Für alle Stoffströme ist eine Entwässerung notwendig.

Für die groben Fraktionen wie Kies und Sand genügen Entwässerungsschnecken und Schwingentwässerer. Hier kommen Schwingsiebe zum Einsatz, deren Siebparameter auf eine optimale Entwässerungswirkung abgestimmt sein müssen (siehe auch Kap. 3.2.3.1).

Für die Entwässerung der feinkörnigen Schlufffraktionen kommen jedoch die wirksameren Trennprozesse Sedimentation und Filtration zur Anwendung.

Prozeßmechanismus

Unter **Sedimentieren** versteht man das Absetzen des in einer Suspension enthaltenen Feststoffes unter der Wirkung des irdischen Schwerkraftfeldes oder eines Zentrifugalkraftfeldes, wobei ein eingedickter Dickschlamm mit dem Feststoff und eine weitgehend geklärte Flüssigkeitsphase entsteht. Je nach der verfahrenstechnischen Zielstellung spricht man von **Eindicken**, wenn die Erzeugung eines Dickschlammes mit möglichst hohem Feststoffgehalt im Vordergrund steht, oder von **Klären**, wenn die möglichst vollständige Feststoffabscheidung aus der Flüssigkeit das dominierende Prozeßziel ist.

Unter **Filtrieren** versteht man das mechanische Trennen einer Suspension in feuchten Feststoff (Filterkuchen) und Flüssigkeit (Filtrat) auf einer für die Flüssigkeit durchlässigen Schicht (Filtermittel) unter der Wirkung eines Druckkraftfeldes. In der Regel arbeitet man beim Filtrieren mit statischen Druckgefällen, die man als Unterdruck (Vakuumfiltration) oder als Überdruck (Druckfiltration) relativ zur umgebenden Atmosphäre anlegt. Wird das Druckkraftfeld mit Hilfe von Druckelementen erzeugt, spricht man von Pressen. Dabei wird der zu filtrierende Schlamm in einen sich verengenden Raum mit semipermeablen Wänden gebracht, durch die die Flüssigkeit hindurchtreten kann (also ausgepreßt wird), während der Feststoff im Preßraum verbleibt.

Bei beiden Prozessen, d. h. Sedimentation und Filtration, ist u. a. die Korngröße bzw. die Korngrößenverteilung eine wichtige Stoffeigenschaft. So sedimentieren große Teilchen schneller als kleine bzw. große Teilchen ergeben in einem sich bildenden Filterkuchen größere Poren, die dem Filtratdurchfluß einen geringeren Widerspruch entgegensetzen. Deshalb wird zur Intensivierung beider Prozesse häufig durch chemische Konditionierung eine Zusammenlagerung feiner Feststoffteilchen zu Aggregaten herbeigeführt, was man als **Flockung** bezeichnet. (siehe auch Kap. 3.2.4.2). Die dabei entstehenden Flocken bewirken eine Erhöhung der Absetzgeschwindigkeit bei der Sedimentation bzw. eine Erhöhung der Durchlässigkeit bei der Durchströmung von Filterkuchen im Falle der Filtration.

Sedimentation

Bei der Sedimentation in statischen Sedimentationsapparaten setzen sich die Feststoffteilchen aus der Suspension unter der Wirkung des irdischen Schwerkraftfeldes ab und bilden einen Dickschlamm, den man wie die Klarwasserphase kontinuierlich oder diskontinuierlich austragen kann. Am Beispiel eines Rundeindickers mit zentralem Zulauf und peripherem Klarwasserüberlauf werden die in einem solchen Sedimentationsapparat ablaufenden Teilprozesse schematisch dargestellt (Abb. 3.2-34).

Für das Bodenwaschen werden für diesen Apparatetyp vorzugsweise

Kompressionseindicker eingesetzt (NEESSE und GROHS, 1991/2), die sich gegenüber herkömmlichen Eindickern durch ein höheres Höhe/Durchmesser-Verhältnis auszeichnen. Dadurch kann ein hohes Schlammbett eingestellt werden, in das die Aufgabesuspension direkt eingeleitet wird.

Ein langsam laufendes Rührwerk, das bei der Rundeindickervariante (Abb. 3.2-35) als Stabrührer auf das Krählwerk montiert ist, unterstützt einerseits die Flockung und andererseits die Kompression durch das Zerstören von Strukturen in der Kompressionszone.

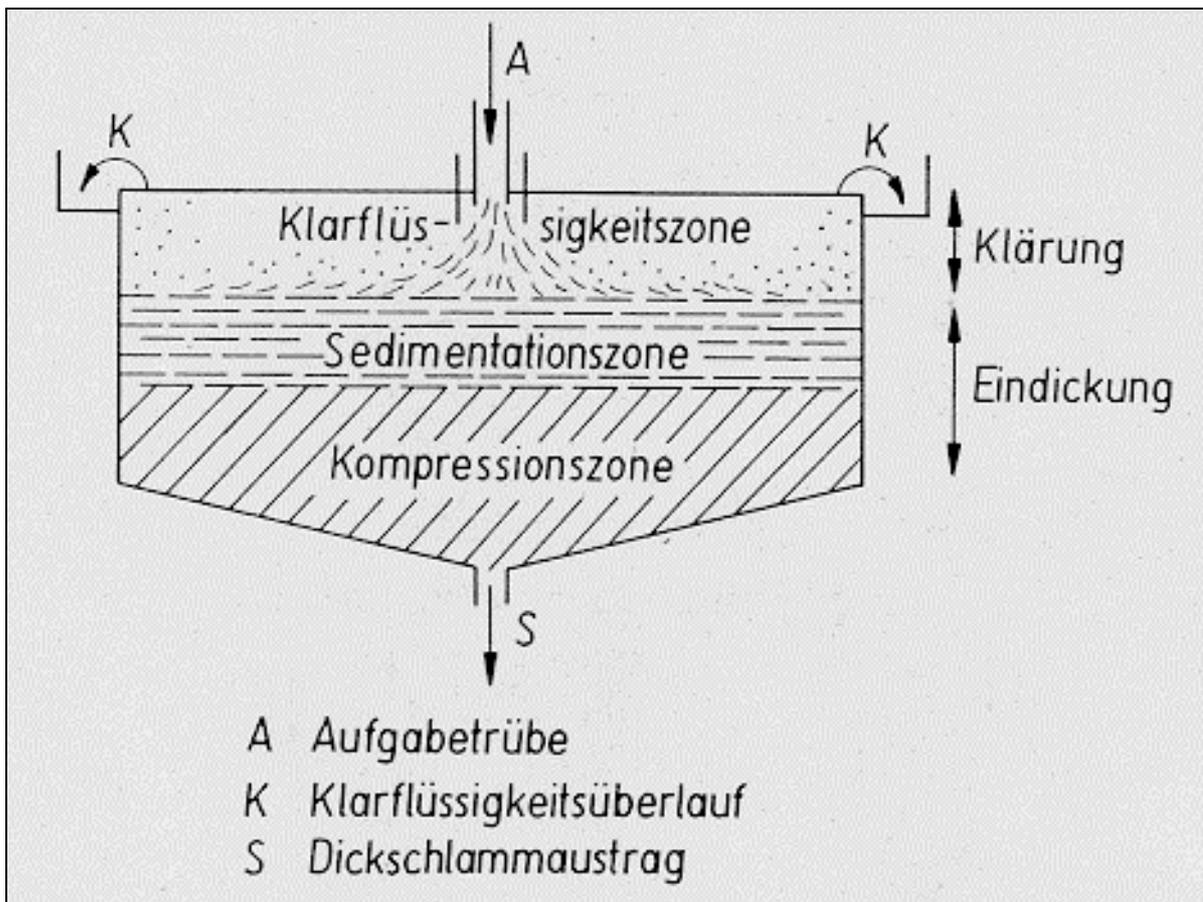


Abb. 3.2-34 Teilprozesse in einem Rundeindicker, schematisch (SCHUBERT 1984)

Zunehmende Bedeutung erlangt ein Apparatetyp, in dem man zur Erhöhung des Suspensionsdurchsatzes je Einheit Apparatvolumen geeignete Plattenpakete anordnet, wodurch sich die wirksame Absetzfläche entsprechend der Plattenanzahl erhöht. Die Wirkungsweise solcher **Schräglklärer bzw. Lamellenklärer** wird schematisch in Abb. 3.2-36 gezeigt.

Schräglklärer werden beim Bodenwaschen als selbständige Apparate eingesetzt (Abb. 3.2-37) und häufig in Kombination mit Rundeindickern angewendet (siehe Kap. 3.3).

Beide Apparatetypen können jedoch auch in einem Apparat vereinigt werden.

Für den Prozeß der Sedimentation ergeben sich im Vergleich zur Filtration niedrigere Betriebskosten, allerdings sind die hier erreichbaren Feststoffgehalte nicht ausreichend, um das Entwässerungsverfahren abzuschließen. Deshalb werden i. d. R. Sedimentation und Filtration kombiniert.

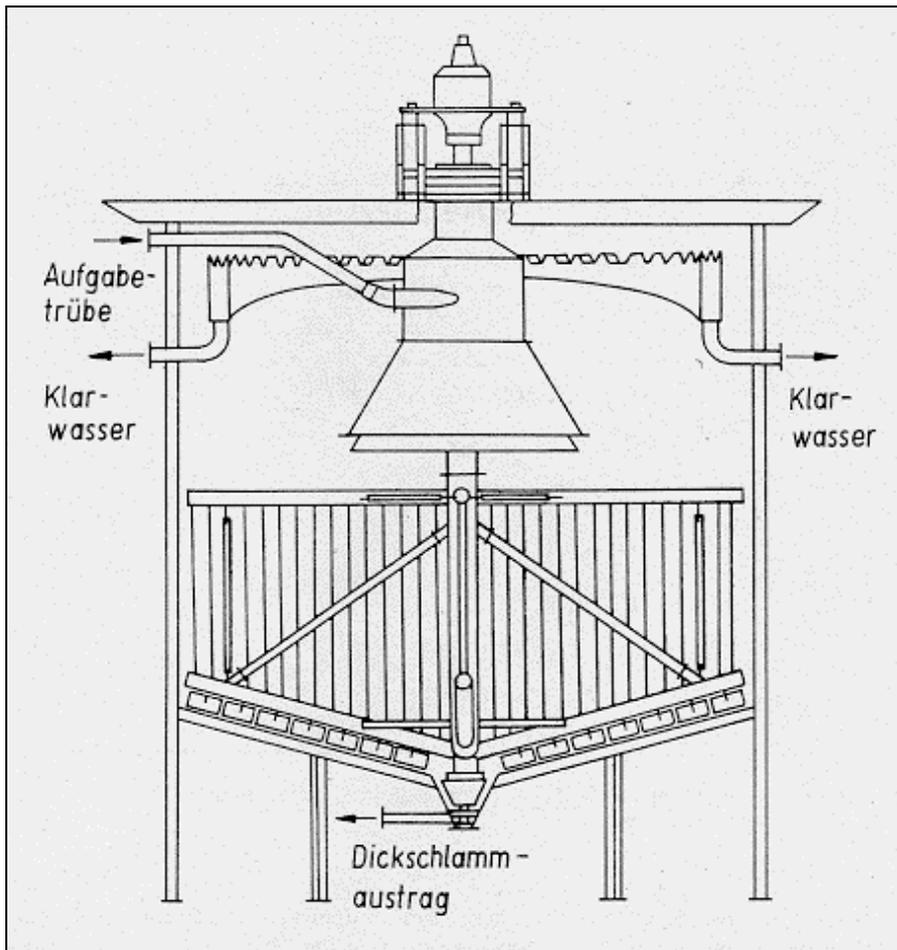


Abb. 3.2-35 Kompressionseindicker Typ AKASET, Bauart AKW

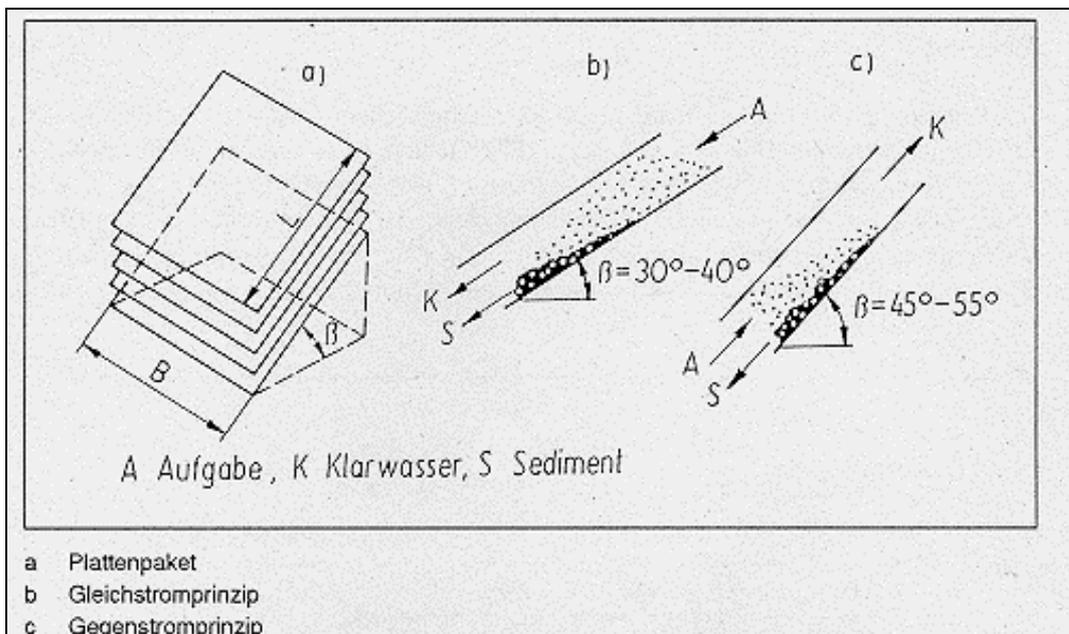


Abb. 3.2-36 Wirkungsweise eines Schrägklärers (SCHUBERT 1984)

- a) Plattenpaket
- b) Gleichstromprinzip
- c) Gegenstromprinzip

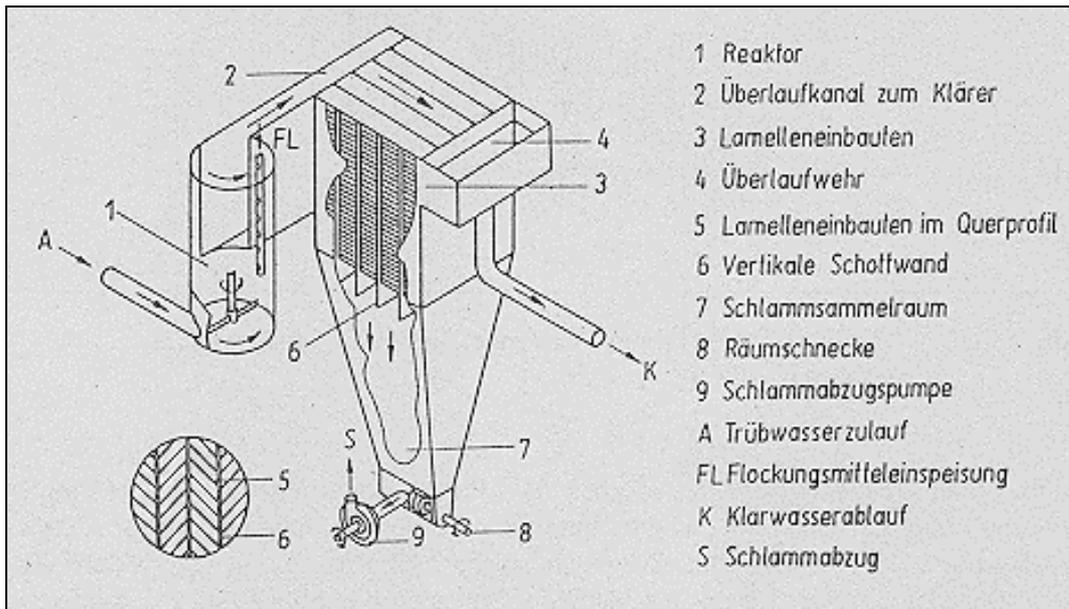


Abb. 3.2-37 Schrägklärer, Bauart MAB (NEESSE und GROHS 1991/2)

Filtration

Die Filtration ist die Verfahrensstufe, die auf mechanischem Wege zu den niedrigsten Feuchtegehalten im entwässerten Feststoff (Filterkuchen) führt. Wegen der Feinheit der betrachteten Schlufffraktionen kommt ausschließlich eine Druckfiltration in Frage. In solchen Fällen, wo eine thermische Weiterbehandlung der kontaminierten Schlämme in Verbrennungsanlagen vorgesehen ist, wird man der **Filterpresse** den Vorzug geben. In Bild 3.2-38 wird schematisch die Arbeitsweise einer Kammerfilterpresse gezeigt.

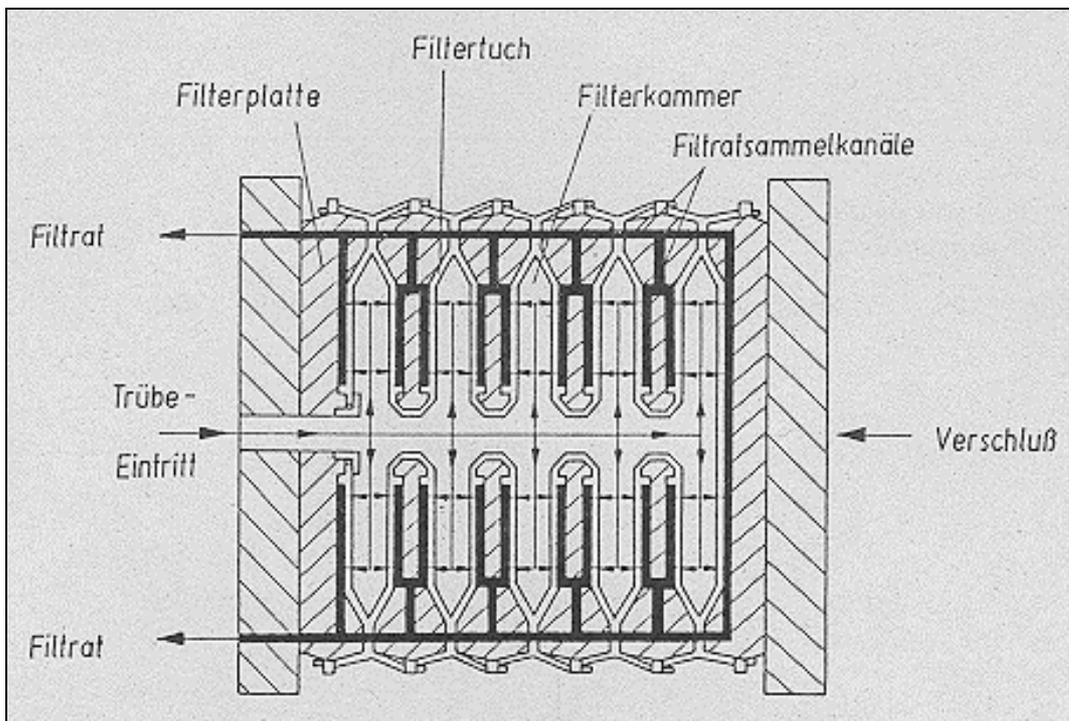


Abb. 3.2-38 Kuchenbildung in einer Kammerfilterpresse, schematisch (Netzsch - Filtrationstechnik)

Filterpressen arbeiten chargenweise nach dem Prinzip der kuchenbildenden Filtration. Moderne Apparate sind heute mit einer automatischen Folgesteuerung aller Arbeitstakte eines Arbeitszyklus ausgestattet. Zu einem solchen Arbeitszyklus gehören: Schließen des Filterplattenpaketes, Füllen und Filtrieren, Entlasten des Schlußdruckes, Auffahren des Druckstückes, Transport der Platten und Filterkuchenaustrag, Schließen der Filterpresse. Filterpressen arbeiten in Normalausführung mit Druckdifferenzen von 15 bar. Neuerdings werden jedoch auch Hochdruckfilterpressen angeboten, die mit Drücken von 60 bar arbeiten.

In Bodenwaschanlagen werden jedoch wegen ihrer kontinuierlichen Arbeitsweise zunehmend sog. **Siebbandpressen** bzw. **Bandpreßfilter** eingesetzt, insbesondere dann, wenn bei Ablagerung auf Deponien nur eine bestimmte Mindestfeuchte erreicht werden muß. Siebbandpressen gibt es in einer kaum überschaubaren Vielzahl von Konstruktionsvarianten. Ausgehend vom Arbeitsprinzip bestehen sie jedoch generell aus zwei endlos umlaufenden Siebbändern, die zunächst einen sich keilförmig verengenden Spalt bilden, in den der Schlamm eingezogen und zunehmend verdichtet wird. Danach werden die Bänder mit der zwischen ihnen befindlichen, stabilisierten Schlammmasse über ein sehr variabel auslegbares Rollensystem geführt, wo der feuchte Feststoff mehrfach geschert bzw. gewalkt und einer zunehmenden Druckbeanspruchungen unterzogen wird. In Abb. 3.2-39 wird das Funktionsprinzip einer modernen Siebbandpresse gezeigt.

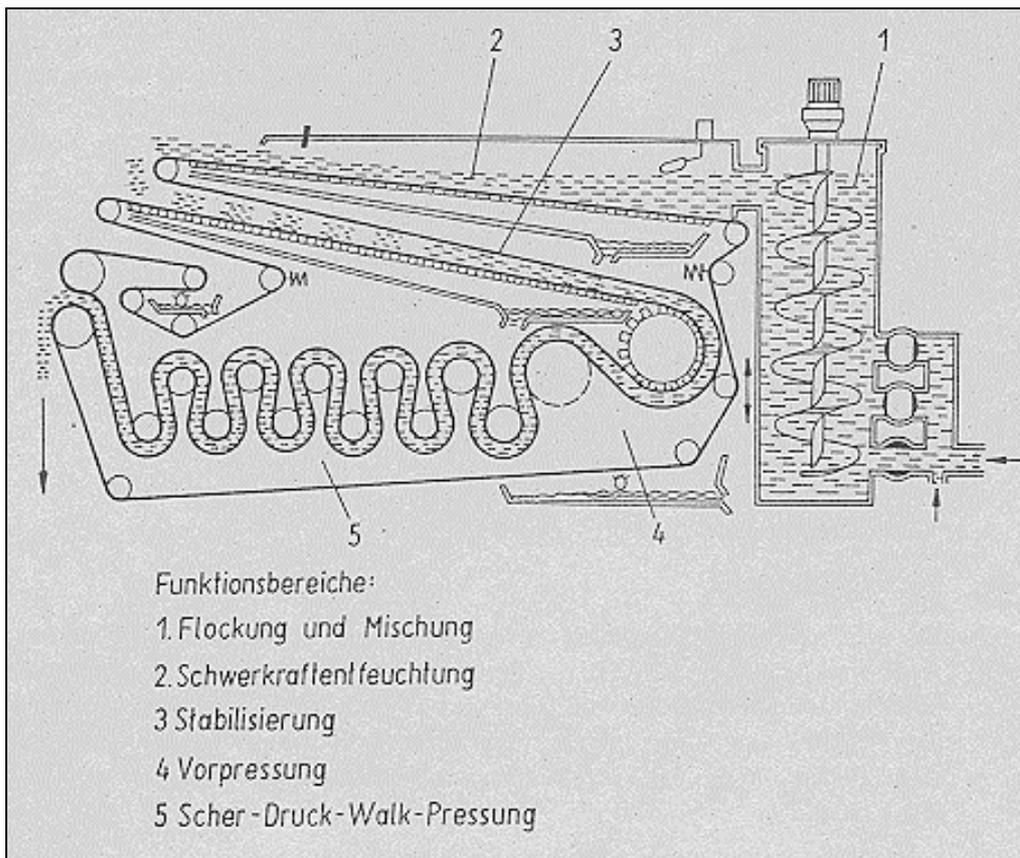


Abb. 3.2-39 Funktion einer Siebbandpresse, Bauart RPE (HOFFMANN 1988)

Mit Preßdrücken von etwa 2 bar werden in den meisten Fällen ausreichende Entwässerungsergebnisse, d. h. Feuchtegehalte im Filterkuchen von 20 bis 45 % erzielt. Siebbandpressen zeichnen sich durch Einfachheit, Betriebssicherheit sowie robuster und kompakter Bauart aus

und sind damit in besonderer Weise für mobile Anlagen mit hohem Automatisierungsgrad geeignet.

Flockung

Die Flockung kann nach verschiedenen Mechanismen erfolgen:

a) Elektrolytflockung oder Koagulation

Hierbei handelt es sich um direkte Teilchenhaftung durch interpartikuläre Wechselwirkung, wobei entsprechend der DLVO- Theorie (SONNTAG 1977) durch Zugabe von Elektrolyten ein Abbau des Grenzflächenpotentials (Zeta-Potential) und damit der elektrostatischen Abstoßungskräfte erfolgt, wodurch eine Annäherung der Teilchen in den Wirkungsbereich (Abstand 100 nm) der VAN-DER-WAALSschen Anziehungskräfte möglich wird. Als Zusatzstoffe werden mehrwertige anorganische Metallsalze wie $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Fe(III)-Salze, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ eingesetzt.

b) Polymerflockung

Bei der am häufigsten angewandten Polymerflockung benutzt man organische, hochmolekulare, wasserlösliche Polymere. Als Haftmechanismus wird allgemein angenommen, daß die in der Lösung als Knäuel vorliegenden Polymere gleichzeitig an mindestens zwei Feststoffteilchen adsorbieren, so daß diese durch eine Molekülbrücke zusammengehalten werden (MÜHLE et. al. 1988). Wasserstoffbrückenbindung und Ionenbeziehungen sind bevorzugte Bindungsarten bei der Adsorption der Moleküle an den Feststoffoberflächen.

Typische Vertreter von synthetischen, makromolekularen Flockungsmitteln sind:

- Polyacrylamide und deren Copolymere mit Polyacrylsäuren,
- Polynatriumacrylat (anionisch),
- Polyäthylenoxid (kationisch),
- Polyamin u. a.

c) Einschlußflockung

Sie beruht auf der Bildung sehr voluminöser, durch Hydroxid-Fällung erzeugter Hydroxid-Flocken (z. B. $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$), in die die abzutrennenden Feststoffteilchen eingehüllt werden. Diese in bestimmten pH-Bereichen ablaufende Einschlußflockung wird häufig mit einer Polymerflockung kombiniert, um kolloidale Teilchen in die Flocken einzubinden, was oftmals durch Polymerflockung allein nicht gelingt.

In Abhängigkeit von der verfahrenstechnischen Zielstellung werden unterschiedliche Flockeneigenschaften angestrebt. Für die Eindickung werden kleine, dichte Flocken gewünscht, um hohe Sedimentdichten zu erreichen. Dagegen sind für die Wasserklärung, aber auch für die Preßfiltration große, voluminöse Flocken vorteilhaft. Die Elektrolytflockung führt i. d. R. zu kleinen, festen Flocken, während polymere Flockungsmittel große Makroflocken bilden. Die Flockengröße kann aber auch über die Turbulenzintensität beim Mischen von Suspension und Flockungsmittellösung beeinflußt werden (IVANAUSKAS et. al. 1985). Zur Flockung

werden Flockungsreaktoren eingesetzt. Das sind Rührbehälter mit langsamlaufendem Rührwerk, das die Stoßwahrscheinlichkeit Teilchen/Teilchen bzw. Teilchen/Polymermolekül erhöht, jedoch nach erfolgter Haftung nicht zur Flockenzerstörung beiträgt.

Oftmals genügt es aber schon, die Dosierung der Flockungsmittel in die Aufgabe-Rohrleitung zu einem Entwässerungsaggregat vorzunehmen, was zweckmäßigerweise auf der Druckseite der Beschickungspumpe erfolgen sollte.

3.3 Kombination verfahrenstechnischer Grundoperationen

Im vorangegangenen Kap. 3.2 wurden die einzelnen verfahrenstechnischen Grundoperationen und die dafür eingesetzten typischen Apparate erläutert. Das Erreichen der verfahrenstechnischen Zielstellung bei der Bodenwäsche gelingt durch eine auf den jeweiligen Einsatzfall angepasste Kombination (sinnvolles Zusammenwirken) von Grundoperationen.

Abb. 3.3.1 zeigt die wesentlichen Verfahrensschritte einer Bodenwäsche in etwas veränderter Darstellung im Vergleich zu Abb. 3.1-1.

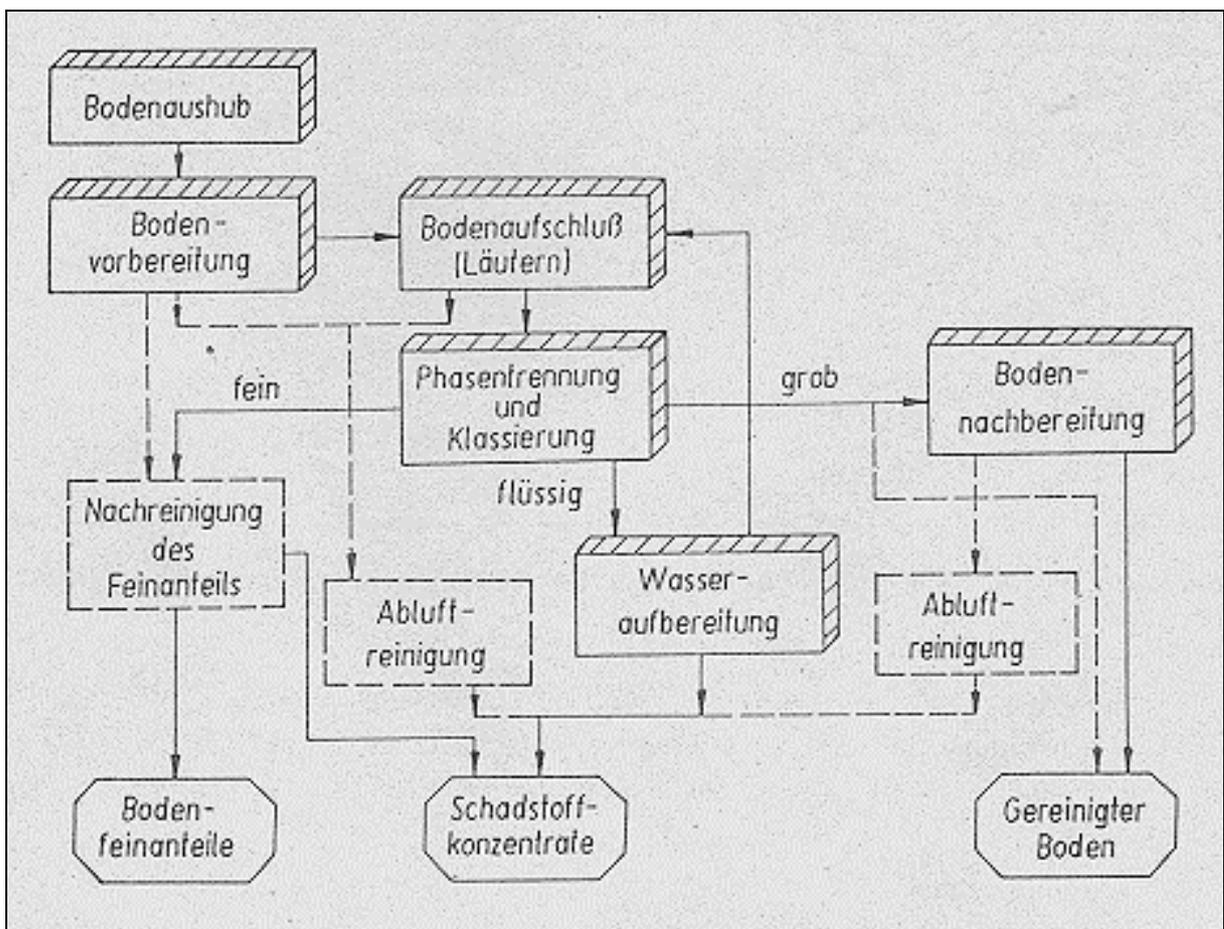


Abb. 3.3-1 Verfahrensfließbild für ein typisches Verfahren zur Bodenwäsche

Der für das typische Verfahrensprinzip einer Bodenwäsche entsprechende Verlauf der Masseströme ist in Abb. 3.3-2 dargestellt.

Grundsätzlich können in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit

- Körnungs- und Dichteaufbau,
- Schadstoffgehalte und -verteilung in Abhängigkeit von Korngröße und Korndichte,
- Schluffanteil,
- Bindungsart der Kontaminationen

im Extremfall sämtliche in Abb. 3.3-1 genannten Verfahrensschritte eingesetzt oder das Grundschemata stark vereinfacht werden. Deshalb ist auch ein **modulartiger Aufbau** von Bodenwaschanlagen in Bezug auf eine hohe Flexibilität günstig.

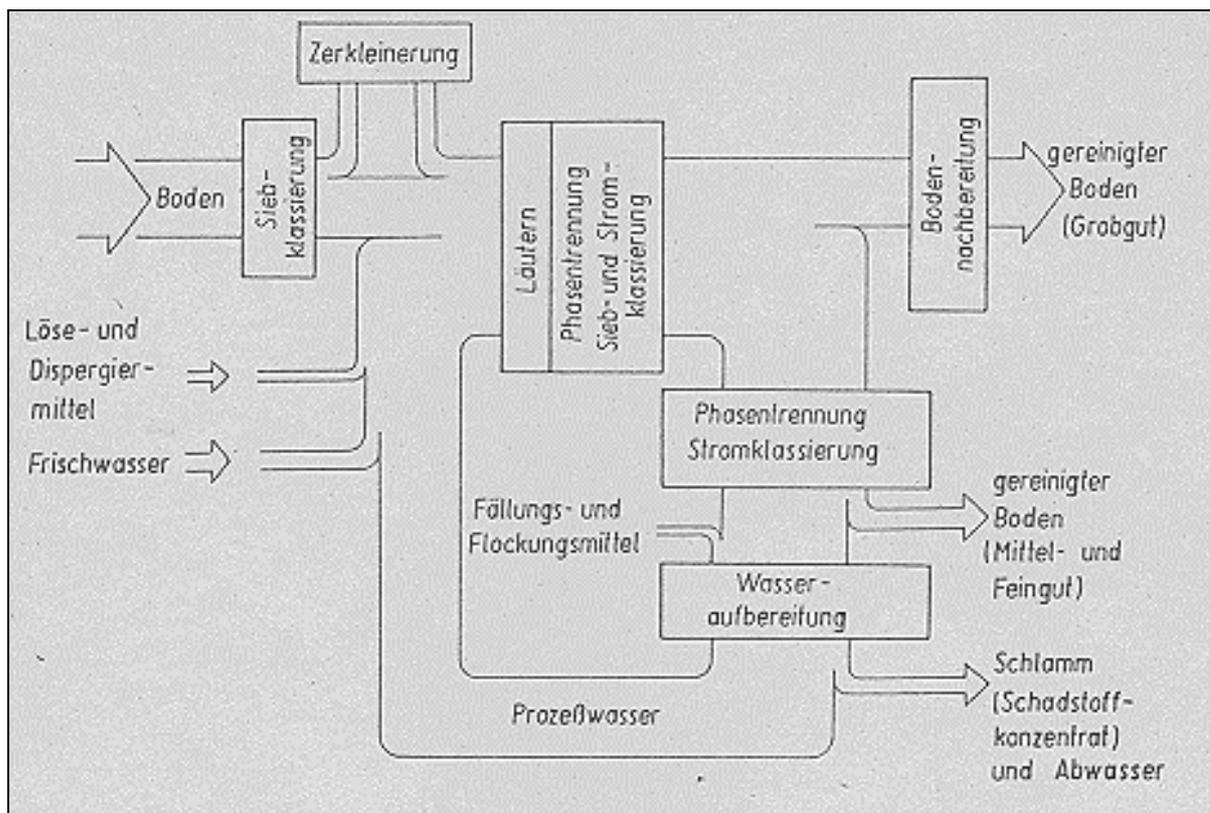


Abb. 3.3-2 Massenströme für ein typisches Verfahren zur Bodenwäsche

Beispielsweise sind für die Sanierung eines schweraufbereitbaren Ausgangsmaterials außer dem Naßaufschluß und den Klassierverfahren u. U. zusätzlich alle Sortierverfahren (Dichtesortierung und Flotation) einzusetzen. Desweiteren ist denkbar, daß in einigen Prozeßstufen, z. B.

- Naßaufschluß,
- Klassierung (z. B. Hydrozyklon),
- Feinkornsartierung (z. B. Flotation),

mehrstufig gearbeitet werden muß. Dadurch kann der Verfahrensgang kompliziert und aufwendig werden.

Im Vergleich zum oben genannten Beispiel kann der Verfahrensgang für das Waschen eines grobkörnigen Kies/Sandbodens mit geringen Schluffanteilen

- ohne Naßaufschluß in speziellen Maschinen,
- einfaches Bebrausen und Spülen auf Sieben,
- Fest/flüssig-Trennung,

eine einfache Technologie darstellen. Allerdings ist bei den meisten Sanierungsfällen mit schwer sanierbarem Ausgangsmaterial zu rechnen.

In bestimmten Fällen kann eine **getrennte Behandlung von Grob- und Feinkorn** in zwei (teilweise) parallelen Waschanlagen die einzige Möglichkeit darstellen, um wenigstens in einer Teilmenge des Bodens die Schadstoffgrenzwerte zu erreichen.

Der Verfahrensgang einer naßmechanischen Bodenwäsche ist nicht nur vom Ausgangsmaterial, sondern auch von den weiteren Behandlungsmöglichkeiten der Trennprodukte, z. B. des kontaminierten Feinschlammes (Deponie oder biologische, chemische bzw. thermische Weiterverarbeitung), abhängig (siehe auch Kap. 3.1).

Für die Verfahrensschritte Waschen und Klassieren sowie Fest/flüssig-Trennung existieren Kombinationen der Grundoperationen, die als verfahrenstechnische Einheit (Modul) in einer Vielzahl von Bodenwaschverfahren anzutreffen sind (siehe Kap. 6). Im folgenden sollen typische Vertreter dieser Einheiten vorgestellt werden.

Kombinationen beim Waschen und Klassieren (NEESSE und GROHS 1991/1)

Abb. 3.3-3 zeigt ein einfaches Waschfließbild mit **einstufiger Hydrozyklonklassierung**. Ein Teil des Hydrozyklonüberlaufs kann im Kreislauf der Hydrozyklonaufgabe wieder zugeführt werden. Das trifft auch für die Abb. 3.3-4 und 3.3-5 zu.

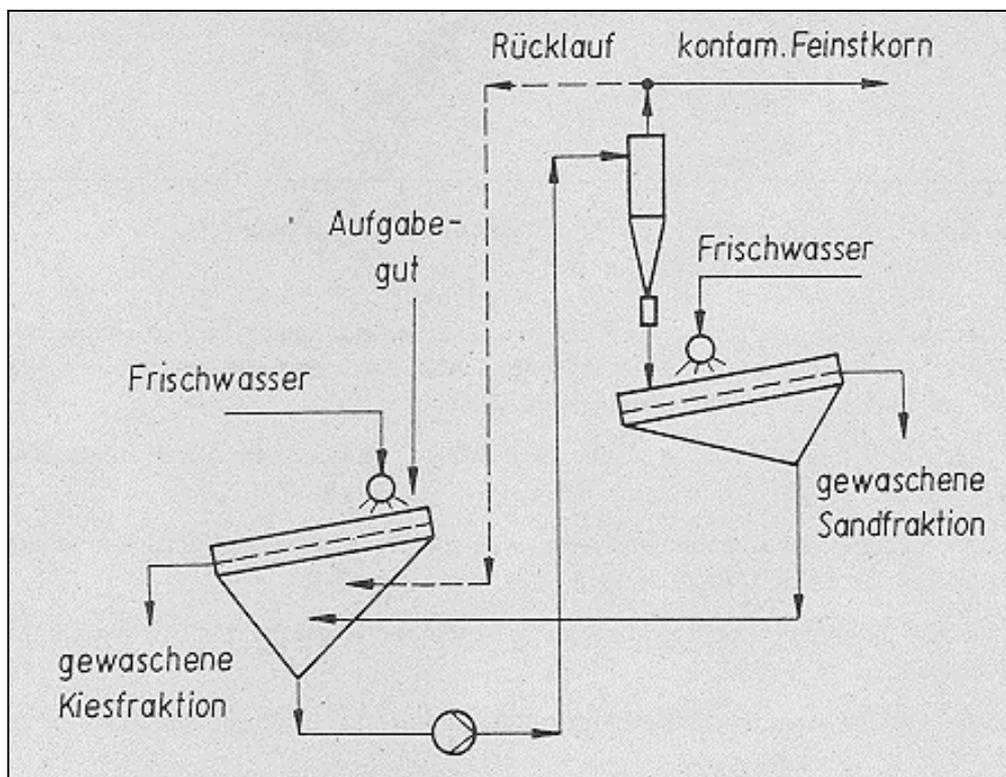


Abb. 3.3-3 Einfaches Waschfließbild

Bei einer weiteren Intensivierung der Reinigung wird das Waschen in feineren Körnungsbe-
reichen bis etwa 0,01 mm angestrebt. Deshalb muß nunmehr mit einer **zweistufigen Hydrozy-
klonklassierung** gearbeitet werden. Dabei wird der Überlauf der ersten Zyklonstufe einem
zweiten Zyklon zur Feinsttrennung aufgegeben (siehe Abb. 3.3-4).

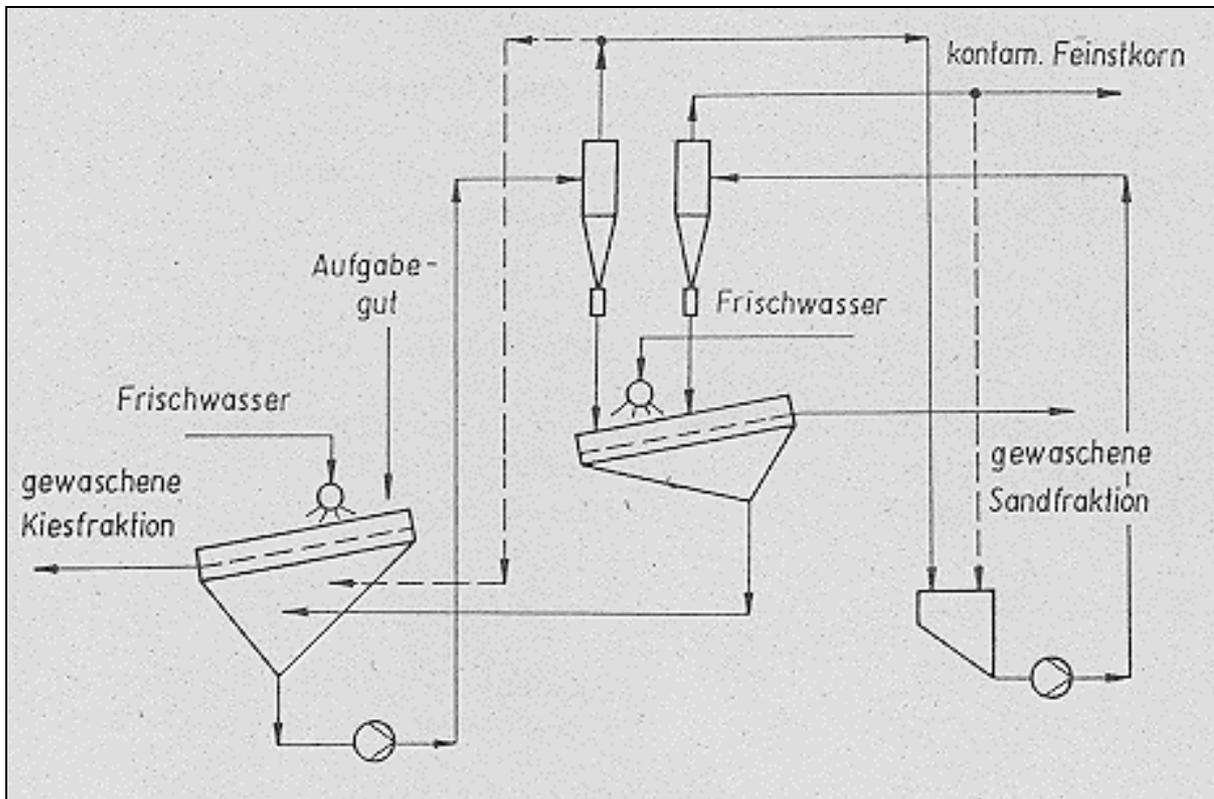


Abb. 3.3-4 Nachwaschen des Hydrozyklonüberlaufs (Feingut)

Bei stark verunreinigten Böden müssen Apparate zum Nachwaschen des Hydrozyklonunter-
laufs der 1. Stufe nachgeschaltet werden. Abb. 3.3-5 zeigt die Variante des Nachwaschens der
Sande in einer zweiten Hydrozyklonstufe.

Um den Reinigungseffekt noch weiter zu erhöhen, werden auch **Aufstromklassierer** zum
Nachwaschen der Sande eingesetzt. Die Schaltung zeigt Abb. 3.3-6.

Aus dem Überlauf des Aufstromklassierers wird spezifisch leichtes organisches Material,
z. B. über ein Bogensieb, abgetrennt.

Die hier beschriebenen Apparatekombinationen werden vorwiegend in Containerbauweise
ausgeführt.

Eine Variante der Kombination Hydrozyklon/Aufstromsortierer/Schwingentwässerer zeigt
Abb. 3.3-7.

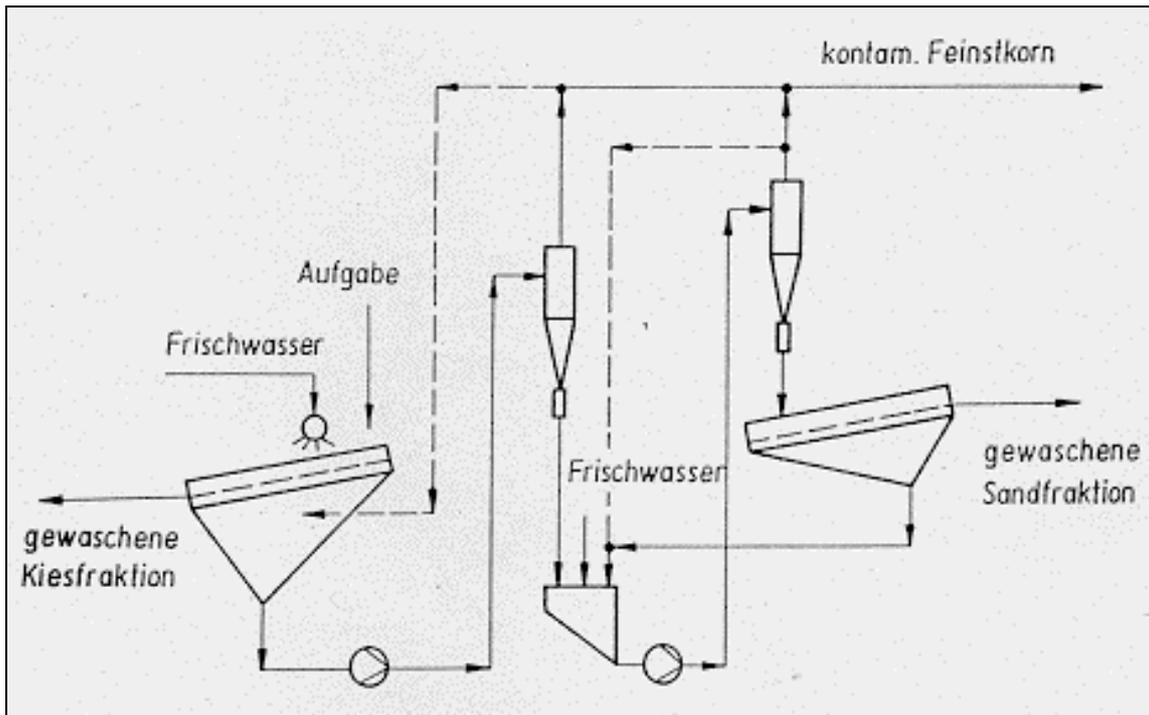


Abb. 3.3-5 Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Grobgut)

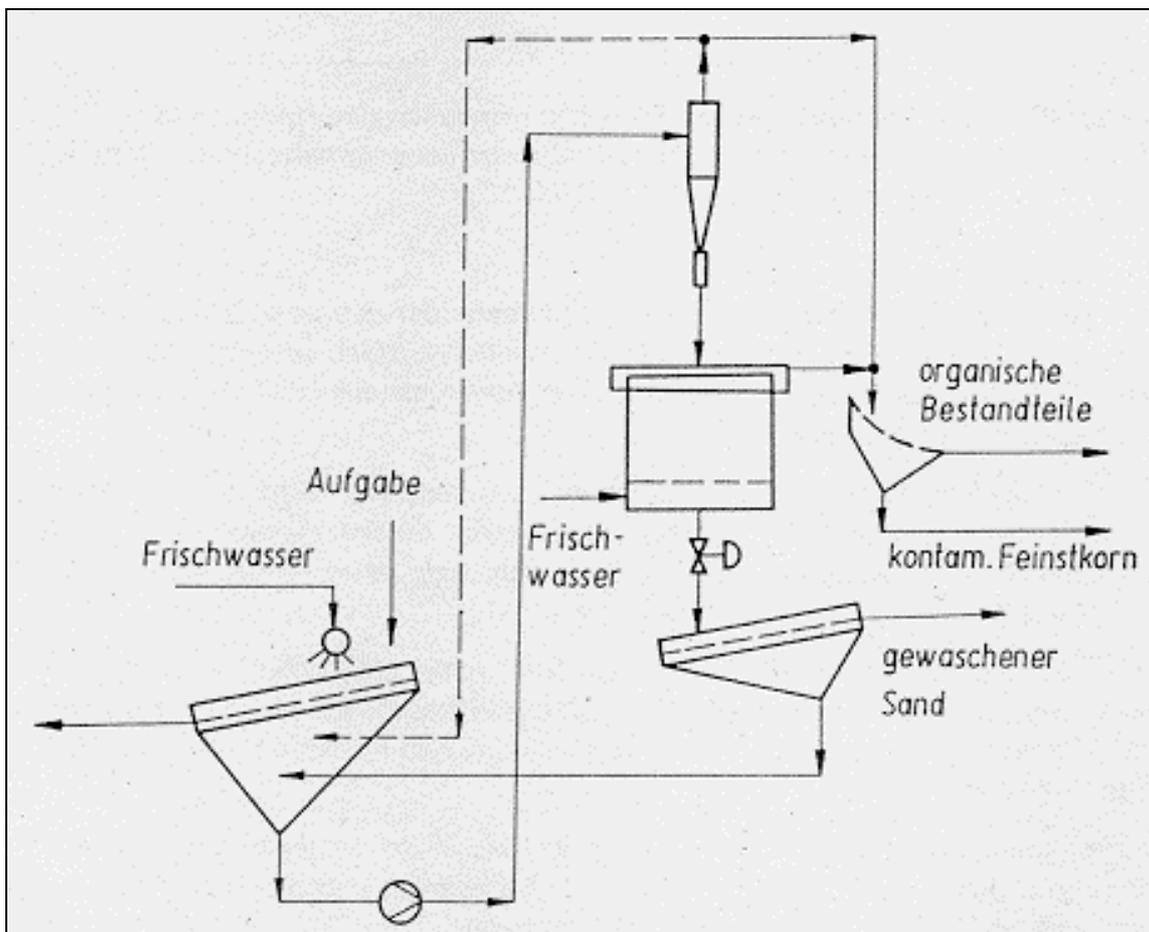


Abb. 3.3-6 Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Sand) im Aufstromklassierer

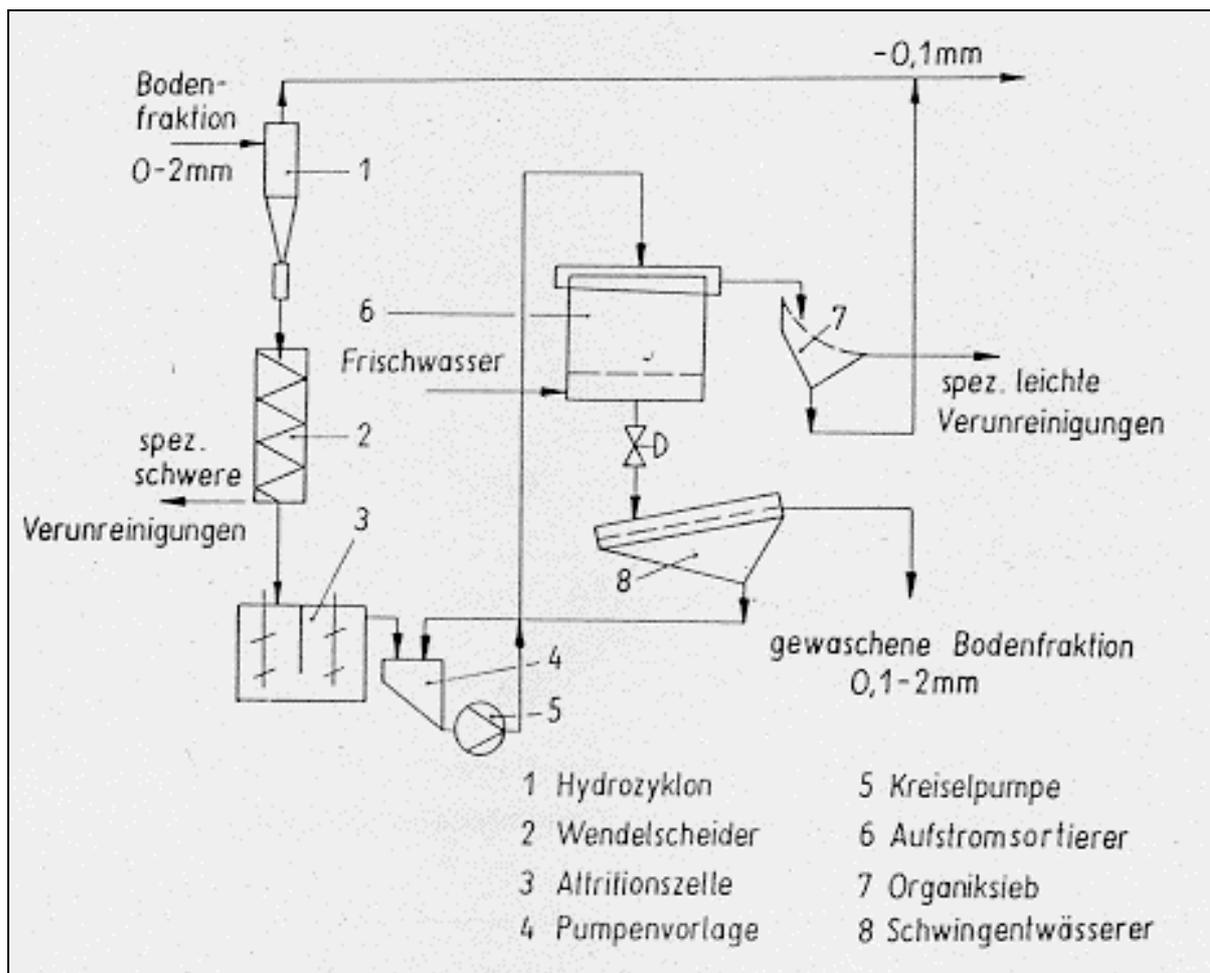


Abb. 3.3-7 Fließbild mit zweistufigem Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Sandfraktion) und zwischengeschalteter Attritionsstufe (System Schauenburg MAB 1991/2)

Nach diesem Fließbild werden in einem **Wendelscheider** aus dem Zyklonunterlauf zunächst spezifisch schwere Verunreinigungen abgetrennt. Nach weiterem Aufschluß der mittelschweren und leichten Fraktionen in einer **Attritionszelle** erfolgt dann der weitere Verfahrensgang, analog nach Abb. 3.3-6.

Eine besonders effektive Form des Waschens von Feinkorn(Sand)fraktionen bietet das Hydrozyklonwaschen nach dem **Gegenstromprinzip**. Dieses Prinzip wird z. B. in der chemischen Industrie, aber auch bei der Boden-sanierung, angewendet. Abb. 3.3-8 zeigt eine 4stufige Hydrozyklongegenstromwäsche.

Hohe Wascheffekte erfordern beim einstufigen Waschen große Mengen an Waschflüssigkeit. Dagegen wird beim mehrstufigen Gegenstromwaschen Wasch(Frisch)wasser nur in der letzten Stufe aufgegeben und im Gegenstrom zum Feststoff bis zur Aufgabe der ersten Stufe zurückgeführt.

Für das (mehrstufige) Gegenstromwaschen werden in der Bodenwäsche im größeren Kornbereich (Sand, Kies) auch Spiralwäscher (Sandfänge) und die mehrstufige Frischwasserkaskadenspülung (Siebklassierung) verwendet.

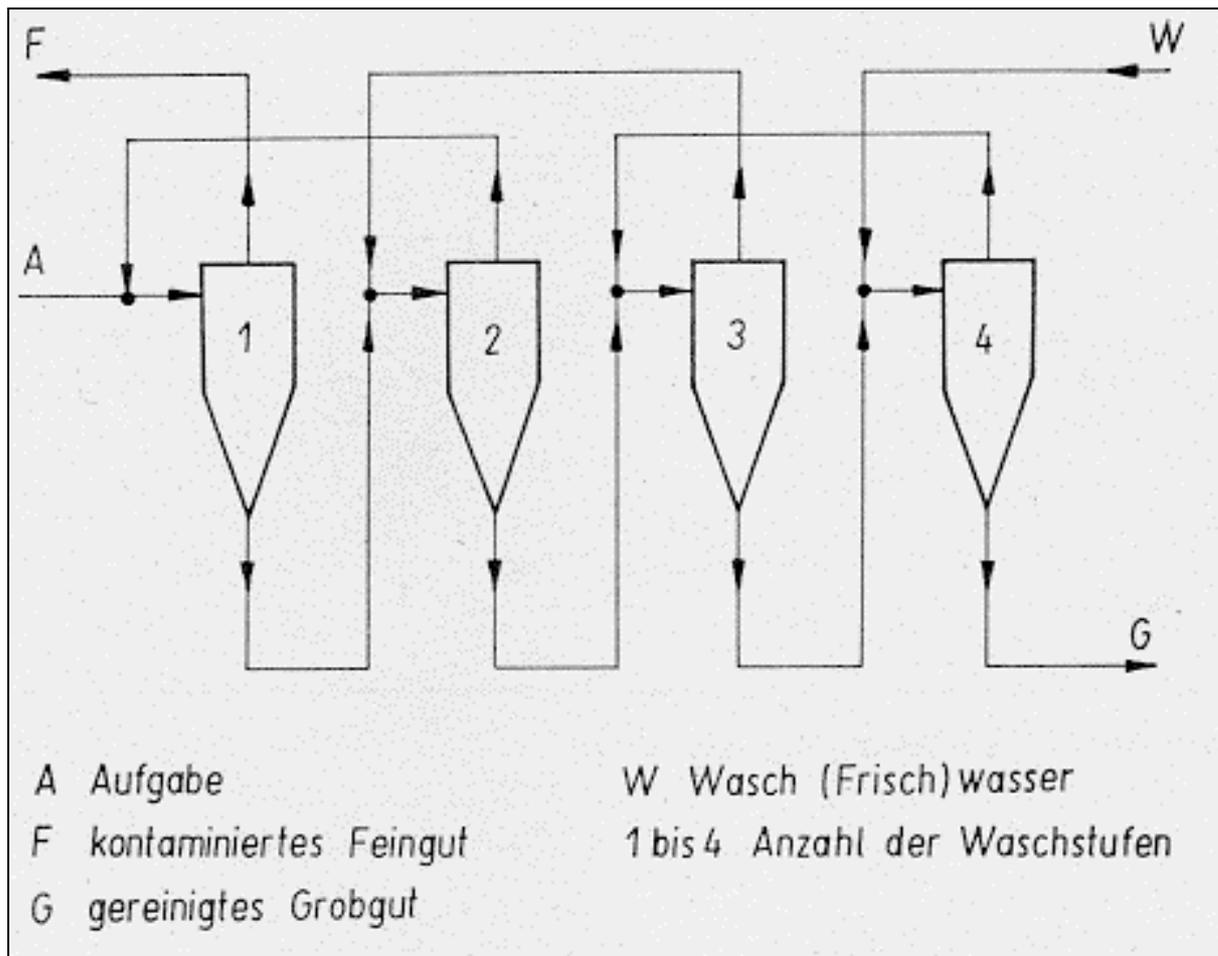


Abb. 3.3-8 Mehrstufige Hydrozyklongenestromwäsche (AKW 1991)

Kombinationen in der Fest/flüssig-Trennung (NEESSE und GROHS 1991)

Bei relativ hohen Aufgabefeststoffkonzentrationen des kontaminierten Feinschlammes wird beispielsweise die **Apparatekombination Eindicker/Schräglärer** eingesetzt (Abb. 3.3-9). Siehe auch Kap. 3.2.5.

Hier wird der Eindickerüberlauf noch einmal nachgeflockt und im Schräglärer geklärt.

Auch die umgekehrte **Kombination Schräglärer/Eindicker** wird in der Bodenaufbereitung bei relativ niedrigen Aufgabefeststoffkonzentrationen angewendet. Der Schlammaustrag des Schräglärers wird im Eindicker naheingedickt (Abb. 3.3-10).

Bei Vorliegen von koagulierten Suspensionen/Emulsionen kann an die Stelle der Sedimentationsstufe auch die Flotation treten.

Das Fließbild einer **mehrstufigen Prozeßwasseraufbereitung** zeigt Abb. 3.3-11. Die zweistufige Sedimentation entspricht der Variante von Abb. 3.3-9.

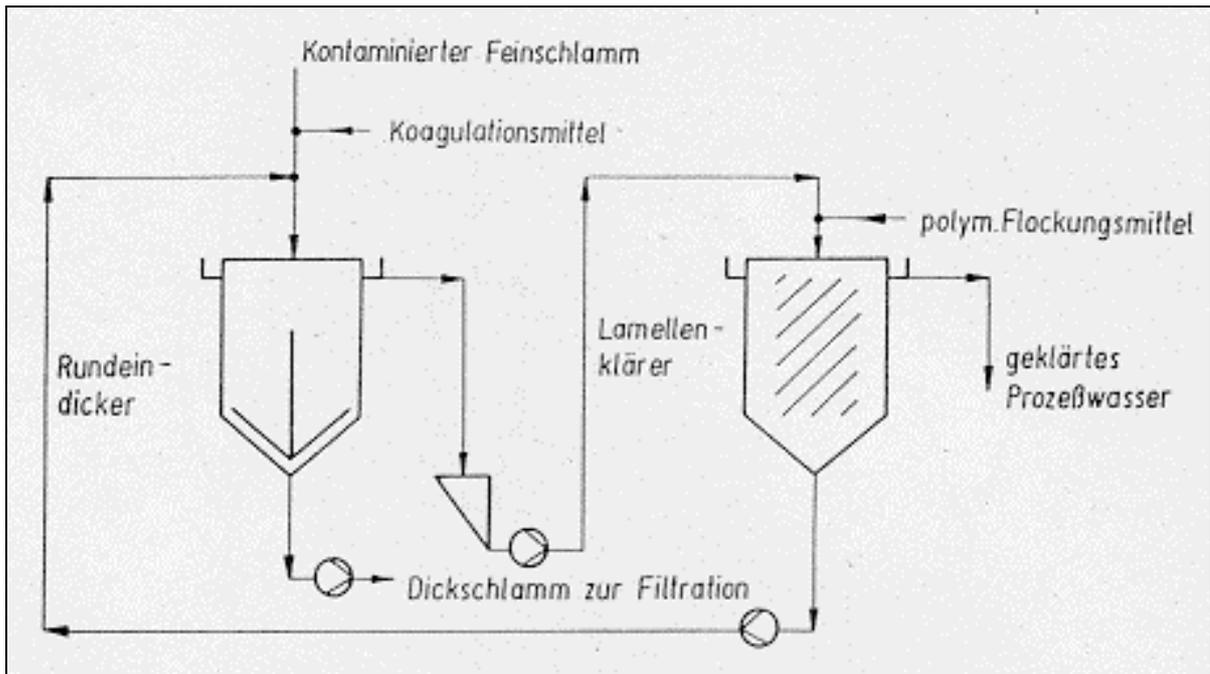


Abb. 3.3-9 Eindickung und Nachklärung

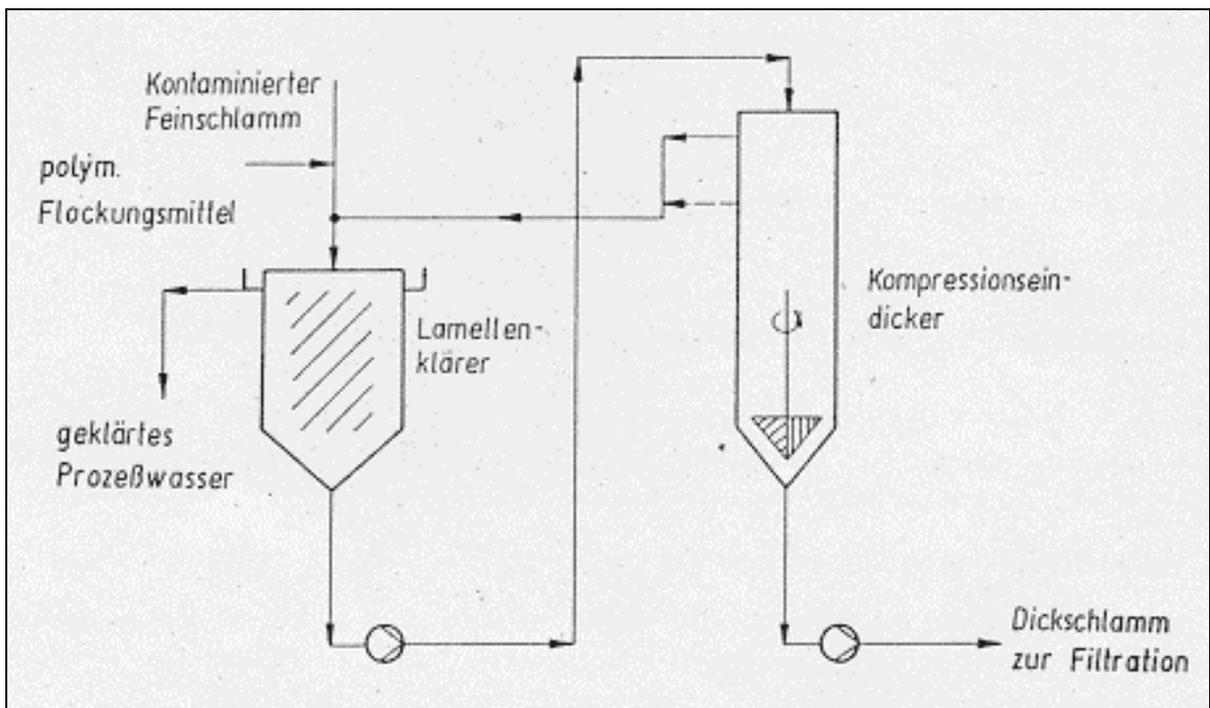


Abb. 3.3-10 Klärung und Nacheindickung

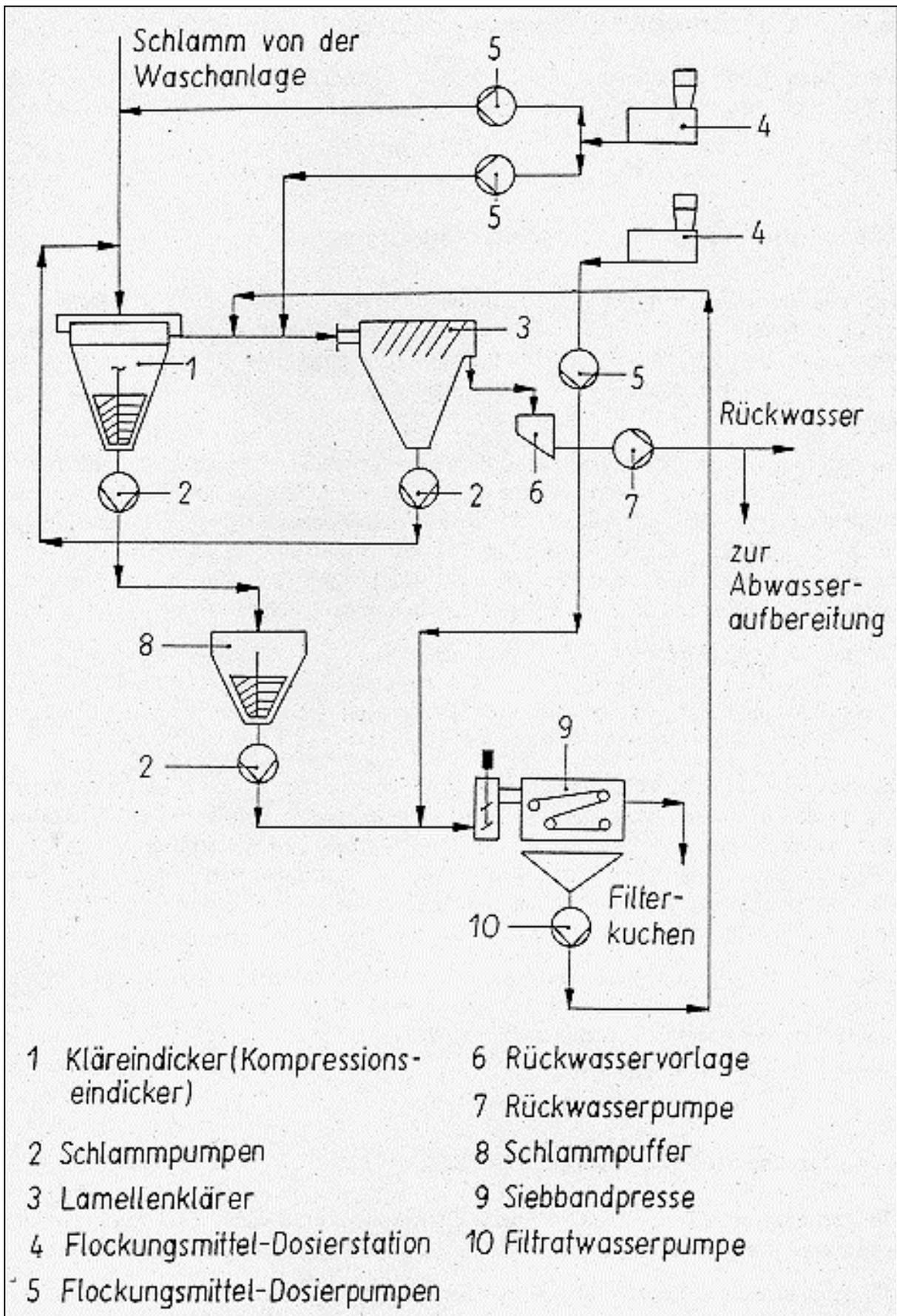


Abb. 3.3-11 Fließbild einer mehrstufigen Prozeßwasseraufbereitung

3.4 Chemische Prozesse in der Sekundärtechnik

Bedeutung haben chemische Prozesse für die Behandlung der bei jeder Bodenwäsche anfallenden Prozeß- und Abwässer sowie für die Abluftreinigung und Schlammbehandlung.

3.4.1 Prozeßwasser/Abwasserbehandlung

Die beim Bodenwaschvorgang ins Waschmedium Wasser überführten Schadstoffe müssen aus diesem soweit wieder entfernt werden, daß eine Kreislaufführung des Prozeßwassers möglich ist. Weiterhin ist es erforderlich, das anfallende Abwasser soweit zu reinigen, daß es den Bedingungen für die Einleitung in die öffentliche Kanalisation entspricht.

Im Zusammenhang mit der Bodenwäsche sind als chemische Prozesse **Löseprozesse** und **Fällungsprozesse** besonders zu beachten. Während Löseprozesse im Verlaufe des Waschvorganges für die Belastung der Prozeßwässer verantwortlich sind, stellt die **Fällung** von gelösten Wasserinhaltsstoffen eine der Grundoperationen für die Wasserbehandlung dar. Darüberhinaus sind weitere Verfahren wie **Umkehrosmose**, **Ionenaustausch**, **Oxidation** und andere, für die Wasserbehandlung üblich.

Bei der **Umkehrosmose** wird mittels Druck und halbdurchlässigen Membranen aus einem Abwasser eine an Schadstoffen konzentrierte Wasserfraktion und eine gereinigte Wasserfraktion bereitet. Der angewandte Druck muß größer sein als der osmotische Druck der wäßrigen Lösung (15 bis 80 bar).

Ebenso wie durch Umkehrosmose lassen sich geringe Ionenkonzentrationen im Abwasser durch **Ionenaustausch** erzielen. Unter Ionenaustausch versteht man die Bindung von im Wasser gelösten Ionen an Festkörpern (spezielle Austauscherharze) unter Freisetzung anderer, gleichsinnig geladener Ionen (H⁺-Ionen oder Alkaliionen). Beim reversiblen Ionenaustausch können die am Harz gebundenen Ionen durch Umkehr der Reaktion wieder freigesetzt werden (Regenerierung des Harzes).

Oxidationsverfahren (Ozonisierung oder Naßoxidation) dienen bevorzugt zur oxidativen Umsetzung organischer (z. T. auch anorganischer) Schadstoffe. In günstigen Fällen werden dabei die organischen Verbindungen zu CO₂ und H₂O "verbrannt". Beide Verfahren sind aufwendig, aber sehr intensiv.

Löseprozesse (NEESSE 1990) (siehe auch Kap. 3.2.2.4)

Da jede chemische Verbindung eine mehr oder weniger große Löslichkeit in Wasser aufweist, kann der Schadstoff bei allen nassen Verfahrensstufen gelöst werden.

Die dabei erreichten Konzentrationen hängen von dem **Löslichkeitsprodukt** des Schadstoffes ab. Das Löslichkeitsprodukt L einer Verbindung K_xA_y ist durch das Ionenprodukt definiert.

$$L = C_K^x \cdot C_A^y$$

Schwerlösliche Verbindungen haben einen kleinen Wert für L, leicht lösliche Verbindungen einen hohen Wert.

Je nach der Basizität der Schadstoffverbindung kann eine pH-Wert-Änderung den Löseprozeß begünstigen.

Die Überführung von Kontaminationen in gelöster Form in die Waschflüssigkeit ist nicht nur auf die Auflösung fester Schadstoffpartikel beschränkt, sondern kann auch über die Desorption adsorbierter Schadstoffe erfolgen. Auch in diesem Fall hat der pH-Wert einen beträchtlichen Einfluß auf den Prozeß.

Fördernd für die Schadstoffauflösung wirken auch Zusätze von **Komplexbildnern** zur Waschflüssigkeit. Je stabiler der sich bildende Komplex ist, um so leichter ist das Herauslösen des Schadstoffes.

Zusätze von Komplexbildnern bzw. pH-Wert-Einstellungen werden bei den Extraktionsvorgängen gezielt zur Dekontamination von Böden eingesetzt.

Das Lösen unter Komplexbildung spielt vor allen Dingen beim Aufschluß **cyanidhaltiger Kontaminationen** eine Rolle. Aber auch bei der sauren Laugung von **quecksilberverunreinigten Böden** bilden sich lösliche Chlorokomplexe.

Demgegenüber hat der Tensideinsatz nur eine indirekte Wirkung auf Löseprozesse, indem er über eine Verbesserung der Benetzbarkeit des Feststoffs die Wechselwirkung des Wassers mit dem Boden unterstützt.

Kennzeichnend für Auflösungs Vorgänge ist die Verweilzeitabhängigkeit des Prozeßerfolges. Lange Verweilzeiten, eine hohe Dispersität des Feststoffes und intensives Rühren der Trüben begünstigen den Löseprozeß.

Fällung (HARTINGER 1985/1)

Die Fällung schwerlöslicher Verbindungen hat für die Bodenwäsche selbst keine Bedeutung, ist aber ein weitverbreitetes Grundverfahren für die Reinigung der anfallenden Prozeß- und Abwässer. Es kann stets dann angewendet werden, wenn das im Wasser gelöste Schadstoffion **schwerlösliche Verbindungen** bildet. Die physiko-chemische Beschreibung des Fällprozesses erfolgt ebenfalls durch das Löslichkeitsprodukt.

Es ist ein bevorzugtes Verfahren zur Abscheidung von Schwermetallen (**Kationen**) aus Wässern. Da die meisten Schwermetalle schwerlösliche Hydroxyde, Karbonate, Phosphate und Sulfide bilden, sind diese Anionen die am meisten eingesetzten Fällungsmittel.

Die Auswahl des Fällungsmittels richtet sich in erster Linie nach dem Löslichkeitsprodukt. Es ist allerdings zu beachten, daß das Fällungsmittel im stöchiometrischen Überschuß zugesetzt werden muß und zum beträchtlichen Anteil nach der Fällung im Wasser verbleibt. Demzufolge darf das Fällungsmittel selbst kein Wasserschadstoff sein (Sulfide).

Die durch die Fällung erreichbaren Restkonzentrationen an Schwermetallen ergeben sich aus dem Löslichkeitsprodukt. Für zu entfernende Konzentrationen unterhalb dieser Grenzkonzen-

tration müssen andere Verfahren zur Abwasserbehandlung eingesetzt werden (z. B. Umkehrosmose, Ionenaustausch, Oxidation) (HARTINGER 1985/2).

Ebenso sind auch schädliche **Anionen**, wie Fluorid oder Sulfat, durch Kationenzusätze abscheidbar (HARTINGER 1985/3).

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Restkonzentrationen ist durch den Einsatz von Fällungsmittelkombinationen (Karbonat/Hydroxid) gegeben.

Ein besonderes Verfahren ist die sogenannte **adsorptive Fällung**, wobei die hohe Adsorptionsaktivität amorpher Hydroxidniederschläge (Hydroxide des Eisens und Aluminiums) ausgenutzt wird.

Fällungsreaktoren sind Rührbehälter. Die Rührintensität und die Geschwindigkeit der Fällungsmittelzugabe haben entscheidenden Einfluß auf die Kristallinität des Fällproduktes.

Die richtige Steuerung des Fällprozesses kann in der nachfolgenden Fest/flüssig-Trennung (Abtrennung des Fällproduktes aus dem Wasser) beträchtliche Vorteile bringen.

Besondere Maßnahmen sind erforderlich bei Wässern, die **emulgierte Bestandteile** enthalten.

Man trennt entweder die emulgierte Phase mittels **physikalisch-mechanischer** Prozesse ab:

- Elektrophorese
- Mikro/Ultrafiltration
- Flotation (siehe Kap. 3.2.4.2)

oder es erfolgt eine **Abtrennung der unpolaren Phase nach der Emulsionsspaltung**:

- **Chemische Spaltung** z. B.
 - Säure/Salzspaltung
 - Hydroxidspaltung
 - Organische Emulsionsbrecher

Bei der **Elektrophorese** erfolgt die Reinigung durch Anlegen eines elektrischen Feldes (DC). Die Emulsionstropfen wandern im elektrischen Feld und reichern sich an einer Elektrode an.

Durch den Einsatz von Membranen, die eine Struktur aus Kapillarkanälen besitzen und somit für verschieden große Teilchen wie ein Sieb wirken, können durch **Mikro/Ultrafiltration** Teilchen von ca. 5 nm bis 10 µm aus Lösungen abgetrennt werden.

Strippen (VCI 1985)

Strippen ist ein Verfahren zum **Austreiben von leichtflüchtigen Bestandteilen aus belasteten Abwässern**. Für die Abwasserreinigung bei der Bodenwäsche kann es insofern von Bedeutung sein, wenn es gilt, leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe, die sich während des Waschprozesses im Waschwasser gelöst haben, zu entfernen.

Das Verfahren beruht auf dem Henryschen Gesetz, das den Zusammenhang zwischen dem Molenbruch einer Komponente in der Flüssigkeit und dem darüber befindlichen Gasraum angibt.

Beim Strippen wird der Partikeldruck des im Wasser gelösten leichtflüchtigen Stoffes im Gasraum erniedrigt und so das Nachverdampfen ständig gewährleistet. Dies wird durch Begasen der Flüssigkeit mit einem Inertgas, Entspannen der Flüssigkeit oder Eintrag von Wasserdampf erreicht.

Verfahrenstechnisch wird das Strippen in **Strippkolonnen**, die in ihrem Aufbau der Destillationskolonne ähneln, durchgeführt. In nachgeschalteten Kühlern oder Adsorbern wird die flüchtige Komponente aus dem Gasstrom abgeschieden (siehe auch Kap. 3.4.2).

Außer zur Entfernung der schon erwähnten leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe ist das Strippen auch zum **Austreiben gelöster Gase** wie z. B. Ammoniak oder Schwefelwasserstoff geeignet.

Abschließend muß zur Prozeß- und Abwasserbehandlung gesagt werden, daß in Anbetracht der Vielzahl der möglichen Schadstoffe und des weiteren Konzentrationsbereiches eine technisch und wirtschaftlich optimale Reinigung nur durch eine Kombination von Verfahren zu erzielen ist.

3.4.2 Schlammbehandlung

In der Regel sind in den Schlämmen der Bodenwäsche die Schadstoffe konzentriert. Man lagert diese entweder auf Sonderdeponien ab, oder es wird eine Schlammbehandlung durchgeführt.

Folgende Verfahren zur Nachbehandlung der anfallenden Schafstoffkonzentrate sind in Abhängigkeit von Art und Konzentration der Schadstoffe möglich:

1. Verfestigung

Die Entwässerbarkeit von Schlämmen mit den üblichen Entwässerungsaggregaten sind Grenzen gesetzt (ca. 35 % TS). Um die Standfestigkeit und die Befahrbarkeit von Deponien zu garantieren ist oftmals eine Nachverfestigung erforderlich. Dies wird durch die Zumischung von wasser verbindenden Stoffen, wie Branntkalk, Zement oder Sägemehl erreicht.

2. Thermische Verfahren

Organische Verbindungen werden durch Oxidation vollständig in CO_2 und H_2O umgewandelt. Flüchtige Schwermetalle (z. B. Cd und Hg) werden ausgetrieben.

3. Keramisieren (Verglasen)

Schwermetalle werden durch eine entsprechende Prozeßführung in die mineralische (silikatische) Matrix durch Schmelzprozesse eingebunden, so daß sie nicht mehr auslaugbar sind.

4. Chemische Extraktion

Dabei werden die Schwermetalle aus den angefallenen Schlämmen durch Säure-, Alkalibehandlung oder Komplexbildung gelöst. Anschließend erfolgt eine Abwasserbehandlung.

3.4.3 Abluftbehandlung

Das Ziel der **Abluftbehandlung** ist die Entfernung der Schadstoffe aus der Abluft, bevor diese in die Umgebung gegeben wird.

Folgende **Methoden** sind bekannt:

- Staubabscheidung der schadstoffhaltigen Luft in Zentrifugalkraftabscheidern (Aerozyklone), in Filtrationsabscheidern (Staubfilter) und in elektrischen Abscheidern (Elektrofilter)
- Adsorption an Aktivkohle (Aktivkohlefilter)
- Katalytische Abluftverbrennung
- Kondensation
- Abluftwäsche (Naßabscheider)
- Zerstörung der Schadstoffe durch UV-Strahlung

Die anzuwendende Methode richtet sich nach:

- Art und Konzentration der Schadstoffe
- Möglichkeit der Rückgewinnung der Schadstoffe

Die Verfahren müssen im Einzelfall nach ihrem Wirkungsgrad und der Umweltrelevanz beurteilt werden (MÖLLER-BREMER, 1991).

4 Stand der Technik

Bodenwaschverfahren werden gegenwärtig von etwa zwei Dutzend Firmen auf dem deutschen Markt angeboten, wobei sich nur wenige Anbieter auf umfangreiche Anwendungserfahrungen im großtechnischen Maßstab stützen können.

Sie unterscheiden sich in ihren Konzeptionen vorrangig durch die gewählte Technik zur Ablösung des Schadstoffes vom zu reinigenden Bodenkorn (Naßaufschluß) und durch die Anwendung unterschiedlicher Klassier- und Sortierverfahren.

Im Regelfall wird der kontaminierte Boden ausgehoben ("ausgekoffert"), vorsortiert und gegebenenfalls zwischengelagert. Anschließend durchläuft er Verfahren der Sortierung, Zerkleinerung und ggf. der Abscheidung metallischer Bestandteile.

Es folgt eine Aufschlammung (in der Literatur auch "anmaischen" genannt) des Bodens mit Wasser und ggf. Additiven zur Verbesserung des Schadstofftransportes vom kontaminierten Material in das Waschmedium.

Daran schließt sich der eigentliche Waschvorgang an, der das Ablösen der Schadstoffe von den Bodenpartikeln bewirken soll. Dazu werden durch spezielle verfahrenstechnische Lösungen Beschleunigungs-, Scher- oder Reibungskräfte auf den Boden übertragen, um die Bindung zwischen Schadstoff und Bodenpartikeln aufzuheben, und um eine vollständige Dispergierung der Suspension zu erreichen.

Die Schadstoffe gehen so in ein anderes Trägermedium (Luft, Wasser) über und können daraus leichter entfernt werden. Die verbleibende Suspension durchläuft nun mehrere Stufen der Klassierung und Sortierung zur Abtrennung der gereinigten Bodenfraktionen (Schotter, Kies, Sand) und der aufkonzentrierten Schadstoffe, die als Leichtgut, Sedimentfilterkuchen und auch als selektiv separierte Schadstofffraktionen vorliegen.

Zur Reinigung des Prozeßwassers werden je nach Schadstoff- und Bodenart Ölabscheider, Schlammeindicker, Zentrifugen, Filterpressen, Aktivkohlefilter und Ionenaustauscher sowie Einrichtungen zur Neutralisation, Fällung, Flockung und Emulsionsspaltung eingesetzt.

Durch den Austrag der noch feuchten gereinigten Bodenfraktion und der Reststoffe sowie durch sonstige Verluste werden dem Prozeß ca. 10 bis 20 % des Umlaufwassers entzogen. Diese Menge muß grundsätzlich durch Frischwasserzufuhr ausgeglichen werden.

Verfahren, die heute den Stand der Technik repräsentieren, verfügen neben einer chemisch-physikalischen und/oder biologischen Abwasseraufbereitung auch über eine wirksame Abluftreinigungsanlage. Diese ist für die Reinigung von Böden, die mit leicht- bis mittelflüchtigen Schadstoffen belastet sind, zwingend erforderlich.

Durch den sogenannten "Stripp-Effekt" besonders bei der Bodenvorbereitung, kann es zur Desorption und damit zur Schadstoffverlagerung auf das Trägermedium Luft kommen.

Um diesen, auch bei der Belüftung, Homogenisierung und Oberflächenvergrößerung (beispielsweise durch Auflockerung) hervorgerufenen Effekt zu beherrschen, integrieren verschiedene Anbieter dezentrale Absaugvorrichtungen und eine zentrale Abluftbehandlung in ihr Anlagenkonzept.

Bodenwaschverfahren werden sowohl im On-site- als auch im Off-site-Betrieb eingesetzt, d. h. der zuvor ausgekofferte Boden wird entweder in Anlagen vor Ort (on site) oder in Bodenbehandlungszentren (off site) gereinigt. Neuere Entwicklungen zielen darauf ab, Waschverfahren auch in situ, d. h. ohne vorherige Auskoffierung des kontaminierten Bodens einzusetzen.

In Bodenbehandlungszentren sollen demnächst auch stationäre Bodenwaschanlagen in Kombination mit anderen Reinigungstechniken, wie z. B. der biologischen oder thermischen Behandlung, eingesetzt werden.

In den folgenden Abschnitten wird die verfahrenstechnische Umsetzung der einzelnen Prozessstufen einer Bodenwäsche der Anlagen beschrieben, die zwischen 1990 und 1991 großtechnisch im Einsatz waren bzw. im ersten Quartal 1992 in Betrieb gingen.

Unterschieden wird dabei nach der Art der Anlagenmobilität, d. h. nach

- **mobilen** (Rüstzeit bis 3 Tage)
- **semimobilen** (Rüstzeit 2 bis 4 Wochen) und
- **stationären** (ortsfest installierten)

Bodenwaschanlagen.

Mobile Anlagen sind in sich vollständig verrohrt und verkabelt, so daß am Einsatzort praktisch keine Montagearbeiten mehr erforderlich sind. Sie sind standardisiert (meist Normcontainer) und leicht umsetzbar.

Semimobile Anlagen bestehen aus bis zu 70 vormontierten und verkabelten Container-Einheiten, die am Einsatzort durch i. d. R. einfache Steck- und Flanschverbindungen miteinander verbunden werden. Als "Container" werden meist Stahlrahmenkonstruktionen gewählt, in die Anlagen und Maschinen bereits fest installiert sind. Die Maße der Bauteile richten sich nach ihrer Transportfähigkeit und reichen bis 12,00 x 3,00 x 2,50 m (Länge x Breite x Höhe). Die Montage semimobiler Anlagen am Einsatzort erfordert einen hohen Personal- und Maschinenaufwand, verbunden mit entsprechend hohen Baustelleneinrichtungskosten.

Stationäre Bodenwaschanlagen sind ortsfest installierte und in festen Gebäuden bzw. Hallen untergebrachte Anlagen mit dem Ziel des Dauerbetriebes. Konstruktives Merkmal sind technisch aufwendig gestaltete Nebenanlagen, wie z. B. doppelt abgesicherte Materiallager, Abluft- und Abwasserbehandlungsanlagen.

4.1 Mobile Bodenwaschanlagen (on site)

4.1.1 Das Trommelwasch-Verfahren System ContraCon

Von der Fa. ContraCon Umwelt-Technik, Cuxhaven, werden Bodenwaschverfahren sowie die Kombination von Bodenwäsche und biologischer Behandlung angeboten.

Umgesetzt in Modulbauweise lassen sich bestimmte Verfahrensschritte ergänzen oder ändern. Das gilt in besonderem Maße für die Wasseraufbereitungsstufe. Hier können hydraulische, chemisch-physikalische sowie biologische Verfahren eingesetzt oder miteinander kombiniert werden.

Zur Lärm- und Emissionsminderung können die Anlagen auch komplett eingehaust werden.

4.1.1.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Das Prinzip der ContraCon-Bodenwäsche beruht darauf, daß in einem Freifallmischer unter Zugabe von Wasser und ggf. Tensiden eine mechanische Ablösung der an den Schluff- und Tonfraktionen des Bodens anhaftenden Schadstoffe erreicht werden soll. Diese sollen weitgehend in die Wasserphase überführt werden.

Diese Bodenanteile sowie die an ihnen angelagerten Schadstoffe werden im Wasser durch Tenside in Lösung gehalten und durch eine Behandlung mit Polyelektrolyten anschließend ausgeflockt.

Dieser ausgeflockte Schlamm kann in Abhängigkeit vom Schadstoff bzw. der Schadstoffkombination und -konzentration entweder statisch oder mechanisch entwässert werden oder er wird in einem mobilen Bioreaktor (Versuchsstadium) vor Ort behandelt.

Im Fließschema, Abb. 4.1-1 sind die einzelnen Verfahrensstufen dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Mit Hilfe eines Brechers oder Preßluftmeißels wird insbesondere grobstückiges Material (Bauschutt) vorzerkleinert und mittels eines Radladers einem Stangensizer aufgegeben. Der Stangensizer trennt Material mit einer Stückgröße über 150 mm ab.

Waschprozeß

Das kontaminierte Bodenmaterial < 150 mm wird in einem Freifallmischer mit Wasser und ggf. Detergentien ca. 30 min homogenisiert, bevor es in eine Waschtrommel gelangt. Bei den Freifallmischern handelt es sich um Mischtrommeln, die schräg gestellt sind und ein Fassungsvermögen von ca. 14 bis 15 t besitzen.

Die Freifallmischer werden entleert, indem man die Drehrichtung der Trommeln umkehrt, so daß das Material über die gleiche Öffnung wieder ausgetragen wird, in die es eingegeben

wurde. Der Austrag erfolgt in die Waschtrommel, in der das Material im Gegenstromverfahren gewaschen wird.

Der Waschtrommel nachgeschaltet ist ein Schwingsieb, auf das Düsen mit hohem Druck Wasser sprühen und damit einen Nachreinigungseffekt erzielen.

Bodenklassierung und -separation

Durch das Schwingsieb, das eine Spaltbreite von 2 mm aufweist, wird das zu behandelnde Material in zwei Fraktionen getrennt; das Überkorn wird durch die Bebrausung nachgereinigt.

Die Fraktion mit einer Körnung > 2 mm kann nach diesem Verfahrensschritt direkt ausgetragen werden, wenn sie den geforderten Grenzwerten für den Feststoff entspricht.

Das Material < 2 mm wird weiter durch Schneckenförderer und Entwässerungsschnecke klassiert. Die Entwässerungsschnecke besitzt noch einen sogenannten Nachwaschgang im Gegenstrom.

Das Material zwischen 0,063 mm und 2 mm wird als gereinigte Sandfraktion ausgeschleust.

Die Suspension mit dem Feinkornanteil $< 0,063$ mm wird über einen Hydrozyklon eingedickt, geflockt und in einer Siebandpresse auf 55 bis 65 % TS entwässert.

Prozeßwasserreinigung

Die anfallenden Prozeßwasserströme und die Überläufe des Hydrozyklons werden in einen Puffercontainer geleitet, von wo sie nach erfolgter Sedimentation kontinuierlich in die Wasseraufbereitung übernommen werden.

Der Überlauf des Hydrozyklons geht über den Pufferbehälter direkt in die Wasseraufbereitungsanlage, die mit Flockung, Fällung, Kies- und Aktivkohlefiltration arbeitet.

Das so gereinigte Abwasser wird im Kreislauf gefahren oder dem Schmutzwasserkanal zugeführt.

Reststoffbehandlung

Die Feinanteile, die Schluff- und Tonfraktionen sowie die angelagerten Schadstoffe werden im Wasser durch Detergentien in Lösung gehalten und durch eine Behandlung mit Polyelektrolyten ausgeflockt. Dieser ausgeflockte Schlamm kann - abhängig vom Schadstoff bzw. der Schadstoffkombination und -konzentration - entweder statisch oder mechanisch entwässert werden, um anschließend ebenso wie das Schadstoffkonzentrat entsorgt zu werden (Deponie oder Bioreaktoren).

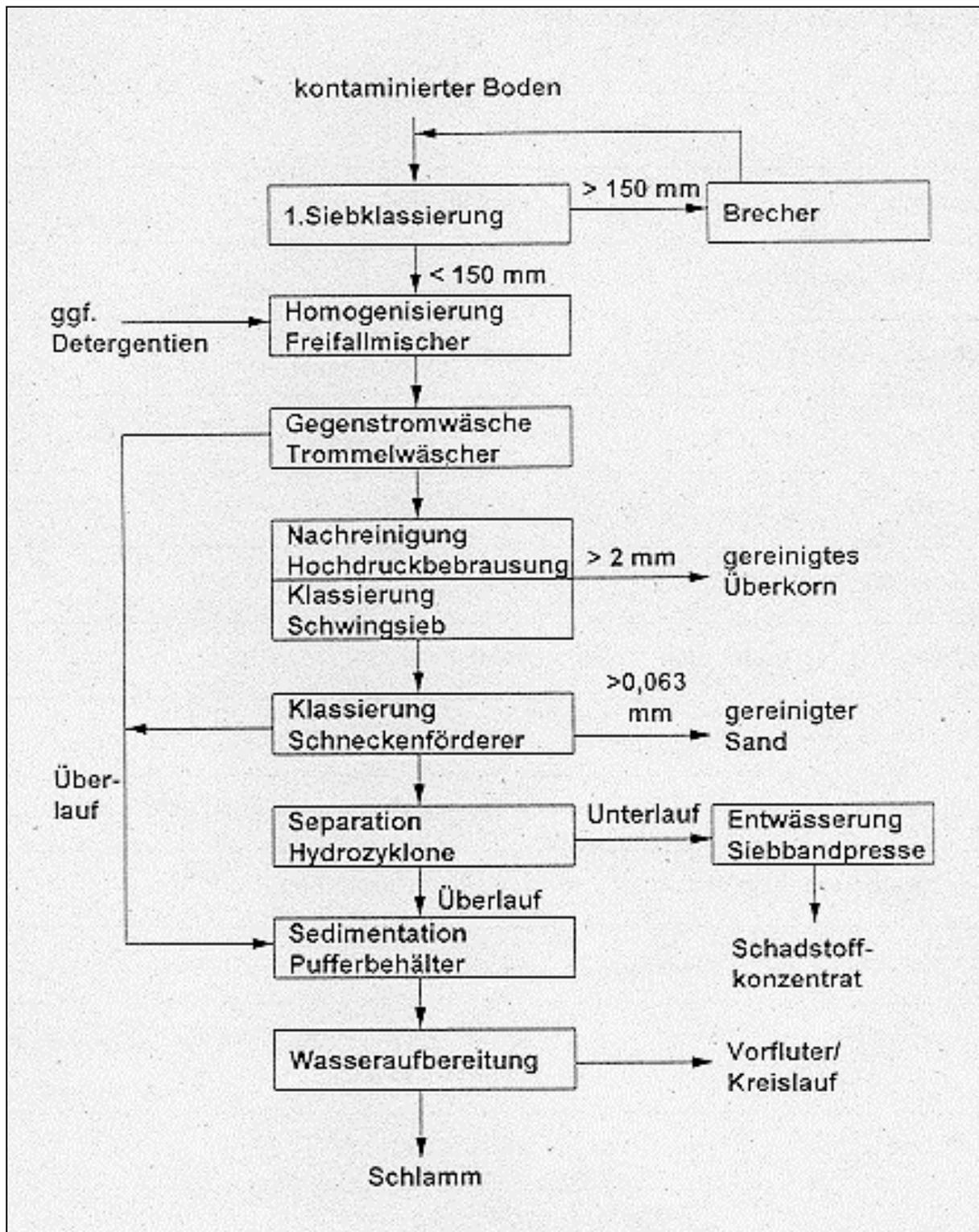


Abb. 4.1-1 Fließschema

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Trommelwaschverfahren System ContraCon

Bauart	mobil
Platzbedarf	ca. 1000 m ²
Elektrischer Anschlußwert	50 kW
Frischwasserbedarf	max. 5 m ³ /h
Rüstzeit	3 bis 5 Tage
Durchsatz	10 bis 15 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	keine Angaben
Spezifischer Wasserverbrauch	ca. 0,4 m ³ /t
Abwasseranfall	Kreislauf, Vorfluter
Abluftmenge	keine Abluftreinigung, nachrüstbar bei Bedarf
Waschbare Bodenfraktionen	0,063 mm bis 150 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	ca. 30 %
Einsatzbereich	MKW, PCB, PAK, Cyanide, Phenole, BTX, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	180 bis 250 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

4.1.1.2 Ergebnisse und Bewertung

Bisher wurden ca. 100 000 t vornehmlich MKW-verunreinigter Böden gereinigt. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die erzielten Reinigungsleistungen:

Tabelle 4.1-1 Einsatzfälle Trommelwaschverfahren System ContraCon

Schadstoff	Bodenart hauptsächlich -	Kontaminierter Boden [mg/kg]			Gewaschener Boden [mg/kg]		
		min.	Ø	max.	min.	Ø	max.
Diesel	-	1200	-	5500	0	-	52
Diesel	-	6400	-	70500	0	-	250
MKW	-	1200	-	56000	-	70	-
MKW	Hafenschlick	-	7000	-	-	< 1000	-
KW	Hafenschlick	-	3120	-	-	51	-
MKW,BTX	-	500	-	20000	-	< 100	-
MKW	Sandiger Kies	1000	-	60000	0	-	300
MKW,PAK	Mischboden	4000	-	25000	0	-	500
BTX,MKW	-	1000	-	21800	0	-	380
Diesel	Sand	-	14000	-	-	52	-
MKW	-	-	-	70000	< 1000	-	-
PAK	Mischboden	50	-	1800	1	-	60

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: ContraCon						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	50 - 1800		< 10		1 - 60		a
PCB ges.	< 500				< 1,0		d
MKW ges.	14.700 < 5700		< 100 < 100		< 100 < 100		b c
HKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.							
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.							
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol							
As							
Ca							
Cr							
Cn							
Hg							
Ni							
Pb							
Zn							

Tabelle 4.1-2 Reinigungsleistungen Trommelwaschverfahren System ContraCon

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

- a Heidenheim:**
Schluffanteil ca. 10 %, Kies/Sand-Boden
PAK: vereinbartes Sanierungsziel: < 10 mg/kg TS
- b Flugsicherung Düsseldorf:**
Heizölkontamination
teilw. Wiedereinbau des gereinigten Bodens
- c Österreichische Bundesbahn**
Schmieröle, Dieselmotoren
- d Bahnhof Ottweiler, ehem. Schrottplatz:**
teilweise Wiederverfüllung vor Ort

Quelle: Firmenschrift/Referenzliste

Vorgehensweise und Rahmenbedingungen bei der Altlastensanierung in der BRD, UBA-Text 1991

Sanierungsbeispiel: Stadtwerke Heidenheim

Aktuelles Sanierungsobjekt ist ein ehemaliges Gaswerksgelände in Heidenheim. Boden und Bauschutt sind kontaminiert mit PAK, Phenolen, BTX-Aromaten, MKW und Spuren von Cyaniden. Es sollen insgesamt 35 000 t Boden und Bauschutt gereinigt werden.

Das Gelände ist unterschiedlich stark kontaminiert. Flüssige Phasen, Teerprodukte und Teerrückstände, die ca. 20 % der Gesamtmasse ausmachen, werden separiert und in einer niederländischen Abfallbeseitigungsanlage verbrannt.

Beim Sanierungsziel für gereinigte Böden unterscheidet man zwischen Grob- und Feinmaterial. Bezogen auf grobes Material gilt ein Wert von < 10 mg/kg, im Feinmaterial < 50 mg/kg, jeweils bezogen auf den Leitparameter PAK bzw. Deponieklasse II für die Eluate.

Das gereinigte Material (Grob- und Feinfraktion) wird als Auffüllmaterial verbracht. Der Sedimentfilterkuchen wird zu 10 bis 20 % in einer Ziegelei zur Herstellung von Ziegeln zur Kabelabdeckung verwendet. Bei diesem Projekt handelt es sich um ein BMFT-gefördertes Forschungsvorhaben.

Der Sedimentfilterkuchen hat 55 bis 65 % TS und zeigt eine ca. 3fache Aufkonzentration der PAK (300 bis 400 mg/kg). Der Anfall an Sedimentfilterkuchen ($< 0,063$ mm) beträgt ca. 15 bis 20 %.

Die PAK befinden sich zu 50 bis 2 500 mg/kg im Eingangsmaterial, im Grobmaterial ca. 22 %, im Feinmaterial 77,2 %. Der Rest sind unbekannte Verluste.

Die hohe Mobilität der vollständig containerisierten Anlagen (System Meiller) und die kurzen Rüstzeiten ermöglichen einen wirtschaftlichen Einsatz dieses Verfahrens schon bei mittleren Mengen kontaminierten Bodens.

Die Anlage verfügt über gesicherte Entsorgungswege für die anfallenden Fraktionen. Die verschiedenen Kornfraktionen werden so sauber wie möglich voneinander getrennt, separat behandelt und entsorgt. So gesehen, steht der Klassiereffekt bei der Anlage im Vordergrund.

Durch Zuschalten einer zweiten Trommel kann die Anlage flexibel auf unterschiedlichen Chargenbetrieb angepaßt werden.

Mit der Möglichkeit, die Behandlungsdauer in den Waschtrommeln zu verändern, ggf. unter Zusatz verschiedener Chemikalien und Tensiden, läßt sich das geforderte Sanierungsziel ggf. zu Lasten eines hohen Outputs - bezogen auf die durchgesetzte Menge - erreichen.

Die Anlagenkonzeption ist vor allem für den mobilen Einsatz bei schwach bis mittelstark belasteten Böden zugeschnitten.

4.1.2 Das CBBR-Verfahren System Possehl

Die Firma Possehl Kies + Hafen + Umweltschutz GmbH hat das sogenannte CBBR-Verfahren (Chemisch-Biologisches-Bodenreinigungsverfahren), eine Art Reaktorverfahren entwickelt, mit dem kontaminierte Böden chargenweise abgereinigt werden können.

Ziel der Entwicklung dieser Anlage ist die Reinigung vor Ort, insbesondere auf ölkontaminierten Standorten.

4.1.2.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Die Komponenten der mobilen Reinigungsanlage sind in drei 6-m-Containern untergebracht. Dazu gehört noch eine von einem kleinen Radlader befahrbare Schrägmulde.

Der Waschvorgang erfolgt in einer Siebbodenwaschmulde mit einem Fassungsvermögen von ca. 8 m³. Diese Mulde steht auf einer hydraulischen Hebebühne, die die gesamte Mulde zum Entleerungsvorgang schräg stellen kann.

Die einzelnen Prozeßschritte sind im Fließschema, Abb. 4.1-2, dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Das verunreinigte Material wird mit einem Radlader in den Waschbehälter transportiert. Dieser wird mit ca. 8 m³ Material gefüllt.

Je nach Porenvolumen wird das verschmutzte Material mit 3 bis 7 m³ Wasser vermischt, dem ein Tensid und ggf. aktivierte Mikroflora zugesetzt werden.

Waschprozeß

Im Boden der Mulde befinden sich Düsenstöcke für Druckluft und Wasser. Das Wasser wird mit einem Druck von ca. 120 bar durch die jeweils in einem Winkel von 45° angeordneten Düsen in das Boden-Wasser-Gemisch gedrückt.

Dabei erfolgt eine Homogenisierung des Bodens und Bildung einer Suspension. Durch die gleichzeitige Druckluftzufuhr soll eine wirbelbettartige Auflockerung des Bodenkörpers erzeugt werden. Über den Siebboden wird das Prozeßwasser mittels Vakuumpumpe abgezogen und dem System erneut als Druckwasser zur Verfügung gestellt.

Durch diesen "Flotationsprozeß" soll eine intensive Durchmischung und Dispergierung der Feststoffe erfolgen, des weiteren sollen die Schadstoffe an die Oberfläche flотиert werden.

Die an der Oberfläche im Waschwasser dispergierten Schadstoffe werden mit einer Abschäumvorrichtung abgescummt und der Abscheideanlage zugeführt.

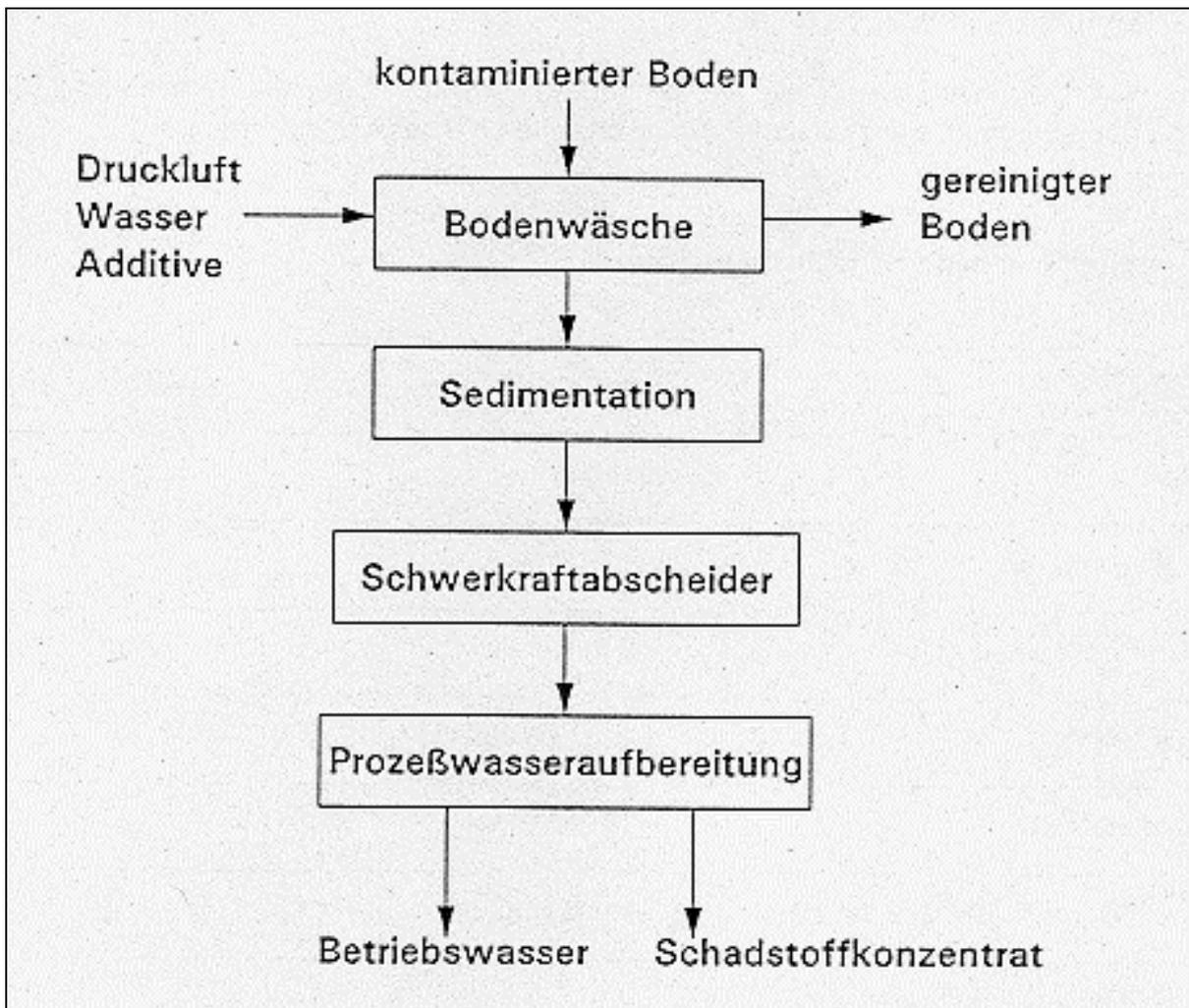


Abb. 4.1-2 Fließschema

Bodenklassierung und -separation

Durch die Zwangsdurchströmung von unten nach oben sammeln sich die "flotierbaren" Bestandteile (z. B. Feinstanteile) des Bodens an der Oberfläche und werden separiert.

Je nach Schadstoffbelastung dauert die Behandlung der abzureinigenden Bodencharge bis zu einer Stunde. Anschließend wird die gesamte Mulde mit Hilfe der Hydraulik in eine Schräglage gebracht und entleert.

Prozeßwasserreinigung

Das noch mit Schadstoffen und Leichtstoffen belastete Waschwasser wird einer Prozeßwasseraufbereitungsanlage zugeführt. Diese Anlage ist ebenfalls in einem 6-m-Container untergebracht und besteht im wesentlichen aus einem Sedimentabscheider mit eingehängten Koaleszenzmatten, einem Schwerkraftabscheider und je nach Ausrüstung, aus nachgeschalteter Fällung, Flockung oder Aktivkohlestufe.

Reststoffbehandlung

Die Reststoffentsorgung erfolgte bei den bisherigen Sanierungseinsätzen sowohl über eine Deponierung als auch durch mikrobiologische und thermische Verfahren.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ CBBR-Verfahren System Possehl

Bauart	mobil
Platzbedarf	150 m ²
Elektrischer Anschlußwert	125 kW
Frischwasserbedarf	6 m ³
Rüstzeit	1 bis 2 Tage
Durchsatz	10 bis 16 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	keine Angaben
Spezifischer Wasserverbrauch	0,5 m ³ /t
Abwasseranfall	0,5 bis 6 m ³ /h
Abluftmenge	keine Abluftreinigung
Waschbare Bodenfraktionen	> 0,040 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	ca. 30 %
Einsatzbereich	MKW, PAK, PCB, Schwermetalle, Walzzunder- und Schleifschlämme, Bohrspäne, Shreddermaterial, Putzlappen, Ölaufsaugmaterial
Spezifische Reinigungskosten 2)	250 bis 400 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

2) Angaben vom Autor geschätzt

4.1.2.2 Ergebnisse und Bewertung

Bisher wurden 8 mobile Anlagen gebaut und mit diesen Anlagen über 30 verschiedene Altlasten behandelt. Dabei handelte es sich im wesentlichen um Böden aus Tankstellengeländen und sonstigen mineralölverunreinigten Standorten.

Reinigungsmöglichkeiten mit dem CBBR-Verfahren sind laut Anbieter gegeben bei Kontaminationen mit MKW, PAK, PCB und Schwermetallen.

Tabelle 4.1-3 Behandlungsdauer (in min) für die einzelnen Bodenfraktionen CBBR-Verfahren System Possehl

Bodenart	Kies grob	Sand grob	mittel sandig	stark bindig
Prozeß	Prozeßdauer (min)			
Beladen	10	10	10	10
Waschen	8 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 35
Spülen	10 - 15	10 - 20	15 - 20	25 - 35
Trocknen	5 - 10	5 - 10	10 - 15	15 - 20
Entladen	5	5	5	5
Summe	38 - 50	40 - 60	55 - 70	75 - 100

Alle Angaben bei Wassertemperaturen von 15 °C. Unterschiedliche Zeiten ergeben sich aus dem Grad der Kontamination.

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: CBBR-Fa. Possehl						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	3.184	1.625		< 0,2	4	0,1	a
PCB ges.							
MKV ges.	25.000		< 300		254	< 100	b
MKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.							
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.							
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol							
As							
Cd							
Cr							
Cu							
Hg							
Ni							
Pb							
Zn							

Tabelle 4.1-4 Reinigungsleistungen CBBR-Verfahren System Possehl

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

a Alte Teergruben:

vereinbartes Sanierungsziel: Deponieklasse I, Lärmschutzwälle

b Mineralölschäden:

vereinbartes Sanierungsziel: 35 % der Mischproben dürfen zwischen 300 und 500 mg/kg TS liegen

Quelle: Firmenschrift

Sanierungsbeispiel: Hydraulikölschaden in Rheinsedimenten

In einem großen metallverarbeitenden Betrieb in Köln war im Laufe vieler Jahre Hydrauliköl durch den Betonboden in den Untergrund gelangt. Es handelt sich hierbei um ein sehr zähes hochmolekulares Öl, das sehr schwer mobilisierbar ist. Die Fußbodenplatten aus Beton mußten vor der Reinigung gebrochen werden. Der Boden sollte so gereinigt werden, daß MKW < 300 mg/kg TS beträgt, wobei 35 % der Mischproben zwischen 300 und 500 mg/kg TS liegen durften.

Der gewichtete Mittelwert über das gesamte Inputmaterial betrug 25 000 mg/kg TS, der höchste Inputwert lag bei 68 000 mg/kg TS. Der Boden hatte einen Schluffanteil von ca. 30 %.

Das Material wurde auf 276 mg/kg TS mit Schwankungen zwischen 100 und 450 mg/kg TS gereinigt. Sämtliche Eluate im gereinigten Boden ergaben Werte < 0,1 mg/l und wurden nach Begutachtung zum Wiedereinbau freigegeben und dort wieder verfüllt, wo sich vorher die Altlast befand.

Zur Reinigung der Reststoffe wurden mikrobiologische und thermische Verfahren eingesetzt. Die ausgewaschenen Kohlenwasserstoffe konnten in der Wasseraufbereitung komplett abgebaut werden. Für die Reinigung von ca. 1 500 t wurden 5 Arbeitswochen inkl. Baustelleneinrichtung und -abbau benötigt.

4.1.3 Weitere Verfahren

4.1.3.1 Das Bodenwaschverfahren der Fa. SAN Umwelttechnik

Die Fa. SAN Sanierungstechnik für den Umweltschutz GmbH wurde 1987 gegründet und gehört zum Firmenverbund der Haniel Umweltschutz GmbH, Duisburg. Sitz der Firma ist Bremen.

Die mobile Bodenwaschanlage ist komplett in Containern installiert und kann on site / off site eingesetzt werden.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Das gesamte Verfahren beruht auf physikalischen, chemischen und biologischen Verfahrensschritten, die zur Reinigung ölverschmutzter Oberflächen eingesetzt werden können. Bei anorganischen Schadstoffen ist die Anlage entsprechend umgerüstet einsetzbar.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind im Fließschema, Abb. 4.1-3, dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Durch die der Bodenvorbehandlung vorgeschalteten Sieb- und Dosiergeräte sowie Misch- und Förderanlagen erfolgt die Aufgabe des verunreinigten Bodens (Korngröße bis max. 60 mm) in die Anlage. Hier wird Prozeßwasser aus dem geschlossenen Kreislauf je nach Grad der Verschmutzung und entsprechend den vorgegebenen Reinigungszielen zudosiert.

Durch intensive Durchmischung soll gewährleistet werden, daß alle Partikel vollständig benetzt sind und die erforderliche Einwirkzeit zur Anlösung der Verunreinigung erreicht wird.

Da in verschiedenen Bodenstrukturen die unterschiedlichsten Verunreinigungen auftreten, sollten im SAN-eigenen Technikum Waschversuche durchgeführt werden, um die geeignete Anlagenkonfiguration für die jeweilige Aufgabenstellung und die jeweiligen Parameter zu ermitteln.

Waschprozeß

Das so vorbehandelte Material gelangt in eine Waschtrommel. Durch Reibungsvorgänge der einzelnen Bodenpartikel aneinander werden die in der Vorbehandlung angelösten Schadstoffe von der zu reinigenden Kornoberfläche entfernt.

Der gewaschene Boden wird mittels einer Schnecke einem Austragsförderer zugeführt.

In sogenannten Aquamatoren (Bandseparatoren) wird der ausgetragene gewaschene Boden nochmals gespült, um noch anhaftende Schadstoffe und Feinstanteile zu entfernen.

Die abgelösten Schadstoffe steigen an die Wasseroberfläche und werden durch einen Skimmer abgeschöpft. Die löslichen Schadstoffe werden in der Wasseraufbereitung mineralisiert.

Bodenklassierung und -separation

Über eine Schnecke und ein Förderband gelangt der nun gereinigte Boden auf ein Entwässerungssieb, um erdfeucht ausgetragen zu werden.

Das mit Feinstpartikeln und Schadstoffen belastete Wasser aus dem Pufferbehälter und der Nachspülung wird in eine Hydrozykloneinheit gepumpt, von wo aus der Unterlauf in eine Dichtesortierung mit Wendelrinnen gelangt, um selektiv Schadstoffe abtrennen zu können. Der Überlauf der Zykloneinheit gelangt in die Wasseraufbereitung.

Prozeßwasserreinigung

Nach Entfernen der Schwebstoffe und Feinstpartikel mittels Dekanterzentrifuge und zwei Schrägklärern oder Siebbandpressen wird das Prozeßwasser in zwei parallel geschaltete Reaktoren mit Fällungschemikalien und Flockungsmitteln behandelt.

Das behandelte Abwasser kann noch organische Schadstoffe, wie zum Teil noch nicht umgesetzte PAK, Phenole und BTX-Aromate enthalten, welche in zwei Festbettreaktoren mikrobiell abgebaut werden können. Nach der biologischen Stufe wird das Wasser in den Prozeßkreislauf zurückgeführt.

Eliminierung von PAK und Cyaniden

Eine Weiterentwicklung der Bodenwaschanlage erlaubt die Reinigung kontaminierter Böden von Cyaniden und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Das Verfahren beruht auf einer Kombination von chemischen und biologischen Abbaumethoden. Zur Eliminierung der vorhandenen Cyanide wird im basischen Bereich gearbeitet. Durch Zugabe von

Oxidationsmitteln wird Cyanid zunächst oxidiert und anschließend zu Hydrogencarbonat und Ammonium hydrolysiert.

Die Entfernung von PAK läuft in zwei Stufen ab:

1. Katalytische Stufe

Die Reaktionen erfolgen hier im sauren Bereich; als Katalysator dient ein mehrwertiges Metallsalz. Durch Zugabe von H_2O_2 werden energiereiche Radikale frei, die die vorliegenden PAK in biologisch gut abbaubare und besser wasserlösliche Folgeprodukte spalten.

2. Biologische Stufe

Aus dem Schadenszentrum werden adaptierte Mikroorganismen isoliert und kultiviert. Die entstandenen Folgeprodukte aus der katalytischen Stufe werden von diesen Biomassen zu den Endprodukten CO_2 und Wasser abgebaut.

Das so behandelte Wasser wird danach wieder in den Prozeß zurückgeführt. Überschüssiges Prozeßwasser wird soweit gereinigt, daß es in den Vorfluter eingeleitet werden kann.

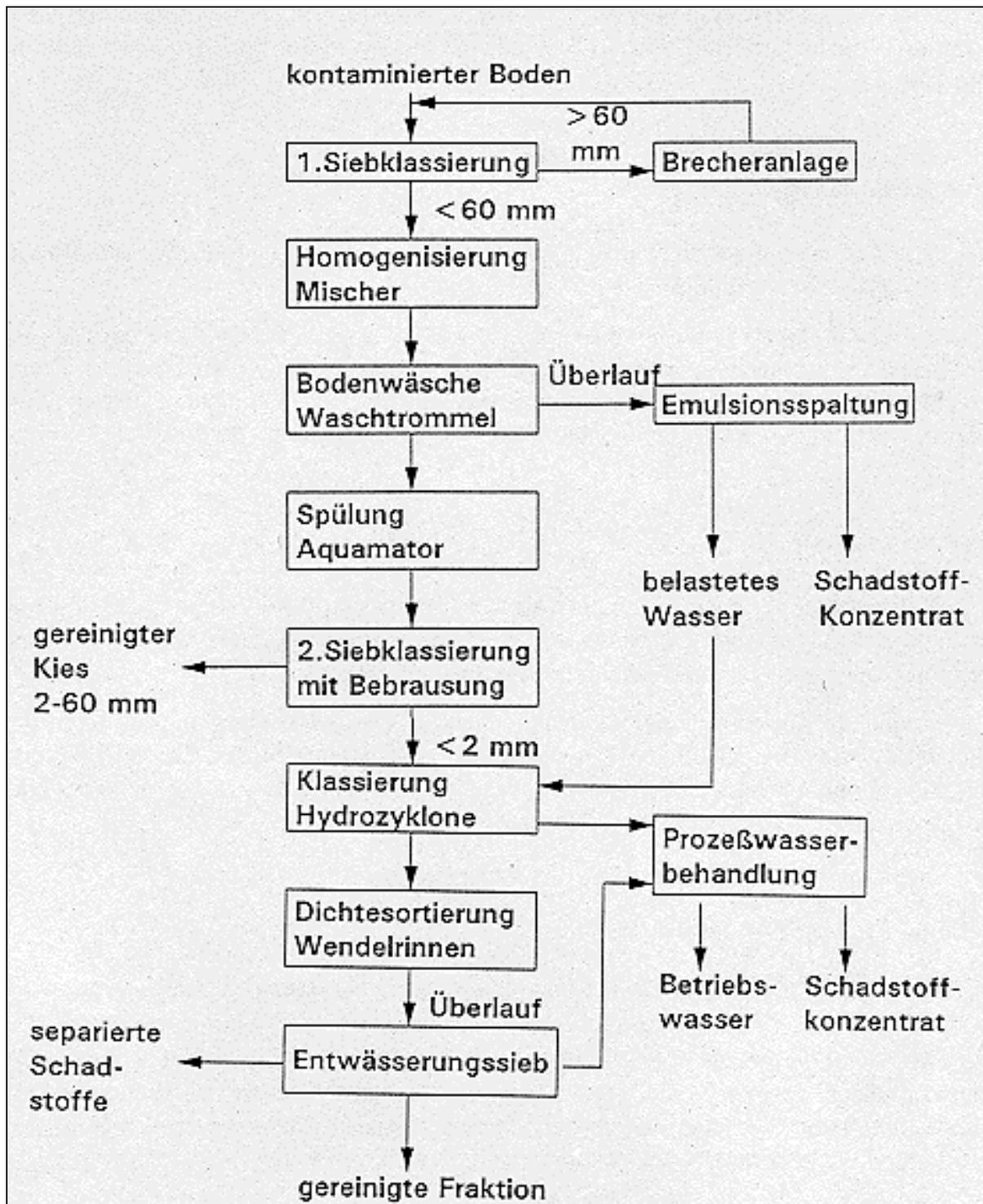


Abb. 4.1-3 Fließschema

Reststoffbehandlung

Die während des Reinigungsprozesses anfallenden Schadstoffe bzw. Schadstoffkonzentrate (aus Entwässerungssieb und Prozeßwasserbehandlung) werden deponiert oder mikrobiologisch behandelt.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Bodenwaschverfahren Fa. SAN Umwelttechnik

Bauart	mobil
Platzbedarf	400 bis 500 m ²
Elektrischer Anschlußwert	100 kW
Frischwasserbedarf	ca. 2 m ³ /h
Rüstzeit	2 bis 4 Wochen
Durchsatz	10 bis 15 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	ca. 4 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	0,5 m ³ /t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	keine Abluftreinigung
Waschbare Bodenfraktionen	0,060 mm bis 60 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	ca. 30 %
Einsatzbereich	MKW, BTX, Phenol, PAK, Cyanide
Spezifische Reinigungskosten	80 bis 350 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung**Sanierungsbeispiel: Gaswerksboden**

Im Jahr 1990 wurde ein ehemaliges Gaswerk in Norddeutschland saniert, das hauptsächlich mit BTX, PAK, AKW und Cyaniden belastet war. Der Boden bestand aus sandigen Sedimenten, die stellenweise durch Schlufflagen unterbrochen waren.

In 2 Monaten wurden ca. 2 000 t Gaswerksboden mit einem relativ hohen Schluffanteil von ca. 30 % gewaschen.

Der Durchsatz betrug 7,5 t/h.

Die geforderten Sanierungswerte (B-Werte der Holland-Liste) wurden für jede der vorliegenden Kontaminationen unterschritten. Die Qualität des aufbereiteten Prozeßwassers, das chemisch-biologisch gereinigt wurde, liegt qualitativ zwischen Trink- und Brauchwasser.

Neben der Prozeßwasserreinigung (max. 20 m³/h) wurden in der Aufbereitungsanlage auch witterungsbedingte Oberflächenwässer dekontaminiert und teilweise zur Ergänzung der Wasserverluste genutzt.

Bei der Sanierung wurden bis auf Flockungsmittel keine toxischen oder salzbildenden Chemikalien eingesetzt.

Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht weitere nach dem SAN-System erzielte Reinigungsleistungen.

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: SAN						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	300		20		< 10	< 50	a
PCB ges.	3,6		1		0,46		b
HKW ges.							
HKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.	200		7		< 0,01	< 10	a
Benzol							
Toluol							
Xylo							
Cyanide ges.	40		50		5	< 1000	a
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol	3		1		< 0,1	< 50	a
As							
Cd							
Cr							
Cu							
Hg							
Ni	5,8		100		1,9		b
Pb	58,7		150		7,8		b
Zn							

Tabelle 4.1-5 Reinigungsleistungen Bodenwaschverfahren Fa. SAN Umwelttechnik

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

a Gaswerksgelände:

sandige Sedimente durch Schlufflagen unterbrochen

b Lack- und Farbenfabrik:

vereinbartes Sanierungsziel: B-Werte der Holland-Liste

Quelle: WLB 3/91: Teresa, S. 136

Firmenschrift

4.1.3.2 Das Bodenwaschverfahren BOWA 20 System WU-Walter

Das von der WU-Walter Umwelttechnik GmbH, mit Sitz in Augsburg, angebotene Bodenwaschverfahren ist Ergebnis einer Entwicklung im Firmenverbund der Walter-Gruppe mit großtechnischem Einsatz ab Juli 1992.

Die Anlage ist für Chargenbetrieb ausgelegt und anlagentechnisch geeignet für Öl- bzw. PAK-kontaminierte Böden, die mit Tensiden behandelt werden müssen.

Die gesamte Anlage ist mobil und ohne spezielle Transportgenehmigung mit Hilfe von 4 Sattelaufliegern umsetzbar. Diese bestehen aus den Anlagen und Aggregaten zur Materialaufgabe, Reinigungs- und Separationsanlage, Klassieranlage, der Wasseraufbereitung mit Dosieranlagen und Steuerstand, der Wasseraufbereitung mit Flockungsanlage und Schrägklärer sowie der Schlammwässerung.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Die einzelnen Verfahrensschritte sind im Fließschema, Abb. 4.1-4, dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Das bei 80 mm vorsortierte Material wird durch einen Radlader in den Aufgabebunker gegeben, gewogen und chargenweise in einen kombinierten Reinigungs- und Separierreaktor aufgegeben.

Waschprozeß

Im Reaktor wird das Material unter Zugabe von Prozeßwasser intensiv aneinander gerieben und dadurch von anhaftenden Feinstteilchen getrennt.

Am Ende dieses Attritionsvorganges wird die Prozeßwasserzufuhr stark erhöht, wobei der entsprechend ausgebildete Reaktor als Aufstromklassierer wirkt - d. h. Feinstmaterial, Schwebstoffe und organische Verunreinigungen werden mit dem Prozeßwasser über den Behälterrand gespült und über ein Bogensieb ausgetragen. Das feinststoffhaltige Prozeßwasser wird über den Ölabscheider zur Wasseraufbereitung geführt.

Nach diesem erstem Waschprozeß wird der Reaktorinhalt in die Klassieranlage gefördert.

Bodenklassierung und -separation

Über einen Schwingentwässerer wird die Fraktion 0 bis 80 mm in die Fraktionen 0,06 bis 80 mm und 0 bis 4 mm getrennt.

Der Materialdurchgang < 4 mm wird über einen Vorlagebehälter in Hydrozyklone gepumpt.

Hier findet die Trennung des Materials bei ca. 0,06 mm statt. Der Zyklonunterlauf 0,06 bis 4 mm wird über den Schwingentwässerer auf das Band für gereinigten Boden ausgetragen. Der Zyklonüberlauf < 0,06 mm wird in den Vorlagebehälter einer Flockungsanlage geleitet. Über

einen induktiven Durchflußmengenmesser werden benötigte Dosierchemikalien proportional zur durchfließenden Wassermenge den Reaktionsbehältern zugegeben.

Mit entsprechenden Dosierchemikalien können Emulsionsspaltung, Schwermetallfällung, Neutralisation und Flockung durchgeführt werden.

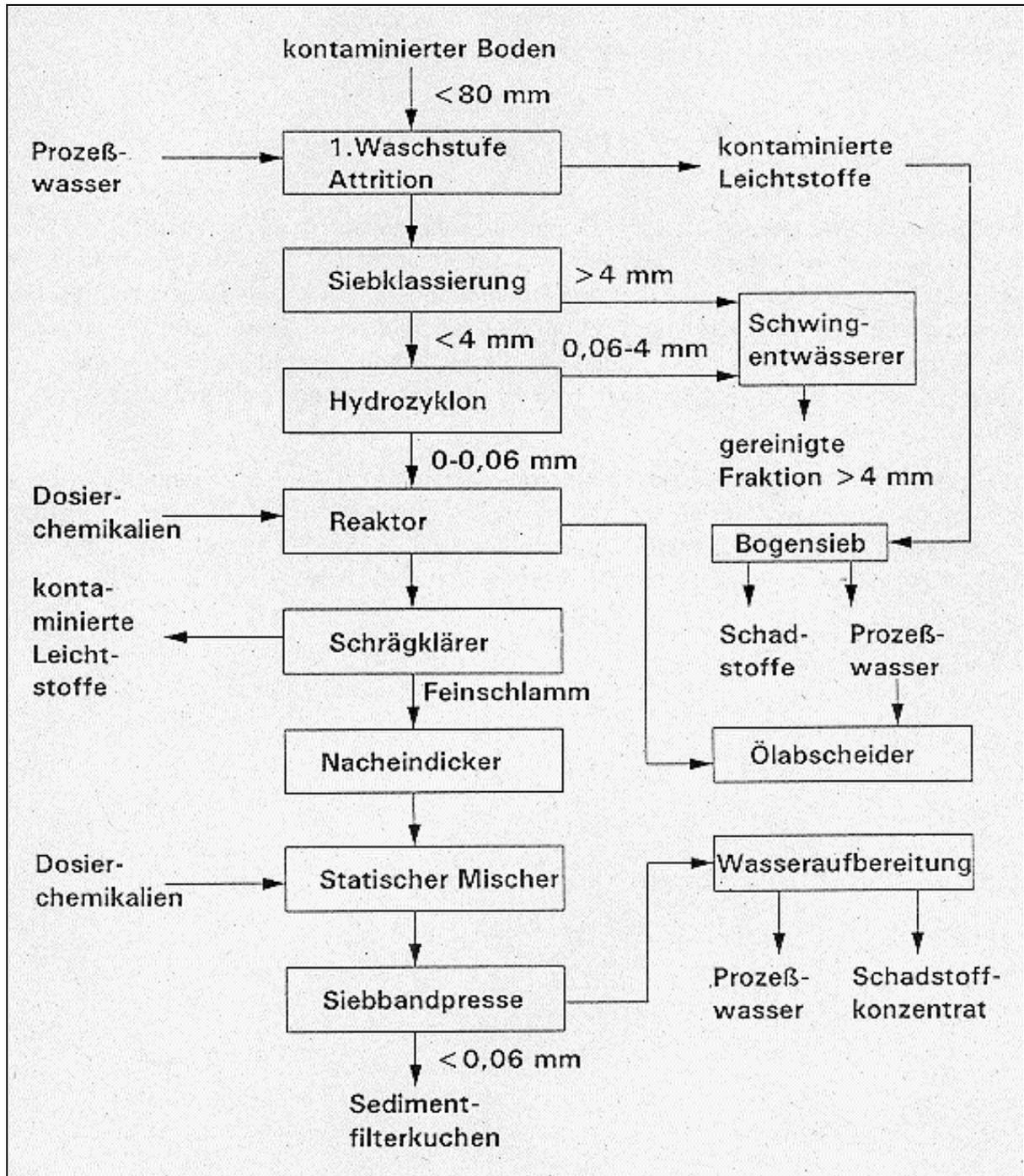


Abb. 4.1-4 Fließschema

Prozeßwasserreinigung

Nach der Flockung gelangt das Wasser im freien Fall in einen Schrägklärer. Dieser ist mit einem Bodenräumer und einem Oberflächenräumer versehen.

Die Schwimmstoffe werden in einem Auffangbehälter gesammelt, während der sedimentierte Schlamm von einem Bodenräumer in Schlamm Taschen gefördert wird und in einen Nacheindicker gelangt.

Der im Schrägklärer abgesetzte, kontaminierte Feinschlamm $< 0,06$ mm wird aus dem Nacheindicker in den statischen Mischer zur Schlammentwässerung gepumpt.

Das am Schrägklärer überlaufende Klarwasser geht zurück in den Vorlagebehälter für Prozeßwasser und wird erneut als Waschwasser verwendet.

Reststoffbehandlung

Die Schlammentwässerung erfolgt in einem statischen Mischer, einem Reaktor und einer Siebbandpresse. Im statischen Mischer wird der Feinschlamm mit Flockungsmitteln versetzt, die im nachfolgenden Reaktor mit Rührschnecke die Flockung zur besseren Entwässerung einleiten. Mit Hilfe der Siebbandpresse wird der Feinschlamm bis zu einem Restwassergehalt von ca. 45 % abgepreßt. Der entstandene Sedimentfilterkuchen muß entsorgt werden, das Prozeßwasser wird in die Prozeßwasseraufbereitung zurückgenommen.

Außer der Entsorgung der aufkonzentrierten Reststoffe auf entsprechenden Deponien wird von der Fa. WU-Walter die Verwertung in Zementwerken und Ziegeleien angestrebt. Im geplanten Entsorgungszentrum in Bischofswerda/Sachsen sind zur Reststoffentsorgung mikrobiologische bzw. thermische Verfahren vorgesehen.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Bodenwaschverfahren BOWA 20 System WU-Walter

Bauart	mobil
Platzbedarf	ca. 400 m ²
Elektrischer Anschlußwert	200 bis 400 kW
Frischwasserbedarf	ca. 2 m ³ /h
Rüstzeit	2 bis 3 Tage
Durchsatz	5 bis 35 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	10 bis 20 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	50 bis 200 l/t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	keine Abluftreinigung, bei Bedarf nachrüstbar
Waschbare Bodenfraktionen	0,020 mm bis 80 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	35 %
Einsatzbereich	MKW, PAK, Cyanide, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	150 bis 350 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Geplante Einsatzgebiete für das Verfahren sind beispielsweise Böden von Gaswerken, Koke-
reien, Schrottplätzen, Tankstellen u. a.

Der Einsatz des BOWA 20 - Verfahrens ist u. a. für das bereits erwähnte Entsorgungszentrum
Bischofswerda/Sachsen geplant. Die Reinigungskapazität der Bodenwaschanlage soll 120 000
t jährlich betragen. Mit der Inbetriebnahme des Entsorgungszentrums, das sich derzeit in der
Genehmigungsphase befindet, wird 1993 gerechnet.

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: WU - Walter						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	500		1 + ATM	-	1	3,0	a
PCB ges.	200		1 + ATM	-	2	0,6	
NKW ges.	10.000		500	-	200	1,0	b
HKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.	7.000		10 + ATM	-	10	0,0	
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.							c
Cyanide frei							
Pestizide	55		2	-	1	1,0	
Phenol	50		2	-	1	0,0	
As	200		30	-	25	0,0	
Cu	1.200		100	-	90	0,0	
Cr	6.000		100	-	50	0,0	
Cd	30		3 + ATM	-	1	4,0	
Hg	800		10 + ATM	-	5	1,0	d
Mn	600		100	-	45	10,0	
Pb	6.500		100	-	30	10,0	
Zn	5.000		100	-	35	500,0	

Tabelle 4.1-6 Reinigungsleistungen Bodenwaschverfahren BOWA 20 System WU-Walter

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

- a** **Schwellenimprägnierung**
Schluffanteil < 63 µm: 8 %
- b** **Tankstelle**
Schluffanteil < 63 µm: 14 %
- c** -
- d** **Schwellenimprägnierung**
Schluffanteil < 63 µm: 8 %
- ATM** **Anlagentechnisch möglich**

4.2 Semimobile Bodenwaschanlagen (on site / off site)

4.2.1 Hochdruckstrahl-Verfahren System Klöckner Oecotec

Von der Firma "Bodemsaneering Nederland" (BSN) erwarb Klöckner Oecotec die Lizenz für das patentierte Hochdruck-Strahlrohr. BSN ist mit seiner Hochdruck-Bodenwaschanlage seit Anfang der 80er Jahre in den Niederlanden im Bereich Bodensanierung tätig und damit eine der erfahrensten Firmen auf diesem Gebiet.

Klöckner Oecotec hat die BSN-Anlage verbessert und weiterentwickelt, wodurch sowohl eine höhere Durchsatz- und Reinigungsleistung als auch eine bessere Wirtschaftlichkeit erzielt werden konnten.

Die erste, von Klöckner weiterentwickelte mobile Hochdruck-Bodenwaschanlage wurde im Jahre 1986 von der Oecotec-afu GmbH - Anwendungsgesellschaft für Umweltschutztechniken - in Berlin in Betrieb genommen. Die Anlage mit einer Kapazität von bis zu 30 t/h hat bei ihrem Einsatz an drei Standorten in Westberlin rund 80 000 t an kontaminiertem Erdaushub und Bauschutt gereinigt.

Aufgrund der Erfahrungen in Berlin wurde die Oecotec Hochdruck-Bodenwaschanlage 2000 mit einer Kapazität bis zu 50 t/h speziell für den semimobilen Einsatz bei Großprojekten mit einem Sanierungsaufwand von mehreren 10 000 t entwickelt. Sie wurde erstmals im Frühjahr 1989 in Betrieb genommen.

Eine stationäre Anlage wird seit Anfang 1991 von der Firma NORDAC, einer Klöckner Beteiligungsgesellschaft im Norddeutschen Altlastensanierungs-Centrum in Hamburg eingesetzt.

4.2.1.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Beim Hochdruck-Bodenwaschverfahren der Fa. Klöckner Oecotec wird zunächst mit Hochdruckwasserstrahlen der Bodenverbund aufgeschlossen und danach die zwischen den einzelnen Bodenkörnern befindlichen und/oder an ihren Oberflächen haftenden Schadstoffe abgetrennt.

Die Abtrennung der Schadstoffe vom Boden erfolgt sowohl im Hochdruckstrahlrohr als auch in der anschließenden Prallkammer sowie in der Attritionsmühle.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind im Fließschema, Abb. 4.2-1, dargestellt.

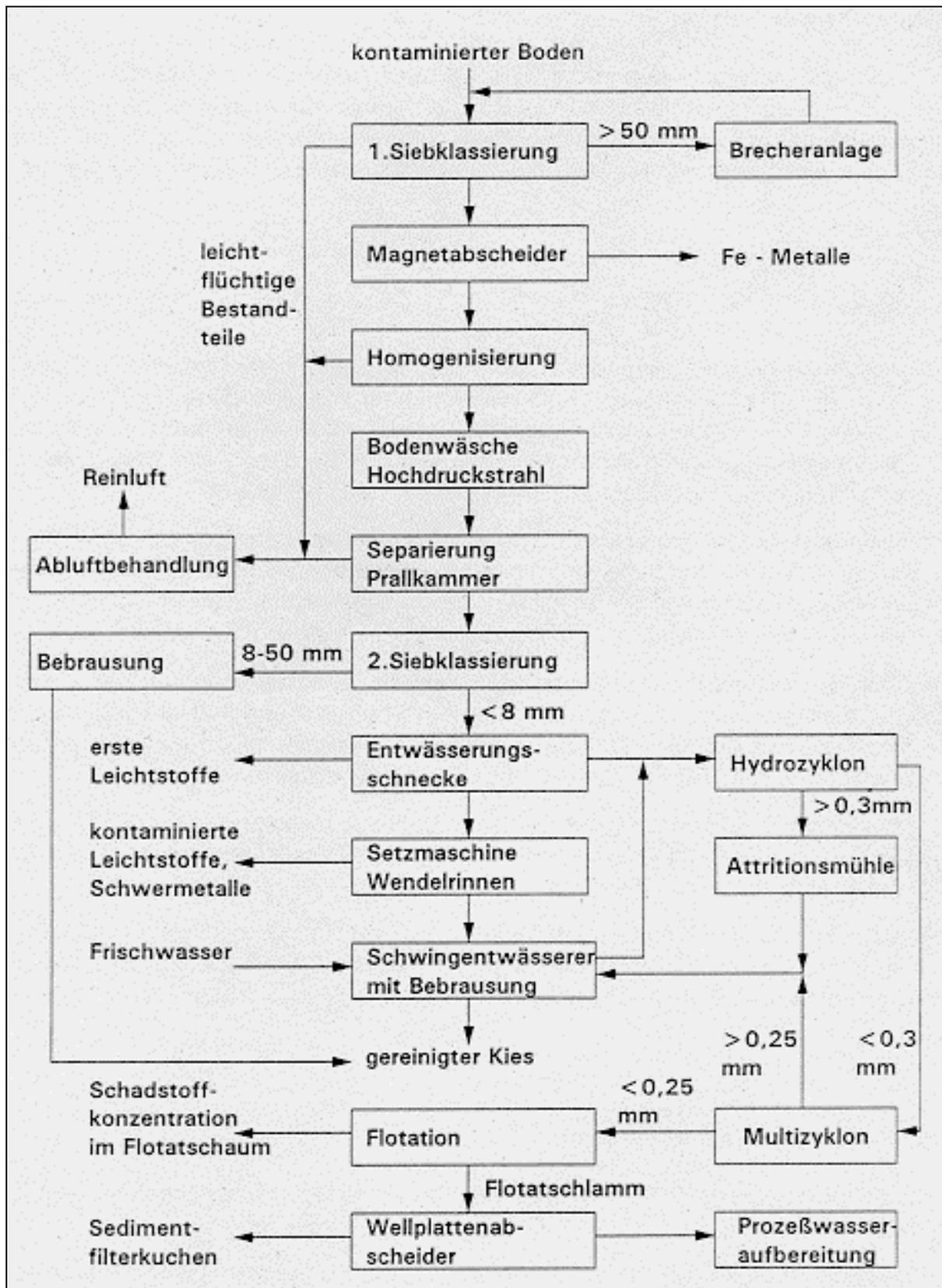


Abb. 4.2-1 Fließschema

Bodenvorbehandlung

Der schadstoffbeladene Boden wird ausgekoffert und erdfeucht der Behandlungsanlage zugeführt. Grobstückiges, kontaminiertes Material muß vor der Aufgabe in die Waschanlage auf die maximale Korngröße von 50 mm gebrochen werden; zur weiteren Vorbehandlung ist eine gekapselte Siebmaschine und ein Magnetabscheider in die Anlage integriert.

Waschprozeß

Das gebrochene, vorgesiebte kontaminierte Material gelangt unter Zugabe von Prozeßwasser in einen Homogenisierer (Paddelmischer). Der homogenisierte Boden wird danach - zusammen mit einer großen Luftmenge - durch einen Unterdruck von 0,8 bar in das dreistufige Hochdruck-Strahlrohr gesogen, nachdem bei Bedarf eine Dampfinkjektion mit ca. 1 000 kg/h Sattndampf zum Anlösen der Schadstoffe erfolgte.

Aus einem ringförmig angeordneten Düsenkranz treten Wasserstrahlen mit einem Druck von bis zu 350 bar aus und treffen kegelförmig in einem Brennpunkt zusammen. Die kontaminierte Bodenmasse wird durch diesen "Brennpunkt" hindurchgesaugt und prallt - hoch beschleunigt - anschließend auf eine Platte am Ende einer "Prallkammer".

Der durch diesen Impuls hervorgerufene mechanische Energieeintrag führt zur Aufhebung der Bindungsenergie zwischen anhaftendem Schadstoff und Bodenkorn, desweiteren zur Deglomeration und Dispergierung. Die Prallkammer ist mit einer Absaugvorrichtung für die in die Gasphase überführten Schadstoffe ausgerüstet.

Die gesamte Energieversorgung der Anlage wird über 2 Dieselaggregate mit einer Leistung von zusammen 750 kVA gesichert. Die Hälfte der Gesamtleistung wird für das Betreiben der Hochdruckpumpe benötigt.

Beim Oecotec Hochdruck-Bodenwaschverfahren wird der Reinigungseffekt ausschließlich durch den Einsatz von mechanischer Energie mittels Hochdruckwasserstrahlen erzielt, d. h. es werden i. d. R. keine Chemikalien, wie z. B. Tenside, Lösungsmittel oder Komplexbildner, benötigt.

Bodenklassierung und -separation

Der untere Trennschnitt für Böden, die in der Oecotec Anlage gereinigt werden, liegt bei ca. 0,025 mm.

Die Reinigung von Boden mit mehr als 25 % Feinstanteil, also mit Bodenpartikeln < 0,025 mm, ist nicht mehr wirtschaftlich (verminderter Durchsatz der Anlage und hoher Anfall an zu entsorgenden Schadstoffkonzentraten).

Nach dem Strahlrohr und der nachgeschalteten Prallkammer durchläuft das Material sowohl eine Klassierung als auch eine Sortierung.

Die Klassierung der Suspension erfolgt mit Hilfe von Sieben und Hydrozyklonen.

Als erstes wird die Siebklassierung der Fraktion > 8 mm durchgeführt, der Siebrückstand wird bebraust und über ein Haldenband ausgetragen.

Der Durchgang des Siebes gelangt in eine Entwässerungsschnecke, wo erste Leichtstoffe ausgespült und über ein Leichtstoffsieb abgetrennt werden.

Das Überlaufwasser wird in einem Hydrozyklon bei einem Trennschnitt von 0,3 mm klassiert. Der Sand wird über ein Förderband einer Setzmaschine und mehreren Wendelrinnen (Typ Humphrey-Spiralen), die der Waschanlage als zusätzliche Module angegliedert sind, zugeführt.

Dieser Schritt ist erforderlich, wenn in nennenswerten Anteilen bodenfremde Bestandteile vorhanden sind, wie z. B. Aschen, Schlacken, Kohlen, Holz und humose Bestandteile, die aufgrund ihrer Struktur potentielle Schadstoffträger sind.

In der Setzmaschine wird die grobkörnige Fraktion (0,3 bis 8 mm) behandelt. Hier werden das Leichtgut (der Schadstoff) und das Schwergut (der Boden), die eine unterschiedliche Dichte aufweisen, mittels eines senkrecht pulsierenden Wasserstroms getrennt.

Über die Wendelrinnen wird die feinkörnige Fraktion (0,025 bis 0,3 mm) aufgetrennt.

Der so von Leichtstoffen befreite Boden wird auf einen Schwingentwässerer aufgegeben, der durch Bebrausung mit Frischwasser gewährleisten soll, daß kein belastetes Prozeßwasser in nennenswerter Größenordnung an dem anschließend ausgetragenen Material anhaftet.

Das Spülwasser der Schwingentwässerer wird auch dem Hydrozyklon, der in doppelter Ausführung im Parallelbetrieb arbeitet, zugeführt. Dessen Überlauf wiederum geht zur Multizyklonanlage, deren Trennschnitt bei 0,025 mm liegt.

Beide Unterläufe führen über eine Attritionsmühle, in der eine Nachbehandlung mit Ultraschall stattfindet, zum Schwingentwässerer zurück. Der Überlauf des Multizyklons geht direkt in die Wasseraufbereitung.

Der gereinigte Boden wird über ein Förderband mit der Fraktion 8 bis 50 mm auf einer Halde zusammengeführt.

Prozeßwasser- und Abluftreinigung

Die separierten Schadstoffe wurden zunächst in die Trägermedien "Prozeßluft" und "Prozeßwasser" überführt, um anschließend aus diesen entfernt zu werden. Das Prozeßwasser wird in eine in die Bodenwaschanlage integrierte Prozeßwasseraufbereitung geleitet und wird zum größten Teil erneut wieder eingesetzt. Das Prozeßwasser aus dem Multizyklon (ca. 135 m³/h) und den zwei Siebbandpressen (ca. 20 m³/h), in denen die Entwässerung des Sedimentfilterkuchens stattfindet, wird in einer Prozeßwasseraufbereitungsstufe einer Flotationsanlage zugeführt.

Diese wird ausschließlich mit Luft beaufschlagt, es besteht aber auch die Möglichkeit, Flotationschemikalien zuzuführen. Der Unterlauf wird den Lamellenabscheidern zugeleitet. Die Entfernung des Schlammes erfolgt über eine Schnecke. Ein Teilstrom des Prozeßwassers von max. 15 m³/h wird in eine angegliederte Abwasserbehandlungsanlage gepumpt, die mit einer

Oxidations/Reduktionsstufe, einer Emulsionsspaltanlage, einer klassischen Neutralisation, einem Kiesbettfilter und einer Aktivkohlefilterstufe ausgerüstet ist.

In ihr wird das Prozeßwasser so weit gereinigt, daß es teilweise zur Frischwasserspülung in der Hochdruck-Bodenwaschanlage wieder eingesetzt oder gereinigt in die Kanalisation abgeleitet werden kann.

Die Oecotec Hochdruck-Bodenwaschanlage ist außerdem mit einer integrierten Abluftreinigungsanlage ausgerüstet. Die Behandlung der in einer Menge von 6 000 m³/h aus dem Strahlrohr anfallenden Prozeßluft erfolgt über Tropfenabscheider, Wärmeaustauscher, einem Einweg-Aktivkohlefilter für höhersiedende Kohlenwasserstoffe und einem wasserdampfgenerierbaren Aktivkohlefilter für tiefer siedende Kohlenwasserstoffe mit angegliederter Lösungsmittelrückgewinnungsanlage.

Aus Emissionsschutzgründen sind der Aufgabebunker und der Muldengurtförderer zur Beschickung der Hochdruck-Bodenwaschanlage bis zum Strahlrohr (der eigentlichen "Strippstufe") eingehaust. Die entstehenden Emissionen werden über das Absaugsystem "Strahlrohr" der Abluftreinigungsanlage zugeführt.

Nach dem Waschprozeß liegen die ausgesonderten Schadstoffe einerseits als Flotatschlamm und andererseits als stichfester Sedimentfilterkuchen (Entwässerung über Siebbandpresse) sowie als sog. "Leichtgut" (aus der Dichtesortierung) vor.

Diese Schadstoffkonzentrate müssen entsorgt werden.

Reststoffbehandlung

Das Leichtgut kann aufgrund seiner Struktur und seiner heterogenen Zusammensetzung nicht weiter aufgearbeitet werden und muß entsorgt werden.

Der Flotatschlamm enthält besonders die emulgierbaren Schadstoffe, aber auch einige schwerlösliche Verbindungen, wie z. B. PCB oder PAK.

Der Flotatschlamm ist i. d. R. hoch belastet und muß daher entsorgt werden.

Bei der Reststoffbeseitigung kommt dem Sedimentfilterkuchen sowohl von der Quantität als auch von der Art der Zusammensetzung als "Sammelbecken für Schadstoffe" die größte Bedeutung zu.

Mengenmäßig ist der Anfall des Sedimentfilterkuchens abhängig vom Anteil an Feinstfraktion und Schluff des ursprünglichen Bodens. In ihm befinden sich schwerlösliche und unlösliche Verbindungen, u. a. auch die Schwermetalle.

Die Filterkuchenmenge kann durch die Verfahrensweise der Bodenwaschanlage beeinflusst werden. Verantwortlich dafür ist die Trennschärfe von Klassier-, Sortier- und Filtrationsanlagen.

Durch den Einsatz von Wendelrinnen und Setzmaschinen in Verbindung mit leistungsfähigen Sieben und Multizyklonanlagen können Bodenbestandteile bis zu einer Korngröße von

< 0,025 mm abgetrennt und gereinigt werden. Der Anfall an Sedimentfilterkuchen wird dadurch entsprechend gesenkt.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Hochdruckstrahl-Verfahren System Klöckner Oecotec

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 1000 m ²
Elektrischer Anschlußwert	750 kW
Frischwasserbedarf ²⁾	1 bis 15 m ³ /h
Rüstzeit	ca. 1 Woche
Durchsatz	35 bis 50 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	ca. 7 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	ca. 70 l/t
Abwasseranfall	Kreislaufführung, ges. ca. 150 m ³
Abluftmenge	ca. 140 m ³ /t, Abluftreinigung!
Waschbare Bodenfraktionen	0,025 mm bis 50 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	max. 25 % < 0,025 mm
Einsatzbereich	PAK, MKW, Cyanide, KW, PCB, BTX-Aromate, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	ab ca. 260 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

2) Angaben vom Autor geschätzt

4.2.1.2 Ergebnisse und Bewertung

Die semimobile Oecotec Hochdruck-Bodenwaschanlage kann innerhalb von zwei Wochen umgesetzt werden und eignet sich daher auch als On-site-Verfahren.

Im bisherigen Einsatz wurden Böden mit folgenden Kontaminationen behandelt:

- Mineralölkohlenwasserstoffe (bis zu 20 000 mg/kg)
- Kohlenwasserstoffe
- PAK (bis zu 110 mg/kg)
- Cyanide

- PCB
- BTX-Aromate
- Schwermetalle usw.

Sanierungsbeispiele

Projekt Düsseldorf-Lierenfeld, Sanierung des Geländes eines ehemaligen Röhrenwerkes

Auf dem Gelände wurden rund 72 000 t kontaminierten Bodens gereinigt.

Ausgangslastungen und Reinigungsleistungen:

Schadstoff	Gelorderter Grenzwert (mg/kg)	KONTAMINierter BODEN (mg/kg)			GEWASCHENER BODEN (mg/kg)		
		Mindestwert	Durchschnittswert	Maximalwert	Mindestwert	Durchschnittswert	Maximalwert
MKW	< 1000	1230	2100	9040	110	440	980
PAK (EPA)	< 20	6,8	14,5	58,3	1,7	6,8	8,2
BTX	< 3,5		2,8			< 0,6	
CKW	< 0,1	85	113	130	< 0,008	0,009	0,037

Projekt Hamburg- Freihafen, Sanierung eines ehemaligen Werftgeländes (Stülckenwerft)

Zu reinigende Menge: ca. 35 000 t Boden.

Ausgangslastungen und Reinigungsleistungen:

Schadstoff	Gelorderter Grenzwert (mg/kg)	KONTAMINierter BODEN (mg/kg)			GEWASCHENER BODEN (mg/kg)		
		Mindestwert	Durchschnittswert	Maximalwert	Mindestwert	Durchschnittswert	Maximalwert
MKW (H17)	-	220	3900	15.000	68	325	730
MKW (H18)	< 500	110	2170	12.000	20	161	410
PAK (EPA)	-	4	30,2	110	0,5	7,8	21
PAK (TVO)	< 10	2,2	14,8	54,8	0,8	3,5	9,8

Projekt ehemalige AEG-Trafo-Union, Stuttgart-Bad-Cannstatt

Von Januar bis Oktober 1991 wurden dort Böden gereinigt, die durch PAK, MKW und PCB verunreinigt waren. Insgesamt wurden in diesem Projekt ca. 50 000 t Boden behandelt.

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: Klöckner Oecotec						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	6,8 - 56,3 2,2 - 54,8		< 10		1,7 - 8,2 0,8 - 9,8		a b
PCB ges.							
MKW ges.	1230 - 9040 110 - 12000		< 1000 < 500		110 - 980 20 - 410		a b
HKW ges.							
CKW ges.	85 - 130		< 0,1		< 0,006 - 0,087		a
BTX ges.	2,8		< 3,5		< 0,6		a
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.							
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol							
As							
Cd							
Cr							
Cn							
Hg							
Ni							
Pb							
Zn							

Tabelle 4.2-1 Reinigungsleistungen Hochdruckstrahl-Verfahren System Klöckner Oecotec

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

a Düsseldorf-Lierenfeld:

Reinigung in 69 Chargen unterschiedlich kontaminierter Böden; Vorgabewerte wurden auch bei hohen Ausgangskonzentrationen mit bis zu 20 000 mg/kg TS eingehalten

b Stülckenwerft:

Hochgradig mit PAK und bodenfremden Stoffen wie Flugstäube, Aschen und Schlacken verunreinigt

Quelle: Firmenschriften

4.2.2 Vibrations-Verfahren System Harbauer

Das Vibrations-Verfahren der Fa. Harbauer wird seit 1987 großtechnisch betrieben. Seither wurden ca. 170 000 t kontaminierte Böden von zahlreichen unterschiedlichen Standorten gereinigt. Die Entwicklung des Verfahrens wurde durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert.

Zur Zeit sind zwei Anlagen mit Durchsatzleistungen von 20 bis 30 t/h in Betrieb: Eine de facto stationäre Bodenwaschanlage, die in Berlin arbeitet und eine semimobile in Containerbauweise erstellte Anlage auf einem Standort in Wien.

Die semimobile Bodenreinigungsanlage Wien besteht aus insgesamt 32 Containern. Die Container haben eine Höhe und Breite von 3 m, eine Länge von 8 m und sind bis zu vier Etagen übereinandergesetzt. Neben der Boden- und Wasserreinigungsanlage ist eine Abluftreinigungsanlage integriert. Zur Lärm- und Schallisolation ist die gesamte Anlage eingehaust.

Der Transport der Container zur Baustelle erfolgt durch Tieflader, der Aufbau durch Kräne. Nachdem die Container miteinander verbunden sind, wird die Rohr- und Elektroinstallation durchgeführt. Der Anlagenbetrieb wird von einer zentralen Leitwarte mit Hilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung überwacht. Im Normalbetrieb sind pro Schicht vier Personen in der Anlage tätig. Für Wartungs- und Reparaturarbeiten sind täglich 4 Stunden vorgesehen.

4.2.2.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Die Bodenwaschanlage System Harbauer arbeitet nach dem Prinzip eines kombinierten Wasch- (Schwertwäsche, Rührreaktor, Extraktionsschnecke) und Separationsverfahrens. Durch mehrmaliges intensives Energieeinleiten werden die an den Bodenpartikeln anhaftenden Schadstoffe gelöst bzw. abgetrennt.

Der gezielte Energieeintrag erfolgt durch eine speziell für diese Anlage entwickelte Vibrations-Waschschnecke, in der durch das Einleiten von Schwingungen hohe Scherkräfte an der Oberfläche der Bodenpartikel erzeugt werden. Der optimale Reinigungserfolg soll sich schon bei einem relativ geringen Energieverbrauch einstellen.

Im Anschluß an diesen Vorgang werden die gereinigten Bodenpartikel durch mehrstufige Klassier- und Sortierverfahren aus der Wasser-Feststoffsuspension abgeschieden und als gereinigtes Produkt ausgetragen.

Die im Waschwasser gelösten bzw. emulgierten Schadstoffe werden in der Prozeßwasseraufbereitungsstufe abgeschieden und dort aufkonzentriert. Das gereinigte Prozeßwasser wird durch Kreislaufführung wieder im Waschprozeß eingesetzt. Die in der Wasser-Feststoffsuspension vorliegenden festen Schadstoffpartikel (z. B. Teerpartikel) werden durch Sortierverfahren abgeschieden.

In der Anlage erfolgt eine Trennung der Wasch- und Spülwasserkreisläufe.

Der gereinigte Boden wird vor der endgültigen Entwässerung noch einmal mit Frischwasser (Spülwasser) nachgewaschen. Dadurch soll verhindert werden, daß mit dem durch mechanische Entwässerung nicht vom Bodenkorn zu trennenden Haftwasser gelöste Schadstoffe mit ausgetragen werden.

In dem der Wascheinheit vorgeschalteten Anmischbehälter können die Dichte der Wasser-Feststoff-Suspension, der Durchsatz und der pH-Wert geregelt werden. Daher ist eine Anpassung der Verweilzeit an die ggf. stark schwankenden Kontaminierungsgrade des Materials möglich.

Abb. 4.2-2 zeigt das Fließschema für das Harbauer-Verfahren.

Bodenvorbehandlung/Erster Waschprozeß

Ein Radlader bringt das kontaminierte Material aus dem Zwischenlager zum Aufgabebunker der Bodenwaschanlage. Es erfolgt zunächst eine Trockenklassierung bei 200 mm auf einem Stangensizer und bei 60 mm auf einem Grobsieb. Anschließend gelangt das Material über einen Steilförderer in einen Schwertwäscher.

Bei der Reinigung von Bauschutt wird der auf dem Grobsieb abgeseibte Überkornanteil > 60 mm in einer mobilen Brechstufe zerkleinert.

In der Schwertwäsche wird der Boden mit Wasser vermengt. Durch die Rührbewegung werden vorhandene Lehmklumpen aufgelöst.

Aus dem Schwertwäscher wird das Material auf ein doppelstufiges Sieb ausgetragen. Auf dem oberen Siebbelag wird das Überkorn 8 bis 60 mm bebraust, entwässert und sauber ausgetragen.

Bei Erfordernis werden in der Grobfraction enthaltene Leichtstoffe (Holz, Kohle, Wurzelwerk) in einer Setzmaschine abgeschieden und separat ausgetragen. Die Leichtstoffe werden in einem Container zwischengelagert. Der Abwurf des unteren Siebbelages wird zur weiteren Behandlung zunächst in den Anmischbehälter gefördert.

Anmischung

Im Anmischbehälter wird die durch die vorausgegangenen Klassierverfahren erzeugte Fraktion 0,015 mm bis 8 mm mit Prozeßwasser im Verhältnis von 1 : 1 vermischt. Falls erforderlich, können an dieser Stelle Reinigungshilfsstoffe zudosiert werden (Tenside, Säuren, Lauge zur pH-Wert-Regelung).

Die Verweilzeit und Dichte der Wasser-Feststoffsuspension ist regelbar. Der "angemischte" Boden wird zur nachgeschalteten Vibrations-Waschschncke gepumpt.

Zweiter Waschprozeß

In einer speziell für die Bodenreinigung entwickelten Wascheinheit erfolgt die sogenannte Intensivwäsche. Diese Einheit besteht aus einer Förderschncke, die mit Hilfe eines elektronisch gesteuerten Hydrauliksystems in axiale Schwingungen (Vibrationen) versetzt wird. Frequenz und Amplitude sind stufenlos regelbar (Abb. 3.2-7).

So kann der Energieeintrag dem jeweiligen Material und der Schadstoffcharakteristik angepaßt werden. Am Bodenkorn soll dabei eine solche Energiedichte erzeugt werden, daß die Bindungskräfte zwischen Schadstoff und Bodenkorn physikalisch aufgehoben werden und der Schadstoff abgelöst wird (Kap. 3.2.2.3).

Bodenklassierung und -separation

Im Sandfang wird das gewaschene Material im Gegenstrom gespült. Zusammen mit dem Waschwasser werden feine Bodenbestandteile im Überlauf ausgetragen und zur Feinkornwäsche weitergeleitet.

Das gröbere Material wird entwässert und in einen Wirbelschichtsortierer gefördert. Hier werden schadstoffhaltige Leichtstoffe aufgeschwemmt und über ein Vibrationssieb aus dem

Waschprozeß entfernt. Bei diesem Vorgang wird die Sandfraktion intensiv gespült. Die Entwässerung des Materials findet auf dem nachgeschalteten Schwingsieb statt.

Dritter Waschprozeß/Separation

Das Gemisch aus feinkörnigem Boden und Waschwasser aus dem Überlauf des Sandfanges wird in einer Flotation behandelt. Ziel ist die Abtrennung schadstoffhaltiger, feinkörniger Leichtstoffe. Anschließend findet eine intensive Spülung in einer fünfstufigen Hydrozyklonanlage statt. Das gewaschene Feinkorn wird zusammen mit der Sandfraktion auf dem Schwingsieb entwässert. Der saubere Boden (0,015 mm bis 8 mm) wird über ein Haldenband ausgetragen und kann für anschließende Verfüll- und Baumaßnahmen genutzt werden.

Prozeßwasser- und Abluftreinigung

Das nahezu feststofffreie Prozeßwasser enthält die Feinstfraktion $< 0,015$ mm, in der die gelösten und emulgierten bzw. dispergierten Schadstoffe aufkonzentriert sind. Durch Zugabe geeigneter Chemikalien werden Schwermetalle gefällt bzw. emulgierte Kohlenwasserstoffe in eine Ölphase demulgiert und anschließend in einer Entspannungsflotation aus dem Wasserstrom entfernt. Das in der Flotation gereinigte Wasser enthält noch Spuren von gelösten Stoffen, die in einem nachgeschalteten Aktivkohlefilter adsorbiert werden.

Das gereinigte Wasser wird im Kreislauf gefahren und als Brauchwasser wieder der Bodenreinigungsanlage zugeführt. Durch die dosierte Zugabe von Entwässerungshilfsmitteln und wegen des hohen anorganischen Anteils hat der Sedimentfilterkuchen i. d. R. einen Feststoffgehalt zwischen 60 und 70 % TS und ist somit deponiefähig.

Neben der Boden- und Wasserreinigungsanlage beinhaltet das System Harbauer eine Abluftreinigungsanlage. Die Kanäle der Abluftanlage sind mit den einzelnen gekapselten Apparaten verbunden, zusätzlich kann ein Teil der Raumluft der gesamten Anlage der Abluftreinigung zugeführt werden.

Reststoffbehandlung

Das Waschwasser enthält die Feinstfraktion $< 0,015$ mm, in der die verbliebenen Schadstoffe teilweise aufkonzentriert sind. Die Abtrennung der Feststoffe erfolgt durch eine zweistufige Schwerkraftentwässerung in Eindickern bzw. im Wellplattenabscheider. Die Sedimentation in den Eindickern wird durch den Einsatz von Polyelektrolyten unterstützt. Der sedimentierte Schlamm wird in der Siebbandpresse entwässert. Der Sedimentfilterkuchen hat i. d. R. einen Restwassergehalt zwischen 30 und 40 % TS und läßt sich somit deponieren.

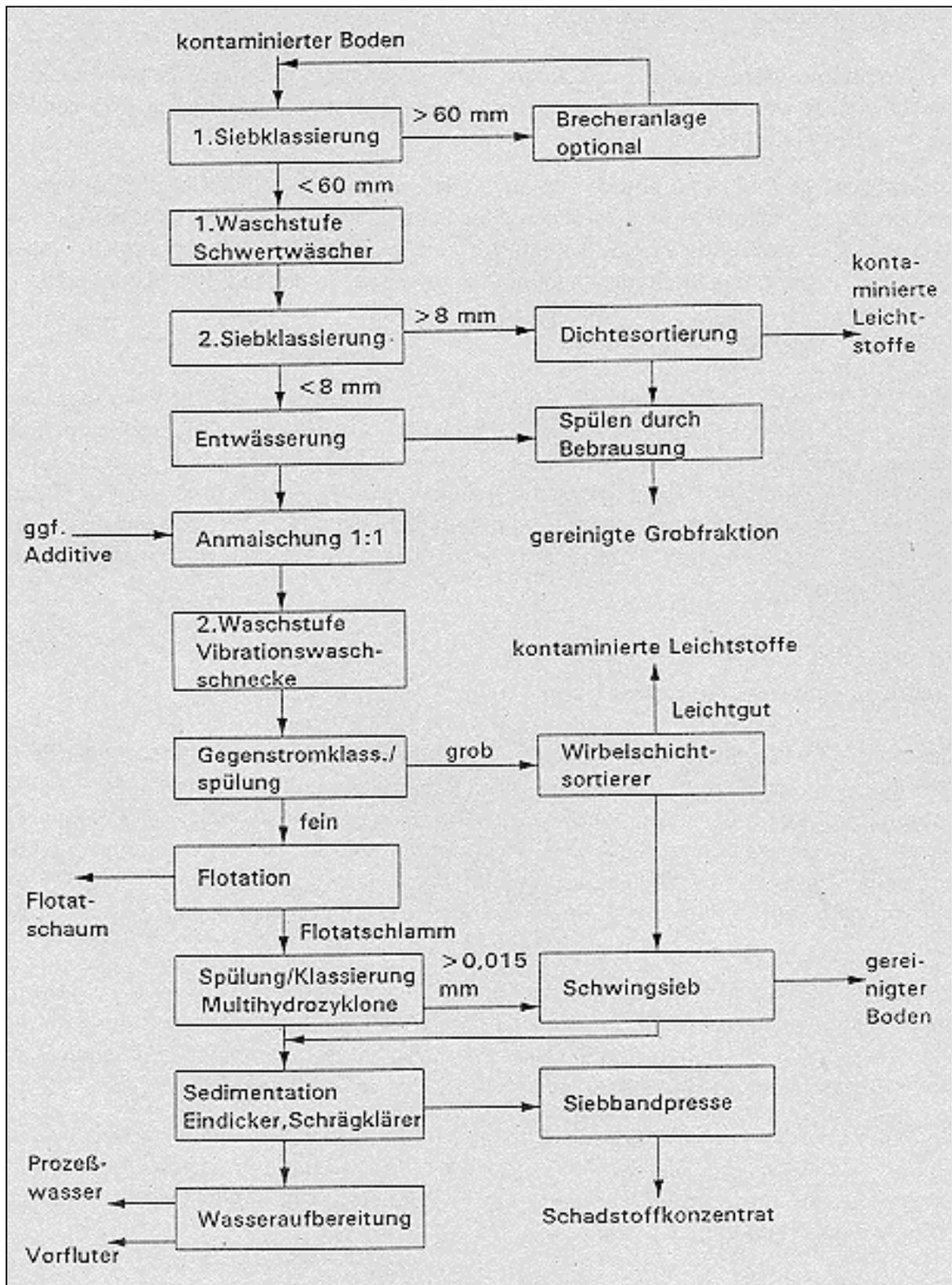


Abb. 4.2-2 Fließschema

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Vibrations-Verfahren System Harbauer

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 1000 m ²
Elektrischer Anschlußwert	480 kW
Frischwasserbedarf	ca. 6 m ³ /h
Rüstzeit	4 bis 8 Wochen
Durchsatz	20 bis 30 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	ca. 15 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	200 bis 500 l/t
Abwasseranfall	200 bis 500 l/t gereinigt
Abluftmenge	ca. 15 000 m ³ /h gereinigt
Waschbare Bodenfraktionen	0,015 mm bis 150 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	30 bis 40 %
Einsatzbereich	MKW, PAK, PCB, AKW, HKW, Phenole, Cyanide, Hg, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	180 bis 250 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

4.2.2.2 Ergebnisse und Bewertung

Die aus den Harbauer-Anlagen vorliegenden Erfahrungen erstrecken sich auf Böden, die mit organischen Schadstoffen (MKW, PAK, PCB, CKW, Phenolen und anderen Aromaten) belastet sind, desweiteren auf Kokereiböden (Phenole, PAK, Aromaten, Cyanide) und auf Schwermetallkontaminationen. Eine Auswahl der bisher in Berlin sanierten Standorte ist in der nachfolgenden Referenzliste zusammengestellt.

Beim Sanierungseinsatz in Wien waren Böden zu reinigen, deren Schluff- und Feinkornanteil bei 60 bis 70 % lag (Tab. 4.2-3).

Tabelle 4.2-2 Auszüge Referenzliste Bodenreinigungsanlage Berlin Vibrations-Verfahren System Harbauer

Stand: Dezember 1991

Gesamtmenge des bisher gereinigten Bodens: ca. 120 000 t

Gereinigter Boden (t)	Bodenherkunft	Kontamination
60000	Pintsch-Gelände, Berlin (ehem. Altölaufbereitung)	MKW, CKW, BTX, PAK, PCB, Phenole
1350	Neuköllnische Allee, Berlin (ehem. Farbwerk)	MKW, BTX, Pb, PAK, PCB, Zn, Phenole
10700	Gaswerk Mariendorf, Berlin Eisstadion Wilmersdorf, Berlin (ehem. Gaswerkstandorte)	MKW, PAK, CN, Phenole
7800	Kanalstraße, Berlin (ehem. Teerchemie)	MKW, BTX, PAK, Phenole
100	Marktredwitz, Bayern (ehem. Chemische Fabrik)	Hg
3350	Borsig-Gelände, Berlin Alsenstraße, Berlin	MKW
2200	Curtiusstraße, Berlin (ehem. Schwellentränke)	MKW, PAK, Phenole
7200	Ollenhauerstraße, Berlin (ehem. Galvanisierbetrieb und Messingfabrik)	Ni, Cu, Cd, Zn, Cr, MKW
6500	Pohlstraße, Berlin (Mineralölschaden)	MKW
1000	Trebbiner Straße, Berlin Helmholtzstraße, Berlin (Heizölschäden)	MKW, BTX
1300	Treidelweg, Berlin	Pb, Cn, Zn, PAK
2400	Berliner Straße 1000 Berlin 28 (ehem. Gaswerkstandort)	PAK, Phenole
530	Holzstraße, Berlin (ehem. Farbwerk)	MKW, PCB, BTX, Pb, Zn
1850	Rungiusstraße, Berlin (Mineralölschaden)	MKW, PCB, PAK

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: Harbauer						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	3500 47,9		5 5		n.n. n.n. - 0,29		a c
PCB ges.	24,4		0,5		n.b.		
MKW ges.	160 5000 - 1000 4535		150 150		11 70 8 - 98		a c
HKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.							
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.	225 70 - 80	80000	10 20	1000	1,25 1 - 5	500	a b
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol	125		5		0,34		a
As							
Cd	123		1		< 0,3		a
Cr							
Cu	1070		100		58		a
Hg							
Ni	200		100		< 6,0		a
Pb							
Zn							

Tabelle 4.2-3 Reinigungsleistungen Vibrations-Verfahren System Harbauer

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...**a Berliner BWA:**

verschiedene Böden (schluffiger Feinsand bei PAK- und Phenol-Kontaminationen, schluffiger Fein- und Mittelsand bei rest. Kontaminationen); Sanierungsvorgabe: Einbauwerte Berliner Liste

b Wiener BWA:

hoher Cyanidgehalt einer ehemaligen Fabrik; Reinigung auf Deponieklasse III, zum Teil II; Schluffanteil zwischen 60 und 70 %

c Rungiusstraße Berlin:

Sanierungsvorgabe: Einbauwerte Berliner Liste

Quelle: Vorgehensweise und Rahmenbedingungen bei der Altlastensanierung in der BRD, UBA-Text 1991, S. 28

Firmenschriften

4.2.3 Das Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik

Die AB-Umwelttechnik, eine 100 %ige Tochter der Alsen-Breitenburg Zement- und Kalkwerke GmbH, verfügt über eine semimobile Bodenwaschanlage, die zur Zeit in München Freimann eingesetzt wird. Im Februar 1992 wurde in Lägerdorf eine zweite, fest installierte und eingebaute Bodenwaschanlage in Betrieb genommen.

4.2.3.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Bei der stationären Bodenreinigungsanlage der AB-Umwelttechnik handelt es sich um eine Weiterentwicklung der semimobilen Anlage, die sich hauptsächlich durch eine erhöhte Durchsatzleistung von 25 bis 50 t/h, eine zweite Waschstufe und eine verbesserte Klassierung unterscheidet. Die Unterbringung der Anlage erfolgt in einer eingehausten Turmkonstruktion.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind im Fließschema, Abb. 4.2-3 dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Das Material < 240 mm wird mittels Radlader einem Aufgabebunker zugeführt. Der Bunker entleert (durch eine Bandwaage gesteuert) auf ein Steilförderband, das die Waschtrommel beschickt.

Erster Waschprozeß

Gewaschen wird mit Prozeßwasser, dem je nach Boden- und Schadstoffart Tenside zugesetzt werden können.

Bei der Waschtrommel handelt es sich um einen mit Leitblechen versehenen Mischer mit einem Volumen von ca. 5 m³. In der Waschtrommel wird der Boden mit Wasser befeuchtet. Die zugesetzte Wassermenge richtet sich nach Boden- und Schadstoffart und dem gewünschten Effekt (Mahl- oder Wascheffekt).

Bei stark schluffhaltigen Böden wird wenig Wasser zugesetzt, um durch einen hohen Reib- und Mahleffekt Ton- und Lehmfraktionen von den übrigen Bodenkörnern zu trennen. Bei stark kiesigen Böden dagegen überwiegt der Wascheffekt. Die Waschzeit wird zwischen 30 und 90 sec, die Wassermenge zwischen 100 und 250 l/t variiert.

Die Steuerung des Prozeßwassers erfolgt von einer zentralen Schaltwarte aus und wird mit Hilfe einer Videokamera überwacht.

Die Waschtrommel besteht aus zwei vertikal getrennten Halbschalen, die durch eine Hydraulik voneinander getrennt werden. Das Öffnen der Trommel ermöglicht eine schnelle Entleerung auf eine Rutsche mit Schieber. Die Rutsche führt das Material auf ein Schwingsieb, über dem eine Wasserbedüsung installiert ist.

Mit Hilfe der Wasserbedüsung erfolgt die Zugabe der Hauptwassermenge für den Wasch- (Läuterungs-)Prozeß. Die Gesamtwassermenge beträgt das 3- bis 5fache der aufgegebenen Bodenmenge.

Bodenklassierung und -separation/ Zweiter Waschprozeß

Das Material der Korngröße 63 bis 240 mm wird als sogenannter Grobschutt an dieser Stelle gereinigt ausgeschleust.

Die verbleibende Fraktion wird in einem 2. Waschprozeß einem Aufschlußmischer zugeführt, in dem die weitere Abtrennung der Schadstoffe erfolgen soll.

Der so nochmals homogenisierte, gewaschene Boden wird einer 3. Siebklassierung zugeführt. Der durch Bebrausung auf dem Sieb geläuterte Schotter (32 bis 63 mm) wird gereinigt ausge-
tragen.

Der Siebdurchgang < 32 mm wird nochmals bei 8 mm abgesiebt (4. Siebklassierung).

Die Fraktion 8 bis 32 mm wird mittels eines Förderbandes in eine Setzmaschine geleitet, in der mit Hilfe eines Luft-Wasser-Aufstromes eine Nachwäsche und die Separierung von Leichtstoffen, wie Holz, Kunststoff und Schlacken erfolgt.

Der Siebdurchgang > 2 mm wird in einer weiteren Siebklassierung abgetrennt und ebenfalls der Setzmaschine zugeführt. Nach Abtrennung der Leichtstoffe werden beide Fraktionen als gereinigter Kies ausge-
tragen.

Die Kornfraktion < 2 mm wird als Sandfraktion durch Schraubenklassierer (Sandschnecken) aus der Waschsuspension abgetrennt und Wendelrinnen zugeleitet, wo eine selektive Abtrennung der Schadstoffe unterschiedlicher Dichte erfolgt.

Prozeßwasserreinigung

Die Sande werden über ein Entwässerungsschöpfrad ausge-
tragen, die Tonminerale hingegen werden durch organische Flockungsmittel agglomeriert und mit dem Prozeßwasser, das die emulgierten Kohlenwasserstoffe enthält, der Wasseraufbereitung, bestehend aus Schlamm- und Lamelleneindicker, zugeleitet. Die Entwässerung der vorgeflockten Suspension erfolgt über eine Siebbandfilterpresse auf ca. 65 % TS.

Durch den Austrag der sechs Fraktionen, Grobschutt, Schotter, Kies, Sand, Leichtstoffe und Sedimentfilterkuchen, werden dem Prozeß ca. 10 % des Umlaufwassers entzogen. Diese Menge wird durch Frischwasserzufuhr ausgeglichen.

Reststoffbehandlung

Der Sedimentfilterkuchen kann bei bestimmten Schadstoffgehalten in firmeneigenen Zementwerken verwertet werden. Das Zementwerk Lägerdorf besitzt auch eine Genehmigung zur Mitverbrennung von PCB-haltigen Altölen.

Bei CKW- oder schwermetallhaltigen Reststoffen verbietet sich diese Vorgehensweise; hier müssen die Reststoffe, zu denen neben dem Sedimentfilterkuchen auch die Leichtstoffe, wie Holz, Kohle, Schlacken u. ä. gehören, ordnungsgemäß auf einer entsprechenden Deponie entsorgt werden.

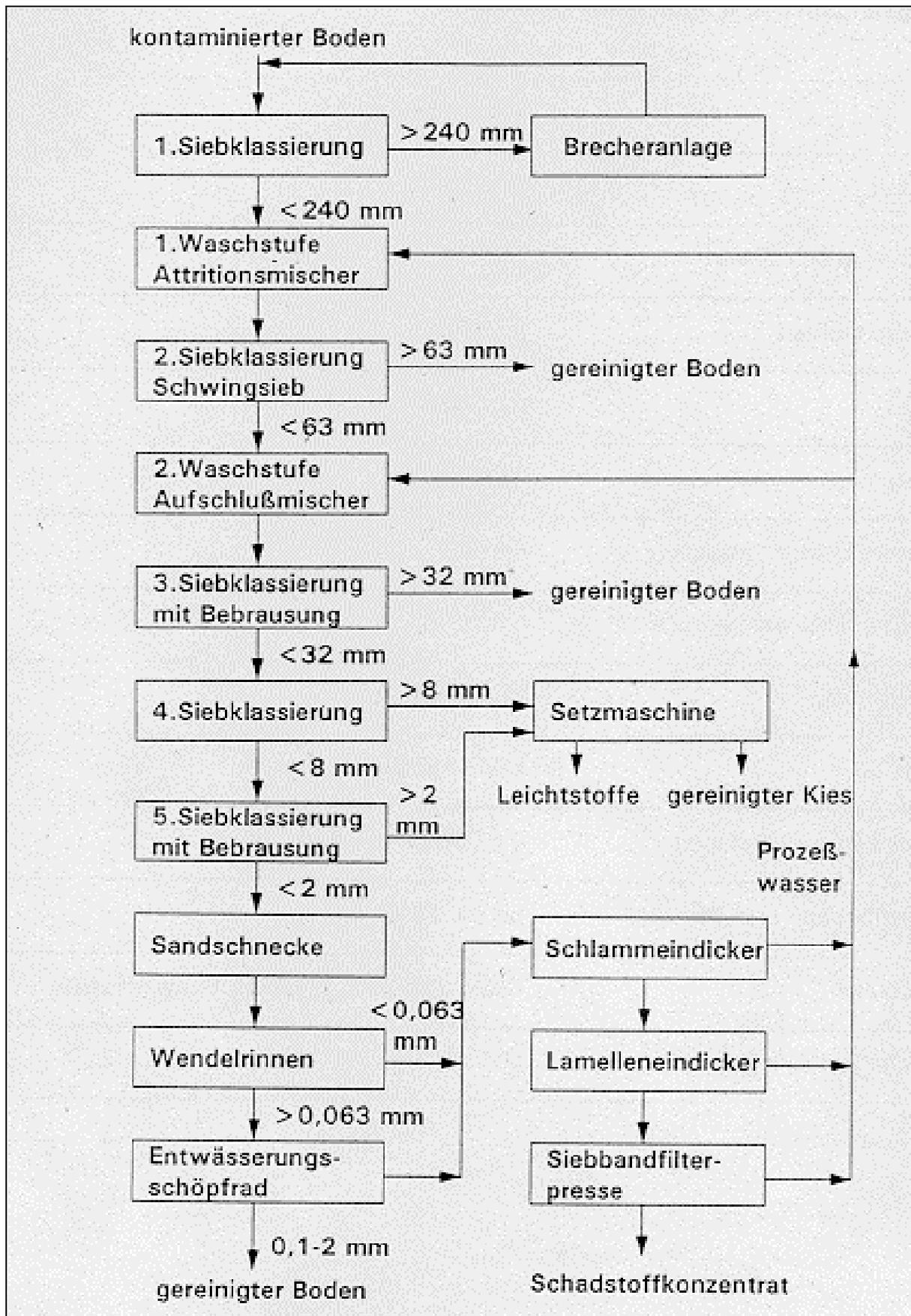


Abb. 4.2-3 Fließschema

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik

Bauart	semimobil
Platzbedarf	3 000 m ²
Elektrischer Anschlußwert	200 kW
Frischwasserbedarf	0,5 m ³ /h
Rüstzeit	ca. 3 Wochen
Durchsatz	15 bis 40 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	5 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	3 m ³ /t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	keine Abluftreinigung
Waschbare Bodenfraktionen	< 0,063 mm bis 240 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	bis ca. 70 %
Einsatzbereich	CKW, KW, PAK, Cyanide, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	150 bis 250 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

4.2.3.2 Ergebnisse und Bewertung

Im Sanierungsfall München-Freimann besteht die Hauptkontamination in einer erhöhten Bleibelastung, die zwischen 1 000 und 5 000 mg/kg beträgt. Ziel ist die Abreinigung des Materials unter 150 mg Pb/kg TS. Das Blei liegt überwiegend oxidisch vor, so daß die Abtrennung über ein Waschverfahren grundsätzlich möglich ist. Die Ergebnisse im gereinigten Material liegen daher auch bei nur ca. 25 mg Pb/kg TS. Insgesamt wurden in München bisher ca. 60 000 t Boden gereinigt.

Weitere Sanierungsergebnisse sind den Tabellen 4.2-4 und 4.2-5 zu entnehmen:

Tabelle 4.2-4 Sanierungsbeispiele Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik

Bodentyp	Herkunft		Ausgangsbela- stung (mg/kg TS)	Restbelastung (mg/kg TS)
Schotter/Bodengemisch	Gleisaushub Hamburg	KW	14 800	435
Schotter	Gleisaushub Hamburg	PAK	24	1,7
		Cu	466	20
Auffüllung Boden/ Schutt	Industriegelände Ham- burg	KW	2 500	252
		Pb	1 480	141
		As	149	< 5
		PCB	60	0,07
Filterkies	Kohleaufbereitung	KW	1 560	94
Lehmboden/ Auffüllung	Raffinerie Gelsenkir- chen	KW	1 490	75
Auffüllung	Industriegelände Köln	KW	1 000	105
		PAK	87	4
		DDT	2,5	< 0,001
		Pb	275	23
		Cr	142	10,2
		Cd	4	0,6
Auffüllung	Industriegelände Flens- burg	KW	1 000	26
		EOX	5	< 0,5
		PAK	75	4
Füllsand	Tankstelle Neumünster	KW	1.590	160

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: AB-Umwelttechnik						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Luft	mg/kg TS	µg/l Luft	
PAK ges.	24 87				1,7 4		b c
PCB ges.	60				0,07		b
MKW ges.	14800 1590				435 160		b d
HKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.							
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.							
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol							
As	149				< 5		b
Cd	4				0,6		c
Cr	142				10,2		e
Cu	466				20		b
Hg							
Ni							
Pb	1480 > 1000 275		< 150		141 < 150 23	< 40	b a c
Zn							

Tabelle 4.2-5 Reinigungsleistungen Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

- a München-Freimann
- b verschiedene Objekte in Hamburg
- c Industriegelände Köln
- d Tankstelle Neumünster

Quelle: Internes Firmenmaterial

4.2.4 Weitere Verfahren

4.2.4.1 Das DYWINEX-Verfahren System DYWIDAG

Die Firma DYWIDAG UMWELTSCHUTZTECHNIK GmbH entwickelte 1988 für eine Sanierungsmaßnahme in Hamburg eine eigene Bodenwaschanlage.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Die einzelnen Komponenten der Bodenreinigungsanlage befinden sich in genormten Großcontainern unter einer Einhausung. Im Fließschema, Abb. 4.2-4, sind die einzelnen Prozessschritte dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Bei einer Korngröße von 120 mm erfolgt eine Abtrennung des Überkorns von dem zu behandelnden Bodenmaterial. In elementarer Form vorliegende Schwermetalle können durch magnetische und induktive Metallabscheidung sowie Wendelscheider zu Beginn des Reinigungsverfahrens entfernt werden.

Waschprozeß und Bodenklassierung

Durch Bebrausung eines Schwingsiebes wird die relativ gering belastete Kornfraktion 60 bis 120 mm gereinigt, vom restlichen Boden abgetrennt und ausgetragen. Das durch diesen Prozeßschritt aufgeschlämmte Bodenmaterial wird in einer Trommel im Gegenstrom gewaschen und mittels eines Entwässerungssiebes vom Waschwasser getrennt.

Die möglichst vollständige Ablösung der Schadstoffe und Feinstteile ($< 0,063$ mm) von den größeren Fraktionen erfolgt in der sich anschließenden Schwertwäsche durch Eintrag von mechanischer Energie. Die Naßextraktion mit Wasser kann wahlweise mit oberflächenaktiven Substanzen (Tensiden) intensiviert werden.

Die gereinigte Grobfraktion 8 bis 60 mm wird über Schwingsiebe ausgetragen und die feinere Fraktion einer Dichtestromklassierung in Hydrozyklonen unterzogen, aus der ein Austrag der gereinigten Fraktion 0,06 bis 8 mm und ein mit Feinstkornanteilen und Schadstoffen angereichertes Prozeßwasser resultiert.

Prozeßwasserreinigung

Im Anschluß an die Bodenreinigung erfolgt die Aufbereitung des mit Schadstoffen und der Feinstfraktion des Bodens angereicherten Prozeßwassers, so daß dieses im Kreislauf geführt werden kann. Mineralölkohlenwasserstoffe werden nach Emulsionsspaltung durch einen Ölabscheider abgetrennt. Gelöste Schwermetalle werden mittels Hydroxiden oder Sulfiden ausgefällt und sedimentieren gemeinsam mit der Feinstfraktion des Bodens unter Einsatz von Polyelektrolyten. Letztgenannte Prozeßschritte finden in Mehrkammerreaktor und Lamellenklärer statt. Nach Neutralisation ist das Wasser zum erneuten Einsatz im Waschprozeß aufbereitet.

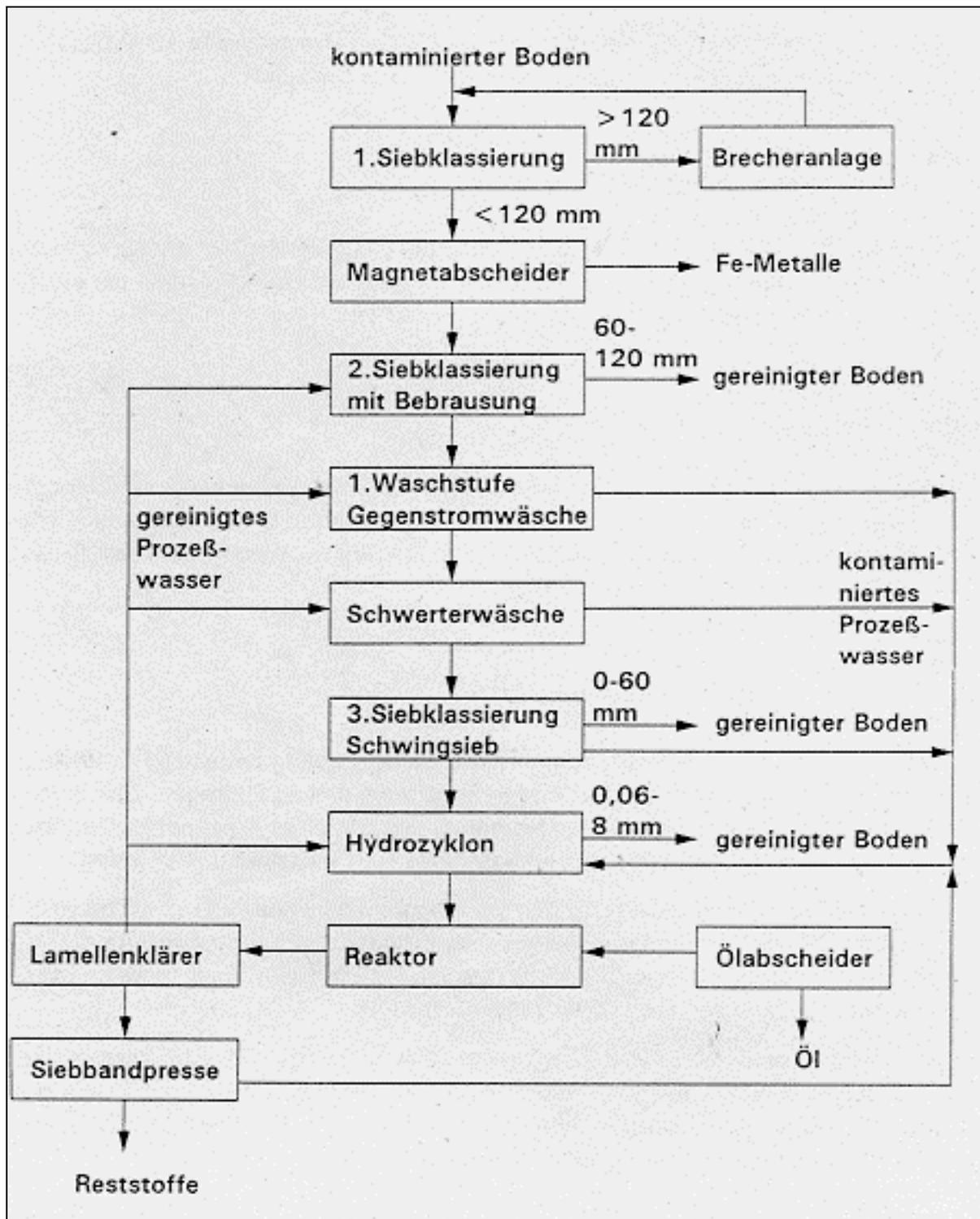


Abb. 4.2-4 Fließschema

Reststoffbehandlung

Der mit Schadstoffen behaftete Schlamm wird mit Hilfe einer Siebbandpresse entwässert. Die so aus dem Reinigungsprozeß anfallenden Reststoffe müssen einer dem Material entsprechenden Deponierung zugeführt werden. Eine alternative Weiteraufbereitung durch chemisch-physikalische oder bei organischen Chemikalien durch mikrobiologische Verfahren befindet sich zur Zeit in der Entwicklung.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ DYWINEX-Verfahren System DYWINEX

Bauart	semimobil
Platzbedarf	1000 m ²
Elektrischer Anschlußwert	250 kW
Frischwasserbedarf	1 bis 2 m ³ /h
Rüstzeit	2 bis 3 Wochen
Durchsatz	10 bis 20 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	keine Angaben
Spezifischer Wasserverbrauch	ca. 100 l/t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	keine Abluftreinigung
Waschbare Bodenfraktionen	0,063 mm bis 120 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	20 bis 25 %
Einsatzbereich	MKW, Schwermetalle, Cyanide, PAK
Spezifische Reinigungskosten	ab 150 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Für jeden Sanierungsfall wird in einem Laborversuch die prinzipielle Eignung für das Wasch- und Klassierungsverfahren festgestellt. Darauf bauend ist i. d. R. ein Versuch im technischen Maßstab zur Ermittlung des spezifisch zu erreichenden Reinigungsergebnisses erforderlich.

Mit der Anlage können Böden mit Schluffanteilen von 20 bis 25 % behandelt werden.

4.2.4.2 Das Bodenwaschverfahren System Hafemeister

Die Fa. Hafemeister ist ein im Berliner Erdbau tätiges Unternehmen der HochTief-Firmengruppe.

Seit der Gründung des Firmenbereiches Umwelttechnik im Jahre 1986 ist man in diesem Unternehmen mit der Entwicklung und dem Bau einer semimobilen Bodenwaschanlage beschäftigt, die im April 1992 den Dauerbetrieb aufnehmen wird.

Die Anlage setzt sich überwiegend aus 6-m-Containern zusammen. Lediglich die beiden Kammerfilterpressen für die Schluffentwässerung sind mit je 12 m Baulänge von anderer Bauart. Die Gesamtgröße entspricht rund 35 Containereinheiten von 20' (6.058mm x 2.438mm x 2.591mm).

Allgemeine Verfahrenstechnik

Das Anlagenprinzip beruht auf folgenden Arbeitsgängen:

- Trennung der Schadstoffe vom kontaminierten Boden durch Prallaufschluß
- Separierung und Behandlung der in die Flotation eingetragenen Schadstoffe
- Entwässerung der konzentrierten Schadstoffe bis auf 80 % TS

Die prozeßrechnergesteuerte Bodenreinigungsanlage ist für eine zweistufige Bodenbehandlung ausgelegt, d. h. je nach Schadstoffbelastung kann während einmaligem Durchlauf des Bodens durch die Anlage z. B. eine alkalische und eine saure Behandlung erfolgen. Diese Schritte vollziehen sich in zwei nacheinander zu durchlaufenden Dekontaminationsstufen (Reihenbetrieb). Die Durchsatzleistung wird in dieser zweistufigen Fahrweise, bei Böden mit einem Feinstkorngehalt < 0,064 mm von 20 %, mit ca. 8,5 t/h angegeben.

Bei Belastungen des Bodens mit nur einem Schadstoff bzw. einer Schadstoffgruppe (Monokontamination) können die Anlagenstufen auch nebeneinander (Parallelbetrieb) gefahren werden, wodurch eine Verdoppelung der Leistung erreicht wird. Dabei wird das Bodenmaterial über eine Stoffstromteilung je zur Hälfte in die erste und die zweite Dekontaminationsstufe aufgegeben.

Das Verfahren ist so ausgelegt, daß in den behandelten Boden keine Tenside und Flokkungsmittel eingetragen werden. Der zu reinigende Boden wird, soweit erforderlich, lediglich mit Natronlauge oder Salzsäure zur Eluation der Schadstoffe und mit Magnesiumchlorid als Emulsionsspalter in Berührung gebracht.

Im Fließschema, Abb. 4.2-5, sind die Verfahrensstufen dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Der verunreinigte Boden wird mit einem Ladegerät dem Aufgabesilo mit nachgeschaltetem Rüttelsieb zugeführt.

Das Aufgabesilo hat eine Kapazität von ca. 2 m³. Das Erdreich wird aus dem Aufgabesilo heraus dosiert und auf ein Rüttelsieb geleitet. Die Kornfraktion > 25 mm wird als Überkorn abgesiebt und durch eine Brecheranlage (Hammermühle) auf eine entsprechende Korngröße zerkleinert.

Die Fe-Metalle werden vorher über einen Magnetabscheider separiert.

Waschprozeß

Das so vorbereitete Material wird mit Umlaufwasser aus dem Prozeßwasserkreislauf im Verhältnis 1:2,5 homogenisiert und gelangt über einen Kettenrohrförderer und ein Zentralrohr in das Herzstück der Anlage, den Zentrifugalbeschleuniger.

Dieses Anlagenteil beschleunigt die Suspension über einen Streuteller in einer sinuskurvenähnlichen Flugbahn auf eine Geschwindigkeit von max. 45 m/sec. Beim Auftreffen des Materials auf den Pralling kommt es zu einem Aufschluß der Agglomerate und Verkrustungen (Kap. 3).

Bodenklassierung und -separation

Das so vom Schadstoff befreite Korn gelangt über ein Fallrohr in einen mit Wasser gefüllten Absetzbehälter. Eine Rekontamination soll durch Zugabe bestimmter Salze verhindert werden. Durch Sedimentation setzt sich die vom Schadstoff befreite Kornfraktion $> 0,045$ mm im unteren Bereich des Behälters ab. Von dort aus fördert eine Austragsschnecke den Boden auf ein Schwing-Entwässerungssieb.

Hier erfolgt die Fraktionierung des gereinigten Bodens in seine groben Bestandteile $> 0,2$ mm. Eine weitere Klassierung auf $0,050$ mm erfolgt beim Siebdurchgang auf einem Balkenklassierer.

Diese beiden Fraktionen können bei Bedarf der zweiten Dekontaminationsstufe zugeführt werden (Reihenbetrieb). Das ist der Fall, wenn in der ersten Stufe beispielsweise organische Schadstoffe alkalisch behandelt wurden und anschließend in der zweiten Stufe Schwermetalle mit einer sauren Waschlösung entfernt werden sollen.

Der Austrag des Grobkorns und des Sandes erfolgt mit einem Restwassergehalt von ca. 15 %.

Das Verlustwasser muß ergänzt werden.

Die abgetrennten organischen Schadstoffe, deren Dichten geringer sind als die der Suspension, werden nach der Auftriebsphase abgescummt und separiert. Dieser Vorgang kann durch Flockung oder Fällung unterstützt werden.

Auf diese Art sollen bis zu 80 % der organischen Schadstoffe entfernt werden können. Die abgescummten Kontaminationen werden nach Durchlaufen eines Ölabscheiders einer Kammerfilterpresse zugeführt.

Das in dem Absetzbehälter anfallende schadstoffbelastete Wasser, versetzt mit Feinanteilen $< 0,050$ mm, und das angefallene Spülwasser aus den Schwingentwässerungssieben, das ebenfalls einen Restanteil an Feinstsedimenten enthält, wird über einen Lamellenabscheider abgesehen. Das von den Feinstsedimenten getrennte und mit Schadstoffen belastete Prozeßwasser wird nun einem Reinigungsprozeß unterzogen. Die ausgefällten Schadstoffe werden ebenfalls, wie die Abskimmprodukte, der Kammerfilterpresse zugeführt.

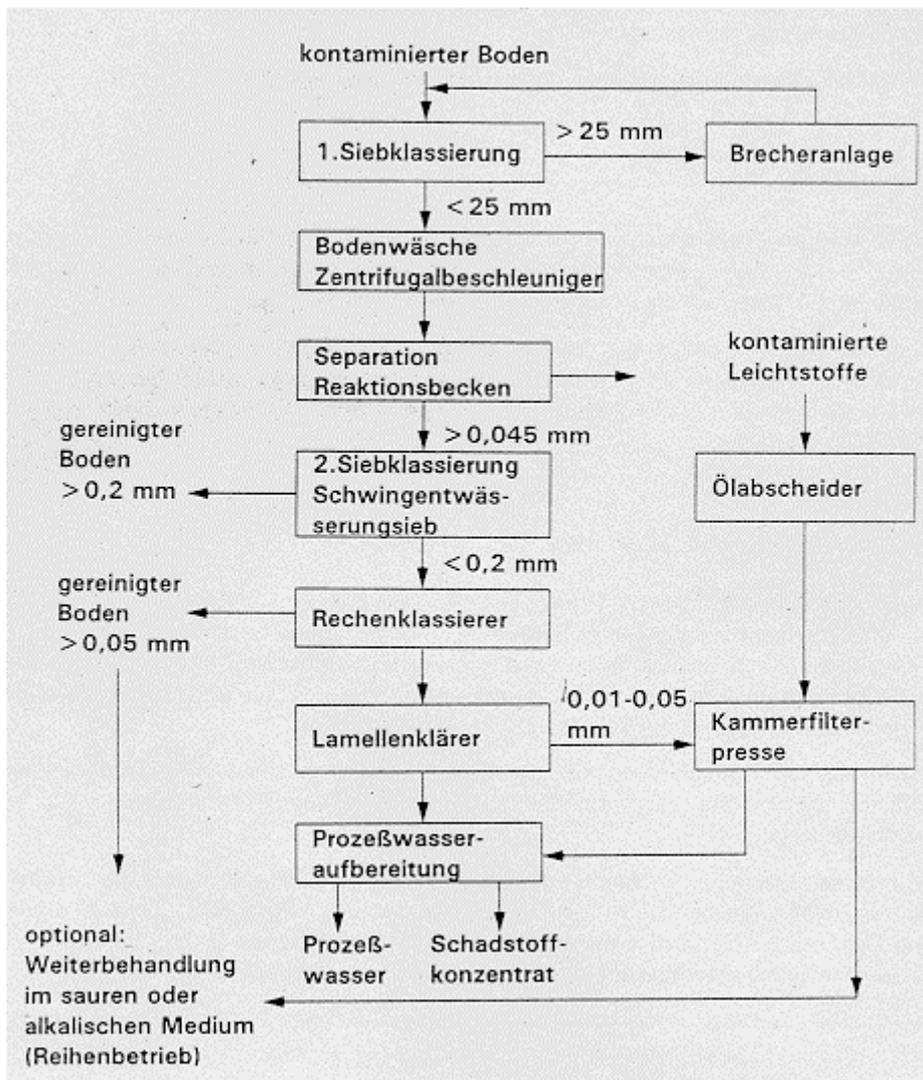


Abb. 4.2-5 Fließschema

Prozeßwasser- und Abluftreinigung

Das Prozeßwasser für beide Reinigungsstufen wird in unabhängigen Kreisläufen gefahren und soll durch eine Fällung und Aktivkohleadsorption so aufbereitet werden, daß ein hinreichendes Schadstoffkonzentrationsgefälle entsteht. Vor einem Wechsel des Wassers, z. B. nach Abschluß eines Dekontaminationsauftrages, wird die Schadstoffkonzentration im Wasser durch mehrfaches Durchlaufen der Wasseraufbereitung auf die zulässigen Einleitwerte gesenkt, was ggf. durch eine Stripp- und Entsalzungsanlage erreicht werden könnte.

Zur Vermeidung von Schadstoffbelastungen der Luft ist die Bodenreinigungsanlage an eine zentrale Abluftreinigungsanlage, mit Staub- und Aktivkohlefilterung, angeschlossen. Die Abluft aus der Anlage wird mit FID (Flammenionisationsdetektor) und Prüfröhrchen überwacht.

Reststoffbehandlung

Die Reststoffmenge eines bis zu 40 % aus Schluffanteilen < 0,063 mm zusammengesetzten Aufgabematerials soll bei 3 bis 5 % liegen.

Der ausgetragene Filterkuchen soll später in einer noch in der Entwicklung befindlichen thermischen Bodenbehandlungsanlage verarbeitet werden.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Bodenwaschverfahren System Hafemeister

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 1 500 m ²
Elektrischer Anschlußwert	350 kW
Frischwasserbedarf	0,75 m ³ /h
Rüstzeit	ca. 2 Wochen
Durchsatz	8 bis 16 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	ca. 20 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	ca. 0,06 m ³ /t
Abwasseranfall	ca. 0,04 m ³ /t
Abluftmenge	2 500 m ³ /h
Waschbare Bodenfraktionen	0,01 mm bis 25 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	ca. 30 %, mit Zusatzmodulen auch höher
Einsatzbereich	MKW, PCB, PAK, Phenole, Cyanide, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	250 bis 450 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Zunächst wurde eine Versuchsanlage mit einer Leistung von 3 m³/h gebaut. Auf der Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurde eine 5 m³/h - Pilotanlage konstruiert und im Mai 1989 in Betrieb gesetzt. Eine dritte Generation der Anlage ist ab April 1992 in Betrieb gegangen.

Die Anlage ist so konzipiert, daß eine Dekontamination aller Bodenteilchen > 0,010 mm durchgeführt werden kann. Bei höherem Schluffgehalt vermindert sich die Leistung.

Mit dem Hafemeister-Verfahren sollen Böden mit folgenden Schadstoffen behandelt werden:

MKW, BTX, Phenole, CKW, PCB, PAK, organische Pflanzenschutzmittel (Insektizide, Pestizide), Schwermetalle, Cyanide.

4.2.4.3 Preussag Anlagenbau-Verfahren System Heijmans

Die niederländische Firma Heijmans Milieutechnik hat bereits 1984 ein Bodenwaschverfahren insbesondere zur Oxidation von Cyaniden sowie zur Laugung und Fällung von Schwermetallen entwickelt und europaweit patentrechtlich geschützt. Dabei handelt es sich um eine chemisch-physikalische Bodenwäsche, bei der dem Wasser, je nach Art der vorliegenden Kontaminationen, Säuren, Laugen, Oxidationsmittel und Tenside zur Behandlung hinzugefügt werden können.

Für das Heijmans-Verfahren hat die Preussag Anlagenbau GmbH die Exklusivlizenz für die Bundesrepublik zur Herstellung der erforderlichen Anlagen und zur Anwendung des Verfahrens erworben.

Aufgrund der bei Heijmans gemachten Erfahrungen wurde eine neue Anlage für die Howaldtswerke - Deutsche Werft AG (HDW), Kiel, gebaut und Anfang 1992 in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um eine semimobile Anlage in Containerbauweise, die an den jeweiligen Ort der Altlast verbracht werden kann, um dort die Bodenreinigung on site durchzuführen.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Das Verfahrensprinzip der in 16 Containern (Stahlträgerkonstruktion) untergebrachten Anlage beruht auf der Bodenwäsche in einer Attritionseinheit (Scrubber) mit mehrfacher Siebklassierung und Nachwäsche durch Läuterung (Bebrausung).

Abb. 4.2-6 zeigt das Fließschema.

Bodenvorbehandlung

Grobkorn > 80 mm, Ziegel, Bauschutt und sonstiges Grobgut werden mit Hilfe einer mobilen, an einem Radlader befestigten rotierenden Siebtrommel (Rotar-Cleaner der Fa. Zeppelin) aussortiert und in einer Wanne gewaschen. Das so vorgesiebte Material wird auf ein Rollensieb aufgegeben, in dem das Grobkorn > 40 mm ausgetragen wird.

Die zur weiteren Naßsiegung führenden Förderbänder sind mit Überband-Magneten zur Entfernung der Eisenteile ausgerüstet. Die Naßsiegung resultiert in einer gereinigten Fraktion 8 bis 40 mm und dem passierenden Material < 8 mm.

Waschprozeß

Der Hauptanteil des Bodens < 8 mm wird in einer Attritionswäsche, dem sogenannten Scrubber, mit einer Waschlösung behandelt. Dabei werden Kontaminationen von den Bodenpartikeln durch Scherkräfte gelöst und in die Waschlösung überführt. Als Waschlösung dient Wasser, dem Tenside zur Intensivierung des Desorptions-Prozesses zugesetzt werden. Zur Einstellung des gewünschten pH-Wertes werden Salzsäure oder Natronlauge zudosiert. Beim Scrubber handelt es sich um mehrere hintereinandergeschaltete sechseckige Rührwerksbehälter mit speziell für die Bodenwäsche konstruierten Paddel-Rührwerken.

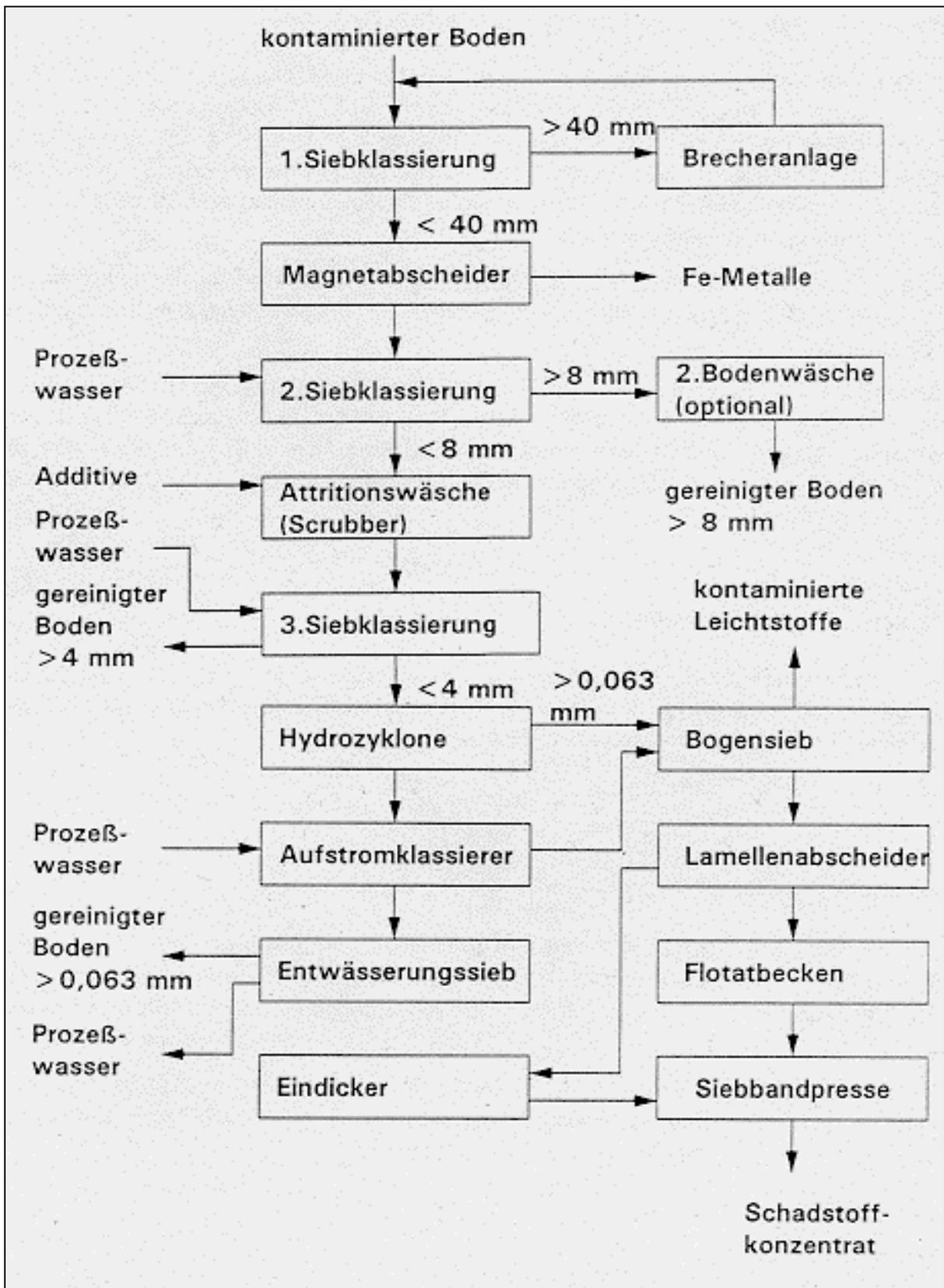


Abb. 4.2-6 Fließschema

Bodenklassierung und -separation

Aus dem Scrubber wird nach Absiebung des Grobsandes > 4 mm die Sandfraktion $> 0,063$ mm Korngröße in zwei Hydrozyklonen abgetrennt und einer Nachwäsche mit Frischwasser unterzogen. Im Aufstromklassierer werden die Leichtstoffe ausgeschwemmt und über ein Bogensieb ausgesiebt. Die schwerere Sandfraktion wird abgezogen und über ein Entwässerungssieb als gereinigter Boden ausgetragen.

Die im Hydrozyklon-Überlauf abgetrennten Ton- und Schluffpartikel $< 0,063$ mm werden nach Passieren des Bogensiebes in einem Lamellenklärer mit anschließendem Dekanter sedimentiert und auf einer kontinuierlichen Siebbandpresse entwässert. Der abgepreßte Sedimentfilterkuchen enthält den Hauptanteil der Kontamination.

Prozeßwasserreinigung

Das kontaminierte Waschwasser wird in einer Prozeßwasserreinigungsanlage behandelt. Diese Reinigungsanlage umfaßt die Abscheidung der im Prozeßwasser verbliebenen Feinstkornanteile und die Entfernung suspendierter oder emulgierter Teilchen durch Flockung und Flotation. Bei der Behandlung schwermetallhaltiger Böden erfolgt die Attritionswäsche im sauren pH-Bereich. Die Fällung der Schwermetalle folgt an dieser Stelle durch Wechsel des pH-Wertes ins stark Basische.

Das gereinigte Wasser wird wieder als Prozeßwasser genutzt. Die Restfeuchte in den ausgetragenen Produkten muß durch Frischwasser ergänzt werden.

Reststoffbehandlung

Die aus der Bodenwäsche resultierenden Reststoffe werden z. Z. noch auf Deponien entsorgt.

Die Preussag-Anlagenbau experimentiert zur weiteren Aufbereitung dieser Stoffe mit Technologien

- zum Abbau organischer Kontaminationen im Ton und Schluff,
- zur Ausfällung restlicher Schwermetallverunreinigungen,
- zur Verfestigung durch Einbindung in eine Stoffmatrix.

Ziel dieser Entwicklungen ist die Verringerung der zu deponierenden Reststoffe oder zumindest die Qualitätsverbesserung durch Erreichen einer niederen Deponieklasse.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Preussag Anlagenbauverfahren System Heijmans

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 800 m ²
Elektrischer Anschlußwert	180 kW
Frischwasserbedarf	1,5 bis 2,0 m ³ /h
Rüstzeit	3 bis 4 Wochen
Durchsatz	8 bis 10 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	ca. 16 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	ca. 0,5 m ³ /t
Abwasseranfall	Kreislaufführung, beim Abfahren ca. 60 m ³
Abluftmenge	Abluftreinigung nur für Cyanidstufe
Waschbare Bodenfraktionen	0,063 mm bis 40 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	25 bis 30 %
Einsatzbereich	MKW, PAK, Cyanide, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	180 bis 300 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Das Heijmans-Verfahren wird seit 1985 im industriellen Maßstab in den Niederlanden eingesetzt. Dort stehen zwei Anlagen zur Verfügung:

- seit 1985 eine zunächst zur Erprobung betriebene semimobile Anlage in Rosmalen für einen Durchsatz von 8 bis 10 t/h;
- seit 1988 eine ortsfeste Anlage auf dem Abfallterminal Moerdijk für einen Durchsatz von 20 bis 30 t/h.

Bisher wurden ca. 250 000 t kontaminierten Bodens durchgesetzt.

Die Preussag-Anlage arbeitet bis voraussichtlich Sommer 1992 am Ostufer des Kieler Hafens auf ehemaligem HDW-Gelände. Auch diese Anlage wurde in den Niederlanden gebaut und an einem Sanierungsfall in Belgien großtechnisch erprobt.

Das Preussag Anlagenbau-Verfahren, System Heijmans, ist für folgende Kontaminationen geeignet:

- Mineralöle (MKW)
- Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- Aromatische Kohlenwasserstoffe (AKW)
- Cyanide
- Schwermetalle

Mit dem Verfahren in der Praxis erzielte Werte sind der Tabelle 4.2-6 zu entnehmen.

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: Heijmans - Preussag						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	60 - 160	-	< 20		9		a
	30 - 80		< 15		14		b
	50 - 500		< 15		13		
PCB ges.							
MKW ges.	7600		< 1000		227		c
HKW ges.							
CKW ges.							
BTX ges.	10 - 25		< 7		0,1 - 1,0		a
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.	30 - 1000		< 20		18		b
	100 - 500		< 20		15		c
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol							
As							
Cd	9		< 1		0,65		e
Cr							
Cu							
Hg							
Ni	100 - 300		< 75		46		d
Pb	250 - 500		< 150		135		a
	420 - 880		< 150		121		
Zn	550 - 1000		< 500		174		a
	500 - 1500				115		
	300 - 1000				95		d

Tabelle 4.2-6 Reinigungsleistungen Preussag Anlagenbauverfahren System Heijmans

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

- a Industriestandort
 b Gaswerksboden
 c ölverunreinigter Sand
 d galvanischer Betrieb
 e aufgefüllter Boden

Quelle: Firmeninformation

4.2.4.4 Deconterra-Verfahren System Lurgi

Dieses Verfahren ist eine eigene Entwicklung und stellt eine zweistufige naßmechanische Bodenaufbereitung zur Abtrennung organischer und anorganischer Schadstoffe dar. Als Waschflüssigkeit wird Wasser ohne Zusätze von Detergentien, Lösungsmitteln, Säuren, Basen oder ähnlichen Stoffen verwendet.

Die Entwicklung dieses Verfahrens basiert auf Kenntnissen der Firma auf dem Gebiet der naßmechanischen Aufbereitung von Mineralien, insbesondere von Erzen und Salzen sowie Schlick aus fließenden und stehenden Gewässern und auf langjährigen Erfahrungen in der Geräte- und Anlagentechnik.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Das Verfahren ist sowohl stationär als auch semimobil einsetzbar. Die zur Zeit in Frankfurt/Main im Betrieb befindliche Anlage besitzt eine Kapazität von 10 bis 20 t/h. Abb. 4.2-7 zeigt das Fließschema.

Bodenvorbehandlung

Der ausgehobene kontaminierte Boden wird bei 600 mm klassiert und einer nachfolgenden Siebung aufgegeben, die in eine Fraktion 0 bis 150 mm und eine 150 bis 600 mm trennt. Die Grobfraktion (150 bis 600 mm) wird im Kreislauf in einer Brecheranlage auf < 150 mm zerkleinert und gemeinsam mit der Feinfraktion einer Attritions-Waschtrommel zugeführt.

Erster Waschprozeß

In der Attritions-Waschtrommel werden unter Zugabe von Wasser die anhaftenden Schadstoffe vom Grobkorn abgerieben und zunächst in der Flüssigkeit suspendiert und danach an den Feinanteilen des Bodens adsorptiv gebunden.

Die benötigte Energie für die Attrition wird auf die Bodenart, den Charakter und die Konzentration der Kontamination abgestimmt, wobei bis zu 16 kWh/t an das Material übertragen werden können.

Bodenklassierung und -separation

Es folgt eine mehrstufige Absiebung des Trommelaustrages.

Die Fraktion > 20 mm wird nach der Zerkleinerung in einem Nachbrecher der Attritionstrommel erneut aufgegeben.

Die Fraktion 1 bis 20 mm wird entweder als gereinigtes Endprodukt aus dem Prozeß herausgeführt, oder einer gravimetrischen Sortierung unterzogen, wobei das Schwergut gereinigt ausgeschleust wird und das Leichtgut, z. B. kontaminierte gröbere Kohle, Teer- und Holzteilchen, als Schadstoffkonzentrat anfällt.

Die Fraktion < 1 mm wird einem Hydrozyklon aufgegeben, dessen Überlauf in einen Eindicker gelangt.

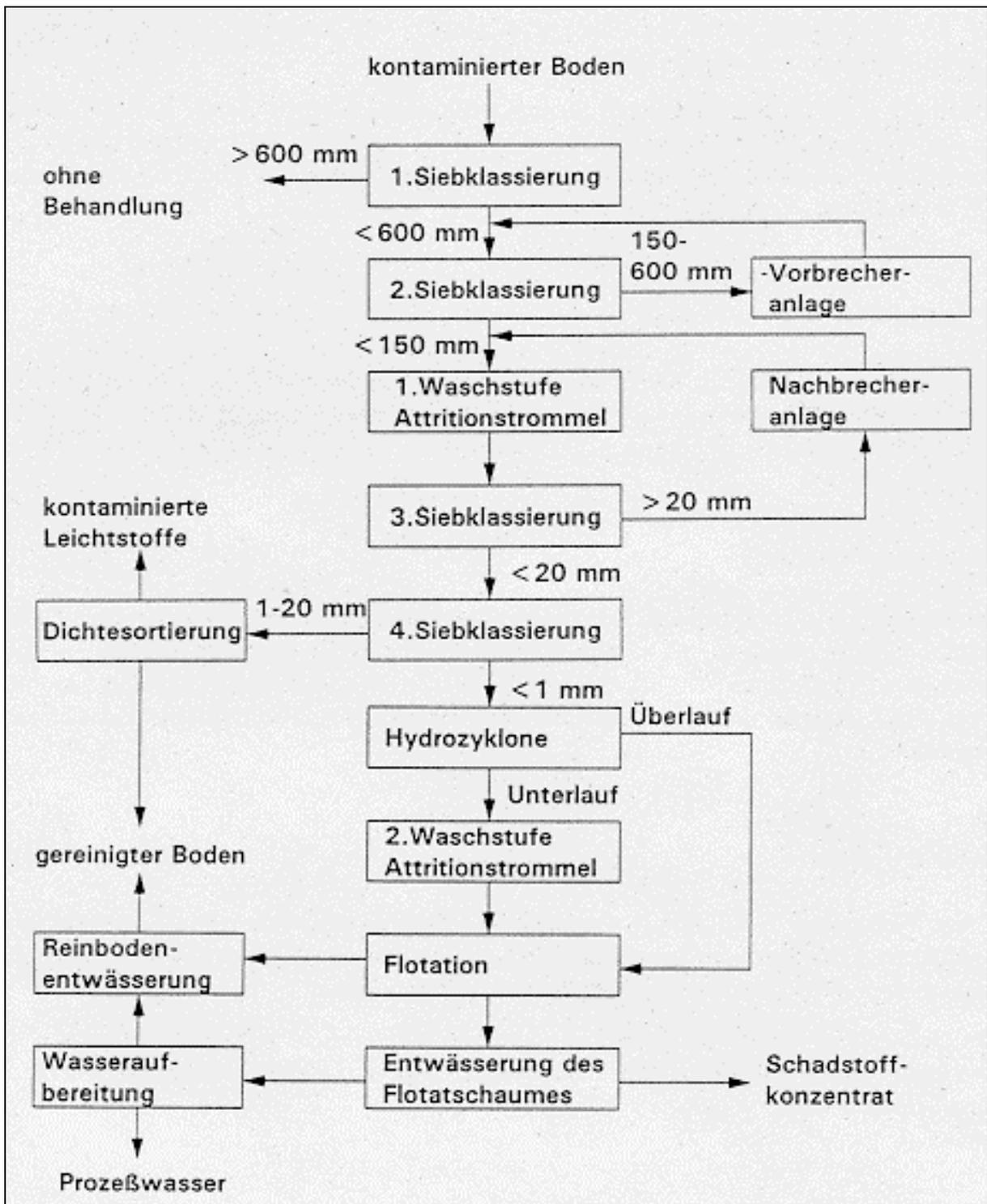


Abb. 4.2-7 Fließschema

Zweiter Waschprozeß

Der Hydrozyklonunterlauf wird zusammen mit der entschlämmten Grobfraktion des Klassierers in die 2. Attritionsstufe eingeleitet und einer weiteren Reinigung unterzogen.

Der Austrag der 2. Attritionsstufe gelangt in eine Flotation, deren Reagenzienschema auf die Erfordernisse des jeweiligen Schadstoffspektrums abgestimmt wird.

Der Flotationsrückstand enthält das gereinigte Material, das in einer nachgeschalteten Entwässerung auf eine Restfeuchte von ca. 15 bis 20 % gebracht wird und vor Ort wieder eingebaut werden kann.

Im Schaumaustrag der Flotation sind die Schadstoffe konzentriert. Der Flotations-schaumaustrag gelangt in den Eindicker zur Vorentwässerung.

Der Eindickerunterlauf wird über eine Entwässerungsstufe auf ca. 30 % Wassergehalt gebracht und stellt einen großen Teil des sogenannten Schadstoffkonzentrates dar, das die aus dem Boden entfernten Schadstoffe in angereicherter Form enthält.

Prozeßwasserreinigung

Das beim Deconterra-Verfahren anfallende Waschwasser ist nur gering verunreinigt, so daß der Großteil des Betriebswassers in die Anlage zurückgepumpt werden kann.

Um die Anreicherung von Schadstoffen im Wasser zu vermeiden, wird ein Teilstrom über eine Prozeßwasseraufbereitung geleitet.

Reststoffbehandlung

Die Schadstoffe setzen sich aus folgenden im Prozeß separierten Stoffen zusammen:

1. Leichtgut aus der gravimetrischen Sortierung (z. B. Holz, Teerbrocken, Kohle, Koks etc.)
2. Schaum aus der Flotation

Geplant ist die thermische bzw. chemische Behandlung in stationären Anlagen. Als Verfahren werden dazu von Lurgi vorgeschlagen:

- Drehrohrtechnik
- Pellet-Wanderrostverfahren
- Wirbelschichtverfahren (bei geeigneter Korngrößenverteilung)
- Naßoxidation (in Entwicklung)

Lurgi untersucht zur Zeit die Behandlung der Reststoffe durch thermische Verfahren im Niedertemperaturbereich.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Deconterra-Verfahren System Lurgi

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 1200 m ²
Elektrischer Anschlußwert	750 kVA
Frischwasserbedarf	abhängig von der Kornzusammensetzung des Rohbodens
Rüstzeit	ca. 2 Wochen
Durchsatz	15 bis 25 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	ca. 16 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	0,1 bis 0,3 m ³ /t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	keine Abluftreinigung, nachrüstbar
Waschbare Bodenfraktionen	0,002 mm bis 150 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	> 30 % möglich
Einsatzbereich	KW, Cyanide, PAK, Schwermetalle
Spezifische Reinigungskosten	160 bis 300 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Im Versuchsbetrieb hat sich gezeigt, daß abhängig von der Zusammensetzung des Bodens und der Art der Verunreinigung das Ausbringen an gereinigtem Boden zwischen 70 % und 90 % des Rohbodens liegt. Die Restgehalte an Schadstoffen im gereinigten Boden liegen deutlich unter den A- bzw. B-Werten der Holland-Liste.

Reinigungsleistungen für verschiedene Schadstoffarten laut Angaben der Fa. Lurgi:

Schwermetalle: Blei	Ausgangskonzentration: 144 mg/kg Endkonzentration: 35 mg/kg
Organische Verunreinigungen:	siehe Tabelle 4.2-7

Schadstoffart	Bodenreinigungsverfahren, System: System Deconterra-Lurgi						Sanierungsfall
	Ausgangskonzentration		vereinbartes Sanierungsziel		erreichtes Sanierungsziel		
	mg/kg Boden	µg/l Wasser	mg/kg TS	µg/l Eluat	mg/kg TS	µg/l Eluat	
PAK ges.	1030		< 20		7,2		a
PCB ges.	8		0,2		0,1		b
MKW ges.	8100		< 500		420		c
HKW ges.							
CKW ges.	219		< 1		0,87		d
BTX ges.	187		< 10		6,2		e
Benzol							
Toluol							
Xylol							
Cyanide ges.	39				1,7		a
Cyanide frei							
Pestizide							
Phenol	4,2				1,2		a
As							
Cd							
Cr							
Cu	2615				28		d
Hg	265		< 20		36		f
Ni							
Pb	144				35		g
Zn							

Tabelle 4.2-7 Reinigungsleistungen Deconterra-Verfahren System Lurgi

Erläuterungen zum Sanierungsfall, Bodenart ...

Orientierung an B-Werten der Holland-Liste

- a Kokereiboden
- b Trafowerk
- c Raffinerie
- d Metallverarbeitung
- e Gaswerk
- f Chemiebetrieb
- g Batterieherstellung

Quelle: Teresa
Firmenschrift

4.2.4.5 Bodenwaschverfahren System R.E.T.

Die R.E.T. - Recycling- und Entsorgungstechnologie GmbH & Co. KG, Regensburg entwickelte in eigener Regie ein Bodenwaschverfahren zur Reinigung von Böden und Bauschutt.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Bodenvorbehandlung

Nach erster Siebklassierung werden die einzelnen Kornfraktionen analysiert. Sollten sich Schadstoffe im abgeseihten Überkorn befinden, so muß dieses gebrochen, gemahlen und in der Waschanlage weiterbehandelt werden.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind im Fließschema, Abb. 4.2-8, dargestellt.

Erster Waschprozeß

Das abgetrennte schadstoffbelastete Siebgut < 100 mm wird in einer Attritionsmühle mit Wasser angemaischt. Die oberflächigen Anlagerungen und Verkrustungen sollen durch den dabei entstehenden Abrieb gelöst werden.

Bodenklassierung und -separation

Daran anschließend erfolgt die Naßklassierung des Materials durch Trommel- und Spannwellensiebe.

Das Trommelsieb besteht aus drei Sektionen, die mit Siebbelägen unterschiedlicher Maschenweite belegt sind. Hier wird das Erdreich bei hohem Wasserdruck gesiebt und gewaschen.

Das Bodenmaterial < 20 mm gelangt über ein Becherwerk in das Spannwellensieb. Durch die Bewegung der Siebmatte wird das Material laufend gegen die mit Kunststoff beschichtete Abdeckung des Siebes geschleudert, prallt ab und fällt wieder auf den Siebbelag zurück.

Gleichzeitig wird das Material entgegen der Fließrichtung mit einem starken Wasserstrahl besprüht. Diese starke mechanische Belastung soll dazu führen, daß die durch die vorhergehenden Behandlungen nicht gelösten Schadstoffe von der Kornoberfläche abgetrennt werden.

Zweiter Waschprozeß/Separation

Der schadstoffreiche Boden < 3 mm wird in die Dichtesortierung, die sich aus Aufstromklassierer, Wendelrinnen und Gegenstromwäscher zusammensetzt, gepumpt. Im Aufstromklassierer findet u. a. eine kräftige Verwirbelung des Materials statt. Ein Teil des schlammhaltigen Wassers wird abgezogen und in den Gegenstromwäscher gepumpt.

In Wendelrinnen erfolgt die Abtrennung bestimmter Fraktionen nach der Dichte; im Gegenstromwäscher erfolgt die Auftrennung in drei Sandfraktionen unterschiedlicher Körnung.

Je nach vorliegender Verunreinigung erfolgt eine zusätzliche Behandlung des Schlammes bzw. der kontaminierten Sandfraktionen < 3 mm im sogenannten Wirbelschichtwäscher.

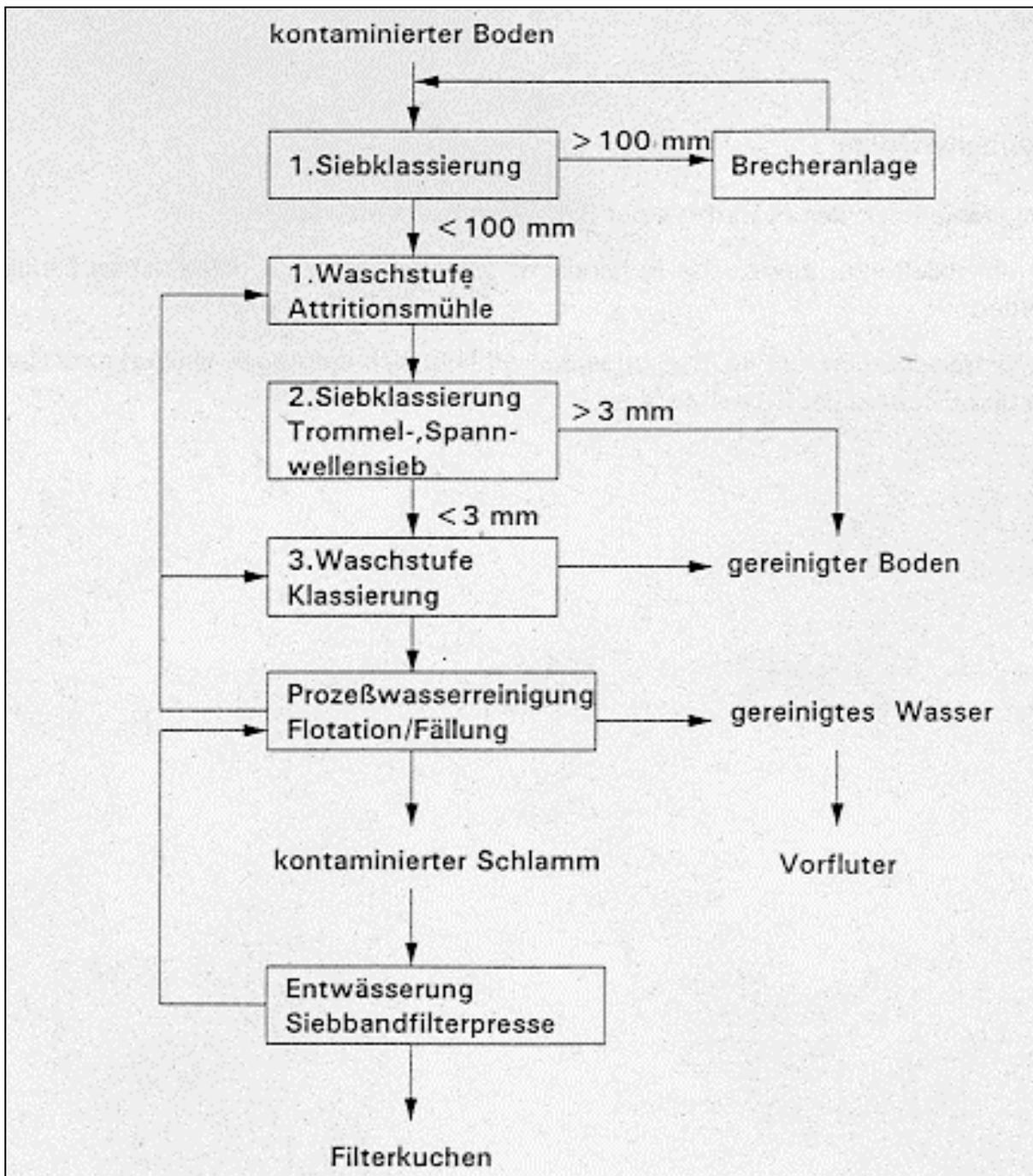


Abb. 4.2-8 Fließschema

Prozeßwasserreinigung

Der belastete Schlamm wird in der Prozeßwasser-Aufbereitungsanlage geflockt, eingedickt und zur Weiterbehandlung oder Entsorgung gesammelt. Die im Waschwasser gelösten Schwermetalle werden gefällt oder in Ionenaustauschern reduziert.

Das Waschwasser soll nach mehrmaliger Sedimentation als Prozeßwasser im Kreislauf gefahren oder in die Kanalisation eingeleitet werden. Bei Mineralölverunreinigungen wird das Waschwasser in Ölabscheidern, Koaleszenzabscheidern und Emulsionsspaltanlagen gereinigt.

Reststoffbehandlung

Der kontaminierte Schlamm wird in einer Bandfilterpresse entwässert.

Für die anschließende thermische Behandlung muß der gepreßte Filterkuchen zerkleinert werden.

An den thermischen Prozeß im Trägergasofen schließt sich die Abgasreinigung mit Naßwäsche und Filterung der Prozeßgase an.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ Bodenwaschverfahren System R.E.T.

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 640 m ²
Elektrischer Anschlußwert	200 kW
Frischwasserbedarf	1 bis 2 m ³ /h
Rüstzeit	1 bis 2 Wochen
Durchsatz	20 bis 30 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	3 kWh/t
Spezifischer Wasserverbrauch	3,5 m ³ /t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	keine Abluftreinigung, bei Bedarf nachrüstbar
Waschbare Bodenfraktionen	0,02 mm bis 100 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	bis max. 50 %
Einsatzbereich	Hg, ACN, MKW, PAK
Spezifische Reinigungskosten	170 bis 270 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Bisherige großtechnische Erfahrungen liegen vor allem bei der Behandlung von Quecksilberverunreinigungen vor. Dabei wurden die vorliegenden Verbindungen des Quecksilbers mit dem Bodenanteil < 0,1 mm ausgewaschen. Sand- und Kiesfraktionen konnten mit Restgehalten unter 10 mg Hg/kg TS die Waschanlage verlassen.

In einem anschließenden thermischen Prozeß sollen die Quecksilberverbindungen dann reduziert und der Quecksilberdampf kondensiert werden (Versuchsanlage besteht bereits).

In der Versuchsanlage in Regensburg wurde auch der Nachweis für die Dekontaminierbarkeit von MKW- und PAK-verunreinigten Böden mit dem R.E.T.- Verfahren erbracht.

Aktueller Sanierungseinsatz ist das ehemalige Richtberggelände in Regensburg.

4.2.4.6 Das TerraCon-Verfahren

Beim TerraCon-Verfahren handelt es sich um eine Bodenwaschanlage mit angeschlossener Prozeßwasseraufbereitung der Arbeitsgemeinschaft Eggers Tiefbau GmbH und der Wayss + Freytag AG in Hamburg. Das Verfahren beruht auf einer Eigenentwicklung der 1988 gegründeten Arbeitsgemeinschaft. Die Anlage wurde im September 1989 für 6 Monate nach § 4.2 ABFG, später nach § 7.2 befristet für einen Versuchsbetrieb genehmigt. Die Beantragung der Planfeststellung nach § 7.1 ist Anfang 1991 eingereicht worden.

Die semimobile Bodenwaschanlage der TerraCon ist in sieben 20' - Containern untergebracht, dazu kommen weitere 8 Container für die Wasser- und Schlammbehandlung.

Ein für diese Bodenwaschanlage konzipiertes System der elektronischen Datenerfassung und -übertragung, einschließlich einer speicherprogrammierbaren Steuerung und eines übergeordneten Personalcomputers soll die Stoffströme im Prozeß leiten. Dieses System soll den Anlagenbediener in die Lage versetzen, die Bodenwaschanlage von einer zentralen Warte aus zu bedienen. Nach Eingabe der vom Boden abhängigen Waschparameter soll der eigentliche Waschprozeß zentral gesteuert, überwacht, auf einem Bildschirm angezeigt und auf einem Drucker dokumentiert ausgewertet werden.

Allgemeine Verfahrenstechnik

Der Verfahrensablauf ist im Fließschema, Abb. 4.2-9, dargestellt.

Bodenvorbehandlung

Von der befestigten Zwischenlagerfläche bringt ein Radlader den kontaminierten Boden in einen Aufgabetrichter mit Stangensizer.

Hier wird das Überkorn > 100 mm und der Unrat abgeschieden. Ein Förderband bringt den vorklassierten Boden in die Siebmaschine, die sich in der zweiten Containerebene befindet. Auf dem Förderband ist ein Magnetabscheider zur Entfernung metallischer Verunreinigungen installiert.

An dieser Stelle kann alternativ auch ein Brecher für die Zerkleinerung von kontaminiertem Bauschutt eingesetzt werden.

Das vorklassierte bzw. gebrochene Material wird gewogen und trocken einem Zwangsmischer zugeführt. Dieser Zwangsmischer steht in der 3. Containerebene, schallisoliert in einem 20' - Container. Der Mischer wird chargenweise mit 2,5 t Material gefüllt.

Waschprozeß

Im Mischer selbst erfolgt das Anfeuchten mit Wasser und einer waschaktiven Substanz (Tensid). Bei der 3 bis 8 min dauernden Durchmischung erfolgt ein starker Energieeintrag durch die Wahl des Mischsystems. Es entsteht eine fast homogene Mischung, die in einen unter dem Mischer in zweiter Containerebene befindlichen Trommelwäscher entleert wird.

Durch Flügel und Aufhalter wird auch im Trommelwäscher eine innige Vermischung des Bodens mit der Waschlösung gewährleistet. Die Behandlungsdauer im Trommelwäscher kann variiert werden und ist abhängig von der Schadstoff- und Bodenzusammensetzung.

Der Waschprozeß im Trommelwäscher erfolgt nach dem Gegenstromprinzip, was wiederum die Abscheidung von Leichtstoffen im gleichen Verfahrensschritt ermöglicht.

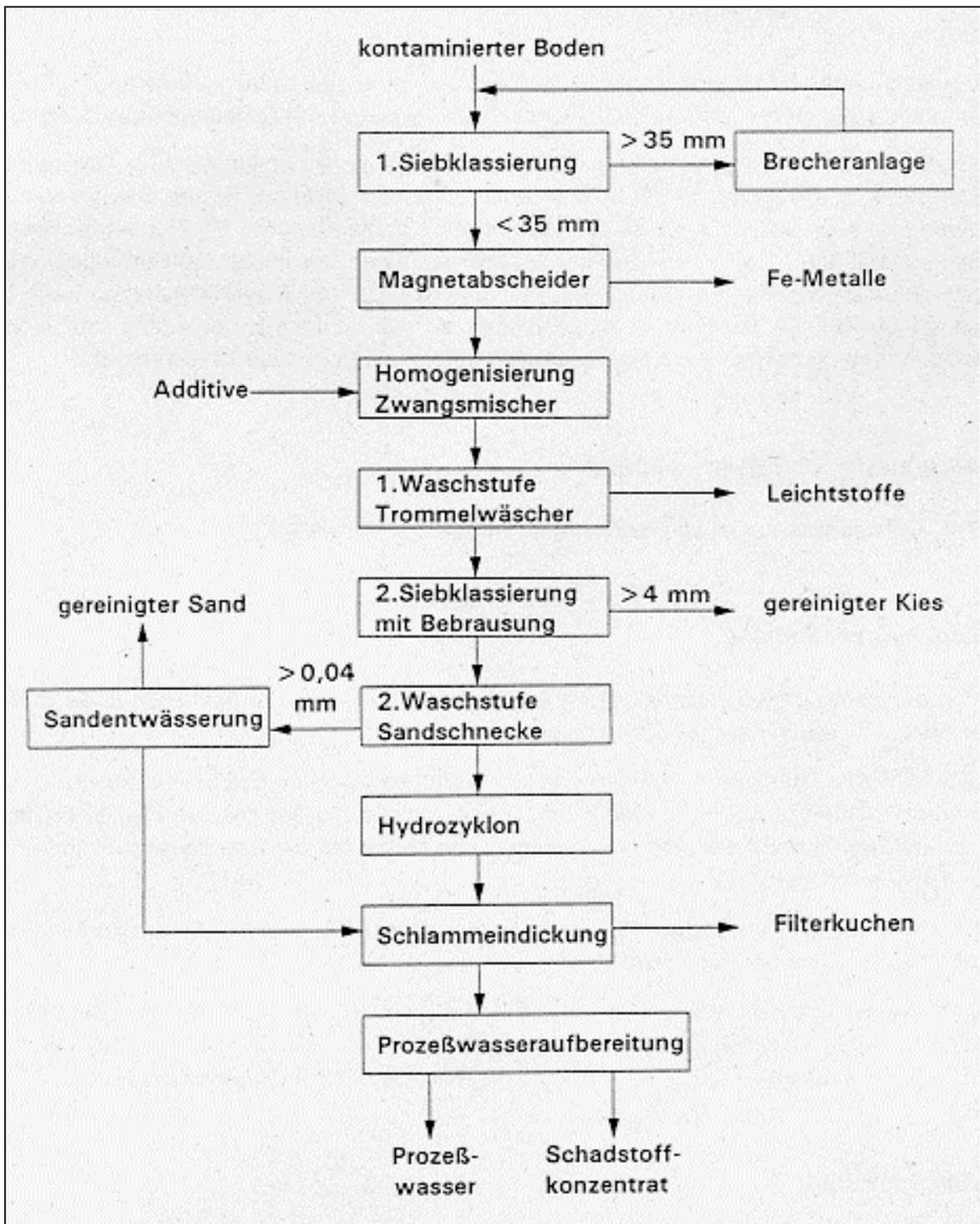


Abb. 4.2-9 Fließschema

Bodenklassierung und -separation

Der Trommelwäscher entleert auf ein Schwingsieb, das die gesäuberte Kiesfraktion ausschleust. Die verbleibenden Sand- und Schlufffraktionen werden in einer schräggestellten Sandschnecke durch Wasserbedüsung nachgewaschen. Über ein ebenfalls mit Wasserbedüsung versehenes Entwässerungssieb wird die Sandfraktion gereinigt ausgetragen.

Sowohl das Überlaufwasser der Sandschnecke als auch das Spülwasser des Sandsiebes führen über Hydrozyklone.

Der Schlammaustrag des Hydrozyklonunterlaufs wird in einer Siebbandpresse entwässert.

Prozeßwasserreinigung

Die Prozeßwasserreinigung erfolgt über Wellplattenabscheider und Druckentspannungsflotation. In der Flotation werden demulgierte Öle und Additive abgeschieden. Eine anschließende Adsorptionsfällung und Filtration soll das Wasser soweit regenerieren, daß es als Kreislaufwasser wieder eingesetzt werden kann.

Reststoffbehandlung

Der aus dem Behandlungsprozeß anfallende Reststoffanteil wird nach einer Entwässerung deponiert.

Leistungsangaben und technische Daten¹⁾ TerraCon-Verfahren

Bauart	semimobil
Platzbedarf	ca. 1000 m ²
Elektrischer Anschlußwert	350 kW
Frischwasserbedarf	1 m ³ /h
Rüstzeit	ca. 3 Wochen
Durchsatz	10 bis 15 t/h
Spezifischer Energieverbrauch	keine Angaben
Spezifischer Wasserverbrauch	40 l/t
Abwasseranfall	Kreislaufführung
Abluftmenge	Abluftreinigung bei Bedarf
Waschbare Bodenfraktionen	0,04 mm bis 35 mm
Maximaler Schluff- und Tonanteil	bis ca. 35 %
Einsatzbereich	MKW
Spezifische Reinigungskosten	250 bis 350 DM/t

1) Angaben laut Betreiber

Ergebnisse und Bewertung

Die eigentliche Bodenreinigung findet nur in der Fröhschicht statt, in der 4 Mann beschäfftigt sind. In der Spätschicht wird die Anlage entschlammt und in der Nachtschicht erfolgt dann die Prozeßwasseraufbereitung. Der Durchsatz der Anlage beträgt bei einem Schluffgehalt von max. 15 % 150 t/d, maximal kann die Anlage mit 35 % Schluffanteil beaufschlagt werden und hat dann einen Durchsatz von ca. 100 t/d.

Mit der Anlage wurden bisher am Standort Hamburg rd. 24 000 t, überwiegend ölverunreinigte Böden, gereinigt. Bei Eingangskonzentrationen bis zu 20 000 mg MKW/kg wurden im gereinigten Material i. d. R. Werte unter 200 mg MKW/kg erreicht.

4.3 Stationäre Bodenwaschanlagen (off site)

Unter stationären Bodenwaschanlagen werden Anlagen verstanden, in denen die eingesetzte Technik ortsfest installiert ist. Der kontaminierte Boden wird in Abhängigkeit vom Gefährdungspotential in beplanten LKW, geschlossenen Containern bzw. Containern mit Aktivkohlesicherung angeliefert, einer Reinigung unterzogen und anschließend einer Wiederverwertung oder einer Deponierung zugeführt.

Im Unterschied dazu sind Bodenreinigungszentren als "Zusammenschluß von mehreren kombinierbaren und sich ergänzenden Technologien in einer stationären Anlage zur Reinigung kontaminierter Böden und anderer Materialien zu sehen. Der Begriff "Zentrum" beinhaltet zudem, daß ein bestimmter Einzugsbereich erfaßt werden soll, bei dem die Anbindungslogistik sowohl ökonomisch als auch ökologisch optimal ausgeprägt ist." (Nach Fischer, Köchling in: NORDAC - Errichtung und Betrieb eines Bodenrecyclingzentrums.)

Gegenwärtig gibt es in der Bundesrepublik Deutschland noch kein genehmigtes und errichtetes Zentrum, sondern erst einige Standorte mit verschiedenen Techniken, quasi einer ersten Errichtungsstufe von Behandlungszentren. Tabelle 4.3-1 enthält eine Zusammenstellung von bereits realisierten oder in der Planung befindlichen stationären Anlagen zur Bodenreinigung bzw. Bodenreinigungszentren.

Stationäre Anlagen, mit dem Schwerpunkt Bodenwaschen, bieten die Möglichkeit, einen sowohl auf die Schadstoffzusammensetzung als auch auf die Schadstoffmenge optimierten Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Abluft- und Abwasserführung und -reinigung sind einfacher zu handhaben, Sekundäremissionen werden verringert.

Die gesetzlichen Grenzwerte für Abluft und Abwasser können bei stationären Anlagen leichter kontrolliert und eingehalten werden als es bei mobilen /semimobilen Anlagen möglich ist.

Stationäre Anlagen bieten darüber hinaus die Möglichkeit zur sinnvollen Kombination mit thermischen oder biologischen Verfahren zur Behandlung der im Sedimentfilterkuchen aufkonzentrierten Schadstoffe. Die Errichtung von stationär betriebenen Bodenwaschanlagen bietet sich vor allem für industrielle Ballungsräume mit einem hohen Anteil an Altstandorten und Altablagerungen an.

Tabelle 4.3-1 Stationäre Reinigungsanlagen (nach FRANZIUS in NORDAC - Errichtung und Betrieb eines Bodenreinigungszentrums, aktualisiert)

Standort	Stand (1992)		Verfahrensstränge		
	geplant	realisiert / im Bau	thermisch	chem./phys.	biologisch
Hamburg-Vedde		x		x	
Hamburg-Billbrook	x			x	x
Hamburg-Elmsbütte		x		x	
Hamburg-Peute		x		x	
Itzehoe/Lägerdorf		x		x	
Ganderkesee		x			x
Bremen		x			x
Ahnsen		x			x
Hildesheim	x		x	x	x
Northeim-Göttingen		x			x
Berlin-Grünau		x			x
Berlin-Tiergarten		x	x		
Großkreuz	x			x	x
Münster	x				x
Hattingen	x			x	
Bochum	x		x		x
Duisburg	x		x		
Dresden	x			x	x
Gröbern (bei Meißen)	x			x	x
Schwarze Pumpe	x		x	x	x
Neunkirchen	x		x	x	x
Frankfurt	x		x	x	x
Mannheim	x			x	x
Stuttgart	x			x	
Karlsruhe	x				
Hanau	x			x	x
Bischofswerda/Sa	x		x	x	x

4.3.1 Entsorgungszentrum Hamburg

Die Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg beauftragte 1988 die BFUB Umweltberatung Fischer & Köchling mit der Erarbeitung einer Bedarfsanalyse für ein Bodenrecyclingzentrum. Das Ergebnis der Recherchen belegte, daß aufgrund der in Hamburg und Umgebung vorhandenen Altlasten ein Bedarf zur Installation technischer Aufbereitungskapazitäten gegeben war.

Die dafür notwendige Technik nach Hamburg zu holen, gelang 1990 durch die Gründung der Firma NORDAC (Norddeutsches Altlastensanierungs-Centrum GmbH & C. KG), ein Tochterunternehmen der Klöckner AG, Duisburg, und der Deutschen Abfallwirtschafts GmbH (DAW), Hamburg.

Die Nordac wurde gegründet, um ein stationäres Behandlungszentrum in Hamburg zu bauen und zu betreiben. Als erste abfallrechtlich planfestgestellte Anlage wurde das Zentrum in der ersten Stufe mit einer Bodenwaschanlage nach dem System Oecotec 2000 errichtet und ist seit Februar 1991 in Betrieb. Seit April 1991 wird im 3-Schicht-Betrieb gearbeitet.

Für die Anlage wurde ein Planfeststellungsverfahren nach § 7 Abs. 1 AbfG i. V. m. § 4 BImSchG und der Ziffer 8.4 des Anhangs der 4. BImSchV durchgeführt. Die erteilte Genehmigung gilt unbefristet.

Das Kernstück der stationären Anlage ist eine, in wesentlichen Bestandteilen zu der unter Punkt 4.2.1 beschriebenen, gleiche Oecotec-HDBW-Anlage, installiert in einer isolierten, winterfesten Maschinenhalle.

Betriebsstruktur der NORDAC-Anlage

Die Bodenbehandlungsanlage besteht aus dem Eingangsbereich, dem Behandlungs- und Lagerbereich/Zwischenlager, dem Behandlungsbereich Hochdruckbodenwaschanlage, dem Labor und den Freiflächen.

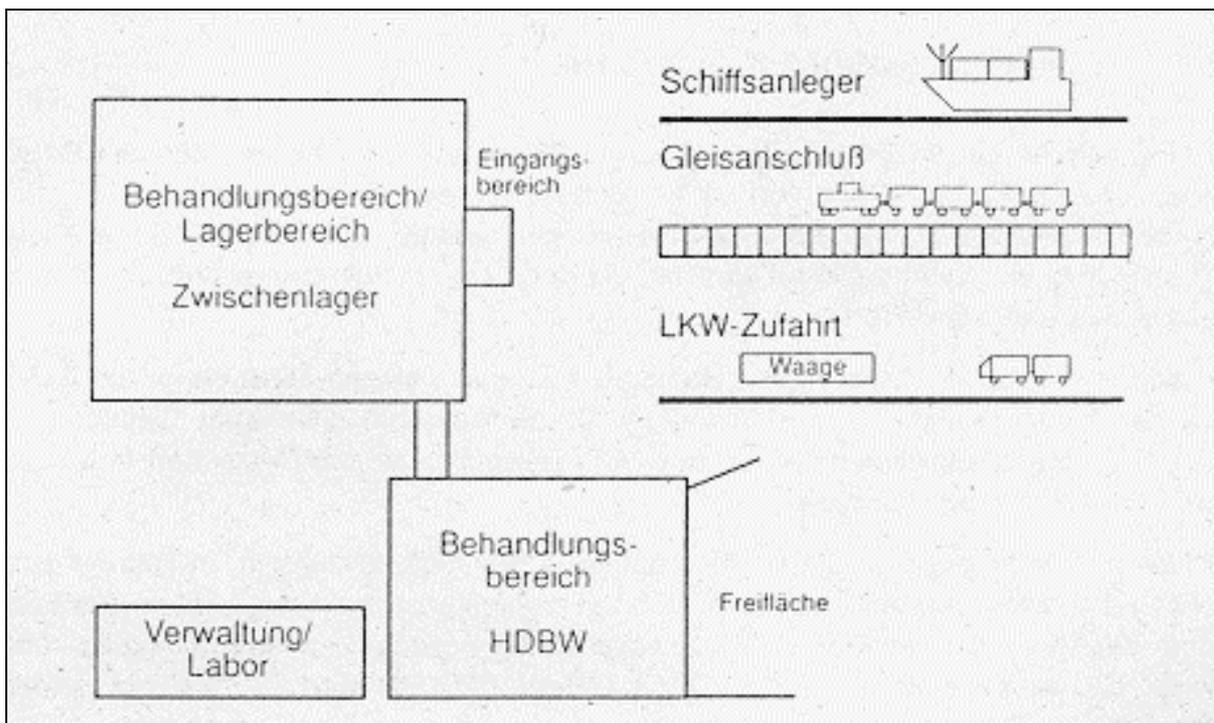


Abb. 4.3-1 Schematische Übersicht des NORDAC - Geländes (nach NORDAC)

4.3.1.1 Eingangsbereich

Den Eingangs- und Kontrollbereich bilden die Waage, die Anlieferungszone und die Kontrolleinrichtungen, die von Mitarbeitern besetzt sind, die als Gefahrgutbeauftragte mit den Vorgaben der Gefahrstoff- und Abfallverordnung vertraut sind und die Arbeitssicherheit im Zwischenlager und in den Außenbereichen überwachen sollen.

Alle angelieferten Böden sind vor der Anlieferung bereits untersucht. Bei der Eingangskontrolle werden Ladung und Unterlagen überprüft und Rückstellproben, die die notwendige Transparenz und Kontrollsicherheit gewähren sollen, genommen.

4.3.1.2 Behandlungs- und Lagerbereich

Der gesamte Lagerbereich hat 3 Funktionen zu erfüllen: einmal als Behandlungsbereich zum Sortieren, Sieben und Brechen zur Vorbereitung des Bodens für die anschließende Wäsche, zum anderen als Zwischenlager im eigentlichen Sinne der TA-Abfall. Chargen über 50 t werden als Einzelchargen behandelt, Chargen < 50 t werden nach Schadstoffart, -kombination, -konzentration zu größeren Teilchargen zusammengefaßt und der Bodenwäsche zugeführt.

Das Zwischenlager hat eine Aufnahmekapazität von 10 000 t.

Dieser Bereich dient auch der Lagerung von Rest- und Wertstoffen.

Jede Massenbewegung in diesem Bereich wird in einem sogenannten Abfallnachweisbuch dokumentiert. Die Übergabe der Böden erfolgt generell durch sogenannte Entsorgungslaufzettel.

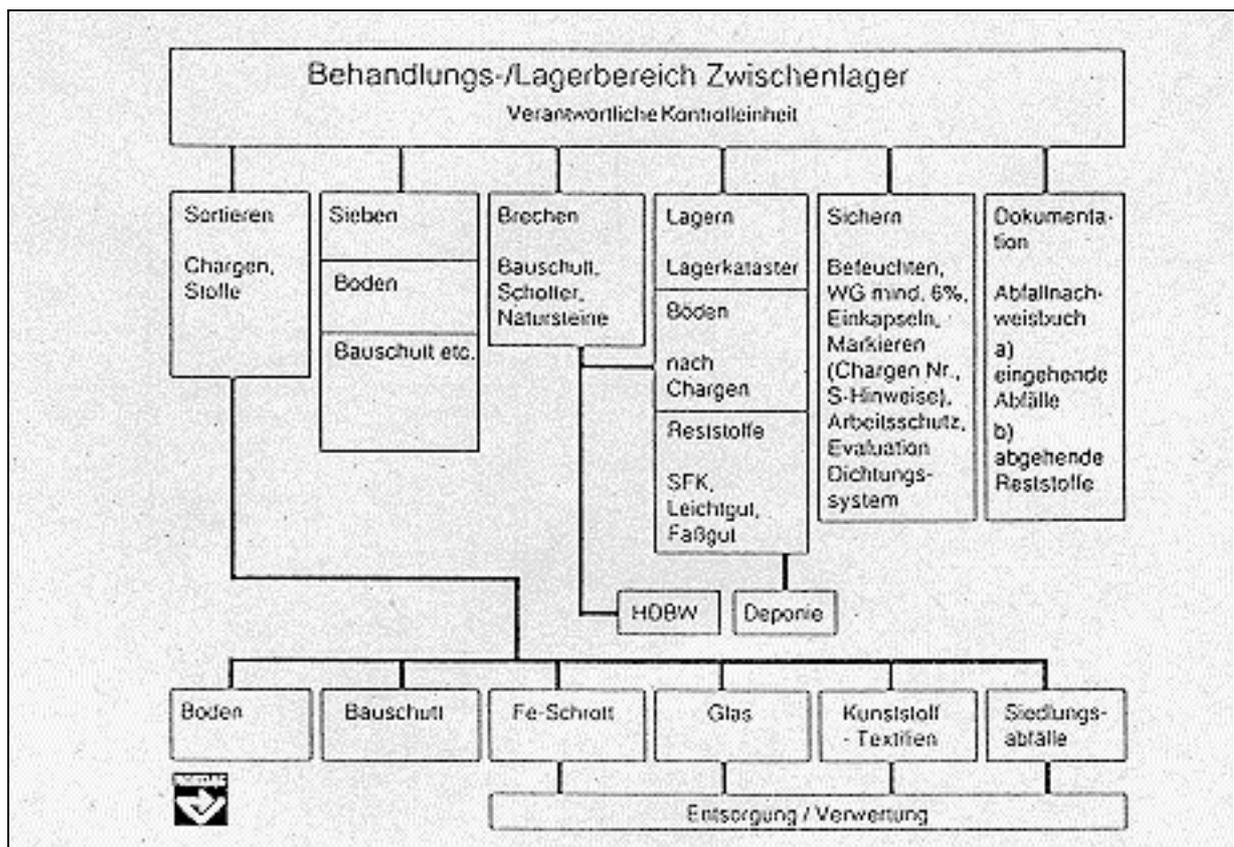


Abb. 4.3-2 Bereich Behandlung/ Lagerung/ Zwischenlager (nach NORDAC)

Das Bodenlager ist mit einem speziellen Abdichtungssystem gegen den Untergrund versehen. Es besteht aus zwei Folienlagen, wobei die eine Lage durch eine integrierte Metallsperre verstärkt ist, um einen Schutz gegen das Durchdringen von LHKW zu gewährleisten.

Außerdem läßt sich der Zwischenraum der beiden Folien bereichsweise kontrollieren bzw. reparieren. Darüber hinaus sind Vorkehrungen für den Fall getroffen, daß das zwei-lagige System versagt. Dabei werden auch unterhalb der Metallschichtbahn austretende Stoffe geortet.

Das Abdichtsystem ist durch die Bundesanstalt für Materialprüfung geprüft und zugelassen, somit dürfen sämtliche in der Gefahrstoff-VO aufgeführten Böden, unter Berücksichtigung der in der 12. BImSchV -"Störfall-VO", Spalte 1 - festgelegten Mengenschwellenwerten, gelagert werden.

4.3.1.3 Behandlungsbereich - Hochdruckbodenwaschanlage

Der Behandlungsbereich der HDBW umfaßt die Bodenwäsche, die Prozeßabwasser, Abwasser- und Luftreinigung und den Sicherheitsbereich.

Sie unterliegt der behördlichen Überwachung gem. Bundesimmissionsschutzgesetz in den Bereichen Lärm und Luft und dem Hamburgischen Abwassergesetz im Bereich des Abwassers.

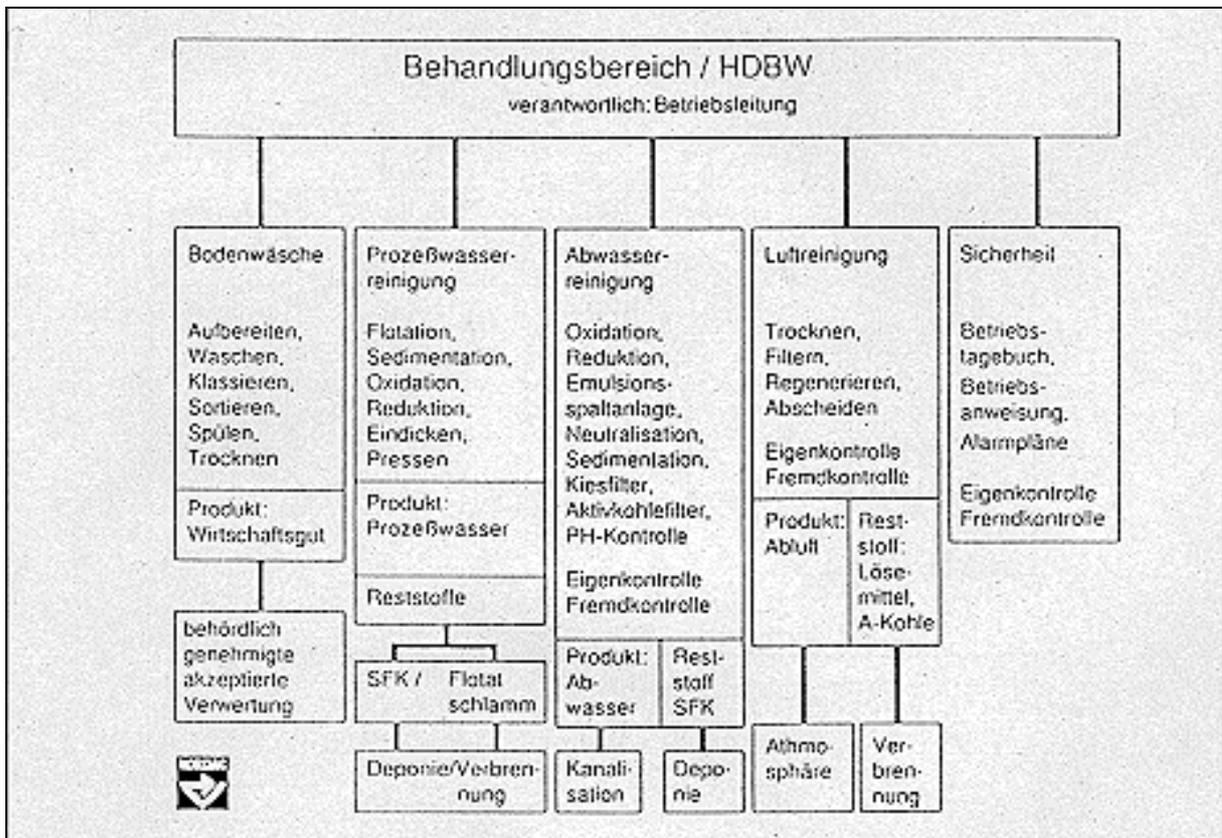


Abb. 4.3-3 Behandlungsbereich/HDBW (nach NORDAC)

4.3.1.4 Allgemeine Verfahrenstechnik

Auf das Verfahrensprinzip der Klöckner Oecotec Hochdruckbodenwaschanlagen wurde im Abschnitt der semimobilen Bodenwaschanlagen, Kap. 4.2.1, im einzelnen eingegangen.

Das Betriebslabor gewährleistet eine kontinuierliche Analysetätigkeit. In Versuchen wird bereits vor der Behandlung einer bestimmten Charge geprüft, mit welchen Methoden und Verfahrensschritten die gelösten und suspendierten Schadstoffe bzw. Schadstoffträger aus dem Wasser abgeschieden werden können. Dabei werden Verfahren der modernen Klärwerkstechnik eingesetzt.

Alle Reststoffe des Reinigungsprozesses werden ständig chemisch-physikalisch analysiert.

Der gereinigte Boden kommt nach der Wäsche noch feucht in ein Freilager; bei trockener Witterung wird der Boden berieselt, um Staubentwicklung zu verhindern. Vor dem Abtransport werden noch einmal Proben genommen und analysiert.

Die aufkonzentrierten Reststoffe aus unterschiedlichen Waschvorgängen werden getrennt gesammelt und ordnungsgemäß entsorgt.

Der Personalbedarf pro Schicht beträgt 1 Vorarbeiter, 4 Mitarbeiter sowie Fachpersonal für die analytische Begleitung, Dokumentation, Verwaltung/Abrechnung etc. Die Reinigungskosten liegen ab 260 DM/t; der Preis schließt die Reststoffentsorgung ein.

4.3.1.5 Ergebnisse und Bewertung

Aufgrund der Standortwahl ist eine gute Ver- und Entsorgung der Anlage gesichert. Es besteht sowohl eine unmittelbare Anbindung an das Autobahnnetz, ein eigener Gleisanschluß zur Bundesbahn als auch ein Liege- und Entladeplatz für Binnenschiffe. Somit kann man davon ausgehen, daß seit April 1991 eine ökologische Entsorgungsalternative für kontaminierte Böden für Norddeutschland existiert.

Die chemisch-physikalische Behandlung inkl. der Entsorgung der anfallenden Reststoffe ist möglich für:

- ölverunreinigte Böden, Abfallkatalog Nr. 31423
- sonstige Böden mit schädlichen Verunreinigungen, Abfallkatalog Nr. 31424
- Bauschutt und Erdaushub mit schädlichen Verunreinigungen, Abfallkatalog Nr. 31441

4.3.2 Weitere Anlagen

Die Bodenwaschanlage der Firma Harbauer besteht seit 1986 auf dem Altstandort Pintsch-Öl in Berlin. Sie ist in einer Halle stationär für die Sanierung des Geländes errichtet worden.

Aufgrund ihrer Bauart und der Dauer des bisherigen Betriebes muß sie als stationär angesehen werden.

Sofern erforderlich, kann sie mit entsprechendem Aufwand an einem anderen Platz wieder errichtet werden. Sie ist mit Abluft- und Abwasserreinigung ausgestattet und entspricht dem Stand der Technik für stationäre Bodenwaschanlagen (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.2.2).

Eine dritte stationäre Bodenwaschanlage wurde von der Firma Alsen-Breitenburg Umwelttechnik in Lägerdorf bei Itzehoe errichtet und Anfang 1992 in Betrieb genommen.

4.4 In-situ-Bodenwaschverfahren

Dort, wo die Flüchtigkeit und Mobilität der im Boden enthaltenen Schadstoffe und schwierige bauliche Randbedingungen die Anwendung von Ex-situ-Verfahren ausschließen und eine Abbaubarkeit durch hydraulische und mikrobiologische Verfahren nicht gegeben ist, bieten sich In-situ-Waschverfahren an (Kap. 2.1.1).

Das Prinzip der In-situ-Bodenwäsche besteht nach dem gegenwärtigen Stand der Technik darin, eine Art Behandlungsraum zur Bodenvorbereitung und Schadstoffabtrennung im Erdreich zu schaffen, die erzeugte Suspension abzupumpen, on site zu behandeln, um anschließend möglichst das gereinigte Material direkt wieder zu verfüllen. Diese Behandlungsräume werden z. B. in Form von Hüllrohren überlappend nebeneinander abgeteuft, so daß in einem Raster die zu reinigende Grundfläche komplett erfasst wird. Es wird Schritt für Schritt gearbeitet, d. h. erst nach "Ausspülung" des kontaminierten Bodens, On-site-Behandlung und Wiederverfüllung, wird der jeweils nächste Behandlungsraum abgeteuft.

Einerseits sind die In-situ-Waschverfahren von der Tiefenreichweite der Verunreinigung und den gegebenen baulichen Situationen verhältnismäßig unabhängig, andererseits sind diese "rammenden" Verfahren, die fast immer mit den bereits genannten Hüllrohren oder Spundwänden arbeiten, weniger geeignet für stark inhomogene Böden mit hohem Grobkornanteil, da sich für diese Bodentypen eine Abteufung schwieriger gestalten würde.

Zusammenfassend können als typische Anwendungsbedingungen für In-situ-Reinigungsverfahren genannt werden:

- Verunreinigungen bis in größere Tiefen vorhanden
- Verunreinigung nur in größerer Tiefe - bei sauberen oder nicht zu durchdringenden Überlagerungsschichten - vorhanden
- Einsätze unmittelbar neben oder unter Bebauung, Verkehrswegen oder Gewässern erforderlich

Die In-situ-Waschverfahren sind mit einer Veränderung der Bodenstruktur und i. d. R. einer Ausspülung eines hochkontaminierten Bodenfeinstkornanteils verbunden. Dabei können Ausspülungen, Sackungen und Setzungen entstehen, die durch geeignete bautechnische Gegenmaßnahmen vermieden werden müssen.

Die In-situ-Verfahren unterscheiden sich von den On-site-Verfahren ferner durch folgende Merkmale:

- Verhältnismäßig lange Behandlungsdauer
- geringe Umfeldstörung

- eingeschränkte Vorhersagbarkeit und Überprüfbarkeit des Reinigungserfolges bzw. der erforderlichen Behandlungsdauer

In den letzten Jahren sind einige In-situ-Techniken entwickelt worden, zwei von ihnen sollen im folgenden beschrieben werden.

4.4.1 Das Spülverfahren System Holzmann

Der grundlegende Ansatz der von der Philipp Holzmann AG Düsseldorf entwickelten In-situ-Bodenwäsche basiert auf der aus dem Spezialtiefbau bekannten Hochdruckinjektion (HDI) (Abb. 4.4-1).

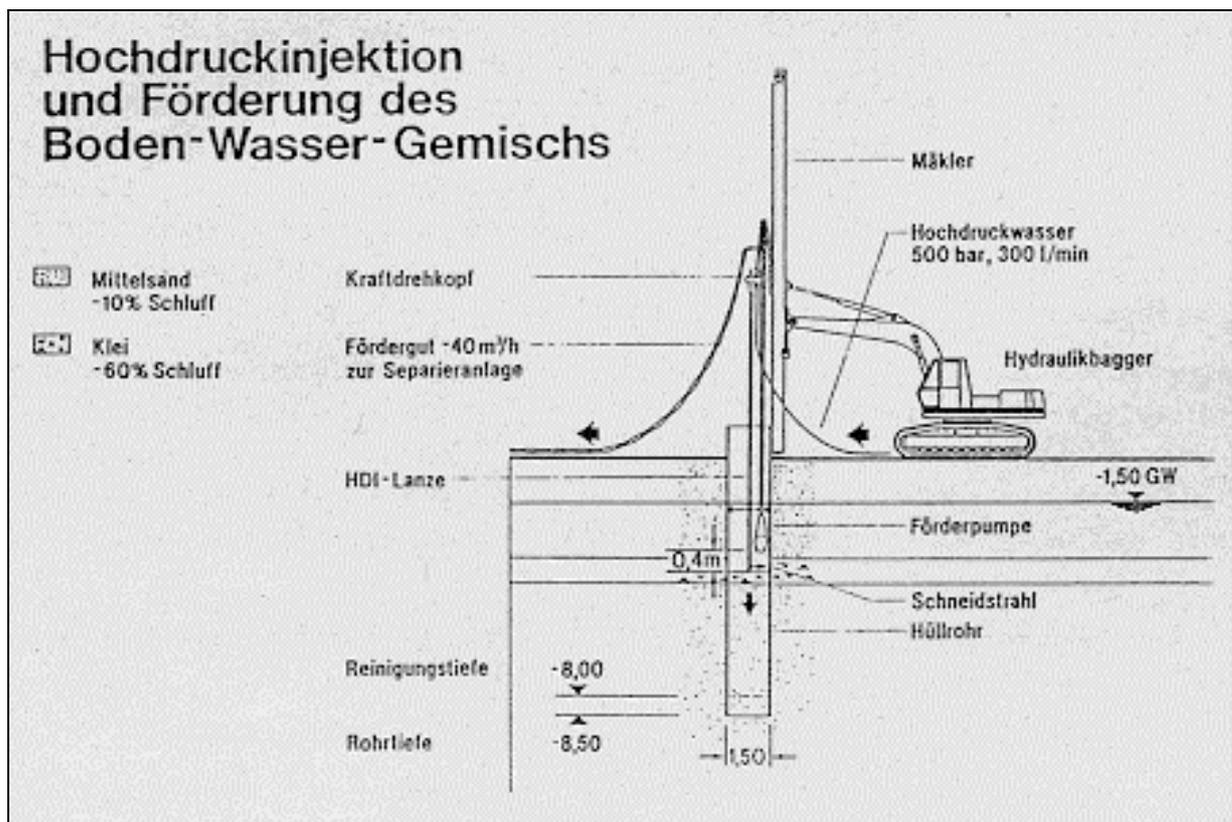


Abb. 4.4-1 Hochdruckinjektion

4.4.1.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Für die Behandlung mit Hilfe einer Hochdruckwäsche wird der zu reinigende Boden schrittweise in einzelne vertikale Bohrungen unterteilt. Der Reinigungsvorgang wird Bohrung für Bohrung durchgeführt, wobei die Herstellung einer ausgedehnten und tiefen Baugrube mit einer entsprechenden Baugrubenumschließung vermieden wird. Eine Grundwasserabsenkung ist nicht erforderlich. Die Bohrungen überlappen sich im gewählten Raster so, daß das gesamte kontaminierte Bodenvolumen erfaßt wird.

Ein Hüllrohr ummantelt i. d. R. den jeweiligen Behandlungsbereich.

Die Reinigung ist als ein mehrstufiger Prozeß zu verstehen, der aus folgenden Schritten besteht:

- Herstellung einer Suspension und Abtrennung der Kontamination von den Bodenpartikeln durch In-situ-Wäsche des Bodens
- Förderung des Boden-Wasser-Schadstoff-Gemisches aus dem Bohrloch
- Trennung in gereinigten Sand und belasteten Schluff
- Prozeßwasserreinigung
- Rückführung des gereinigten Bodens
- Mikrobiologische Schlammbehandlung

Absenken der Hüllrohre

Hüllrohre werden i. d. R. bei der In-situ-Bodenwäsche benutzt, um ein klar definiertes Reaktionsvolumen für die Hochdruckreinigung zu schaffen, wobei der Austausch von Verunreinigungen zwischen benachbarten sauberen und kontaminierten Bereichen vermieden wird. Der Grundwasserspiegel wird konstant gehalten.

Ein an einem W 180 Seilbagger hängender Rüttler oder ein Verrohungsgerät bringt die runden Stahlrohre (Durchmesser 1,50 m) in den Boden ein. Es verbleibt ein Fußpfropfen von 50 cm als zusätzliche Sicherheit gegen unerwünschten Schadstoffaustausch. Das Absenkverfahren wird auf den Baugrund abgestimmt.

Hochdruckreinigung und Förderung des kontaminierten Boden-Wasser-Gemisches

Ein beim Absenken rotierender Hochdruckwasserstrahl löst den Bodenverbund auf, trennt die den Bodenkörnern anhaftenden Schadstoffe ab und führt soviel Wasser zu, daß die entstehende Suspension aus Boden, Wasser und Verunreinigungen mit einer Baggerpumpe zur Separierungsanlage gepumpt werden kann. Ein Hydraulikbagger hält einen neigbaren Mäkler, der den Kraftdrehkopf mit HDI-Einfachgestänge führt. Während die HDI-Lanze mit einer Geschwindigkeit von etwa 8 cm/min abgesenkt wird, schneidet der rotierende Wasserstrahl den Boden bei einem Druck von bis zu 500 bar und injiziert 300 l Wasser pro Minute in den Boden.

Sowohl die Absenkgeschwindigkeit als auch der Injektionsdruck haben sich als wesentliche Steuergrößen für den Reinigungserfolg der In-situ-Wäsche erwiesen.

Beim Abpumpen des aufgeschlammten Gemisches aus dem Bohrloch wird der Wasserspiegel im Rohr durch eine Regelvorrichtung auf dem Niveau des Grundwasserspiegels gehalten. Damit wird verhindert, daß bei zu hohem Wasserstand kontaminiertes Wasser in bereits gereinigte Nachbarbereiche ausgetragen wird und bei zu niedrigem Wasserstand ein hydraulischer Grundbruch an der Bohrlochsohle stattfindet. Die Steuerung erfolgt über die Regulierung der Zusatzwassermenge.

Separierungsanlage

In der Separieranlage wird die abgepumpte Bodenfraktion vom Schmutzwasser getrennt. Dafür sind mehrere Trennelemente vorgesehen. Zuerst wird das Fördergemisch auf ein Grobsieb gepumpt, auf dem Korngrößen > 3 mm abgetrennt werden. Es handelt sich hauptsächlich um organische Bestandteile und um Kies.

Der Siebdurchgang wird in zwei parallel geschaltete Hydrozyklone gepumpt, die einen Trennschnitt von ungefähr 0,060 mm haben. Der Überlauf des Hydrozyklons gelangt zur Wasseraufbereitungsanlage.

Aus dem Unterlauf der Hydrozyklone erfolgt der Materialaustrag der Korngrößen zwischen 0,060 mm und 3 mm in einen Aufstromklassierer mit einem Trennschnitt zwischen 0,10 und 0,12 mm. Gereinigte Kornfraktionen zwischen 0,1 und 3,0 mm, die den Aufstromklassierer passieren, werden entwässert und mit einem Förderband ausgetragen.

Dieser Boden steht für eine Wiederverfüllung der offenen Bohrungen zur Verfügung, sobald die Beprobung stattgefunden hat und der Reinigungserfolg durch chemische Analysen nachgewiesen worden ist.

Bevor der gereinigte Sand (0,1 bis 3 mm) in die offene Bohrung rückgefüllt werden kann, wird das verunreinigte Wasser innerhalb des Bohrrohres gegen sauberes Wasser ausgetauscht.

Der abgeführte Schlammanteil wird durch zugeliefertes Bodenmaterial ausgeglichen, das eine dem Originalboden ähnliche Durchlässigkeit besitzt. Unter Einsatz des Rüttlers werden die Bohrrohre wieder gezogen. Dabei wird dem Boden genügend Energie für eine ausreichende Verdichtung des wiederverfüllten Sandes zugeführt.

Wasserreinigungsanlage

Die schadstoffbelasteten Prozeßwasserströme werden in der Prozeßwasserreinigungsanlage zunächst ausgeflockt und sedimentiert.

In der nächsten Stufe werden demulgierte Öle aus dem inzwischen weitgehend feststofffreien Wasser mit Hilfe eines Ölabscheiders abgetrennt. Es gelangt dann in einen Aktivkohlefilter, wo polare Bestandteile und die verbleibenden Schwebstoffe adsorbiert werden. Als letzte Behandlungsphase kann eine Cyanidfällung angeschlossen werden.

Das Wasser, das die Prozeßwasserreinigungsanlage verläßt, wird in einen Speicherbehälter eingespeist. Mit Pumpen wird die Wiederverwendung gesteuert. Überschüssiges Wasser kann, sofern es unbelastet ist, über Schluckbrunnen dem Boden wieder zugeführt werden.

Schlammbehandlung

Der Schlamm, der die Schadstoffe in konzentrierter Form enthält, wird über einen Dekanter oder eine Siebbandpresse auf 40 bis 50 % TS entwässert. Gemeinsam mit kontaminierten Nebenprodukten der Separierung kann er off site mikrobiologisch im Mietenverfahren behandelt werden. Dazu werden speziell adaptierte Mikroorganismen und eine Substratmischung zugeführt, um den Schadstoffabbau zu optimieren.

4.4.1.2 Ergebnisse und Bewertung

Ehemaliges Gaswerk in Bremen-Woltmershausen

Am Standort des früheren Gaswerkes Bremen-Woltmershausen wurden unterhalb eines alten Teerbeckens ungefähr 15 000 m³ eines Mittelsandes und einer Kleischicht detektiert, die mit PAK und Cyaniden belastet waren. Analysen der Boden-Öl-Mischung zeigten bis zu 20 000 mg PAK/kg und bis zu 600 mg Cyanide/kg TS.

Die höchste PAK-Konzentration wurde oberhalb der Kleischicht im Wasserwechselbereich des Grundwasserspiegels angetroffen. Die geringste Verunreinigung trat innerhalb der Kleischicht auf. Der Sand unterhalb der Kleischicht zeigte überraschenderweise ebenfalls hohe PAK-Verunreinigungsgrade, zum Teil bis in etwa 10 m Tiefe. Die Konzentration der Cyanide war weniger gleichmäßig verteilt. Eine seitliche Verfrachtung der Schadstoffe hatte wegen nur geringer Grundwasserbewegung praktisch nicht stattgefunden.

Die Reinigungsergebnisse des im Mai 1989 begonnenen Sanierungsauftrages mit Ausgangswerten von 3000 bis 4000 mg PAK/kg TS lagen innerhalb des garantierten Reinigungszieles von 10 bis 30 mg PAK/kg TS des Bodens. Als Durchschnittswert für den ersten Abschnitt des Reinigungsauftrages wurden nach der Reinigung 6 bis 7 mg/kg TS gemessen.

Auch für die besonders stark verunreinigten Bodenbereiche mit bis zu 20 000 mg PAK/kg TS wurde das Reinigungsziel erreicht. Die Messungen wurden am frisch ausgetragenen Material an der Separieranlage durchgeführt. Die Abreinigung der Cyanide gelang auf 3 mg/kg TS.

Mit dem beschriebenen Bodenreinigungsprozeß konnte die Deponierung von Abfallstoffen vermieden werden. Die in Bremen eingesetzte Anlage ist auf eine Reinigung von etwa 6 m³ Boden je Stunde ausgelegt. Zur Extraktion und Reinigung von einer Tonne Boden müssen etwa 3,2 m³ Prozeßwasser zugeführt werden. Dieses Prozeßwasser ist im wesentlichen teilgereinigtes Wasser, das in einem Kreislauf geführt wird.

4.4.2 Das Soilcrete Verfahren System Keller

Die Keller Grundbau GmbH, mit Hauptsitz in Offenbach, ist ein Unternehmen des Spezialtiefbaus.

Mit dem Soilcrete-Verfahren aus dem herkömmlichen Tiefbau verfügt die Keller Grundbau GmbH über eine Methode zur Bodenverfestigung und Immobilisierung bestimmter Schadstoffe.

Hierbei wird mit einem rotierenden Erosionsstrahl (Hochgeschwindigkeitsstrahl) Boden bis in Tiefen von 35 m erreicht und mit einer Bindemittel-Bentonit-Suspension intensiv vermischt und verfestigt.

Aus diesem Verfahren der Bodenverfestigung heraus wurde das von Keller angebotene In-situ-Bodenwaschverfahren entwickelt.

Ausgangspunkt des Bodenwaschverfahrens ist das Düsenstrahl-Erosionsverfahren. Mit einem Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl wird der Boden in den kontaminierten Bereichen gewa-

schen, ohne daß Aushubarbeiten notwendig werden. Damit eignet sich das Verfahren auch für die Bodensanierung unter überbauten Flächen.

Der Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl trennt die an den gröberen Bodenbestandteilen anhaftenden Schadstoffe, die zusammen mit Feinfraktionen des kontaminierten Bodens als Suspension im geschlossenen System an die Oberfläche geführt werden.

Das Waschwasser und der geförderte kontaminierte Schlamm können hier je nach Art der Schadstoffe verschiedenen Reinigungsverfahren (chemisch-physikalisch, biologisch) unterzogen werden.

Das gereinigte Waschwasser kann nach der Schlammentwässerung erneut zum Bodenwaschen im Kreislauf gefahren werden. Die gereinigten Bodenbestandteile werden sukzessive und parallel zur Bodenwäsche wieder in die Erosionsräume im Untergrund verfüllt.

Dort, wo aus geologischen Gründen, z. B. bei zu hohem Schluffanteil des Bodens, das In-situ-Bodenwaschverfahren nicht den gewünschten Reinigungserfolg bringt, kann mit dem Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl der kontaminierte Boden ebenfalls entnommen werden, um ihn gegen sauberen Boden auszutauschen.

4.4.2.1 Allgemeine Verfahrenstechnik

Im ersten Arbeitsgang wird der zu sanierende Untergrund mit einer Flächenversiegelung gedichtet, so daß während der folgenden Arbeiten Ausgasungen unterbunden sind. An vorgesehenen Durchdringungen wird dann eine Abdichtungsvorrichtung aufgesetzt, durch die ein Bohrgestänge geführt wird. Die Abdichtungsvorrichtung soll am Austritt den Kontakt von Rückflußmaterial und gasförmigen Materialien mit der Umgebung verhindern (Arbeits- und Emissionsschutz).

Wahlweise kann der zu behandelnde Bodenkörper auch vor Versiegelung in einzelne, voneinander getrennte Behandlungszellen (ca. 1,6 x 1,5 m) unterteilt werden, z. B. durch Einbringen von Spundwandkästen, so daß einzelne, voneinander getrennte Behandlungskammern geschaffen werden.

Nach Einführung des Bohrgestänges und Niederbringen der Bohrung durch die Abdichtungsvorrichtung bis zur gewünschten Endteufe wird über einen ersten Kanal im Bohrgestänge Wasser unter einem Druck zwischen 300 und 600 bar durch eine Düse mit einem definierten Querschnitt gepreßt.

Durch den regelbaren Druck und den definierten Düsenquerschnitt ergeben sich Austrittsgeschwindigkeiten des Wasserstrahles von 140 bis 200 m/sec, je nach Düsenform und -querschnitt des Monitors.

Über einen weiteren Gestängekanal kann z. B. zusätzliches Wasser zur Erhöhung des Wascherfolges zugesetzt werden. Der energiereiche Schneidstrahl führt innerhalb einer definierten Reichweite von der Austrittsöffnung zu einer Auflösung des Gefüges des anstehenden Bodens. Der Boden wird erodiert und mit Wasser intensiv gewaschen und vermischt.

Während und nach dem Erosionsvorgang ist die Stabilität der Säulenwandungen durch den vorhandenen Suspensionsüberdruck in der Säule gewährleistet. Bei Arbeiten in vorher eingeschlossenen Bodenkörpern (z. B. Spundwandkasten) gewährleistet die Umschließung zusätzliche Stabilität.

Der austretende Rückfluß während des Erosions- und Waschvorganges - eine Mischung aus Schneidwasser, kontaminiertem Boden sowie kontaminiertem Wasser und Luft - wird im an die Abdichtungsvorrichtung angeschlossenen System aufgefangen.

Es ist möglich, nach dem Waschvorgang eine im Säulenraum noch vorhandene Restkontamination im Gemisch aus Waschwasser und angetroffenem Boden durch Zugabe eines hydraulischen, auf die Art der Kontamination abgestimmten Bindemittels durch Verfestigung zu immobilisieren. Wird ein kompletter Austausch des kontaminierten Bodens angestrebt, kann wie folgt verfahren werden:

Eine Mischung aus gereinigtem Bodenmaterial (nach der On-site-Dekontamination), Füller (z. B. Tonmehl), hydraulischen Bindemitteln und gereinigtem Filtratwasser wird im Kontraktorverfahren in die vorher behandelte Säule eingebracht (Back-fill-Verfahren).

Das rückgeführte Material erhält dabei eine Eigenfestigkeit und eine Dichtigkeit, die verhindern, daß bei Arbeiten unmittelbar neben diesen behandelten Bereichen Kontaminationen in schon gereinigte Bereiche eindringen und den Sanierungserfolg beeinträchtigen können.

Durch diesen Verfüllvorgang wird das nach dem Waschvorgang noch in der vorher behandelten Säule befindliche Gemisch aus noch kontaminiertem Boden und Wasser aus der Säule von unten nach oben aufsteigend verdrängt und durch das Gemisch der Füllung, das gereinigten Boden enthält, ersetzt.

Diese Behandlungstechnik kann sowohl außerhalb als auch innerhalb von Gebäuden zur Sanierung von Bodenkörpern angewendet werden. Wird außerhalb von Gebäuden der zu behandelnde Bodenkörper in einzelne Behandlungszellen unterteilt, kann bei der Rückführung des gereinigten Materials ggf. auf die Zugabe von Bindemittel verzichtet werden.

Optionell kann mit dem nach diesem Verfahren gewonnenen Material eine weitere Behandlung direkt vor Ort erfolgen. Die On-site-Behandlung des gewaschenen Bodens im gekapselten System muß der jeweiligen Kontamination angepaßt und auf diese im Verfahrensablauf abgestimmt werden.

4.4.2.2 Ergebnisse und Bewertung

Nach der Dekontamination kann das gereinigte Bodenmaterial i. d. R. wieder als Zuschlag zum Verfüllmaterial in die Säule zurückgeführt werden.

Das Sanierungsverfahren wurde erstmals 1988 im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg auf einem Gelände in Hamburg erprobt.

Auf diesem Gelände wurden Anfang der 60er Jahre Desinfektionsmittel produziert. Als Hauptschadstoffkomponenten wurden die drei Kresolisomere und Phenol festgestellt. Das Zentrum der Verunreinigung lag unter einem ehemaligen Produktionsgebäude. Die Hauptbe-

lastung (bis 64 000 mg/kg) wurde in einer Tiefe von 2,0 bis 3,5 m unter Gelände ermittelt, wobei mit zunehmender Tiefe eine zunehmend flächige Ausdehnung erkundet wurde.

Die Dekontamination der Phenolverunreinigung erfolgte durch Oxidation des Phenols (naß-chemische Oxidation).

Das im Säulenvolumen verbleibende noch verunreinigte Material mußte bei dieser Sanierung in einem weiteren Arbeitsgang gegen nicht verunreinigtes Material ausgetauscht werden. Geplant war dabei der Wiedereinbau des grobkörnigen gereinigten Materials unter Zugabe von weiteren Zuschlagsstoffen.

Da nach der Dekontamination des Materials das grobkörnige, hauptsächlich organische Material aus den Torf- und Muddehorizonten noch zu hohe Restkonzentrationen an Phenol enthielt, mußte auf die Wiederverwendung verzichtet werden. Es wurde daher ein Füllstoff aus Fremdmaterial eingebracht und gegen das kontaminierte Gemisch ausgetauscht.

Die Ergebnisse der Dekontamination führten zu einem im Mittel 98 %igen Abbau der Phenolverunreinigung.

4.4.3 Weitere Verfahren

Die Anlagensysteme der Firmen Holzmann und Keller stellen für In-situ-Bodenwaschverfahren den Stand der Technik dar. Es ist anzunehmen, daß diese sich stark ähnelnden Verfahren auch von anderen Anbietern womöglich in modifizierter Form eingesetzt werden. Verfahrensalternativen sind im Zusammenhang mit einer Grundwasserreinigung und/oder einer Bodenluftreinigung bekannt, hier jedoch nicht Gegenstand der Betrachtung.

4.5 Zusammenfassende Bewertung der Bodenwaschverfahren

Mit Hilfe von Bodenwaschanlagen wurden bisher weit über 500 000 t unterschiedlich kontaminierter Böden gereinigt. Somit kann von einem Durchbruch der Bodenwaschverfahren bei der Behandlung schadstoffbelasteter Boden- und Bauschuttmaterialien ausgegangen werden. Eine vergleichende Bewertung der im einzelnen vorgestellten Verfahren und Anlagen erweist sich jedoch als schwierig, da man im Grunde genommen die "Reinigungseffizienz" der einzelnen Bodenwaschverfahren als Vergleichsmaßstab heranziehen müßte. Unter Reinigungseffizienz soll hier zum einen der technische Wirkungsgrad, gemessen am prozentualen Reinigungserfolg der Gesamtschadstoffbelastung zwischen Input und Output verstanden werden, zum anderen die dabei entstandenen Kosten und schließlich die Umweltverträglichkeit der Maßnahme. Allein die erzielten Reinigungsergebnisse vergleichend zu beurteilen erscheint jedoch wenig sinnvoll, da sowohl die Bodenbeschaffenheit als auch die Schadstoffart und -konzentration im Ausgangsmaterial sowie die vereinbarten Sanierungsziele von Fall zu Fall stark voneinander abweichend sind und noch keine Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten vorliegen. Für die nahe Zukunft werden Ergebnisse aus dem Sanierungsfall "Burbacher Hütte" erwartet, bei dem mehrere Bodenwaschverfahren durch Beaufschlagung eines standardisierten Bodens in ihrer Reinigungseffizienz gemessen werden sollen. Die Ergebnisse dieses For-

schungsvorhabens werden vermutlich einen erheblichen Einfluß auf die Weiterentwicklung der Bodenwaschverfahren haben.

Erschwerend zur Beurteilung von Bodenwaschverfahren kommt hinzu, daß das Fehlen eines gesicherten Erfahrungspotentials über einen längeren Zeitraum hinweg (Bodenwaschen wird erst seit ca. 1985 durchgeführt) derzeit keine allgemein gültige Beurteilung ermöglicht.

Somit muß nach wie vor jeder Altlastensanierungsfall gesondert betrachtet und beurteilt werden. Dies gilt insbesondere für die geeigneten Sanierungstechnologien. Allenfalls beim Auftreten von deutlich branchentypischen Kontaminationen in häufig vorkommenden Bodentypen kann man sich an vorliegenden Erfahrungen orientieren.

Dies gilt nicht für die Reinigungspreise, die eindeutig marktorientiert sind. Da derzeit die Nachfrage nach Bodenreinigung das Angebot an verfügbaren Anlagen deutlich überschreitet, können die Anbieter "gute Preise" erzielen. Sofern regional freie Kapazitäten vorliegen, oder die zu reinigende Bodenmenge sehr groß ist, lassen sich für den Nachfrager allerdings auch Preise realisieren, die die untere Grenze der angegebenen Preisspanne repräsentieren. Auch neue Anbieter bieten oft sehr günstige "Einstiegspreise" an, wobei das Risiko für den Nachfrager durch mangelnde Betriebserfahrung des Anbieters recht groß wird. Letztlich wird der Preis allerdings auch sehr stark durch die Entsorgungskosten für die anfallenden Reststoffe (Überkorn, Leichtgut, Flotatschlamm, Sedimentfilterkuchen u. a.) bestimmt. Diese sind als Sonderabfall zu entsorgen und gelangen daher zur Zeit noch - aufgrund mangelnder Verfahrensalternativen - auf teure Sonderabfalldeponien oder in Untertagedeponien.

Eine vergleichende Betrachtung der Umweltverträglichkeit der bekannten Verfahren kann dagegen sehr sinnvoll sein, wenn man sich der technischen und technologischen Verfahrensgrenzen von mobilen, semimobilen und stationären Anlagen bewußt ist. Allen Bodenwaschverfahren ist der Nachteil eines relativ hohen und teuer zu entsorgenden Reststoffanteils gemeinsam.

Tabelle 4.5-1 Übersicht über die Bandbreite von Behandlungskosten

Verfahrenstechnik	Behandlungskosten ¹⁾ (DM/t)
Thermische Verfahren	400 bis 3000
Bodenwaschverfahren	200 bis 800
Biologische Verfahren	150 bis 300

- 1 Aktuelle Behandlungskosten einschließlich Analytik, Transport, Behandlungstest, Sortierung; ausschließlich Reststoffentsorgung
Die Behandlungskosten wurden Anfang 1992 ermittelt. Die Angaben stammen von den Anbietern selbst oder wurden anlässlich von Ausschreibungen ermittelt. Die untere Grenze gilt für leicht zu reinigende Böden bezüglich der Kornzusammensetzung und der Schadstoffbelastung, die obere Grenze für gerade noch mit dem Verfahren beherrschbare Abreinigungen schwer zu reinigender Böden in Bezug auf Bodenart und Schadstoffbelastung. Preisbeeinflussend sind weiterhin die Menge des zu reinigenden Materials und die aktuelle Marktsituation (siehe oben). Für die Entsorgung der Reststoffe und deren Transport entstehen weitere Kosten, die sich i. d. R. an den Kosten für die Deponierung von Sonderabfällen auf entsprechend zugelassenen Deponien orientieren.

Vorteile erzielen hier Verfahren, die besonders sauber diese Reststoffe abtrennen und die noch im Schluffbereich gute Waschergebnisse erzielen. Eine weitere Vergleichsmöglichkeit stellt die Überprüfung der Wirksamkeit von Abluft- und Abwasserreinigungsanlagen dar. Diese gehören in planfestgestellten stationären Bodenbehandlungszentren bereits zum Stand der Technik, sind in aller Regel jedoch bei mobilen Anlagen noch nicht oder nur zu Teilen realisiert. Größere semimobile Anlagen, wie zum Beispiel die der Firmen Klöckner Oecotec und Harbauer enthalten ebenfalls integrierte Abluft- und Abwasserreinigungsanlagen.

Häufig werden "abwasserlose Bodenwaschverfahren" angeboten. Dies ist, wie man leicht anhand einer Wasserbilanz feststellen kann, nicht korrekt, da dem in sich geschlossenen Prozeßwasserkreislauf über die Ausschleusung der Reststoffe und des gereinigten Bodens ständig Wasser entzogen wird. Darüber hinaus entstehen in jedem Waschprozeß bestimmbare und unbestimmbare Wasserverluste, die ebenfalls ergänzt werden müssen. Ein 100 %ig geschlossener Prozeßwasserkreislauf würde zudem zu einer Aufsalzung des Prozeßwassers führen und letztlich zu negativen Waschergebnissen führen. Insoweit sollte das Wort "abwasserloses Verfahren" durch den Hinweis auf einen geschlossenen Prozeßwasserkreislauf ersetzt werden.

Auch die Wiederverwertbarkeit des gereinigten Materials kann zum Verfahrensvergleich herangezogen werden. Hierbei sind jedoch unterschiedlich definierte Sanierungsziele zu beachten. Während der Wiedereinbau eines gewaschenen Bodenmaterials an einem weiterhin auch industriell genutzten Standort mit günstigen hydrogeologischen Eigenschaften möglich sein kann, kann dies an anderen Standorten mit sensibler Nutzung trotz Erreichen gleicher Reinigungsleistungen ausgeschlossen sein.

Bodenwaschverfahren, die mit hohem Energieeintrag und/oder dem Einsatz von Tensiden arbeiten, wird häufig vorgeworfen, daß sie die natürliche Bodenfauna zerstören. Diese Argumentation ist beim Vergleich von Bodenwaschverfahren mit anderen Bodenreinigungsverfahren nicht zulässig, da grundsätzlich Boden im ökologischen Sinn, auch wenn er anthropogen belastet ist, ein einmaliges Biotop an einem bestimmten Standort darstellt. Bereits durch das Ausheben dieses Bodens ist das Biotop an dieser Stelle in der bestehenden Form endgültig zerstört. Ziel der Bodenwaschverfahren ist es daher auch nicht, einen natürlichen Boden zurückzugewinnen, sondern die gleichwertige Nutzung eines Standortes durch Bodenaustausch zu gewährleisten. Das gereinigte Bodenmaterial stellt mehr einen Baustoff als einen Kulturboden dar und kann allenfalls an seiner Fähigkeit zu schnellerer oder langsamerer Rekultivierung gemessen werden.

Zum allgemeinen Stand der Technik bei mobilen und semimobilen Bodenwaschverfahren gehört eine platzsparende Bauweise, wofür entweder Normcontainer oder Rahmenkonstruktionen aus Stahlträgern dienen.

Die meisten Firmen haben ihre Anlagen in Container-Bauweise und damit transportabel konzipiert, wobei der Trend immer mehr zu semimobilen Anlagen hinführt, da eine ordnungsgemäße Bodenwäsche sowohl eine ausreichend variabel zu gestaltende Technik aufweisen muß als auch mit Abwasser- und Abluftreinigung ausgestattet sein sollte.

Für die Bodenwaschverfahren spricht u. a. ihre Vielseitigkeit; sie können bei entsprechender Eignung vorzugsweise in mobiler und semimobiler Ausführung für den Einsatz vor Ort sowie in stationärer Ausführung in Sanierungszentren ihren Einsatz finden.

Ein Vorteil der Bodenwäsche gegenüber anderen Verfahren liegt neben der relativ kurzfristigen Problemlösung und der relativ kostengünstigen Behandlung in der Möglichkeit, Schwermetalle aus den Böden zu waschen. Allerdings müssen bei der Reinigung schwermetallhaltiger Böden bei einigen Sanierungskonzepten/-anlagen deutliche Abstriche gemacht werden. Zum Teil findet nur eine geringe oder nicht befriedigende Dekontamination statt.

Nach wie vor die wirkungsvollste Methode, um schwermetallbelastete Böden zu dekontaminieren, ist die Extraktionsbehandlung mit Säuren, der über eine pH-Wert-Änderung die Ausfällung als Hydroxid im Basischen folgt.

Die besten Reinigungsergebnisse wurden bei allen bisherigen Sanierungen mittels Bodenwäsche bei sandigen und kiesigen Böden erreicht. Der erforderliche verfahrenstechnische Aufwand zur Erzielung einer befriedigenden Reinigungsleistung für stark schluffhaltige Böden dagegen ist hoch und erhöht sich bei tonigen oder lehmigen Böden noch weiter.

Durch ein geschlossenes Anlagensystem ist i. d. R. sichergestellt, daß keine Verlagerung der Schadstoffe aus dem Wasser in die Luft erfolgen kann. Anlagenmodule wie Abscheider, Flotationsbecken, Ausblaskolonnen und Anlagen des Bodenwaschprozesses sollten mit Abzugshauben versehen sein und einer zentralen Luftreinigung zugeführt werden. Die Reinigungsleistung der Abluftanlage muß den Grenzwerten der TA-Luft entsprechen.

Die meisten zur Zeit auf dem Markt verfügbaren Bodenwaschanlagen haben noch keine Abluftreinigungsanlage!

Wie bereits erwähnt, wird der Einsatz von Bodenwaschverfahren bei kontaminierten Böden mit hohen Feinkornanteilen problematisch. Hier können neben der Selektion über eine mechanische Bodenvorbereitung durch Feinfiltration Tonpartikel vor der Regenerierung des Extraktionsmittels (Wasser) entfernt werden. Sind diese Feinstteilchen noch stark kontaminiert, so ist zu prüfen, ob sie weiter behandelt werden können (ggf. weitere, separate Extraktion oder eine weitere Dekontaminierungsart, z. B. thermische Behandlung) oder ob sie deponiert werden müssen.

Allerdings zeigen Erfahrungen bei Sanierungen ehemaliger Standorte der Montanindustrie, daß eine Abtrennung des Feinstkornanteils nicht in jedem Falle zum erwarteten Erfolg führt, denn gerade bei alten Industriestandorten sind die Kontaminationen häufig an poröse Stoffe wie Schlacken, Holz, Kohle, Koks oder Mauerwerk gebunden.

Bei der Vorstellung der einzelnen Bodenwaschverfahren ist deutlich geworden, daß ein wesentlicher Anteil der ablaufenden Prozesse auf die Prozeßwasseraufbereitung entfällt, somit entscheidet bereits die Verfahrensauswahl über den Anfall der zu entsorgenden Schlämme sowie der flüssigen als auch der festen Phase (Kap. 3.4.1).

Für die Aufbereitung des Prozeßwassers kommen folgende Verfahren in Frage:

- Fällung, Flockung
- Abtrennen der Schadstoffe (Filtration, Flotation u. a.)
- Adsorption an Aktivkohlefilter
- Ionenaustausch
- Chemische Umwandlung (Oxidation, Reduktion, Komplexierung, Extraktion u. a.)

4.5.1 On-site-Verfahren

On-site-Bodenwaschverfahren stellen zur Zeit die einfachste und billigste Methode der Altlastensanierung vor Ort dar. In ein bis maximal drei Tagen kann die Anlage ihren Betrieb aufnehmen und läßt sich daher fast beliebig häufig umsetzen. Die Anlagen sind heute weitgehend standardisiert und haben einen geringen Platzbedarf. Bei Durchsatzleistungen bis zu 10 t/h eignen sich diese Anlagen vor allem für Sanierungsfälle, bei denen nicht mehr als ca. 5 000 t Boden oder Bauschutt zu reinigen sind. Abluftreinigung und Abwasserreinigung gehören bei diesen Anlagen noch nicht zum Stand der Technik, jedoch dürften hier entsprechende Entwicklungen bald folgen (vgl. Kap. 5.2).

Anfallendes belastetes Waschwasser wird entweder gestapelt und z. B. innerhalb der Nachtschicht soweit teilgereinigt, daß es in den Schmutzwasserkanal abgeleitet werden kann, oder es erfolgt im laufenden Betrieb eine Teilreinigung des Prozeßwassers mit dem Ziel einer weitgehenden Kreislaufführung.

Aufgrund des Verzichts auf aufwendige Sortier- und Klassiertechniken sind mobile Bodenwaschanlagen insbesondere für den Einsatz auf sandigen und kiesigen Böden mit geringen Feinkornanteilen geeignet. Die Schadstoffpalette sollte keine leichtflüchtigen oder aromatischen Kohlenwasserstoffe sowie Schwermetalle enthalten. An die Wiederverwertung des gereinigten Bodens sollten keine zu hohen Anforderungen gestellt werden.

Für die Reinigung größerer Mengen kontaminierter Böden oder Bauschutt komplexerer Zusammensetzung und einer breiten Schadstoffpalette eignen sich die semimobilen Anlagen besonders gut, da sie i. d. R. über eine komplette Technik verfügen, die auch eine integrierte Prozeß- und Abwasserreinigung sowie eine Abluftbehandlung enthält. Die semimobilen Anlagen sind durch ihre Einhausung auch für Winterbetrieb geeignet, benötigen aber deutlich mehr Platz, mehr Personal und Betriebsstoffe und stellen hohe Anforderungen an die Ver- und Entsorgung der verschiedenen Materialströme. Die größeren, komplett ausgerüsteten semimobilen Anlagen (Klöckner Oecotec, Harbauer) lassen sich erst ab ca. 10 000 t pro Einsatzfall rentabel betreiben, wohingegen die mittleren (z. B. ContraCon, AB und Preussag) ab ca. 5 000 t rentabel arbeiten können.

4.5.2 Off-site-Verfahren

Stationäre Bodenwaschanlagen im Off-site-Betrieb gibt es zur Zeit in Moerdijk/Niederlande (Fa. Heijmans), in Hamburg (Fa. Nordac) und in Lägerdorf (Fa. AB). Stationäre Bodenwaschanlagen haben vor allem den Vorteil, daß ihre technische Ausstattung dem Stand der Technik bei Bodenwaschverfahren schlechthin entspricht. Das heißt, sie sind nicht nur mit Abluft- und Abwasserreinigung ausgestattet, sondern verfügen auch über gegen den Untergrund abgesicherte und genehmigte Zwischenlager, Hallen und über eine aufwendige Technik, die alle erforderlichen Grundoperationen der Verfahrenstechnik enthält. Damit ist es möglich, sowohl unterschiedliche Bodentypen als auch stark schwankende und stark toxische Schadstoffbelastungen (z. B. Dioxine) in Grenzen abzureinigen zu können.

Bei Vorliegen günstiger Infrastrukturen (Autobahn, Gleis- und Wasserstraßenanschluß) können stationäre Bodenwaschanlagen auch preislich mit semimobilen Anlagen konkurrieren. Ihr Vorteil liegt außerdem in der Möglichkeit, auch kleinste hochbelastete Chargen aufnehmen zu

können. Der Nachteil der stationären Bodenwaschanlagen liegt vor allem in ihrer Entfernung zum Sanierungsort sowie in der Verpflichtung, jede behandelte Charge Material zu vermarkten bzw. entsprechende Entsorgungsmöglichkeiten zu finden.

4.5.3 In-situ-Verfahren

In-situ-Waschverfahren stellen eine interessante Variante zu den mobilen oder semimobilen Bodenwaschverfahren dar, da sie auch für einige Anwendungsfälle geeignet sind, wo normale Bodenaushubmethoden versagen (unter Gebäuden oder versiegelten Flächen). Entsprechend ist ihr Einsatz dort angezeigt, wo neben günstigen Standortbedingungen, wie z. B. gut durchlässiger homogener Boden, Platz- und bautechnische Probleme einen verfahrenstechnischen Vorteil bringen. Die Verfahren sollten jedoch mehr unter dem Gesichtspunkt des Spezialtiefbaus als der Bodenreinigung betrachtet werden.

4.6 Leistungsdaten der in Betrieb befindlichen Bodenwaschanlagen

Im folgenden sind die wichtigsten Leistungsdaten der in diesem Handbuch beschriebenen Verfahren aufgeführt. Die Tabelle beruht auf der persönlichen Besichtigung der Anlagen durch die Autoren und auf Angaben der Betreiber.

Nachfolgend findet sich eine Marktübersicht der in Betrieb befindlichen Bodenwaschanlagen mit Angaben über:

- den Anbieter
- das der Anlage zugrundeliegende Verfahren
- den Durchsatz in t/h
- die Verfügbarkeit
- die Reinigungsleistung/Kontamination
- zu reinigende Bodenarten
- evtl. integrierte Abwasser- bzw. Abluftreinigung
- den spezifischen Wasserverbrauch
- die spezifischen Reinigungskosten
- den elektrischen Anschlußwert der Anlage

Marktübersicht: Bodenwaschanlagen, Anbieter, Leistungsdaten

Anbieter	Verfahren	Durchsatz (t/h)	Verfügbarkeit
ContraCon Umwelttechnik, Cuxhaven	ContraCon-Verfahren	10 - 15	mobil, Serienanlage
Possehl GmbH, Lübeck	CBRR-Verfahren	10 - 16	mobil
Dywidag Umwelttechnik, München	Dywinex-Verfahren	10 - 20	semimobil
WU-Walter Umwelttechnik, Augsburg	BOWA20-Verfahren	5 - 35	mobil, großtechnisch ab 04/92
Klöckner Oecotec GmbH, Duisburg	Hochdruckstrahlverfahren	20 - 35 35 - 55	semimobil, Serienanlage stationär in Hamburg
Harbauer GmbH & Co., Berlin	Vibrations-Verfahren	20 - 30	semimobil, Serienanlage, stationär in Berlin
AB-Umwelttechnik, München/Lägerdorf	Attritions-Verfahren	15 - 40	semimobil, Serienanlage, stationär in Lägerdorf
Hafemeister GmbH & Co., Berlin	Bodenwaschverfahren	8 - 16	semimobil, Serienanlage
Preussag Anlagenbau, Kiel	Heijmans-Verfahren	8 - 10	semimobil, Serienanlage
Lurgi GmbH, Frankfurt/Main	Deconterra-Verfahren	15 - 25	semimobil
SAN GmbH, Bremen	SAN-Verfahren	10 - 15	mobil
TerraCon, Hamburg	TerraCon-Verfahren	10 - 15	semimobil
R.E.T. Recycling- und Entsorgungstechnologie GmbH & Co. KG, Regensburg	R.E.T.-Verfahren	20 - 30	semimobil
NORDAC GmbH & Co. KG, Hamburg	Hochdruckstrahl-Verfahren 2000	35 - 55	stationär, Serienanlage
Philipp Holzmann AG, Düsseldorf	In-situ-Bodenwäsche	10 - 15	On-site-Boden/Wasserbehandlung
Keller GmbH, Offenbach	Soilcrete-Verfahren (In-situ-Bodenwäsche)	10 - 15	On-site-Boden/Wasserbehandlung

Weitere Leistungsdaten

Marktübersicht: Weitere Leistungsdaten				
Anbieter	Reinigungsleistung/Kontamination	Bodenart	Integrierte Reinigung	Abwasser / Abluft
ContraCon Umwelttechnik, Cuxhaven	MKW, PAK, BTX, Phenole, PCB, Cyanide, Schwermetalle	Kl. KG: 0,063 mm Gr. KG: 150 mm Max. 30 % Schluff	x	-
Possehl GmbH, Lübeck	MKW, PCB, PAK, KW, Schwermetalle	Kl. KG: 0,040 mm	x	-
Dywidag Umwelttechnik, München	MKW, Schwermetalle, Cyanide, PAK	Kl. KG: 0,063 mm Gr. KG: 120 mm Max. 25 % Schluff	x	-
WU-Walter Umwelttechnik, Augsburg	MKW, PAK, Cyanide, Schwermetalle	Kl. KG: 0,020 mm Gr. KG: 80 mm < 0,063 mm max. 15 - 35%	x	-
Klöckner Oecotec GmbH, Duisburg	MKW, CKW, PAK, Cyanide, Schwermetalle, PCB, BTX	Kl. KG: 0,025 mm Gr. KG 50 mm < 0,025 mm max. 25 %	x	x
Harbauer GmbH & Co., Berlin	MKW, PAK, PCB, CKW, Cyanide, Schwermetalle, Phenole, Hg	Kl. KG: 0,015 mm Gr. KG: 150 mm < 0,015 mm max. 30 - 40 %	x	x
AB-Umwelttechnik, München/Lägerdorf	KW, PAK, Cyanide, Schwermetalle, CKW	Kl. KG: < 0,063 mm Gr. KG: 240 mm	x	-
Hafemeister GmbH & Co., Berlin	MKW, PCB, Phenole, PAK, Cyanide, Schwermetalle	Kl. KG: 0,010 mm Gr. KG: 25 mm	x	x
Preussag Anlagenbau, Kiel	MKW, Cyanide, PAK, Schwermetalle	Kl. KG: 0,063 mm Gr. KG: 40 mm	x	-
Lurgi GmbH, Frankfurt/Main	KW, Cyanide, PAK, Schwermetalle	Kl. KG: 0,063 mm Gr. KG 150 mm	x	-
SAN GmbH, Bremen	PAK, MKW, BTX, Cyanide, Phenole	Kl. KG: 0,060 mm Gr. KG: 60 mm	x	-
TerraCon, Hamburg	MKW	Kl. KG: 0,040 mm Gr. KG: 35 mm	x	-
R.E.T. Recycling- und Entsorgungstechnologie GmbH & Co. KG, Regensburg	Hg, ACN, MKW, PAK	Kl. KG: 0,020 mm Gr. KG: 100 mm < 0,063 mm max. 50 %	x	-
NORDAC GmbH & Co. KG, Hamburg	KW, CKW, PAK, Cyanide, Schwermetalle, Dioxine Gr. KG: 50 mm	Kl. KG: 0,025 mm < 0,025 mm max. 25 %	x	x
Philipp Holzmann AG, Düsseldorf	PAK, Cyanide	Keine Angaben	x	-
Keller GmbH, Offenbach	KW, Phenole, Schwermetalle	Kl. KG: 0,020 mm	x	-

Weitere Leistungsdaten

Marktübersicht: Weitere Leistungsdaten				
Anbieter	Spezifischer Wasserverbrauch	Spezifische Reinigungskosten (DM/t)	Elektrischer Anschlußwert	
ContraCon Umweltsystem, Cuxhaven	0,4 m ³ /t	180 - 250		50 kW
Possehl GmbH, Lübeck	0,5 m ³ /t	250 - 400		125 kW
Dywidag Umweltsystem, München	100 lt	ab 150		250 kW
WU-Walter Umweltsystem, Augsburg	50 - 200 lt	150 - 350		200 - 400 kW
Klöckner Oecotec GmbH, Duisburg	70 lt	ab 260		7 kWh/t
Harbauer GmbH & Co., Berlin	200 - 500 lt	180 - 250		480 kW
AB-Umweltsystem, München/Lägerdorf	3 m ³ /t	150 - 250		200 kW
Hafemeister GmbH & Co., Berlin	0,06 m ³ /t	250 - 450		350 kW
Preussag Anlagenbau, Kiel	0,5 m ³ /t	180 - 300		180 kW
Lurgi GmbH, Frankfurt/Main	0,1 - 0,3 m ³ /t	160 - 300		750 kVA
SAN GmbH, Bremen	0,5 m ³ /t	80 - 350		100 kW
TerraCon, Hamburg	40 lt	250 - 500		350 kW
R.E.T. Recycling- und Entsorgungstechnologie GmbH & Co. KG, Regensburg	3,5 m ³ /t	170 - 270		200 kW
NORDAC GmbH & Co. KG, Hamburg	70 lt	ab 260		7 kWh/t
Philipp Holzmann AG, Düsseldorf	3,2 m ³ /t	220 - 260		500 - 600 kW
Keller GmbH, Offenbach	2,5 m ³ /t	ab 250		250 kW

5 Entwicklungsstand und -tendenzen

5.1 Grenzen des Verfahrens

Maßgebendes Kriterium für die Eignung eines bestimmten Sanierungsverfahrens für einen speziellen Anwendungsfall ist dessen technologische Einsatzgrenze.

Zunächst ist die schadstoffspezifische Eignung des jeweiligen Sanierungsverfahrens zu untersuchen. Dazu ist es erforderlich, Korngrößenanalysen, Dichte- und chemische Analysen sowie Waschversuche voranzustellen.

Waschversuche in kleineren Technikumsanlagen haben sich dabei bisher gut bewährt.

Erfahrungsgemäß ist die Auswahl eines geeigneten Verfahrens bzw. einer Verfahrenskombination um so schwieriger, je breiter die vorliegende Schadstoffpalette und je inhomogener der zu behandelnde Boden ist.

Die vorliegenden Untergrundeigenschaften spielen vor allem bei In-situ-Verfahren eine ausschlaggebende Rolle. Allerdings sind die Erfahrungen mit In-situ-Behandlungsverfahren gegenwärtig noch sehr begrenzt.

Für die On-site/Off-site-Verfahren gilt, daß die Behandlung um so aufwendiger ist, je höher der Anteil der Feinstkorn- und Schluffanteile im Boden ist.

Erst wenn die Einsatzgrenzen des jeweiligen Verfahrens mit den Sanierungszielen des jeweiligen Falles (bezüglich Schadstoffabreinigung und Bodenwiederverwendung) in Einklang zu bringen sind, können andere Aspekte, wie vor allem ökologische und ökonomische, zur Auswahl mit herangezogen werden.

In der Bundesrepublik Deutschland sind zur Zeit 3 stationäre, 11 semimobile und ca. 20 mobile Bodenwaschanlagen verfügbar. Die Praxiserfahrungen haben jedoch gezeigt, daß sich ein großer Teil der schadstoffbelasteten Böden mit den gegenwärtig angewendeten Methoden nicht oder nur bedingt reinigen läßt.

Das trifft besonders auf Böden zu, die mit halogenierten oder aromatischen Kohlenwasserstoffen und Schwermetallen verunreinigt sind sowie auf Böden, die hohe Prozentsätze von Ton- und Schluffpartikeln (< 0,063 mm) enthalten.

Die Schadstoffe sind häufig vorzugsweise an den Feinpartikeln im Boden adsorbiert. Böden mit einem hohen Anteil an Feinpartikeln erzeugen nach der Bodenwäsche einen sehr großen Schlammanfall. Im eigentlichen Sinne kann man kaum mehr von einer "Reinigung" des Bodens sprechen, wenn bodenfremde Stoffe mit dem Boden oder einem Hauptteil des Bodens so verbunden sind, daß eine Abtrennung nur durch Eliminierung dieser wesentlichen Bodenfraktionen möglich ist.

Grenzen für den Einsatz von Waschverfahren sind dort gegeben, wo Schwermetalle in Schlacken eingebunden sind. Das gilt ebenfalls für nicht aufschließbare Agglomerate von organischen Verbindungen und Bodenmaterial oder für den Fall, daß Schadstoffe in porösen Materialien eingebunden sind (Abb. 3.2-4).

Die Mehrzahl der löslichen Verbindungen läßt sich dagegen leicht durch Spülen des Bodens mit Wasser, ggf. mit Tensidzusatz, auswaschen.

Für die Dekontamination bestimmter Schadstoffe mittels Bodenwaschverfahren liegen folgende Erfahrungen vor:

- Schwermetalle
Schwermetalle können nur durch Säureaufschluß gelöst und abgereinigt werden. Es gibt zur Zeit kein großtechnisches Verfahren zur Beseitigung von Schwermetallen aus Tonen und Schlämmen, wie z. B. aus Flotatschlamm oder Sedimentfilterkuchen.
- Cyanide
Cyanide können in Bodenwaschanlagen behandelt werden, solange der Boden keinen zu hohen Anteil an Feinpartikeln oder organischen Stoffen enthält (z. B. Ton und Torf).
- Nicht-halogenierte aliphatische und einfache aromatische Verbindungen
Bodenwaschanlagen können für die Abreinigung dieser Schadstoffe grundsätzlich eingesetzt werden.
- Flüchtige halogenierte und aromatische Kohlenwasserstoffe
Extraktion, Strippung und Flotation sind prinzipiell anwendbar. Wegen ihrer Flüchtigkeit sind zusätzliche Arbeitsschutz- und Emissionsschutzmaßnahmen bei der Sanierung von mit diesen Schadstoffen kontaminierten Böden erforderlich.
- Nicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe, Pestizide und PAK
Waschverfahren lassen sich für diese Verbindungen grundsätzlich anwenden.

Ebenso wie bei den hydraulischen bzw. biologischen Verfahren ist die Wasserlöslichkeit der zu behandelnden Kontaminanten ausschlaggebend für die zu erzielende Reinigungsleistung bei der Anwendung dieser Verfahren. Mit abnehmender Wasserlöslichkeit der Kontamination wird der Reinigungsgrad durch das Lösungsvermögen des Extraktionsmittels begrenzt. Grundsätzlich können die Kontaminanten in drei verschiedenen Zustandsformen im Boden vorliegen:

- gelöst oder dispergiert im Bodenwasser,
- als Phase im Porenraum,
- als an den Bodenpartikeln anhaftender Schadstoffilm.

Während bei den beiden ersten Zustandsformen die Schadstoffe relativ einfach durch Waschen des Bodens zu entfernen sind, ist der anhaftende Film an den Bodenpartikeln nur durch Einsatz von Chemikalien oder mechanischer Energie zu entfernen.

Hier setzen die chemischen, die physikalischen oder eine Kombination beider Verfahren an.

Bindige Böden, eventuell mit hohem Humusgehalt, sind durch Abspülvorgänge nur schwer zu reinigen, da die Kontaminationen an diesen Teilchen sehr fest adsorbiert sind und durch Wasser nicht oder nur unvollständig entfernt werden können.

Besonders interessant sind deshalb Waschverfahren, die zusätzlich durch mechanische Energie unterstützt werden, wobei die Bindungskräfte zwischen Kontaminant und Bodenkorn leichter überwunden werden können. Dadurch werden auch Erfolge bei Schluffen (bis zu 0,015 mm) erreicht, was letztendlich die als Sonderabfall zu entsorgende Schlamm-Menge verringert.

Die wirtschaftliche Grenze für die Einsetzbarkeit von Bodenwaschverfahren liegt im allgemeinen bei einem Feinkornanteil $< 0,063$ mm bei ca. 30 %, jedoch sind Fälle bekannt, wo zum Zwecke der leichteren Deponierbarkeit (Reduzierung um 1 bis 2 Deponieklassen) Material mit bis zu 80 % Schluff erfolgreich behandelt wurde. Grundsätzlich gilt aber: Je höher der Anteil der Ton- und Schluffkomponenten eines Bodens ist, desto geringer ist die Reinigungswirkung, desto höher die Kosten.

Waschverfahren sind demnach vor allem zur Behandlung von grobkörnigen oder körnig-sandigen Böden mit relativ hoher Permeabilität geeignet.

5.2 Verfahren in der Entwicklung, F+E-Vorhaben

Die bestehenden Erfahrungen mit den vorhandenen Bodenwaschanlagen verdeutlichen, daß künftig große Anstrengungen unternommen werden müssen, um die bei Bodenwaschverfahren anfallenden Stoffmengen zu reduzieren, die mit anderen Sanierungstechnologien nachbehandelt bzw. auf Deponien endgelagert werden müssen.

Im Bereich von Forschung und Entwicklung wird man sich auf die Bindungsmechanismen zwischen Schadstoff und insbesondere den Feinstbestandteilen des Bodens weiter konzentrieren, um eine Verbesserung der Trennschärfe im Feinstkornbereich zu erzielen und damit die Restschadstoffmenge weiter zu verringern. Im Interesse der Reduzierung von Reststoffanfall, der auf Deponien gelagert werden muß, ist dessen Behandlung größte Aufmerksamkeit in der Forschung zu widmen. Für Böden mit besonders hohem Ton- und Schluffgehalt (> 30 % der Korngröße $< 0,063$ mm) ist die weitere Entwicklung von Bodenwaschverfahren mit nachgeschalteter thermischer Behandlung von hohem Interesse. Dies gilt insbesondere auch für die Reinigung von quecksilberbelasteten Böden.

Aufgrund der besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften des Quecksilbers, insbesondere der dampfdruckbedingten Flüchtigkeit des metallischen Quecksilbers, gibt es noch keine großtechnisch geeigneten Verfahren zur Abreinigung quecksilberkontaminierter Böden. Allerdings sind mehrere Verfahren in der Entwicklung, die neben dem Klassieren und Sortieren meist eine thermische Nachbehandlung, eine Vakuumdestillation und eine Niedertemperaturkondensation beinhalten.

Neben dem Quecksilberproblem muß an einer quantitativen Beseitigung von PAKs gearbeitet werden. Die zum Teil krebserregenden Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe sind oftmals mit dem Schadstoffträgermaterial derartig stark "verbacken", daß eine mechanisch-physikalische Trennung nicht möglich ist. Welche Restbelastungen im gereinigten Boden bzgl. PAKs zu tolerieren sind, hängt neben der ggf. standortbezogenen Nutzung vor allem vom Elutionsverhalten der PAKs ab. Hier ist Forschungsbedarf im Grenzgebiet zwischen Chemie- und Verfahrenstechnik erforderlich.

Zu den kritischen Bodenkontaminanten zählen auch die Polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane. Die hier unter dem Sammelbegriff "Dioxine" gemeinten Schadstoffe, sind durch Bodenwaschverfahren grundsätzlich abtrennbar, jedoch wäre zu klären, welche Pfade die Dioxine nehmen und welche konkreten Arbeitsschutzbestimmungen einzuhalten wären, letztlich bis zu welchen Höchstkonzentrationen dioxinbelastete Böden in Bodenwaschanlagen behandelt werden dürfen.

Näherer stoffbezogener Untersuchung bedürfen auch die großen Gruppen der Pestizide.

Zur Abreinigung der oben angegebenen Problemstoffe müssen alternative physikalisch-chemische Reinigungsverfahren entwickelt werden. Zu den aussichtsreichsten, alternativen Methoden gehören dabei die Partikel trennverfahren und die chemischen Extraktionsverfahren.

Forschungsbedarf liegt dabei auch in einem verfahrenstechnisch bisher unbefriedigend gelösten Bereich- bei der Entwässerung von Ton-Schluff-Wassergemischen, Flotatschlämmen u. a.

Hinzu kommt, daß bei Schadstoffbelastung durch Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe die Entwässerung bzw. Filtrierbarkeit noch erschwert wird. Es gilt, eine Filtrationstechnik mit hohem Wirkungsgrad zu finden, die die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens positiv beeinflusst. Das Filtrationsverfahren wiederum setzt eine optimale Flockungstechnologie voraus.

Auch im Bereich der Probennahme, Probenaufbereitung und Analytik von kontaminiertem Bodenmaterial ergeben sich noch Probleme mit der Aussagekraft, Vergleichbarkeit und Transparenz der Ergebnisse.

Forschungsbedarf besteht ferner bei der Weiterentwicklung von Spezialgeräten und Vorrichtungen zum sicheren Aushub und Transport kontaminierter Böden, desweiteren für die Bereiche Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit.

In der Projektträgerschaft des Umweltbundesamtes werden im Förderbereich "Altlastensanierung" auch Sanierungsvorhaben mit Bodenwaschverfahren als Einzelprojekte betreut.

So wurde während der Projektlaufzeit 1985/86 von Harbauer GmbH & Co. KG eine modular aufgebaute Bodenreinigungsanlage für kontaminierte Böden erstellt; auf der Basis der Ergebnisse der Laborphase sind über eine weitere Förderung von 1987 bis 1990 Anlagenmodule für ein Bodenwaschverfahren mit mechanischem Energieeintrag und anschließender Behandlung des Extraktionsmittels Wasser in einer vorhandenen Reinigungsanlage entwickelt worden.

Im Rahmen der "Modellhaften Sanierung und Revitalisierung des Burbacher Hüttengeländes" existiert ein vom BMFT gefördertes FuE-Vorhaben, an dem 13 Firmen beteiligt sind. Am derzeit laufenden Pilotversuch werden ca. 1.500 t hauptsächlich mit organischen Substanzen und mit Schwermetallen kontaminierten Bodens in Bodenwasch- und thermischen Anlagen sowie biologisch gereinigt.

An der Bodenwäsche sind die Lurgi GmbH, die Alsen-Breitenburg GmbH, die Harbauer GmbH, die Klöckner Oecotec GmbH, die Ed. Züblin AG und die Allmineral GmbH beteiligt.

Die Bremer Vulkan AG hat von 1987 bis 1991 ein Bodenwaschverfahren zur Beseitigung von organischen und anorganischen Kontaminationen für die Aufarbeitung ölverunreinigter Böden entwickelt und in einer Pilotanlage später bei der Firma SAN umgesetzt, die ab 1991 zur Sanierung eines Geländes in Bremen eingesetzt wurde.

Von 1990 bis 1992 läuft am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen ein Förderprojekt zur On-site-Aufbereitung von organisch- und schwermetallkontaminierten Böden mittels Wasserdampfextraktion bzw. Extraktion mit organischen Komplexbildnern.

Im Jahr 1989 wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein Sonderforschungsbereich "Reinigung kontaminierter Böden" eingerichtet. Die TU Hamburg-Harburg und die Universität Hamburg betreiben in 14 Einzelprojekten Grundlagenforschung für die Verfahrensentwicklung zur Sanierung kontaminierter Böden. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches werden Grundlagen erarbeitet, die auf Basis von Leistungsdaten eine Beurteilung der Verfahren bezüglich einer technischen Realisierung ermöglichen sollen.

Die Preussag Anlagenbau arbeitet an Problemlösungen, die sich mit dem Abbau organischer Kontamination in Tonen und Schluffen, mit der Ausfällung verbliebener Schwermetallverunreinigungen und mit der Verfestigung durch Einbindung in eine Stoffmatrix beschäftigen.

Die Fa. Lurgi forscht auf dem Gebiet der thermischen Behandlung des Schadstoffkonzentrats nach der Bodenwäsche, dabei wird von Lurgi gegenwärtig das Behandeln im Niedertemperaturbereich untersucht.

Die Fa. Klöckner forscht verstärkt auf dem Gebiet der Behandlung der Reststoffe.

Darüber hinaus existieren bei einer Reihe von weiteren Anwenderfirmen Konzepte und Planungen für modifizierte Waschverfahren, meist in Zusammenarbeit mit Forschungsbereichen von Hochschulen und Universitäten:

Bei der LGA Bayern in Nürnberg z. B. befindet sich ein Gegenstromwaschverfahren im Versuchsstadium, das zur Dekontamination von schwermetallhaltigen Böden in mobilen Anlagen vorgesehen ist.

Allgemein kann gesagt werden, daß die Praxis auf dem Gebiet der Bodenreinigung der Forschung und Entwicklung vorausgeht, bedingt durch den großen Markt für Sanierungstechnologien und der damit verbundenen geschäftlichen Perspektive für Betreiber und Anlagenbauer.

5.3 Erfolgsaussichten und Bewertung

Die Bodenreinigung mit den gegenwärtig verfügbaren Bodenwaschverfahren eignet sich im Gegensatz zu den mikrobiologischen und thermischen Verfahren auch für Böden, die mit anorganischen Schadstoffen wie Schwermetallen, Cyaniden und Sulfiden kontaminiert sind. Allein aus diesem Grunde sind sie aus der Sanierungspraxis nicht mehr wegzudenken und werden in den nächsten Jahren weiter verbessert und für spezielle Schadstoffe angepaßt werden müssen. Bei Berücksichtigung der verfahrenstechnischen, schadstoff- bzw. bodenbedingten Grenzen stellt die Bodenwäsche ein leistungsfähiges Reinigungsverfahren dar. Für die Bodenwaschverfahren sprechen außer der schnellen Verfügbarkeit und des damit schnell einstellbaren Sanierungserfolges ökologische und ökonomische Vorteile.

Die bisher erreichten Ergebnisse sind allerdings noch nicht voll zufriedenstellend. Bei künftigen Entwicklungen sollte Verfahrensentwicklungen der Vorzug gegeben werden, die den Anforderungen hinsichtlich ihrer Mobilität, Kapazität, Immisionsschutz, Wirtschaftlichkeit, Konkurrenzfähigkeit und Anwendungsbreite ausreichend gerecht werden.

Aufgrund der Tatsache, daß bei vielen Fällen der Altlastensanierung auch eine sanierungsbedürftige Grundwasserbelastung vorliegt, sollten moderne mobile Bodenwaschanlagen in modifizierter Form prinzipiell auch zur Grundwassersanierung mitgenutzt werden können.

In der Praxis deutlich erkennbar ist der Trend zur Errichtung von sogenannten Bodenbehandlungszentren. Während erste stationäre Bodenbehandlungszentren für die biologische Reinigung kontaminierter Böden bereits in Betrieb sind, und z. B. mit der Fa. Nordac in Hamburg der erste Standort mit stationärer Bodenwaschtechnik entstanden ist, sollen zukünftig Behandlungszentren, die unterschiedliche technische Verfahren integrieren, errichtet werden.

Die Entwicklung geht dabei zur Zeit in Richtung einer Ergänzung der Bodenwaschanlagen durch mikrobiologische und thermische Verfahren zur Beseitigung der anfallenden Reststoffe. Wünschenswert wäre allerdings die Errichtung eines modellhaften Bodenrecyclingzentrums, in dem die chemisch-physikalischen, biologischen und thermischen Verfahren so intelligent miteinander verknüpft werden, daß als Endprodukte nur wiedereinsatzfähiger Boden oder Wirtschaftsgut bei geringst möglichem Anfall von zu entsorgendem Abfall entsteht. Während Pläne für solche Anlagen seit fast 10 Jahren bis zum Genehmigungsstadium entworfen wurden, ist eine Realisierung in Deutschland in nächster Zeit noch nicht zu erwarten.

6 Praktische Vorgehensweise bis zur Anwendung einer Bodenwäsche, Entscheidungshilfen

6.1 Überblick über die Vorgehensweise

Das Ablaufschema in Abb. 6.1-1 soll zunächst einen allgemeinen Überblick über die Vorgehensweise bei der Sanierung eines Altlasten- oder Umweltschadensfalles geben.

Im Rahmen der systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg sind die einzelnen Bearbeitungsschritte unter der Bezeichnung "Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E₃₋₄)" näher geregelt. Im folgenden Text wird in diesem Zusammenhang vor allem auf Aspekte eingegangen, die im direkten Bezug zur Bodenwäsche stehen, und die Vorgehensweise aus diesem Blickwinkel näher erläutert.

Grundlagenermittlung

Nachdem für die Altlast bzw. den Schadensfall ein Sanierungsbedarf festgestellt wurde, bildet die **Bestandsaufnahme** der relevanten Erkundungsergebnisse und Rahmenbedingungen den Ausgangspunkt der Vorgehensweise. Sind die Erkundungsergebnisse nicht ausreichend, ist gegebenenfalls eine **ergänzende Erkundung** vorzusehen.

Sanierungsvorplanung

Nach der Grundlagenermittlung beginnt die Sanierungsvorplanung. Unter Berücksichtigung standortspezifischer Gegebenheiten sind im Zuge der **Verfahrensvorauswahl** all diejenigen Sicherungs- und Dekontaminationsverfahren aus der Gesamtheit möglicher Sanierungsverfahren auszuwählen, deren Anwendung im betrachteten Fall prinzipiell möglich erscheint. Häufig wird auch die Bodenwäsche, sei es als On-site- oder Off-site-Verfahren, zur Vorauswahl gelangen. Danach erfolgt auf der Grundlage konkreter **Firmenanfragen** für jedes Verfahren bzw. Verfahrensanbieter eine **Kostenschätzung** der gesamten Sanierungskosten. Parallel zur Verfahrensvorauswahl und Kostenschätzung ist frühzeitig die **Fachdiskussion der Sanierungsziele** mit den zuständigen Behörden zu führen. Die an der geogenen/anthropogenen Hintergrundbelastung und geplanten Nutzung orientierten bzw. nach ökotoxikologischen Kriterien zu fordernden Sanierungsziele sind der technischen Machbarkeit (z. B. Reinigungsleistung einer Bodenwäsche) gegenüberzustellen. Sanierungsverfahren, die grundsätzlich zur Erreichung der Sanierungsziele eingesetzt werden können, sind danach einer **Kosten-Nutzen-Betrachtung** zu unterziehen. Nach dieser monetären Verfahrensbewertung der möglichen Sanierungsverfahren erfolgt eine **Bewertung nach nicht-monetären Kriterien**, z. B. der Umweltverträglichkeit oder technischen und organisatorischen Kriterien. Am Ende der Sanierungsvorplanung steht die **Gesamtbewertung**, die die Kosten-Nutzen-Betrachtung und die nichtmonetäre Bewertung der möglichen Sanierungsverfahren verbindet und zu einem **Sanierungsvorschlag** führt.

Sanierungsentscheidung

Auf die Sanierungsvorplanung folgt die Sanierungsentscheidung, in deren Rahmen zum einen die **behördliche Festlegung der Sanierungsziele** und zum anderen die **Auswahl des Sanierungsverfahrens** erfolgt. Bestehen am Ende der Sanierungsvorplanung noch

Unsicherheiten, z. B. hinsichtlich der Reinigungsleistung eines Bodenwaschverfahrens, können vor der Sanierungsentscheidung noch spezielle **Voruntersuchungen** oder **Technikumsversuche** erforderlich sein.

Sanierungshauptplanung

Nachdem die Sanierungsentscheidung getroffen ist, folgt die Planungsphase bezüglich des ausgewählten Sanierungsverfahrens. Die Planungsphase beinhaltet die **Ausführungs- und Genehmigungsplanung**, gefolgt vom behördlichen Genehmigungsverfahren und letztlich der Ausschreibung und Vergabe der Sanierungsmaßnahme.

Sanierungsdurchführung

Die anschließende Sanierungsdurchführung, z. B. in Form einer Bodenwäsche, beginnt mit der **Optimierungs- und Testphase**, die im Regelfall in die eigentliche **Betriebsphase** mündet. Die Betriebsphase geht einher mit einer kontinuierlichen **Überwachung**, z. B. hinsichtlich des Immissionsschutzes. Am Ende der Sanierungsdurchführung steht die **Erfolgskontrolle**, durch die nachzuweisen ist, daß ein gefordertes Sanierungs- bzw. Reinigungsziel, z. B. einer Bodenwäsche, erreicht wurde.

Anhand des beschriebenen allgemeinen Ablaufschemas bei einer Sanierung werden in den folgenden Kapiteln im Detail die Vorgehensweise bis zur möglichen Auswahl einer Bodenwäsche als Sanierungsverfahren erläutert und Entscheidungshilfen aufgezeigt. Danach werden für den Anwendungsfall einer Bodenwäsche praxisnahe Hinweise zur Planung und Durchführung gegeben.

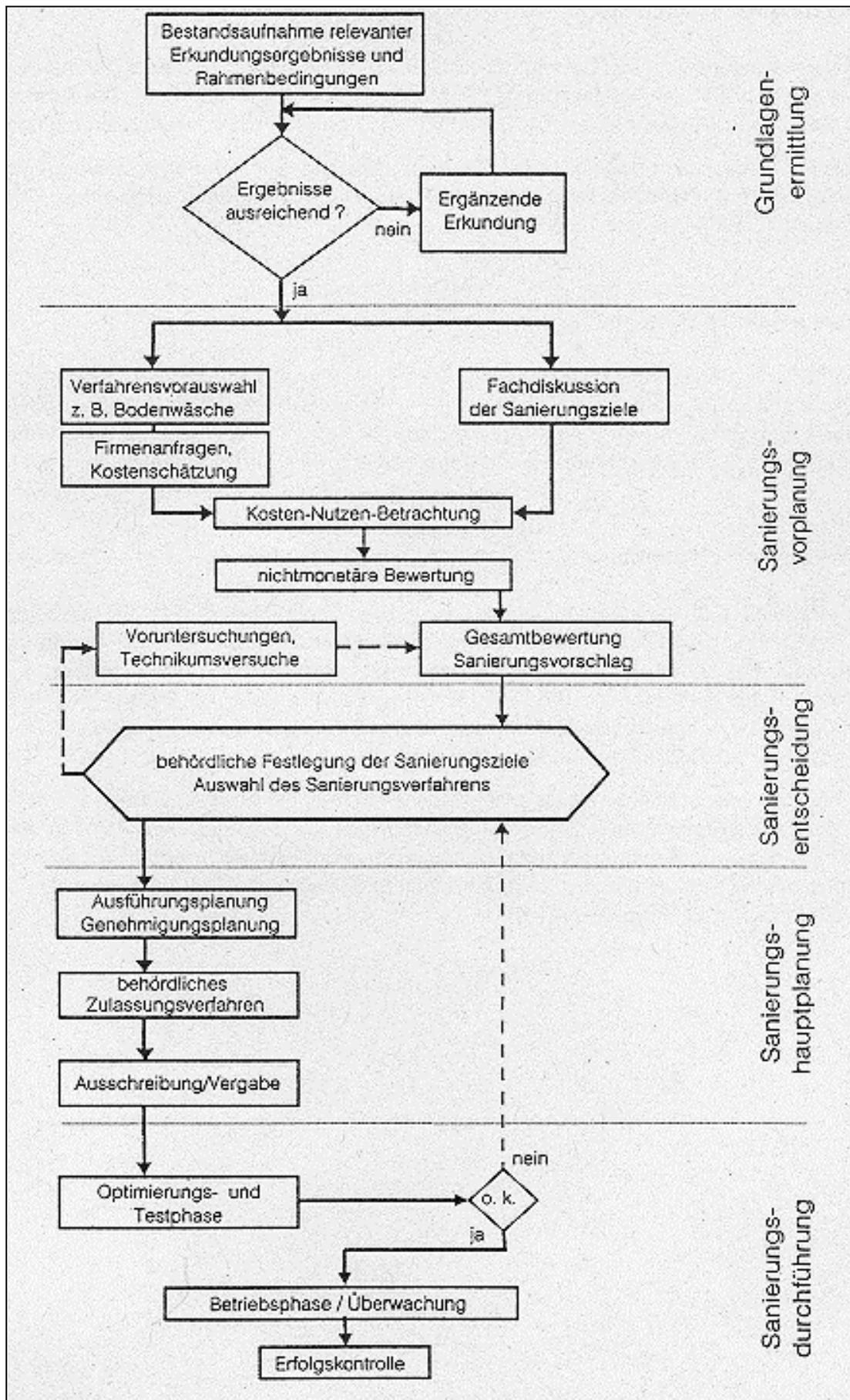


Abb. 6.1-1 Ablaufschema einer Sanierung

6.2 Grundlagenermittlung

Die Ergebnisse der vorausgegangenen Erkundungsarbeiten eines Praxisfalles bilden, sofern nach einer entsprechenden Bewertung ein Sanierungsbedarf festgestellt wurde, die Grundlage für die Verfahrensvorauswahl zu Beginn der Sanierungsvorplanung. Da sich Erkundungsphasen erfahrungsgemäß über längere Zeiträume erstreckt haben können und häufig auch verschiedene gutachterliche und/oder behördliche Kampagnen mit unterschiedlichem Dokumentationsstandard durchgeführt wurden, sind in einem ersten Schritt alle **relevanten Erkundungsergebnisse und Rahmenbedingungen** sorgfältig zu recherchieren und zusammenzustellen.

Die Erkundungsergebnisse sind dann zunächst dahingehend zu prüfen, ob die grundsätzliche Anwendbarkeit einer Bodenwäsche (vgl. Kap. 2.1) beurteilt werden kann. Das Kap. 2.4 "Erkundungsumfang, Voruntersuchungen" ist als **Anforderungskatalog an die Erkundung** im Hinblick auf eine optimale Beurteilung der Anwendbarkeit einer Bodenwäsche aufzufassen. Anhand dieses Anforderungskataloges können vorliegende Erkundungsergebnisse eines Praxisfalles abgeglichen und auf Vollständigkeit hin beurteilt werden.

Wurde beispielsweise im Zuge einer Erkundung nur die Kontaminationssituation festgestellt, nicht jedoch die Bodenverhältnisse, ist hierin ein erhebliches Erkundungsdefizit zu sehen. Unter Umständen können in derartigen Fällen ersatzweise Erfahrungswerte herangezogen werden. Werden die Erkundungsergebnisse im Hinblick auf die Sanierungsvorplanung jedoch als unzureichend bewertet, sind ergänzende Erkundungsmaßnahmen erforderlich. Je vollständiger die Erkundung durchgeführt wurde, desto besser ist die Beurteilungsgrundlage, vor allem hinsichtlich der Reinigungsleistung und des Reststoffanfalls für die Verfahrensanbieter einer Bodenwäsche.

Außer den Erkundungsergebnissen sollten wichtige Rahmenbedingungen wie die **aktuellen und geplanten Nutzungen** im Umfeld bzw. auf dem Sanierungsgrundstück zusammengestellt werden. Aktuelle Nutzungen, z. B. in Form unmittelbar angrenzender Wohnbebauung können aufgrund möglicher Beeinträchtigungen entscheidend für die Vorauswahl von On-site- und In-situ-Verfahren sein. Geplante sensible Nutzungen auf dem Sanierungsgrundstück (z. B. Gartenbau, Kinderspielplatz) sind ebenso wie bestehende Nutzungen im Umfeld (z. B. Industriegebiet, Wohngebiet) bei der Festlegung von Sanierungszielen zu berücksichtigen.

6.3 Sanierungsvorplanung

6.3.1 Verfahrensvorauswahl, Firmenanfragen, Kostenschätzung

Für das vorliegende Handbuch wird davon ausgegangen, daß aufgrund ausreichender Erkundungsergebnisse eines Praxisfalls weder die Kontaminationssituation noch die Bodenverhältnisse oder standortspezifische Rahmenbedingungen grundsätzlich die Bodenwäsche als Sanierungsverfahren ausschließen. Daneben gelangen i. d. R. auch andere Sanierungsverfahren bzw. Verfahrensruppen, z. B. thermische oder biologische Bodenreinigungsverfahren, zur

Vorauswahl. Nach der **Verfahrensvorauswahl** gilt es, auf dem Markt diejenigen Anbieter von Bodenwaschverfahren im Off-site-, On-site- oder In-situ-Betrieb zu recherchieren, die eine Behandlung des betrachteten Materials für möglich halten bzw. durchführen würden.

Nachdem man sich z. B. mit Hilfe des vorliegenden Handbuchs (Kap. 4) oder der Veröffentlichungen des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (z. B. Teresa 1990) einen **Marktüberblick** verschafft hat, sind konkrete (zu diesem Zeitpunkt jedoch noch unverbindliche) **Firmenanfragen** zu stellen. Den Verfahrensanbietern sollten dabei bereits möglichst **exakte Angaben zu folgenden Punkten** mitgeteilt werden:

- Materialart (z. B. natürliche Böden, Auffüllungen mit Fremdstoffen wie z. B. Bauschutt, Stahl, Holz),
- Materialbeschaffenheit (Feinkornanteil, Größtkorn, Porosität, Wassergehalt),
- Kontaminationssituation (Schadstoffe, Konzentrationsbereiche, Verteilung),
- Materialaufkommen
- Infrastruktur (Platz, Versorgungseinrichtungen, Zugänglichkeit)
- geplanter Sanierungszeitraum.

Kommen auch In-situ-Verfahren in Frage, sind darüber hinaus die geologisch-hydrogeologischen Standortverhältnisse darzulegen.

Die **Verfahrensanbieter** ihrerseits sollten **zu folgenden Fragenkomplexen Stellung nehmen**:

- Behandlung des charakterisierten Materials möglich, Verfahrensbeschreibung?
- Erprobungsstand, Referenzen, Genehmigungsmodalitäten?
- Verfügbarkeit?
- Behandlungskosten inklusive Reststoffentsorgung, gegebenenfalls Baustelleneinrichtungskosten?
- Standort/Mobilität?
- Einschränkungen, z. B. hinsichtlich behandelbarer Korngröße und Kontamination bzw. Kontaminationsgrad?
- Dekontaminationsleistung (Restkonzentration, Durchsatzleistung)?
- Reststoffanfall und Entsorgung?
- Arbeitsschutzmaßnahmen?
- Bodenmechanische, bodenkundliche Eigenschaften des behandelten Materials?
- Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials (z. B. am Behandlungsort)?
- Erfordernis, Umfang und Kosten von Voruntersuchungen/Technikumsversuchen?

Die Firmenanfragen im Zuge der Vorplanung sind als Aufforderung zu einem unverbindlichen Richtpreisangebot zu verstehen; sie sollen nicht etwa einer Ausschreibung vorgreifen. Es ist daher auch nicht erforderlich, sämtliche Verfahrensanbieter von Bodenwaschverfahren in die Firmenanfragen einzubeziehen. Vielmehr soll nach dem Ermessen z. B. eines erfahrenen, mit der Vorplanung beauftragten Ingenieurbüros eine Auswahl derjenigen Verfahrensanbieter getroffen werden, die aufgrund ihrer Marktstellung und Referenzen für den betrachteten Sanierungsfall geeignet erscheinen. Auch hierzu liefert das vorliegende Handbuch (Kap. 4) Entscheidungshilfen.

Nach **Auswertung der Firmenanfragen** ist jeweils eine Kostenschätzung für die gesamte Sanierungsmaßnahme durchzuführen.

Bei der **Kostenschätzung** der gesamten Sanierungsmaßnahme wirkt sich in erster Linie der von den Firmen genannte **Behandlungspreis** aus. Dieser Preis sollte sich als Komplettpreis für eine Behandlung kontaminierten Materials verstehen und folgende **Kostenpositionen**, soweit relevant, beinhalten:

- Zwischenlagerung des kontaminierten Materials bis zur Behandlung (Off-site-Verfahren)
- Materialvorbereitung (z. B. Zerkleinerung, Sortierung) und Aufgabe
- Wäsche inklusive Energie- und Wasserkosten und Kosten für Zusatzstoffe
- Chemische Analytik zum Nachweis der geforderten Reinigungsleistung
- Entsorgung der Reststoffe (Schlamm, Abwasser)
- Personalkosten zur Überwachung und Steuerung einer Sanierungsanlage
- Arbeitsschutzmaßnahmen
- Emissionsschutzmaßnahmen.

Neben dem Behandlungspreis sind zur Abschätzung der Gesamtkosten, insbesondere beim Vergleich von Off-site-, On-site- und In-situ-Verfahren **weitere Kostenpositionen** maßgebend:

- Voruntersuchungen, Technikumsversuche inklusive chemischer Analytik
- Baustelleneinrichtung und Infrastrukturmaßnahmen (on site, in situ)
- Erdaushub (on site, off site), gegebenenfalls unter Berücksichtigung besonderer Arbeitsschutz- und Emissionsschutzmaßnahmen.
- Transport innerhalb der Baustelle (on site)
- Verpackung, soweit erforderlich, und Transport außerhalb der Baustelle (off site)
- Rücktransport (off site), soweit erforderlich.
- Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials
- Einbau von Fremdmaterial

Bei den vorgenannten weiteren Kostenpositionen sind i. d. R. Erfahrungswerte anzusetzen (z. B. für Transportkosten) bzw. grobe Schätzungen vorzunehmen (z. B. Baustelleneinrichtung). Aufgrund der im Stadium der Vorplanung noch bestehenden Unsicherheiten, besonders hinsichtlich des von den Firmen genannten Behandlungspreises - häufig unter dem Vorbehalt zur endgültigen Kalkulation noch Voruntersuchungen an Originalmaterial durchführen zu müssen - und ungeklärten Fragen der weiteren Verwertung/Deponierung des behandelten Materials ist die **Kostenschätzung** als **erste grobe Näherung** anzusehen, die folgende **Aussagen** erlaubt:

- Kostengrößenordnung der gesamten Sanierungsmaßnahme in Abhängigkeit des Sanierungsverfahrens und der Massenermittlung des zu behandelnden Materials
- Markante Kostenunterschiede einzelner Sanierungsverfahren bzw. Verfahrensgruppen
- Maßgebliche Kostenpositionen bei der Betrachtung einzelner Sanierungsverfahren.

Die **Kostengrößenordnung** ist vor allem im Hinblick auf die Bereitstellung von Mitteln zur Sanierung relevant, sie ist gleichzeitig ein Kriterium für die Verhältnismäßigkeit von finanziellem Aufwand und der angegebenen Reinigungsleistung. Beim Kostenvergleich der Sanierungsverfahren untereinander wird sich ein Bodenwaschverfahren, vor allem aufgrund des Behandlungspreises gegenüber konkurrierenden Verfahren (z. B. thermische oder biologische Behandlung) zunächst unabhängig von nicht-monetären Kriterien behaupten müssen. Bei Bodenwaschverfahren untereinander können signifikante **Kostenunterschiede** zwischen einer In-situ-, On-site- oder Off-site-Behandlung festgestellt werden. Neben den Behandlungskosten können weitere markante Kostenpositionen (z. B. Verpackungs- und Transportkosten) auftreten.

6.3.2 Fachdiskussion der Sanierungsziele

Parallel zur Recherche möglicher Sanierungsverfahren in Form der Anfragen an Verfahrensanbieter bzw. -betreiber ist die Frage der Sanierungsziele bezüglich eines Praxisfalles mit den zuständigen Fachbehörden fachlich zu erörtern. **Ziel einer Sanierung** ist nach §25 Landesabfallgesetz Baden-Württemberg grundsätzlich "die Herstellung eines dem Wohl der Allgemeinheit entsprechenden Zustandes". Das Wohl der Allgemeinheit gilt gemäß §2 Bundesabfallgesetz als beeinträchtigt, wenn

- "die Gesundheit der Menschen gefährdet und ihr Wohlbefinden beeinträchtigt,
- Nutztiere, Vögel, Wild und Fische gefährdet,
- Gewässer, Boden und Nutzpflanzen schädlich beeinflusst,
- schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen oder Lärm herbeigeführt,
- die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege sowie des Städtebaus nicht gewahrt oder
- sonst die öffentliche Sicherheit und Ordnung gefährdet oder gestört werden."

Die **Sanierungsziele** sind daher letztlich in Form **zulässiger Schadstoffhöchstkonzentrationen** für die betroffenen Schutzgüter, z. B. Boden oder Grundwasser, festzulegen. Die zulässigen Schadstoffhöchstkonzentrationen - häufig Sanierungsgrenzwerte genannt - sind als hinnehmbare oder unumgängliche Restbelastungen anzusehen, die durch eine Sanierung anzustreben sind bzw. dauerhaft eingehalten oder unterschritten werden sollen. Es ist zu betonen, daß die im konkreten Einzelfall notwendige und mögliche Einzelfallentscheidung sich innerhalb der behördlichen Rahmenvorgaben zu bewegen hat und die darin festgelegten Orientierungswerte zu berücksichtigen sind.

Die Sanierungsgrenzwerte für eine Bodensanierung bestimmen zum einen die zu sanierenden Massen, d. h. bei On-site- oder Off-site-Verfahren den erforderlichen Erdaushub bzw. die zu sanierende Fläche und Tiefe bei In-situ-Verfahren. Zum anderen geben die Sanierungsgrenzwerte das technologische Reinigungsziel z. B. für Bodenwaschverfahren an, welches erreicht werden muß, um einen Wiedereinbau des Materials an Ort und Stelle zu ermöglichen.

Scheidet eine Verwertung des behandelten Materials in Form eines Wiedereinbaus aus, etwa weil das Reinigungsziel nicht erreicht werden konnte oder weil die Sanierung mit einer Baumaßnahme gekoppelt ist, sind anderweitige Verwertungsmöglichkeiten anzustreben. In Frage kommt beispielsweise der Einbau des behandelten Materials in Lärmschutzwälle oder die

Verwendung im Straßenbau. Auch hier sind entsprechende Grenzwerte hinsichtlich einer Verwertung einzuhalten, die zum einen in Verwaltungsvorschriften der Bundesländer, z. B. "Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg", enthalten sein können oder von den zuständigen Behörden einzelfallspezifisch festgelegt werden.

Eine Alternative zu einer direkten Verwertung stellt die Möglichkeit dar, das behandelte Material Verfahrensanbietern für Baustoffaufbereitung und -recycling anzudienen; das Material muß jedoch die Annahmegrenzwerte für ein Baustoffrecycling erfüllen, die sich einschlägige Firmen im Rahmen einer freiwilligen Güteüberwachung zum Teil selbst auferlegen (GÜTE-GEMEINSCHAFT RECYCLING-BAUSTOFFE 1991) bzw. als praktisch unbelastet einzu-stufen sein.

6.3.3 Kosten-Nutzen-Betrachtung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Firmenanfragen und parallel durchzuführenden Fachdiskussion der Sanierungsziele sind in Frage kommende Sanierungsverfahren, d. h. Verfahren, die vorgegebene bzw. sich abzeichnende Sanierungsziele erreichen können, einer Kosten-Nutzen-Betrachtung zu unterziehen. Die Kosten-Nutzen-Betrachtung soll das Verfahren aus der Verfahrensvorauswahl, z. B. Bodenwaschverfahren, liefern, das bei vergleichbarer Wirksamkeit die kostengünstigste Alternative darstellt.

Die **Wirksamkeit eines Verfahrens** läßt sich an der Dekontaminationsleistung, ausgedrückt in Prozent der **Schadstoffeingangskonzentration** bzw. an dem erzielbaren **Restschadstoffgehalt** im behandelten Material messen. Je komplexer die Schadstoffbelastung eines zu behandelnden Materials ist, desto schwieriger wird die Wirksamkeit unterschiedlicher Verfahren und besonders unterschiedlicher Verfahrensgruppen zu bewerten und zu vergleichen sein. Liegt beispielsweise eine Mischkontamination aus Schwermetallen und Mineralölkohlenwasserstoffen vor, kann es bei unterschiedlichen Verfahren bzw. Verfahrensgruppen der Fall sein, daß eine hohe Reinigungsleistung für organische Schadstoffe wie Mineralölkohlenwasserstoffe einhergeht mit einer geringen oder fehlenden Reinigungsleistung für Schwermetalle.

Gerade bei **Mischkontaminationen** (organische und anorganische Schadstoffe) können Bodenwaschverfahren jedoch eine Kompromißlösung im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren darstellen. Ebenso wie bei den thermischen Verfahren werden bei der Bodenwäsche auch organische Schadstoffe erfaßt; je nach Eingangskonzentration und Schadstoffverteilung (Stichwort Teerklumpen) können allerdings Schadstoffrestkonzentrationen im behandelten Material auftreten, die möglicherweise eine freie Verwendung (Recyclingbörse) des behandelten Materials einschränken. Im Gegensatz zu den biologischen Sanierungsverfahren und manchen thermischen Verfahren (Pyrolyse-Verfahren) erfaßt die Bodenwäsche allerdings zusätzlich anorganische Schadstoffe (z. B. Schwermetalle), so daß Bodenwaschverfahren im Hinblick auf die Reduzierung des Gesamtschadstoffpotentials bei Mischkontaminationen eine höhere Wirksamkeit als thermische oder biologische Verfahren zeigen können.

Die Kosten-Nutzen-Betrachtung von Bodenwaschverfahren untereinander, wobei am ehesten von einer vergleichbaren Wirksamkeit auszugehen ist, zeigt vor allem die unterschiedliche Wirtschaftlichkeit der In-situ- und On-site-Verfahren, verbunden mit den entsprechenden Baustelleneinrichtungen gegenüber den Off-site-Verfahren, verbunden mit Verpackungs- und

Transportaufwand auf. Ebenso wie Kostenangaben müssen auch Angaben zur Wirksamkeit von Verfahren im Stadium der Vorplanung noch als unverbindlich angesehen werden; Erfahrungswerte, wie sie teilweise in Kapitel 4 eingearbeitet sind, ermöglichen jedoch eine grobe Plausibilitätskontrolle.

Aufgrund der im Stadium der Sanierungsvorplanung noch existierenden **Unsicherheiten in der Beurteilung der Wirksamkeit** sowie der **Unschärfe bei der Kostenschätzung** kann eine Kosten-Nutzen-Betrachtung nur ein halbquantitatives Ergebnis liefern. Bei vergleichbarer Wirksamkeit lassen sich beispielsweise Kostengruppen bilden und mit den Einstufungen "kostengünstig, mittlere Kosten, kostenintensiv" belegen. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Projekten zu ermöglichen, bietet es sich an, die Kosten für die gesamte Sanierungs- bzw. Entsorgungsmaßnahme als **spezifischen Gesamtpreis** pro Tonne zu behandelnden Materials anzugeben.

Bei Unterschieden in der Verfahrenswirksamkeit ist mit Blick auf die geschätzten Gesamtkosten der Sanierungs-/Entsorgungsmaßnahme zu prüfen, inwieweit Einsparungen eine eingeschränkte Wirksamkeit, möglicherweise verbunden mit einer mangelnden Verwertungsmöglichkeit des behandelten Materials rechtfertigen.

6.3.4 Nicht-monetäre Bewertung

Neben der Kosten-Nutzen-Betrachtung, die, basierend auf den Firmenangaben, das Verfahren bzw. die Verfahrensgruppe mit der höchsten Wirtschaftlichkeit liefert, sind jedoch auch nicht-monetäre Kriterien, also Kriterien, die kostenmäßig nicht oder nur schwierig zu erfassen sind, bei der Sanierungsentscheidung zu berücksichtigen.

Die nicht-monetären Kriterien lassen sich in die **Kriteriengruppen technische Kriterien, organisatorische Kriterien und ökologische Kriterien** eines Sanierungsverfahrens untergliedern, wobei es durchaus Überschneidungen hinsichtlich der Einordnung einzelner Kriterien geben kann:

Technische Kriterien

- Entwicklungsstand/Referenzen
- Erfolgsaussichten für den Einzelfall
- Verfügbarkeit des Verfahrens
- Durchsatzleistung/Sanierungsdauer
- Schadstoffausbringen
- Möglichkeiten und Kapazitäten einer Zwischenlagerung bei Off-site-Maßnahmen
- Kontrollierbarkeit des Sanierungserfolges, Automatisierbarkeit
- Flexibilität, Beherrschbarkeit von Inputschwankungen (Kontaminationsgrad, Korngröße)
- Erfordernis einer gesonderten Materialvorbereitung (z. B. Zerkleinerung, Sortierung)
- Kompatibilität zu nachgeschalteten Maßnahmen (z. B. Bodenwäsche und anschließende biologische Behandlung)

Organisatorische Kriterien

- Erfordernis und Umfang von Voruntersuchungen
- Erfordernis von Genehmigungen (z. B. hinsichtlich Bau, Betrieb, Transport, Ausfuhr, Deponierung, Abwassereinleitung)
- Flächenbedarf bei In-situ-, On-site-Maßnahmen
- Infrastrukturbedarf bei In-situ-, On-site-Maßnahmen
- Verpackungsanforderungen bei Off-site-Maßnahmen
- Transportmöglichkeiten bei Off-site-Maßnahmen
- Öffentlichkeitsarbeit

Ökologische Kriterien

- Schadstoffbilanz:
 - (teilweise) Schadstoffzerstörung (Mineralisierung)
 - Schadstoffumwandlung (Metabolisierung)
 - Schadstoffverbleib (z. B. bei Separierung/Aufkonzentrierung, Schadstoffimmobilisierung und Deponierung)
 - Schadstoffemissionen über den Luftpfad
 - Schadstoffemissionen über den Wasserpfad
- Reststoffanfall (feste Reststoffe, Schlamm, Abwasser, verbrauchte Luftfilter)
- Energieeinsatz
- Lärmbelastung
- Störfallrisiken (insbesondere im Zusammenhang mit Schadstoffaufkonzentrierung und Entstehung gefährlicher Metaboliten)
- Transportrisiken bei Off-site-Verfahren
- Bodenmechanische und biologische Eigenschaften des behandelten Materials bei Wiedereinbau
- Verwertungsmöglichkeiten des behandelten Materials
- Gesamtökobilanz

Aufgrund der großen Anzahl zu beurteilender nicht-monetärer Bewertungskriterien empfiehlt sich jeweils für die drei Kriteriengruppen die Verwendung einer **Entscheidungsmatrix** (Tab. 6.3-1). Darin erfolgt für alle in Frage kommenden Sanierungsverfahren für jedes einzelne Kriterium eine Bewertung anhand einer Zahlen- oder Symbolskala (z. B. +, o, -). Die **Bewertungsskala** soll dabei eine **qualitative oder nachvollziehbare halbquantitative Einstufung** eines Verfahrens ermöglichen.

Beispiel für das Kriterium: Entwicklungsstand/Referenzen

Definition

Bewertet wird, inwieweit ein Verfahren technisch entwickelt ist und Praxiserfahrungen, die auf einen vorliegenden Sanierungsfall übertragbar sind, existieren.

- Bewertungsskala**
- + Technisch ausgereift und in der Praxis in einer Vielzahl von Sanierungsfällen nachweislich erprobt
 - o Technisch entwickelt, in der Praxis noch nicht oder nur in geringem Umfang großtechnisch erprobt
 - Befindet sich in der Entwicklung, Labor- oder Technikumsversuche lieferten erfolgversprechende Ergebnisse

Tabelle 6.3-1 Entscheidungsmatrix zur nicht-monetären Bewertung (Beispiel)

Technische Kriterien	Verfahren			
	A	B	C	D
Entwicklungsstand/Referenzen	+	-	+	o
Erfolgsaussichten	+	+	+	o
Verfügbarkeit	-	-	+	-
Gesonderte Materialvorbereitung	o	o	+	-
Durchsatzleistung/Sanierungsdauer	+	-	+	-
Erfolgskontrolle	+	o	+	o
Flexibilität	+	+	-	-
Kompatibilität	-	o	+	-
Summe	+ 5	+ 2	+ 7	+ 0
	- 2	- 3	- 1	- 5
Bilanz	+ 3	- 1	+ 6	- 5

Eine zu differenzierte Bewertungsskala ist zu vermeiden, da hierdurch eine quantitative Meßbarkeit vorgetäuscht wird und die anzustrebende Objektivität und damit die Nachvollziehbarkeit leidet. Im Einzelfall kann es jedoch sinnvoll sein, eine **Gewichtung einzelner Kriterien** mittels Multiplikator vorzunehmen. Da eine Gewichtung einzelner Kriterien das Gesamtergebnis entscheidend beeinflussen kann, ist eine entsprechende Begründung erforderlich; eine zu starke Gewichtung in Form zu hoher Multiplikatoren ist zu vermeiden, da hierdurch das Gesamtergebnis zu subjektiv beeinflußt wird.

Grundsätzlich ist für jedes Verfahren zu prüfen, ob eines der nicht-monetären Kriterien unter Berücksichtigung sämtlicher einzelfallspezifischer Rahmenbedingungen zum Ausschluß des Verfahrens führen kann. In Abhängigkeit standortspezifischer Rahmenbedingungen (Infra-

struktur, Platzangebot) können z. B. In-situ- oder On-site-Verfahren ausscheiden. Auch das Kriterium Verfügbarkeit kann beispielsweise bei einem eng gesteckten Sanierungszeitrahmen zum **Ausschluß von Verfahren** führen.

Durch entsprechendes Aufsummieren liefert die Entscheidungsmatrix die **Gesamtbilanz der nicht-monetären Bewertung** für jedes Verfahren. Dabei schneiden Verfahren einer Verfahrensgruppe (z. B. Gruppe der thermischen, biologischen bzw. Waschverfahren) häufig ähnlich ab, jedoch werden auch Unterschiede zwischen In-situ-, On-site- und Off-site-Verfahren deutlich. Bei einer nicht-monetären Bewertung, getrennt nach den drei Kriteriengruppen (technisch, organisatorisch, ökologisch), werden jedoch die diesbezüglichen Stärken und Schwächen einer Verfahrensgruppe deutlich.

6.3.5 Gesamtbewertung, Sanierungsvorschlag

Auf der Grundlage der angestellten Überlegungen und fachlichen Diskussion hinsichtlich der Sanierungsziele, der Kosten-Nutzen-Betrachtung und nicht-monetären Bewertung in Frage kommender Sanierungsverfahren sind in der Gesamtbewertung alle Teilaspekte für einen vorliegenden Sanierungsfall gegeneinander abzuwägen, um zu einem optimalen Sanierungsvorschlag zu gelangen.

Bei der **Beurteilung von In-situ-, On-site- oder Off-site-Verfahren** sind unabhängig von der Kosten-Nutzen-Betrachtung vor allem **organisatorische Kriterien** (z. B. Genehmigungserfordernisse, Flächenbedarf bzw. -angebot) und **ökologische Kriterien** (z. B. Emmissionsproblematik/öffentliche Akzeptanz) von entscheidender Bedeutung.

Bei der Entscheidungsfindung bezüglich eines einzelnen Sanierungsverfahrens sind für den Fall eines abgesteckten **Sanierungszeitrahmens**, unabhängig von der Verfahrensgruppe bzw. technischen Kriterien, die **Kriterien Verfügbarkeit und Behandlungsdauer** zu Beginn bzw. innerhalb des Sanierungszeitraums ausschlaggebend. Bevor es endgültig zum Ausschluß eines Verfahrens kommt, das sich möglicherweise nach anderen Kriterien als optimal darstellt, sind die Möglichkeiten der Platzschaffung in der Nähe (quasi on site) bzw. Möglichkeiten der **Zwischenlagerung** zur Erzielung eines **Zeitgewinns** für ein nicht rechtzeitig verfügbares Off-site-Verfahren zu prüfen.

Erfahrungsgemäß werden trotz einer umfassenden Materialbeschreibung im Zuge der Firmenanfrage häufig von Verfahrensanbietern, so auch der Bodenwäsche, noch **Voruntersuchungen** oder **Versuche im Technikumsmaßstab** für sinnvoll erachtet bzw. gefordert. Erst danach sind verbindliche Angaben zur Reinigungsleistung und zu den Behandlungskosten bezüglich eines vorliegenden Sanierungsfalles möglich. Die mit Voruntersuchungen oder Vorversuchen verbundenen Kosten werden i. d. R. bei Auftragserteilung später angerechnet. Gegenüber den Unterschieden bei den im Zuge der Kostenschätzung für die einzelnen Verfahren ermittelten Gesamtkosten einer Sanierung sind die Investitionen in Voruntersuchungen bzw. Versuche verhältnismäßig gering und daher zur Absicherung der Gesamtbewertung, die letztlich zur Sanierungsentscheidung führt, grundsätzlich zu empfehlen. Wenn Voruntersuchungen oder Technikumsversuche für verschiedene Verfahren durchzuführen wären, sind sie zum Teil als Fehlinvestitionen anzusehen, da letztlich meist nur ein Verfahren zum Einsatz gelangt. Es können sich jedoch durch die Priorisierung eines kostengünstigen Verfahrens, nachdem es

seine Wirksamkeit im Vorversuch unter Beweis gestellt hat, Einsparungen in beträchtlicher Höhe ergeben.

Spätestens bei der endgültigen Auswahl eines Sanierungsverfahrens im Zuge der Sanierungsentscheidung (Kap. 6.4) müssen die Sanierungsziele behördlich festgelegt werden. Die damit verbundenen **Sanierungsgrenzwerte** sind die **Grundlage für Massenermittlungen** und die **Ausschreibung** der Sanierungsmaßnahme im Zuge der Sanierungsplanung.

Im Hinblick auf die **Gesamtbewertung von Bodenwaschverfahren gegenüber den konkurrierenden thermischen oder biologischen Verfahren** sollen nachfolgend einige **Erfahrungswerte und Entscheidungshilfen** angegeben werden (In-situ-Verfahren seien aufgrund der mangelnden Vergleichbarkeit zu On-site- und Off-site-Verfahren hierbei ausgeklammert).

Die **Gesamtkosten** für eine Sanierung durch eine Bodenwäsche sind starken Schwankungen unterworfen, abhängig vor allem vom Reststoffanfall (Menge, Schadstoffgehalte) und den damit verbundenen Entsorgungskosten. Der **spezifische Gesamtpreis** für eine Bodenwäsche (Sanierungsgesamtpreis pro Tonne) liegt i. d. R. niedriger als der einer thermischen Behandlung, kann jedoch in Abhängigkeit von Kontaminationsgrad, den Materialeigenschaften und den gesteckten Reinigungszielen den Kostenbereich thermischer Verfahren erreichen. Gegenüber biologischen Verfahren ermittelt sich der spezifische Gesamtpreis einer Bodenwäsche in der Regel höher. Es ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Gesamtkosten bei biologischen Verfahren von der Sanierungsdauer abhängig sind. Diese kann aber zum Zeitpunkt der Vorplanung nur anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

Die **Wirksamkeit** einer Bodenwäsche im Hinblick auf die Kosten-Nutzen-Betrachtung ist je nach Kontaminationssituation eines Sanierungsfalles besser, gleichwertig oder schlechter als die der konkurrierenden Verfahren einzuschätzen.

Der **Entwicklungsstand** eines Verfahrens, die **Referenzen** und damit verbunden die **Erfolgsaussichten** für einen vorliegenden Sanierungsfall sind aufgrund der zahlreichen Anbieter von Bodenwaschverfahren von Bieter zu Bieter sehr unterschiedlich und ebenso wie bei den biologischen Verfahren schwieriger zu beurteilen als bei thermischen Verfahren.

Die **Verfügbarkeit** von Bodenwaschverfahren ist aufgrund in Betrieb befindlicher stationärer Anlagen und zahlreicher Anbieter semimobiler und mobiler On-site-Anlagen gegenüber biologischen Verfahren ähnlich und gegenüber thermischen Verfahren deutlich besser einzuschätzen.

Durchsatzleistung und damit verbunden die **Sanierungsdauer** einer Bodenwäsche ist ähnlich wie bei den thermischen Verfahren großen Schwankungen unterworfen (vgl. Kap. 4), die Sanierungsdauer ist jedoch gegenüber biologischen Verfahren deutlich geringer anzusetzen.

Der Begriff Schadstoffausbringen bedeutet die mit einem Sanierungsverfahren entfernbare Schadstoffmenge aus einer kontaminierten Originalsubstanz analog zum Begriff Erzausbringen bei der Erzaufbereitung. Das Schadstoffausbringen ist somit das Gegenstück zum Verbleiben der nicht entfernbaren Restschadstoffmenge im behandelten Material. Zu berücksichtigen sind verfahrensabhängige Massendifferenzen zwischen Originalsubstanz und Behandlungsprodukt:

- Bodenwäsche: Massenreduzierung aufgrund Abtrennung des Feinanteils,
- thermische Behandlung: Massenreduzierung durch Überführung flüchtiger und verdampfbarer und gasförmiger (Reaktions-) Produkte in die Abluft,
- biologische Behandlung: Massenerhöhung aufgrund Substratzugabe.

Die **Kontrollierbarkeit** des Sanierungserfolges ist bei allen Verfahren gewährleistet, gestaltet sich jedoch bei der Bodenwäsche und bei thermischen Verfahren einfacher als bei biologischen Verfahren.

Gegenüber **Inputschwankungen** hinsichtlich Kontamination (Materialeigenschaften, Feinkornanteil, Kornverteilung) reagiert die Bodenwäsche im Hinblick auf die zu erzielende Reinigungsleistung sensibler als eine thermische Behandlung. Dies gilt in ähnlicher Form für biologische Verfahren, sofern das zu behandelnde Material nicht ausreichend homogenisiert wird.

Die Erfordernis einer gesonderten **Materialvorbereitung** zur Bodenwäsche und der **Flächen- und Infrastrukturbedarf** variieren je nach Anlage stark und kann daher nur im Einzelfall beurteilt werden.

Die **Kompatibilität** einer Bodenwäsche zu nachgeschalteten Maßnahmen, z. B. einer biologischen Behandlung ist gut bzw. sogar wünschenswert, um nicht auswaschbare Restschadstoffgehalte weiter abzubauen. Manche Verfahren (System Possehl) sind bereits entsprechend ausgerichtet.

Bei den organisatorischen Kriterien ist die Erfordernis und der Umfang von **Voruntersuchungen** (an Originalmaterial) zur Absicherung prognostizierter Reinigungsleistungen und Behandlungskosten ebenso wie bei biologischen Verfahren deutlich höher einzuschätzen als bei thermischen Verfahren.

Der **Genehmigungsaufwand** für Off-site-Bodenwaschverfahren ist ebenso wie für eine off site thermische Behandlung verhältnismäßig gering (Transport, Ein-/Ausfuhrgenehmigung). Die Genehmigung für On-site-Bodenwaschverfahren ist nach der Novellierung der BIMSchV (vgl. Kap. 6.5.2.3) in einem überschaubaren Zeitraum realisierbar. Dies trifft ebenfalls für biologische On-site-Verfahren zu; die Genehmigung thermischer On-site-Verfahren im Rahmen eines Sanierungsfalles ist sehr aufwendig und wenig aussichtsreich.

Verpackungsanforderungen und **Fragen des Transports** spielen bei Off-site-Maßnahmen eine Rolle. Hier sind zum einen die Vorgaben der Gefahrstoffverordnung, gegebenenfalls der Ein- und Ausfuhrbehörden sowie der Verfahrensanbieter zu berücksichtigen.

Je nach politischer Brisanz eines Sanierungsfalles ist vor allem für On-site-Verfahren von einem erhöhten Aufwand an **Öffentlichkeitsarbeit** auszugehen. Anhand ökologischer Kriterien läßt sich die öffentliche und politische Akzeptanz eines Sanierungsverfahrens abschätzen. Hier kann vor allem eine **Schadstoffbilanz**, verbunden mit Fragen nach Emissionen und Risiken, zu einer Bewertung einzelner Sanierungsverfahren oder Verfahrensgruppen führen. Grundsätzlich ist eine Entfernung von Schadstoffen aus dem Gesamtsystem (**Schadstoffzerstörung**) höher zu bewerten als eine **Immobilisierung**, die stets mit der Frage nach dem Langzeitverhalten verbunden ist, und weitaus höher als der **Schadstoffverbleib** im Gesamtsystem. Bei einem Schadstoffverbleib ist die **Aufkonzentrierung** in Reststoffe (Volu-

menreduktion) in Verbindung mit der **kontrollierten Umlagerung** (Deponierung) aufgrund beschränkter Deponiekapazitäten wiederum höher zu bewerten als eine direkte Deponierung. Eine **unkontrollierte Umlagerung** über **Emissionen**, verbunden mit einer **Vermischung/Verdünnung** in anderen Schutzgütern (z. B. Luft, Wasser), ist nicht als Sanierung anzusehen und nach Stand der Technik zu vermeiden. Die **Entstehung gefährlicher Metabolite** kann in toxikologischer Hinsicht ebenfalls als Schadstoffverbleib (unter Umständen unbemerkt) aufgefaßt werden, wobei nicht auszuschließen ist, daß Metaboliten ein höheres Gefährdungspotential als den Ausgangsstoffen zukommt. Wesentlich ist, ob die Bildung von Metaboliten im zu behandelnden Material oder in einem Reststoff auftritt.

Die Aufstellung einer quantifizierten **Gesamtökobilanz** (Schadstoffbilanz, Sekundärfolgen, Energiebilanz) ist äußerst aufwendig und schwierig. In der Regel wird man einzelfallbezogen qualitative Einschätzungen der Verhältnismäßigkeit von erzielbarem Sanierungseffekt und erforderlichem Aufwand (Energieeinsatz, Transport) sowie den Sekundärfolgen (Emissionen, Metabolitenbildung) vornehmen.

Im Hinblick auf den **Energieeinsatz** als ökologisches Kriterium nimmt die Bodenwäsche eine Mittelstellung zwischen thermischen Verfahren, die vor allem teure Stützbrennstoffe benötigen, und den biologischen Verfahren ein. Weite Transportwege bei Off-site-Verfahren wirken sich nachteilig auf die Energiebilanz aus.

Mit der Anlagengröße und Verfahrenstechnik nehmen die **Störfallrisiken** zu. Bleibt ein Störfall zunächst unbemerkt, kann es zur Überschreitung von Emissionsgrenzwerten und zu Fehlchargen mit zu hohem Restschadstoffgehalt kommen. Unter Umständen ist bis zur Reparatur ein Betriebsstopp erforderlich. Die Störfallrisiken einer Bodenwäsche werden ebenso wie die einer thermischen Behandlung aufgrund des großen technischen Aufwandes höher eingeschätzt als bei einer biologischen Behandlung. Bei entsprechender Überwachung ist jedoch eine schnelle Reaktion und Reparatur möglich.

Transportrisiken sind bei Off-site-Verfahren relevant; sie sind abhängig von der Verpackung, vom Transportweg und der Transportweite.

Die **bodenmechanischen Eigenschaften** (z. B. Dichte, Verdichtungsverhalten, Festigkeit) eines in Form einer Bodenwäsche **behandelten Materials** sind aufgrund der Klassierung des Ausgangsmaterials deutlich verändert, müssen jedoch im Hinblick auf ein Baustoffrecycling nicht ungünstig sein. Der Einfluß thermischer Verfahren auf die bodenmechanischen Eigenschaften ist in Abhängigkeit der Temperatur sehr unterschiedlich (Versinterungen, Keramisierung bei Hochtemperaturverbrennung). Der Einfluß biologischer Verfahren auf die bodenmechanischen Eigenschaften ist abhängig von der Materialvorbereitung (z. B. Substratzugabe, Auflockerung).

Die **biologischen Eigenschaften** eines Bodens werden durch eine Bodenwäsche i. d. R. stark beeinträchtigt, so daß eine Bepflanzung erst nach einer entsprechenden Strukturverbesserung und biologischen Reaktivierung erfolgen kann. Dies gilt umsomehr für eine thermische Behandlung, nach der ein Boden biologisch tot vorliegt. Nach einer biologischen Behandlung liegt ein biologisch hochaktives Material vor, dessen ökologische Bodenfunktion (C : N : P - Verhältnis, Huminstoffe, pH-Wert, Redoxpotential) im Einzelfall zu bestimmen ist.

Die Möglichkeiten der **Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials** können häufig im Zuge der Vorplanung nicht abschließend geklärt werden, da noch Unsicherheiten bezüglich des Restschadstoffgehaltes nach einer Behandlung bestehen. Unter entsprechenden Vorbehalten werden von manchen Off-site-Verfahrens Anbietern jedoch Verwertungs- bzw. Deponierungsmöglichkeiten in Aussicht gestellt. Für den Fall einer Rücknahmeverpflichtung des behandelten Materials bzw. für On-site-Verfahren ist die Frage der nachgeschalteten Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials spätestens im Zuge der Sanierungsentscheidung mit den Fachbehörden, Verwertungsfirmen bzw. Deponiebetreibern gegebenenfalls nach weiteren Voruntersuchungen zu beantworten. Wesentlich sind hierbei die voraussichtlich anfallenden Massen, die Schadstoffrestbelastung und entsprechende Zulassungskriterien in Form konkreter Grenzwerte.

Aus der Gesamtbewertung alternativer Sanierungsverfahren resultiert ein **Sanierungsvorschlag**. Der Sanierungsvorschlag stellt ein Sanierungskonzept dar, das durchaus noch verschiedene Sanierungsverfahren vergleichbarer Priorität beinhalten kann. Dies ist besonders dann der Fall, wenn Kosten-Nutzen-Aspekte auf der einen Seite und nicht-monetäre Stärken und Schwächen einzelner Sanierungsverfahren auf der anderen Seite keine eindeutige (objektive) Priorisierung zulassen. Der Sanierungsvorschlag ist ferner unter dem Vorbehalt zu sehen, daß noch erforderliche Voruntersuchungen und noch ausstehende endgültige Klärungen von Sanierungszielen sowie Verwertungs-/Deponierungsmöglichkeiten für das behandelte Material den getroffenen Annahmen und Einschätzungen entsprechen.

6.4 Sanierungsentscheidung

Die Phase der Sanierungsentscheidung beginnt mit der **Vorlage des Sanierungsvorschlags**, der üblicherweise **durch ein fachkundiges Ingenieurbüro** erarbeitet wurde, beim öffentlichen oder privaten Auftraggeber. Beinhaltet ein Sanierungsvorschlag verschiedene Sanierungsvarianten, können sich diese u. U. deutlich in den Kosten aber auch in den Zeitgängen (Genehmigungsdauer, Sanierungsdauer) oder noch vorhandenen Unwägbarkeiten (Materialübernahme nach Behandlung) unterscheiden. Auf der Auftraggeberseite besteht daher zunächst ein Klärungsbedarf, ob z. B. bestehende Zeit- oder sonstige Planungen bezüglich der Sanierung bzw. des Sanierungsgrundstücks, die als Rahmenbedingungen bei der Vorplanung berücksichtigt wurden, nach wie vor einzuhalten sind oder ob z. B. aus Kostengesichtspunkten davon abgewichen werden kann. Im einzelnen sind folgende Punkte für die Sanierungsentscheidung zu klären:

- Finanzielle Mittel für die Gesamtmaßnahme.
- (Finanzielle) Bereitschaft und Zeit für Voruntersuchungen (z. B. Waschversuche)
- Zeitrahmen für die Gesamtmaßnahme
- Zeitgewinn durch Zwischenlagerung
- Verbindung der Sanierungsmaßnahme mit bestehenden Nutzungen (Bewahrung, Beeinträchtigung, Aufgabe)
- Verbindung der Sanierungsmaßnahme mit geplanten Nutzungen (Bewahrung, Modifizierung)
- Stellenwert nicht-monetärer technischer, organisatorischer oder ökologischer Kriterien

Auf der Grundlage der endgültigen Rahmenbedingungen für die Sanierung wird insbesondere unter Berücksichtigung standortspezifischer (geplanter) Nutzungen und der Verhältnismäßigkeit von Sanierungseffekt und Kosten in Abstimmung mit den zuständigen Fachbehörden die Sanierungsentscheidung getroffen.

Sie beinhaltet:

- die behördliche Festlegung der Sanierungsziele und ggf. die Festlegung von Grenzwerten für die Verwertung (z. B. Wiedereinbau vor Ort, anderweitige Verfüllung),
- die endgültige Auswahl des Sanierungsverfahrens bzw. der Sanierungsverfahren.

In komplizierten Sanierungsfällen, z. B. mit nach Art und Höhe unterschiedlichen Kontaminationsbereichen ist es durchaus möglich, daß 2 verschiedene Sanierungsverfahren (z. B. On-site-Bodenwäsche und off site thermische Behandlung) zur Entscheidung und damit in die Planungs- und Ausführungsphase gelangen.

6.5 Sanierungshauptplanung

6.5.1 Ausführungsplanung

Die Ausführungsplanung als erster grundsätzlicher Verfahrensschritt der Sanierungshauptplanung umfaßt die detaillierte Erarbeitung der Sanierungsmaßnahme. Der Sanierungsablauf muß anhand genauer Berechnungen und Vorgehenskonzepte geplant werden.

Hierzu gehören:

Massenermittlung des zur Behandlung vorgesehenen Materials

Die Massenermittlung erfolgt auf der Grundlage der Sanierungsgrenzwerte anhand den aus den Erkundungsstufen gewonnenen Daten hinsichtlich Kontamination und Bodeneigenschaften. Die kontaminierten Massen werden entsprechend der horizontalen und vertikalen Abgrenzung ermittelt. Es empfiehlt sich, Schadstoffbelastungskarten schichtweise über die Tiefe zu erstellen und in bautechnisch sinnvollen Abstufungen für jede Tiefenstufe die Massen separat zu ermitteln. Dies dient dazu, die aushubbedingte Vermengung des Materials so gering wie möglich zu halten.

Ermittlung der anfallenden Bodenarten und der relevanten Korngrößen (je nach Trennschnitt des Verfahrens)

Anhand der geologischen und bodenmechanischen Ansprache der Schichtfolge aus den Aufschlüssen (Bohrungen, Schürfe, Sondierungen) und den an den entnommenen Proben im Labor erstellten Kornverteilungen lassen sich die anfallenden Bodenarten und die Gesamtmenge an Feinstkornanteil ermitteln. Die Grenzkorngröße, welche zur Ermittlung herangezogen wird, ergibt sich aus dem Separationstrennschnitt des zum Einsatz kommenden Verfahrens. Dieser variiert je nach Anlagentechnik zwischen 0,005 und 0,063 mm.

Der Feinstkornanteil, der als Restschadstoffkonzentrat nach der Behandlung vorliegt, weist i. d. R. verfahrenstechnisch einen höheren Wassergehalt auf als im erdfeuchten Zustand. Dadurch erhöhen sich die zu entsorgenden Massen, da i. d. R. bei der Entsorgung bzw. weiteren Behandlung die Tonnage mittels Wiegung herangezogen wird. Dementsprechend ist bei der Berechnung dieser Tonnagen aus der Kubatur eine erhöhte Feuchtwichte zu berücksichtigen.

Durchsatzleistung des Verfahrens und Zeitbedarf der Sanierungsmaßnahme, Bauzeitenplan

Aus der Gesamtmasse des zu behandelnden Bodens und dem enthaltenen Feinstkornanteil läßt sich der Durchsatz und daraus die zur Sanierung benötigte Zeit ermitteln.

Der Bauzeitenplan stützt sich im Fall einer Sanierungsmaßnahme auf die Sanierungsdauer, die jedoch von der Durchsatzleistung der Sanierungsanlage abhängt. Daran lassen sich die im Umfeld nötigen Arbeiten koordinieren und überwachen, wie z. B. Materialvorbereitung (Vorklassieren, Brechen), Verlauf der Aushub- und Abbrucharbeiten. Dies garantiert eine optimale Auslastung der eingesetzten Gerätschaften und dient somit in hohem Maße der Wirtschaftlichkeit.

Arbeitsschutzkonzepte (Schwarz-/Weißbereiche und Dekontaminationseinrichtungen, Sicherheitskoordinator, Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen)

Bei der Sanierung von kontaminierten Standorten ist die Aufstellung eines Arbeitsschutzkonzeptes notwendig. Dies umfaßt die Einrichtung einer Schwarz-Weiß-Anlage, die als Schleuse einzurichten ist. Im Normalfall handelt es sich um zwei Baustellencontainer mit einer zwischengeschalteten Naßzelle, um eine Schadstoffverschleppung aus dem Gefahrenbereich (Schwarzbereich) in den Außenbereich (Weißbereich) zu verhindern.

Unter Dekontaminationseinrichtungen sind Anlagen zu verstehen, die dazu dienen, Arbeitsgeräte aus dem Gefahrenbereich zu reinigen (Fahrzeugwaschplätze), ebenso wie Transportfahrzeuge, die die Baustelle kontinuierlich verlassen (sog. Reifenwaschanlagen).

Der Sicherheitskoordinator ist eine fachkundige Person, der die Einweisung des Personals vornimmt und die Einhaltung der einschlägigen Vorschriften und der vorgegebenen Arbeitsschutzmaßnahmen überwacht. Zusätzlich werden vom Sicherheitskoordinator auch Arbeitsplatzmessungen durchgeführt zur Überwachung der einschlägigen Grenzwerte (z. B. max. Arbeitsplatzkonzentration MAK).

Das im Gefahrenbereich eingesetzte Personal muß sich vor Beginn der Arbeiten einer arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung (Grunduntersuchung) unterziehen. Für Personen, die Arbeiten unter Zuhilfenahme eines Atemschutzgerätes ausführen, ist eine zusätzliche Vorsorgeuntersuchung durchzuführen. Es muß gewährleistet sein, daß die arbeitsmedizinische Untersuchung der für die Baustelle spezifischen Gefahrstoffsituation angepaßt ist.

Beprobungsumfang und Probennahmeverfahren zur Erfolgskontrolle

Ein wesentlicher Punkt bei der Durchführung einer Sanierungsmaßnahme ist die Erfolgskontrolle zur Überwachung der vorgegebenen Reinigungswerte. Deshalb sind bereits im Vorfeld die Häufigkeit der Beprobung und der Umfang der chemischen Analysen festzulegen (z. B.

Probenentnahme nach einer bestimmten Tonnage gereinigten Materials). Darüberhinaus ist auch das Probennahmeverfahren zu definieren und zu vereinheitlichen.

Aufstellen eines endgültigen Entsorgungskonzeptes für die Reststoffentsorgung zur Beschaffung aller erforderlichen Genehmigungen (Transportgenehmigung, Annahmerklärungen der Deponien bzw. Entsorgungseinrichtungen)

Es ist ein vollständiges Entsorgungs- und Verwertungskonzept des gereinigten Materials als auch der Reststoffe anzufertigen, um alle notwendigen Annahmeerklärungen zu beschaffen und um einen reibungslosen Sanierungsablauf gewährleisten zu können, bzw. auch um den Verlauf und den Verbleib der einzelnen Materialströme nachvollziehen zu können.

Kompetenzverteilungen bei der Sanierung beteiligter Firmen und Personen

Die Stellung des Sicherheitskoordinators und dessen Aufgabengebiet bzw. Kompetenzen im Hinblick auf die zum Einsatz kommende Sanierungsanlage muß eindeutig geklärt werden. Weiterhin ist zu bestimmen, durch welche Institution die Überwachung des Sanierungserfolges und die Freigabe des gereinigten Materials zu erfolgen hat bzw. wer für die ordnungsgemäße Abwicklung der Reststoffentsorgung zuständig ist.

Weiterhin sind genaue Ausführungs- und Detailpläne zu erstellen sowie alle Begleitmaßnahmen zum ausgewählten Sanierungsverfahren zu planen:

Baustelleneinrichtungsplan

Aus den Baustelleneinrichtungsplänen werden auch die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen (Ver- und Entsorgungseinrichtungen) ersichtlich. Diese Pläne dienen dazu, die reibungslose Zu- und Abfahrt zur Baustelle abzusprechen und zu planen. Die Baustelleneinrichtungspläne sind mit Bestandteil der Genehmigungsunterlagen.

Plan der notwendigen Infrastruktureinrichtungen (Ver- und Entsorgungseinrichtungen)

Die Infrastruktureinrichtungen beschränken sich im wesentlichen auf die Ver- und Entsorgungseinrichtungen. Hier ist besonders die erlaubte Menge an einzuleitendem Abwasser aus der Behandlungsanlage zu berücksichtigen und die daraus erforderlichen baulichen Maßnahmen. Zusätzlich ist der Energieeinsatz für die Anlage zu planen, um unnötige Emissionen aus Aggregaten zur Stromerzeugung für die Anlage zu vermeiden.

Ist eine Stromerzeugung mittels Aggregaten nicht zu vermeiden, ist im Vorfeld ggf. eine Immissionsprognose erstellen zu lassen, um bauliche Maßnahmen an der Anlage (z. B. Erhöhung des Abgaskamins bzw. Abgasreinigung) durchführen zu können.

Planung des Erdaushubs

Im Vergleich zu Aushubmaßnahmen in unkontaminierten Bereichen erfordert der Erdaushub bei einer Sanierung besondere Sorgfalt und Fachkunde bei der Ausführung und eine sorgfältige Planung.

Vorrangiges Ziel ist die Vermeidung von Schadstoffverschleppungen bzw. von Vermischungen unterschiedlicher Schadstoffkategorien. Grundlage für die Realisierung in der Praxis sind zum einen die Schadstoffbelastungskarten aus der Erkundung, zum anderen die sensorische Beurteilung des Materials unmittelbar beim Aushub.

Unterschiedlich belastetes und voraussichtlich unbelastetes Material ist zu separieren und chargenweise bis zum Vorliegen der begleitenden chemischen Analytik vom Abtransport zurückzuhalten. Verwechslungsmöglichkeiten unterschiedlicher Materialkategorien sind durch organisatorische Maßnahmen (z. B. räumliche Trennung, Farbkodierungen) weitestgehend auszuschalten.

Auch die Vorgehensweise bei besonderen Ereignissen (z. B. unerwarteten Schadstoff-Funden) muß geplant werden, um angemessen (ggf. besondere Schutzmaßnahmen) und schnell (geringe Baustillstandszeiten) bis zur Klärung des Sachverhaltes reagieren zu können.

Verfahrensablaufplan

Die Verfahrensablaufpläne zeichnen die einzelnen Materialströme nach, um aus deren Verlauf mögliche zusätzliche Baumaßnahmen im Rahmen der Baustelleneinrichtung planen zu können. Darunter fallen in erster Linie Bereitstellungsflächen für kontaminiertes Material auf der Inputseite der Sanierungsanlage, die als Pufferlager dienen und Flächen auf der Outputseite der Sanierungsanlage, auf der Material gelagert werden kann bis die chemische Analyse zur Erfolgskontrolle vorliegt. Weiterhin müssen Flächen eingeplant und ggf. auch befestigt werden, auf denen die Restschadstoffkonzentrate bis zum Vorliegen der chemischen Analyse bzw. bis zum Abtransport gelagert werden können.

Zum Verfahrensablaufplan gehört auch ein vollständiges Entsorgungs- bzw. Verwertungskonzept, aus dem der Verbleib der einzelnen Materialströme ersichtlich wird.

Plan über die Transportwege

Die Transportwege sind so anzulegen, daß keine Überkreuzung von Schwarz-Weiß-Verkehr stattfindet, d. h. Fahrzeuge, die im kontaminierten Bereich arbeiten (Lade- und Transportfahrzeuge), dürfen nicht die Wege der Fahrzeuge im unbelasteten Bereich benutzen, um Verschleppungen der Schadstoffe zu verhindern.

Die Begleitmaßnahmen umfassen:

Öffentlichkeitsarbeit

Information der Anwohner bzw. von nicht zwangsläufig mit der Sanierungsmaßnahme befaßten kommunalen Körperschaften.

Beweissicherungsverfahren

Aufnahme aller bereits vorhandenen Gebäudeschäden im Umfeld der Baustelle. Dies ist besonders bei Abbrucharbeiten von großer Bedeutung, um spätere Schadensersatzansprüche zu minimieren.

Aufstellung eines Meßprogrammes (Festlegung der Lage von Meßpunkten und Meßintervallen) auf der Altlast bzw. Altstandort und in der Umgebung, insbesondere:

- **Lärmmessung**
Die Werte der TA Lärm müssen eingehalten werden. Es kann unter Umständen im Vorfeld die Erstellung einer Lärmprognose notwendig werden, um ggf. weitere Schutzmaßnahmen (z. B. Einhausungen) planen zu können.
- **Luftstaubmessung**
Luftstaubmessungen dienen in erster Linie dem Arbeitsschutz und der Kontrolle einer Schadstoffverschleppung und Verschmutzung durch Staubentwicklung aus dem Sanierungsgrundstück hinaus. Bei Bedarf können zusätzliche Maßnahmen der Staubunterbindung eingesetzt werden (z. B. kontinuierliche Berieselung der Fahrstraßen, Abbruch unter Einhausungen).
Dementsprechend können sie auch als Beweissicherung herangezogen werden, um Schadensersatzansprüche, z. B. bei Verschmutzungen an Gebäudefassaden, zu unterbinden.
- **Luftschadstoffmessung**
Luftschadstoffmessungen dienen wiederum in erster Linie dem Schutz der eingesetzten Arbeiter und der umliegenden Bevölkerung. Diese Messungen dienen gleichzeitig zur Dokumentation der emittierten Schadstoffe und zur Erfolgskontrolle der eingesetzten Arbeitsschutzkonzepte. Bei Überschreitungen von Grenzwerten (z. B. TA Luft, MAK-Werten) können während der Sanierungsausführung zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden.

Für die Durchführung einer Sanierung von kontaminierten Altstandorten gibt es keine "schubladenfertigen" Lösungen, vielmehr bedarf jede Sanierung einer lückenlosen Zusammenarbeit aller Beteiligten und Flexibilität zur Beseitigung von auftretenden Störungen und Problemen.

6.5.2 Genehmigungsplanung, behördliche Zulassungsverfahren

6.5.2.1 Überblick über relevante Rechtsbereiche

Immissionsschutzrecht

Die 4. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzrechts (BImSchV) enthält abschließend eine Auflistung der Anlagen, die genehmigungsbedürftig sind.

Mit der Änderung der 4. BImSchV vom 28.08.91 wurden erstmalig im Anhang der genehmigungsbedürftigen Anlagen unter Ziffer 8.7 Bodenreinigungsanlagen wie z. B. Bodenwaschanlagen aufgenommen.

In Spalte 1 heißt es:

*"Anlagen zur Behandlung von verunreinigtem **Boden**, der **nicht ausschließlich am Anlagenstandort** entnommen wird, auch soweit den Umständen nach zu erwarten ist, daß sie weniger als während der sechs Monate, die auf die Inbetriebnahme folgen, an demselben Ort betrieben werden."*

In Spalte 2 heißt es:

*"Anlagen zur Behandlung von verunreinigtem Boden, der **ausschließlich am Anlagenstandort** entnommen wird, auch soweit den Umständen nach zu erwarten ist, daß sie weniger als während der sechs Monate, die auf der Inbetriebnahme folgen, an dem selben Ort betrieben werden."*

Mit der Unterteilung der 4. BImSchV in Spalte 1 und 2 werden die genannten Anlagen zwei Zulassungsverfahren zugeordnet:

- **Genehmigungsverfahren nach §10 BImSchG (Spalte 1)**
Das Genehmigungsverfahren nach §10 BImSchG ist ein förmliches Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung. Die Zeitdauer für die Durchführung eines solchen Zulassungsverfahrens beträgt i. d. R. 6 bis 9 Monate, wenn keine Einwendungen vorliegen.
- **Vereinfachtes Verfahren nach §19 BImSchG (Spalte 2)**
Das vereinfachte Verfahren nach §19 BImSchG ist ein Verfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung, welches i. d. R. ca. 3 Monate in Anspruch nimmt.

Im Gegensatz zu anderen im Anhang der 4. BImSchV genannten Anlagen sind mobile Bodenbehandlungsanlagen unabhängig von der Anlagenkapazität auch dann nach §10 oder §19 BImSchG genehmigungsbedürftig, wenn sie weniger als 6 Monate am selben Ort betrieben werden.

Nicht genehmigungsbedürftig sind Anlagen, die nicht gewerblichen Zwecken dienen und die nicht im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden. Auch diese Anlagen sind jedoch nach §22 BImSchG (Betreiberpflichten) so zu betreiben, daß schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden und beim Betrieb anfallende Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können.

Da die im vorliegenden Handbuch beschriebenen Bodenwaschanlagen i. d. R. gewerblichen Zwecken dienen, sind sie als genehmigungspflichtige Anlagen gemäß Ziffer 8.7, 4. BImSchV, Spalte 1 oder 2 einzuordnen. Die Ziffer 8.7 der 4. BImSchV greift jedoch nur dann, wenn das zu behandelnde Material, wenngleich verunreinigt, als Boden und nicht als Abfall aufgefaßt wird. Eine Begründung der Einstufung auch hoch belasteten Materials als Boden kann darin liegen, daß es nach der Behandlung und Erreichen der Sanierungsziele wiedereingebaut und wieder seiner ursprünglichen Funktion zugeführt werden soll.

Unabhängig von Abgrenzungsschwierigkeiten des Begriffs Boden vom Begriff Abfall setzt Ziffer 8.7 der 4. BImSchV voraus, daß (Boden-)Material entnommen wird.

Anlagen, in denen feste Abfälle, auf die die Vorschriften des Abfallgesetzes Anwendung finden, aufbereitet werden, fallen unter die Ziffer 8.4 der 4. BImSchV.

Abfallrecht

Eine grundlegende Bedeutung hinsichtlich der Anwendbarkeit des Abfallrechts kommt der Frage zu, ob es sich bei dem zu behandelnden Material um Abfall im Sinne des AbfG handelt.

Der Begriff Abfall ist im §1 des Abfallgesetzes (AbfG) festgelegt, wobei zwischen den nachfolgenden Auslegungen zu unterscheiden ist:

- **Abfall im objektiven Sinn**

Abfall im objektiven Sinn liegt dann vor, wenn eine geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit notwendig ist (z. B. die in der Abfallbestimmungsverordnung und in der Reststoffbestimmungsverordnung ausgewiesenen Abfälle "ölverunreinigter Boden", "sonstige Böden mit schädlichen Verunreinigungen" und "Bauschutt und Erdaushub mit schädlichen Verunreinigungen").

- **Abfall im subjektiven Sinn**

Abfall im subjektiven Sinn liegt dann vor, wenn es das alleinige Ziel des Betreibers ist, sich der Sache zu entledigen (z. B. unbelasteter Erdaushub).

Das **Kriterium der Beweglichkeit** führt im Altlastenbereich zu Abgrenzungsschwierigkeiten. So handelt es sich bei Altablagerungen, selbst wenn eine Sanierung geboten ist, dann nicht um Abfall, wenn die abgelagerten Stoffe mit dem Grund und Boden vermischt oder verbunden und somit unbeweglich im Sinne des BGB sind.

Bei Altstandorten dürfte die Abfalleigenschaft regelmäßig nicht gegeben sein, da kontaminierte Böden unbeweglich sind.

Das Abfallrecht ist damit i. d. R. nicht anwendbar, wenn die Behandlung der Altlast im Rahmen eines In-situ-Verfahrens ohne vorherigen Bodenaushub erfolgt.

Wird eine Altlast im Zuge der Sanierung ausgekoffert, werden die Inhaltsstoffe eindeutig zu beweglichen Sachen, so daß eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit des Abfallrechts erfüllt ist. Kontaminierter Erdaushub muß jedoch nicht in jedem Fall Abfall im objektiven Sinne sein. Er wird es erst dann, wenn zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit die Anwendung der abfallrechtlichen Vorschriften geboten ist, also ohne Anwendung des Abfallrechts eine Beeinträchtigung zu besorgen wäre.

In Anwendung des objektiven Abfallbegriffs bedürfen nach §7 Abs. 1 die Errichtung und der Betrieb von **ortsfesten Abfallentsorgungsanlagen**, zu denen auch Abfallbehandlungsanlagen zu rechnen sind, der **Planfeststellung** inklusive Umweltverträglichkeitsprüfung gemäß §3 UVPG durch die zuständige Behörde.

Die Planfeststellung ist ein Verwaltungsverfahren, das alle öffentlich-rechtlichen Belange abschließend regelt und eine Beteiligung der Bevölkerung (Öffentlichkeit) am Verfahren vorschreibt. Hierzu werden die Genehmigungsunterlagen öffentlich ausgelegt. Die beteiligten Behörden und Träger öffentlicher Belange werden von der federführenden Genehmigungsbehörde zur schriftlichen Stellungnahme zu dem geplanten Vorhaben aufgefordert.

Die zuständige Behörde kann auf Antrag oder von Amts wegen (§7 Abs. 2 AbfG) anstelle eines Planfeststellungsverfahrens ein **Genehmigungsverfahren** durchführen, wenn die Errichtung und der Betrieb einer unbedeutenden Abfallentsorgungsanlage oder Versuchsanlage beantragt wird oder wenn mit Einwendungen nicht zu rechnen ist.

Der Unterschied zwischen dem Planfeststellungsverfahren und dem Genehmigungsverfahren besteht in einer Verkürzung des Beteiligungsverfahrens der Öffentlichkeit.

Als **unbedeutende Anlagen** wurden in der Vergangenheit Sanierungsanlagen eingestuft, die folgende Kriterien erfüllen:

- Anlagenbetrieb unabhängig vom Standort, d. h. es handelt sich um **mobile Anlagen**, die im **On-site-Betrieb** (d. h. Behandlung auf dem Grundstück) betrieben werden.
- Behandlung von **Material**, das **ausschließlich vom Standort** der Anlage stammt.
- **Betrieb** an einem Standort nur **über einen begrenzten Zeitraum**. Zur Abgrenzung des Behandlungszeitraumes wurde die Dauer von 6 Monaten herangezogen.

Die Zeitdauer eines abfallrechtlichen Zulassungsverfahrens, sei es Planfeststellung oder Genehmigungsverfahren, kann insbesondere bei fehlender Akzeptanz in der Öffentlichkeit für die beantragte Anlage 5 bis 10 Jahre betragen.

Wasserrecht

Gemäß Wasserhaushaltgesetz (§2 und §3 Abs. 2 WHG) bedürfen Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen, der behördlichen Erlaubnis (§7 WHG).

Hierunter fallen insbesondere In-situ-Maßnahmen zur Altlastensanierung wie z. B. die In-situ-Bodenwäsche, aber auch das Auskoffern von kontaminiertem Material innerhalb eines Wasser- oder Quellenschutzgebietes oder innerhalb des Einzugsbereichs einer Wassergewinnungsanlage oder im Bereich eines für die öffentliche Wasserversorgung nutzungswürdigen Grundwasservorkommens.

Weiterhin müssen **Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen und Behandeln wassergefährdender Stoffe** sowie Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft so beschaffen sein und so eingebaut, aufgestellt, unterhalten und betrieben werden, daß eine Verunreinigung der Gewässer oder eine sonstige nachteilige Veränderung ihrer Eigenschaften nicht zu besorgen ist (§19g WHG).

Anlagen, die nicht einfacher oder herkömmlicher Art sind, dürfen nur verwendet werden, wenn ihre Eignung von der zuständigen Behörde festgestellt ist. Im einzelnen handelt es sich bei der umweltrechtlichen Zulassung gemäß §19h WHG um eine **Eignungsfeststellung**. Das wasserrechtliche Zulassungsverfahren ist grundsätzlich für entsprechende Anlagen zur Altlastensanierung geeignet und zulässig. Die Zeitdauer der wasserrechtlichen Zulassung betrug in einem Praxisfall (semimobile On-site-Bodenwaschanlage) etwa 3 Monate.

Fallen im Rahmen einer Altlastensanierung, z. B. in Form einer Bodenwäsche, Abwässer an, sind die abwasserrechtlichen Regelungen (§7a, §18a WHG) zu beachten.

Baurecht, Naturschutzrecht

Neben den vorgenannten Rechtsbereichen werden bei Bodensanierungen i. d. R. auch das Baurecht und das Naturschutzrecht tangiert.

Gemäß Bauordnungsrecht (Landesbauordnung) bedürfen bauliche Anlagen einer baurechtlichen Genehmigung. Als bauliche Anlagen gelten auch Aufschüttungen und Abgrabungen sowie Abstell- und Lagerplätze.

Die baurechtliche Genehmigung beinhaltet die Auflagen hinsichtlich Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit insbesondere in kontaminierten Bereichen durch die zuständige Fachbehörde (Gewerbeaufsichtsamt).

Den Belangen des Naturschutzes und der Landschaftspflege kommt dann eine erhebliche Bedeutung zu, wenn der zu sanierende Standort selbst in einem besonders schutzwürdigen Bereich liegt oder im Zuge von Sanierungsmaßnahmen nachteilige Auswirkungen auf einen schutzwürdigen Bereich zu befürchten sind.

Im Detail soll auf die Regelungen des Bau- und Naturschutzrechts nicht weiter eingegangen werden.

6.5.2.2 Rechtliches Verhältnis der einzelnen Rechtsbereiche zueinander

Die möglichen Zulassungsverfahren der im vorangegangenen Kapitel genannten Rechtsbereiche haben in unterschiedlichem Maße eine sogenannte Konzentrationswirkung, d. h. sie umfassen die nach anderen Vorschriften erforderlichen Gestattungen mit, so daß von der zuständigen Behörde nur **eine** Entscheidung zu treffen ist.

Die abfallrechtliche Planfeststellung entfaltet volle Konzentrationswirkung, d. h. alle berührten Belange anderer Vorschriften werden berücksichtigt und entsprechende Gestattungen ersetzt.

Bei der abfallrechtlichen Genehmigung werden von der Konzentrationswirkung erfaßt:

- wasserrechtliche Genehmigung oder Eignungsfeststellung,
- baurechtliche Genehmigung,
- naturschutzrechtliche Gestattung.

Der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung kommt ebenfalls eine weitreichende Konzentrationswirkung zu (§13 BImSchG). Mit erfaßt werden:

- abfallrechtliche Gestattungen mit Ausnahme der Planfeststellung,
- wasserrechtliche Eignungsfeststellung, nicht jedoch sonstige wasserrechtliche Gestattungen,
- baurechtliche Genehmigung,
- naturschutzrechtliche Gestattung.

Sind für ein Vorhaben, das einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedarf, auch baurechtliche Entscheidungen der Baurechtsbehörde notwendig, so konzentriert sich die Zuständigkeit für beide Entscheidungen bei der zuständigen Wasserbehörde. Sind für ein Vorhaben, das einer wasserrechtlichen Genehmigung oder Eignungsfeststellung bedarf, auch baurechtliche Entscheidungen der Baurechtsbehörde notwendig, so konzentriert sich die Zuständigkeit für beide Entscheidungen bei der zuständigen Baurechtsbehörde.

6.5.2.3 Genehmigungspraxis bei Bodenwaschanlagen

Die behördliche Zulassung von Bodenwaschanlagen bedarf zunächst der Klärung der Frage, ob und welche behördlichen Genehmigungen durch welche Behörde(n) zu erteilen sind.

Diese Klärung gestaltet sich häufig schwierig, da die Zuordnung zu relevanten Rechtsbereichen schwierige Abgrenzungsfragen aufwirft (z. B. Unterscheidung Boden - Abfall), die nur im Einzelfall zu beurteilen sind. Weiterhin von entscheidender Bedeutung sind die Art des Verfahrens (In-situ-Verfahren, Verfahren mit vorherigem Aushub), die Mobilität der Anlage (ortsfest, mobil) und die Betriebsweise (Behandlung von Material nur eines oder mehrerer Standorte).

Entsprechend wurde in der Vergangenheit die Zulassung von Bodenwaschanlagen sehr unterschiedlich gehandhabt, jeweils stark abhängig vom Einzelfall.

Auch für die zukünftige Zulassung von Bodenwaschanlagen läßt sich keine einheitliche Vorgehensweise angeben. Grundsätzlich ist daher zu empfehlen, sich möglichst frühzeitig im Zuge der Sanierungsplanung mit den zuständigen Behörden abzustimmen und die Genehmigungserfordernisse für den Einzelfall zu eruieren. Entsprechend kann dann die Genehmigungsplanung ausgerichtet werden.

6.5.3 Ausschreibung und Vergabe

Die **Ausschreibung und Vergabe** von Bauleistungen wird im Detail durch die **Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB)** geregelt. Bauleistungen sind nach der VOB definiert als Bauarbeiten jeder Art, durch die eine bauliche Anlage hergestellt, instandgehalten, geändert oder beseitigt wird. Der umfassende Begriff "Bauarbeiten jeder Art" ist zu unterteilen in Arbeiten an Bauwerken und Arbeiten an einem Grundstück. Sanierungsmaßnahmen wie z. B. Aushub, Dekontamination und Wiedereinbau von schadstoffbelastetem Boden im Zuge von Altlasten/Umweltsanierungen sind als Baumaßnahmen an einem Grundstück zu betrachten.

In den folgenden Kapiteln sollen zunächst einige grundlegende Inhalte der VOB im Hinblick auf die Ausschreibung und Vergabe von Sanierungsleistungen wiedergegeben und kommentiert werden; abschließend wird speziell auf die Leistungsbeschreibung einer Bodenwäsche eingegangen.

6.5.3.1 Arten der Vergabe

Grundsätzlich sollen Bauleistungen an fachkundige, leistungsfähige und zuverlässige Unternehmer vergeben und der Wettbewerb angestrebt werden. Nach der VOB/A sind **drei Arten der Vergabe** zu unterscheiden:

- öffentliche Ausschreibung
- beschränkte Ausschreibung
- freihändige Vergabe

Öffentliche Ausschreibung

Bei der öffentlichen Ausschreibung werden Bauleistungen in einem **förmlichen Verfahren** nach **öffentlicher Aufforderung einer unbeschränkten Zahl von Unternehmern** zur Einreichung von Angeboten (z. B. in Tageszeitungen, amtlichen Veröffentlichungsblättern oder Fachzeitschriften) vergeben. Dadurch findet ein völlig freier Wettbewerb statt.

Die öffentliche Ausschreibung soll vorrangig vor der beschränkten Ausschreibung und der freihändigen Vergabe stattfinden, wenn nicht die Eigenart der Leistung oder besondere Umstände (z. B. spezielle technische Anforderungen eines schwierigen Bauvorhabens) eine Abweichung rechtfertigen.

Beschränkte Ausschreibung

Bei der beschränkten Ausschreibung werden Bauleistungen in einem **förmlichen Verfahren** nach **Aufforderung einer beschränkten Zahl von Unternehmern** zur Einreichung von Angeboten vergeben. Ist der in Betracht kommende Bewerberkreis dem Auftraggeber nur unzulänglich bekannt, kann ein **öffentlicher Teilnahmewettbewerb** vorgeschaltet werden.

Bei der beschränkten Ausschreibung sollen im allgemeinen nur 3 bis 8 als geeignet erachtete Unternehmer zur Angebotsabgabe aufgefordert werden; bei der beschränkten Ausschreibung mit vorgeschaltetem öffentlichen Teilnahmewettbewerb kann auch die Auswahl einer größeren Anzahl von Bewerbern sinnvoll sein.

Ein freier Wettbewerb findet bei der beschränkten Ausschreibung nur innerhalb des ausgewählten Bewerberkreises statt.

Eine beschränkte Ausschreibung (gegebenenfalls mit vorgeschaltetem öffentlichen Teilnahmewettbewerb) soll unter anderem dann stattfinden, wenn die Leistung nach ihrer Eigenart nur von einem beschränktem Kreis von Unternehmern in geeigneter Weise ausgeführt werden kann oder eine öffentliche Ausschreibung aus anderen Gründen (z. B. Dringlichkeit der Maßnahme) unzumutbar ist.

Freihändige Vergabe

Bei einer freihändigen Vergabe werden Bauleistungen **ohne förmliches Verfahren** an ein Unternehmen vergeben. Somit findet kein Wettbewerb statt.

Eine freihändige Vergabe soll nur dann stattfinden, wenn eine öffentliche oder beschränkte Ausschreibung unzumutbar ist. Dies ist unter anderem dann der Fall, wenn aufgrund der Eigenart der Leistung oder besonderer Umstände nur ein bestimmter Unternehmer in Betracht kommt, sich die Leistung nach Art und Umfang vor der Vergabe nicht eindeutig und erschöpfend beschreiben läßt oder die Leistung besonders dringlich ist.

6.5.3.2 Leistungsbeschreibung

Nach der VOB/A werden zwei Formen der **Leistungsbeschreibung** unterschieden:

- Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis
- Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm

Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis

Bei der Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis wird nach einer allgemeinen Beschreibung der Aufgabe ein **detailliertes Leistungsverzeichnis** im Sinne einer Liste der einzelnen zu erbringenden Leistungspositionen erstellt. Unterschieden werden dabei:

- Grundpositionen
- Wahlpositionen (Alternativpositionen)
- Bedarfspositionen (Eventualpositionen)
- Zuschlagpositionen (z. B. Zulage für besondere Erschwernisse)

Ein Leistungsverzeichnis wird im allgemeinen so abgefaßt, daß spaltenweise die Positionsnummer, die Beschreibung der Teilleistung, die Menge, der Einzelpreis und der Gesamtpreis genannt werden. Die Teilleistungen sind dabei exakt durch den Auftraggeber z. B. in Form einzuhaltender Maße, zulässige Abweichungen oder technischer oder physikalischer Forderungen zu beschreiben. Außerdem werden vom Auftraggeber die anhand genauer Berechnungen ermittelten Mengen im Leistungsverzeichnis vorgegeben. Der Bieter ist aufgefordert, die Einheitspreise einzusetzen und die Gesamtpreise zu ermitteln.

In der VOB/C werden, gegliedert nach verschiedenen Bereichen, Hinweise für das Aufstellen der Leistungsbeschreibung gegeben (z. B. DIN 18 299 "Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art", DIN 18 300 "Erdarbeiten", DIN 18 303 "Verbauarbeiten").

Weiterhin werden Hinweise zu Nebenleistungen und besonderen Leistungen gegeben. **Nebenleistungen** sind Leistungen, die auch ohne Erwähnung in der Leistungsbeschreibung zur vertraglichen Leistung gehören. Als Nebenleistungen gelten beispielsweise Messungen für das Ausführen und Abrechnen der Arbeit (ausgenommen Absteckung der Hauptachsen und Schaffung von Höhenfestpunkten). **Besondere Leistungen** sind Leistungen, die keine Nebenleistungen sind und nur dann zur vertraglichen Leistung gehören, wenn sie in der Leistungsbeschreibung besonders erwähnt sind. Als besondere Leistungen sind z. B. die Entsorgung von schadstoffbelastetem Bauschutt und Erdaushub, sofern es sich um Sonderabfall handelt oder besondere Maßnahmen zum Schutz benachbarter Grundstücke zu nennen.

Bei umfangreichen Bauleistungen ist eine Unterteilung der Leistung in sogenannte **Teillose** möglich; eine entsprechende Absicht muß jedoch bei einer Ausschreibung bekannt gemacht werden. Teillose können aus einer räumlichen oder fachlichen (Fachlose) Aufteilung der Bauleistung resultieren. Bei einer Aufteilung in Teillose schreibt die VOB eine **Einzelvergabe** als Regelfall vor. Vorteilhaft ist hierbei, daß der Auftraggeber die Vergabe an alle Teilunternehmer selbst in der Hand hat und deren Leistungsfähigkeit, Fachkunde und Zuverlässigkeit selbst beurteilen kann. Nachteilig ist der erhöhte Verwaltungsaufwand und daß die Koordination der Teilunternehmer, um einen reibungslosen Bauablauf zu gewährleisten, beim

Auftraggeber liegt. Wird die Bauleistung mangelhaft erbracht, besteht für den Auftraggeber zunächst ein Klärungsbedarf dahingehend, an welche(n) Teilunternehmer Gewährleistungsansprüche zu stellen sind.

Nach der VOB soll es der Ausnahmefall sein, daß alle Fachlose zusammengefaßt und an einem **Generalunternehmer** vergeben werden. Voraussetzung ist, daß der Generalunternehmer wesentliche Teile der Bauleistung selbst erbringt (mindestens 1/3); die restlichen Leistungen können vom Generalunternehmer an Nachunternehmer vergeben werden. Für den Auftraggeber nachteilig ist hierbei, daß er vergleichsweise wenig Einfluß auf die einzuschaltenden Nachunternehmer hat. Von Vorteil für den Auftraggeber ist, daß ein Großteil des Verwaltungsaufwandes und die Koordinierungsaufgaben an den Generalunternehmer abgegeben werden. Gewährleistungsansprüche des Auftraggebers sind ausschließlich an den Generalunternehmer zu stellen, der auch für die Leistungen der Nachunternehmer gegenüber dem Auftraggeber haftbar ist.

Die Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis erlaubt im Falle einer Ausschreibung einen exakten Leistungs- und Preisvergleich der Bieter und bietet hinsichtlich der Ausführung und Abrechnung eine gute Kontrollierbarkeit.

Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm

Bei der Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm wird vom Auftraggeber **kein detailliertes Leistungsverzeichnis** aufgestellt, sondern lediglich der Zweck der Bauleistung und insbesondere die technischen und funktionellen Anforderungen angegeben. Der Bieter erhält damit alle für eine Entwurfsbearbeitung des Angebots erforderlichen Rahmendaten; gegebenenfalls kann vom Auftraggeber ein Musterleistungsverzeichnis ohne Mengenangaben beigelegt werden. Bei der Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm wird vom Bieter im Zuge der Angebotserstellung der Entwurf der Bauleistung inkl. Erläuterung, Gliederung und die Beschreibung der Leistung in Form von Mengen- und Preisangaben verlangt. Damit wird der Entwurf der Bauleistung als Planungsleistung bereits dem Wettbewerb unterstellt, um insbesondere die technisch und wirtschaftlich beste sowie funktionsgerechteste Lösung der Bauaufgabe zu ermitteln (Ideenwettbewerb). Zweckmäßig ist die Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm beispielsweise dann, wenn es wegen der Verschiedenartigkeit von Systemen oder der Erfordernis spezifischer Fachkenntnisse den Bietern freigestellt werden soll, wie sie die Gesamtleistung aufgliedern und anbieten, um zu einem optimalen Ergebnis zu kommen.

Eine Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm hat den Nachteil, daß zwangsläufig ganz unterschiedliche Lösungen über die Ausführungen der Bauleistung von den Bietern entwickelt werden und es daher kaum möglich sein wird, die unterschiedlichen Angebote im Detail hinsichtlich der angebotenen Leistungen zu vergleichen.

6.5.3.3 Vergabe und Leistungsbeschreibung von Sanierungsleistungen

Eine öffentliche Ausschreibung von Sanierungsleistungen ist aufgrund der Eigenart der Leistung und der besonderen Umstände von Altlasten oder Umweltschadensfällen unzuweckmäßig. Ausgehend von den Ergebnissen der Sanierungsvorplanung wird man sich im Zuge der Sanierungsentscheidung auf eine nur sehr begrenzte Anzahl geeigneter Sanierungsverfahren festlegen. Dementsprechend beschränkt ist auch die Anzahl der Verfahrensanbieter, so daß die

Voraussetzungen für eine beschränkte Ausschreibung gegeben sind. Je nach Umfang der im Zuge der Sanierungsvorplanung durchgeführten Firmenanfragen bzw. Reaktionen ist die Notwendigkeit eines vorgeschalteten öffentlichen Teilnahmewettbewerbs zu beurteilen.

Die Voraussetzungen für eine freihändige Vergabe von Sanierungsleistungen liegen vor, wenn im Zuge der Sanierungsvorplanung nur ein Verfahrensanbieter ausfindig gemacht werden konnte, der mit seinem Verfahren geforderte Reinigungsleistungen erreichen kann bzw. garantiert. Eine freihändige Vergabe von Sanierungsleistungen ist ferner denkbar, wenn infolge einer Umweltschadensfallgefahr im Verzuge ist und insofern eine besondere Dringlichkeit für die Sanierungsmaßnahme besteht.

Die öffentlichen Auftraggeber sind durch haushaltsrechtliche Vorschriften zur Anwendung der VOB verpflichtet; über den öffentlichen Bereich hinaus kann die VOB jedoch auch privaten Auftraggebern als Grundlage für die Vergabe und rechtliche Ausgestaltung der Bauverträge dienen.

Bei der Leistungsbeschreibung von Sanierungsleistungen ist davon auszugehen, daß der Auftraggeber aufgrund mangelnden technischen Know-hows nicht in der Lage ist, ein Leistungsverzeichnis für die eigentliche Sanierungsleistung, z. B. in Form einer Bodenwäsche aufzustellen. Sie wird daher in Form einer Leistungsbeschreibung mit Leistungsprogramm erfolgen. Bei On- oder Off-site-Sanierungsmaßnahmen, verbunden mit Erdaushub und Transportleistungen, lassen sich diese fachlich von der eigentlichen Sanierungsleistung trennen und als Teillose ausarbeiten. Hierbei empfiehlt sich eine Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis, um den Anbietern sämtliche besonderen Leistungen beim Aushub und Transport von kontaminiertem Material darzustellen und dadurch zum einen die sachgerechte Ausführungsweise vorzugeben und zum anderen eine entsprechende Kalkulationsgrundlage zu liefern. Besondere Leistungen im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme sind z. B.

- Einhaltung der Arbeits- und Emissionsschutzauflagen (z. B. Arbeiten unter Vollschutz, Befeuchtungs-/Abdeckungsmaßnahmen)
- Aushubseparierung
- besondere Vermessungsarbeiten zum Ausbau definierter Bereiche (z. B. Kontaminationszentren)
- Wartezeiten (z. B. auf Ergebnisse der chemischen Analytik)
- besondere Verpackungsanforderungen
- Dekontaminationsmaßnahme
- Entsorgung von Verbrauchsmaterial (z. B. A-Kohlefilter, Schutzanzüge)

Da, um ein optimales Sanierungsergebnis zu erzielen, gegebenenfalls erforderliche Aushub-/Transportmaßnahmen und die eigentliche Sanierungsmaßnahme, z. B. im Hinblick auf eine Materialseparation, die begleitende Analytik und die planmäßige Materialanlieferung optimal ineinandergreifen müssen, empfiehlt sich die Vergabe möglicher Teillose an einen Generalunternehmer. Aus Sicht des Auftraggebers ist dies im Falle von Gewährleistungsansprüchen, z. B. bei Nichterreichen der vertraglich festgelegten Reinigungsziele, von erheblichem Vorteil. Die Vergabe an einen Generalunternehmer schließt nicht aus, daß dessen Leistungen von seiten des Auftraggebers oder durch eine behördliche Fremdüberwachung geprüft werden.

6.5.3.4 Leistungsbeschreibung einer Bodenwäsche

Bei der **Leistungsbeschreibung** einer Bodenwäsche müssen grundsätzlich einige Besonderheiten berücksichtigt werden und als einzelne Punkte mit in die Ausschreibung bzw. den Vertrag aufgenommen werden:

- Sanierungsziele
- Inputkontrolle
- Outputkontrolle und Gewährleistung
- Analyseverfahren
- Leistungsnachweis
- Entsorgung der Reststoffe und deren Kosten
- Arbeitsschutz
- Baustelleneinrichtung
- Bodenbehandlung

Sanierungsziele

Vom Auftragnehmer ist bezüglich der Einhaltung der Sanierungsziele durch seine Behandlungsmethode unbedingt eine Garantieerklärung abzugeben. Diese Garantie kann sich jedoch nur auf die ausgeschriebenen Schadstoffe beziehen.

Inputkontrolle

Die der Ausschreibung zugrunde liegenden Massen und deren Kontamination ist i. d. R. zwar durch eine Vielzahl von Untersuchungen belegt, eine Garantie über die tatsächlichen Verhältnissen kann jedoch nicht abgegeben werden. Vor allem bei Altablagerungen und Auffüllungen ist mit einer besonderen Inhomogenität des Untergrundes zu rechnen. Dies kann sowohl in der Art der Kontamination als auch in der Bodenstruktur (Feinkornanteile, Fremdstoffe) auftreten.

Es ist daher zweckmäßig, bestimmte Bereiche mit entsprechenden Kontaminationen und Bodenstrukturen zusammenzufassen und jeweils separat auszuweisen.

Diese Zusammenfassungen werden durch bestimmte Annahmegrenzwerte, sowohl bezüglich Kontamination als auch Feinkornanteile in die Ausschreibung aufgenommen. Dazu ist es erforderlich diese Annahmegrenzwerte als Mittelwerte (arithmetisches oder gewichtetes Mittel) vorzugeben. Zum Nachweis über die tatsächlich angetroffene Situation ist ein Modus der Überwachung vorzugeben, d. h. die Kontrolle des Inputs ist zu definieren.

Dies kann z. B. ermöglicht werden durch Bildung von Haufwerken bestimmter Kubatur bzw. Tonnage und der Beprobung sowie Analyse auf die enthaltenen Schadstoffe und Erstellung von Korngrößenanalysen.

Outputkontrolle und Gewährleistung

Die Outputkontrolle ist wichtig hinsichtlich der Überwachung der Einhaltung der Sanierungsziele und der damit verbundenen Garantieerklärung von seiten des Auftragnehmers. Es ist

ebenso wie bei der Inputkontrolle eine Modalität der Beprobung vorzugeben, d. h. die Kubatur bzw. Tonnage einzelner Chargen muß definiert werden.

Es ist hierbei auch die Kompetenz der an der Probennahme beteiligten und an der endgültigen Freigabe des behandelten Materials beteiligten Personenkreise zu definieren.

Es ist auf jeden Fall empfehlenswert, die Probennahme bei der In- und Outputkontrolle durch einen unabhängigen Schadensgutachter überwachen zu lassen.

Für den Fall, daß die Outputkontrolle eine Charge anzeigt, bei der das Reinigungsziel nicht erreicht wurde, sind unterschiedliche Ursachen möglich:

- außergewöhnlich hohe Schadstoffeingangskonzentration (bzw. höher als im Waschversuch an "repräsentativem" Probenmaterial)
- außergewöhnlich hoher Feinkornanteil (bzw. höher als im Waschversuch an "repräsentativem" Probenmaterial)
- Betriebsstörung der Anlage

Die beiden ersten Punkte sind als "Baugrundrisiko" zu betrachten; das Baugrundrisiko trägt der Bauherr bzw. Auftraggeber. Der letzte Punkt fällt unter die Gewährleistung des Anlagenbetreibers bzw. Auftragnehmers. Betriebsstörungen, die u. U. auch mehrere Fehlchargen hervorrufen können, müssen sofort auf Kosten des Betreibers behoben werden. Die Fehlchargen als solche können je nach Ursache auf Kosten des Auftraggebers bzw. des Auftragnehmers (bei Schlechterfüllung des Vertrags) einer nochmaligen Wäsche unterzogen werden, um das geforderte bzw. vertraglich garantierte Reinigungsziel zu erreichen.

Grundsätzlich empfiehlt sich bei der Outputkontrolle eine Ermittlung der Reinigungsleistung als gewichtetes Mittel über alle behandelten Chargen verbunden mit einer definierten Maximalkonzentration pro Charge (vgl. Reinigungsbeispiel im Kap. 4.1.2.2). Dadurch kann eine geringfügige Überschreitung des Reinigungszieles (bis zur obengenannten Maximalkonzentration) einer einzelnen Charge toleriert werden.

Für den Fall, daß ein vom Betreiber garantiertes Reinigungsziel, das z. B. für einen Wiedereinbau erreicht werden muß, generell nicht eingehalten werden kann, bestehen folgende Lösungsmöglichkeiten:

- Bodenwäsche und Wiedereinbau, sofern selbst bei Überschreitung der zulässigen Bruttokonzentration eine unbedenkliche Eluatkonzentration nachgewiesen werden kann.
- Bodenwäsche und anderweitige Entsorgung, Ankauf von Wiedereinbaumaterial (Mehrkosten trägt der Betreiber).
- Auflösung des Vertrags, Neuvergabe der Sanierung (Schadensersatz durch den Betreiber).

Analyseverfahren

Anhand der vorangegangenen Erläuterungen ist erkennbar, daß für die Sanierungskontrolle und der Inputkontrolle hinsichtlich der Einhaltung der ausgeschriebenen Vorgaben einheitliche Analysemethoden unabdingbar sind. Es muß in der Ausschreibung unbedingt für jede Konta-

mination eine verbindliche Analyse- und allgemein eine Probennahmemethodik vorgegeben werden.

Sollten mehrere Analyseinstitute beauftragt werden, ist ein Analytikabgleich mittels standardisierter Proben, z. B. Referenzproben des NBS (National Bureau of Standards) bzw. durch Ringversuche, unabdingbar.

Somit ist eine möglichst genaue Situationsbeschreibung der Altlast und eine Kontrollmöglichkeit gegeben.

Die festgelegten Analysemethoden sind selbstverständlich auch für die Untersuchungen an den zu entsorgenden Reststoffen vorzuschreiben.

Im Fall der Übernahme der Analytik durch den Auftragnehmer sind die anfallenden Analysekosten des In- und Outputs mit in den Einheitspreis der Einheit zu behandelnder Boden mitaufzunehmen.

In diesen Einheitspreis sollten auch die notwendige Analytikskosten aus der Abwasser- und Abluftbehandlung miteingerechnet werden.

Im Fall der analytischen Überwachung der anfallenden Reststoffe ist der genaue Umfang schwierig abzuschätzen, da die Mengenangaben der anfallenden Reststoffe aus der Prognose abgeleitet werden muß. Aus diesem Grund sollten diese Analysekosten auf Nachweis abgerechnet werden.

Leistungsnachweis

Für die Abrechnung ist ein Leistungsnachweis vorzugeben. Es ist i. d. R. schwierig, eine Abrechnung des behandelten Bodens über Kubaturen vorzunehmen. In der Praxis hat sich der Leistungsnachweis über Gewichtsermittlung der kontaminierten Massen zum Zeitpunkt der Aufgabe in die Behandlungsanlage bewährt. Hierfür stehen Ladegeräte mit geeichten Wägeeinrichtungen zur Verfügung.

Als Leistungsnachweise für die Entsorgung der anfallenden Reststoffe können die bei der Deponierung durchgeführten Wägungen in Form der Wiegescheine herangezogen werden.

Entsorgung der Reststoffe

Der jeweilige Anbieter sollte anhand der in der Ausschreibung gemachten Prognose über die Art und Höhe der Kontamination sowie die enthaltenen Feinkornanteile eine Vorhersage der anfallenden Reststoffe treffen. Vor der Inbetriebnahme sind dem Auftraggeber und den zuständigen Behörden alle für die Durchführung der Sanierung notwendigen Annahmeerklärungen für die zu entsorgenden Massen (Reststoffe und sanierter Boden im Fall der Nichtverwertung auf dem Grundstück selbst) schriftlich vorzulegen. Dies bezieht sich neben den Annahmeerklärungen der Entsorgungsanlagen auch auf die notwendigen Transportgenehmigungen. Ein verspätetes Vorlegen kann unter Umständen zu einer Verlängerung der Sanierungsdauer und somit zu Mehrkosten führen.

Arbeitsschutz

Es empfiehlt sich, die Arbeitsschutzmaßnahmen als Bestandteil der Pauschalpreise für die Reinigungsleistung der Einheit zu behandelnder Boden mitaufzunehmen, d. h. alle behördlicherseits angeordneten Schutzvorkehrungen für Arbeiten im Umfeld der Sanierungsanlage, inkl. der arbeitsmedizinischen Vor- und Nachsorgeuntersuchungen sind im Einheitspreis für die Einheit zu waschender Boden enthalten. Sollten Eventualpositionen für bestimmte Arbeitsschutzvorkehrungen notwendig werden, ist es ratsam auf Standardleistungsverzeichnisse, die über die TBG (Tiefbauberufsgenossenschaft) zu beziehen sind, zurückzugreifen und diese Ausschreibungstexte zu übernehmen.

Arbeitsschutzmaßnahmen die sich nicht unbedingt auf die Behandlung des Bodens beziehen, wie z. B. Vorhalten und Betreiben von Dekontaminationseinrichtungen (Reifen- bzw. Fahrzeugwaschanlagen, Schwarz-Weiß-Anlagen) inkl. der Entsorgung evtl. anfallender Reststoffe bzw. Abwässer sind separat als Einzelpositionen auszuschreiben.

Baustelleneinrichtung

Hinsichtlich der Baustelleneinrichtung sind entsprechende Auflagen des Genehmigungsbescheides zur Sanierung, z. B. bezüglich Arbeits- und Emissionsschutzmaßnahmen, in die Ausschreibung aufzunehmen.

Darunter kann im einzelnen folgendes zu verstehen sein:

- Bauliche Voraussetzungen für ein Zwischenlager (Abdichtung mit PEHD-Folie, Sickerwasserfassung und- aufbereitung, Oberflächenabdeckung),
- Maßnahmen zur Verhinderung von Schadstoff-, Staub- und Lärmemissionen bei den Bodenauf- und -vorbereitungsanlagen (Brecheranlagen, Vorsieb) in Form von Einhausungen und Absauganlagen mit Abluftreinigung,
- Bauliche Maßnahmen der Aufstellfläche der Sanierungsanlage (Untergrundabdichtung, Tagwasserfassung und -aufbereitung).

Jede dieser eventuell notwendigen Positionen ist getrennt auszuschreiben inkl. des späteren Abbaus und möglicher notwendiger Entsorgungen (z. B. Bodenplatte eines Zwischenlagers).

Weiterhin sind für die Baustelleneinrichtung die Fragen der vorhandenen bzw. benötigten Wasser- und Energieversorgung sowie des Abwasseranschlusses zu klären und bei der Ausschreibung entsprechend umzusetzen.

Bodenreinigung

Die eigentliche Leistung der Bodenbehandlung in einer Sanierungsanlage ist detailliert vom Auftraggeber nicht faßbar. In den meisten Fällen handelt es sich bei Sanierungsanlagen um technische Einrichtungen mit hohem verfahrenstechnischem Aufwand. Bestimmte Anlagenmodule unterliegen der "Geheimhaltung" seitens der Sanierungsfirma. Aus diesem Grund kann die Position "Reinigen des Bodens" nur als Einheitspreis pauschal pro Einheit zu behandelnder Boden ausgeschrieben werden. Allerdings läßt sich die Position "Reinigen" allgemein umschreiben, so daß der Anbieter alle notwendigen Kosten mit in den Einheitspreis einkalkulieren kann.

Im einzelnen sollen durch die Position "Reinigen" folgende Unterpunkte abgedeckt werden:

- Vorhaltekosten der Behandlungsanlage (bei nicht vom AN verursachten Stillstandszeiten)
- Übernahme des Materials aus einem Bereitstellungslager und Aufgabe in die Anlage
- Bedienung der Anlage (inkl. Arbeitsschutz und Stellung eines Sicherheitsbeauftragten)
- Energiekosten (Strom-, bzw. Primärenergie für Aggregate)
- Wasser, Abwasser
- Sämtliche für die Reinigung notwendigen Betriebsstoffe (für den Waschvorgang (Tenside, Neutralisation des Prozeßwassers), Abluftbehandlung, Abwasserbehandlung, Schwebstoffabtrennung (Flotation, Sedimentation))
- Behandlung des Bodens nach dem Stand der Technik
- Abluftreinigung
- Abwasserreinigung

Zusätzlich fallen auch die bereits oben erwähnten Punkte an:

- Arbeitsschutz inkl. Vor- und Nachsorgeuntersuchungen, Entsorgung aller im Rahmen des Arbeitsschutzes anfallender persönlicher Schutzausrüstungen für das Bedienungs-, Wartungspersonal
- Analytische Begleitung
- Begleitende Dokumentation, Abschlußbericht

Die Baustelleneinrichtung, d. h. Antransport, Auf- und Abbau sowie Abtransport der Bodenwaschanlage, sollte hingegen als gesonderte Position ausgewiesen sein.

6.6 Sanierungsdurchführung

Die Durchführung der Sanierungsmaßnahme ist immer einer **fachtechnischen Überwachung** zu unterwerfen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können dazu führen, das **Sanierungsverfahren** im Verlauf der Sanierungsmaßnahme zu **optimieren** bzw. zu **modifizieren** (Optimierungs- und Testphase). Im Rahmen der fachtechnischen Überwachung ist außerdem sicherzustellen, daß die im behördlichen Zulassungsverfahren festgelegten Auflagen für den Betrieb der Sanierungsanlage bzw. der im Umfeld eingesetzten Anlagen (Brecher, Klassierungseinrichtungen) in vollem Umfang eingehalten werden.

Die Überwachung der behördlichen Auflagen bezieht sich auf:

- Sanierungserfolg
- Immissionsschutz
- Lärmschutz
- Arbeitsschutz

Die **Erfolgskontrolle** des behandelten Bodens hinsichtlich seines Restschadstoffgehaltes erfolgt an den jeweils behandelten Chargen nach der vertraglich festgelegten Probennahme- und Analysemethodik. Erst nach Vorliegen der Analysenergebnisse und Unterschreitung der ent-

sprechenden Zulassungsgrenzwerte kann das Material zur Verwertung (z. B. zum Wiedereinbau) oder zur Deponierung (z. B. auf einer Erddeponie) freigegeben werden.

Bereits bei den Ausführungen zur Sanierungshauptplanung (Kap. 6.5) wurden die **im Umfeld einer Sanierung** notwendigen **Überwachungsmessungen** angesprochen. In der Regel wurden ein Meßrhythmus und die Meßpunkte bereits im Zuge der Genehmigungsplanung in Absprache mit den Behörden festgelegt und sind Bestandteil der behördlichen Gestattung geworden. In der Anfangsphase des Betriebs einer Behandlungsanlage werden diese Messungen in kürzeren Zeitabständen durchgeführt werden, um eventuelle Modifikationen der Anlage bzw. des Baustellenbetriebs vornehmen zu können.

So können bei Überschreitung der **Lärm-, Staub- bzw. Luftschadstoffgehalte** zusätzliche Einrichtungen wie Einhausungen, zusätzliche Bewässerungseinrichtungen zur Staubbindung, Absauganlagen mit entsprechender Filterung der Abluft, erforderlich werden. Unter Umständen wurden entsprechende Prognosen bereits während der Sanierungshauptplanung erstellt, so daß nur selten größere Umbauten erforderlich sind.

Hinsichtlich der Durchführung von Überwachungsmessungen bzw. ihrer späteren Aussagekraft ist besonders zu beachten, daß alle Anlagenteile beim Meßzyklus in Betrieb sind.

Neben Messungen im Umfeld des Sanierungsvorhabens zum Schutz der umliegenden Bevölkerung sind **auf der Baustelle ständige Überwachungsmessungen** besonders der Luftschadstoffe (z. B. mittels FID oder PID, halbquantitativen Prüfröhrchen) notwendig, um die **Arbeitsschutzmaßnahmen** der auf der Baustelle beschäftigten Personen unter Berücksichtigung der einschlägigen MAK-Werte zu jeder Zeit optimal auslegen zu können. Diese Überwachung und die aus den Ergebnissen resultierenden Anforderungen des Arbeitsschutzes fallen in den Aufgabenbereich des Sicherheitskoordinators.

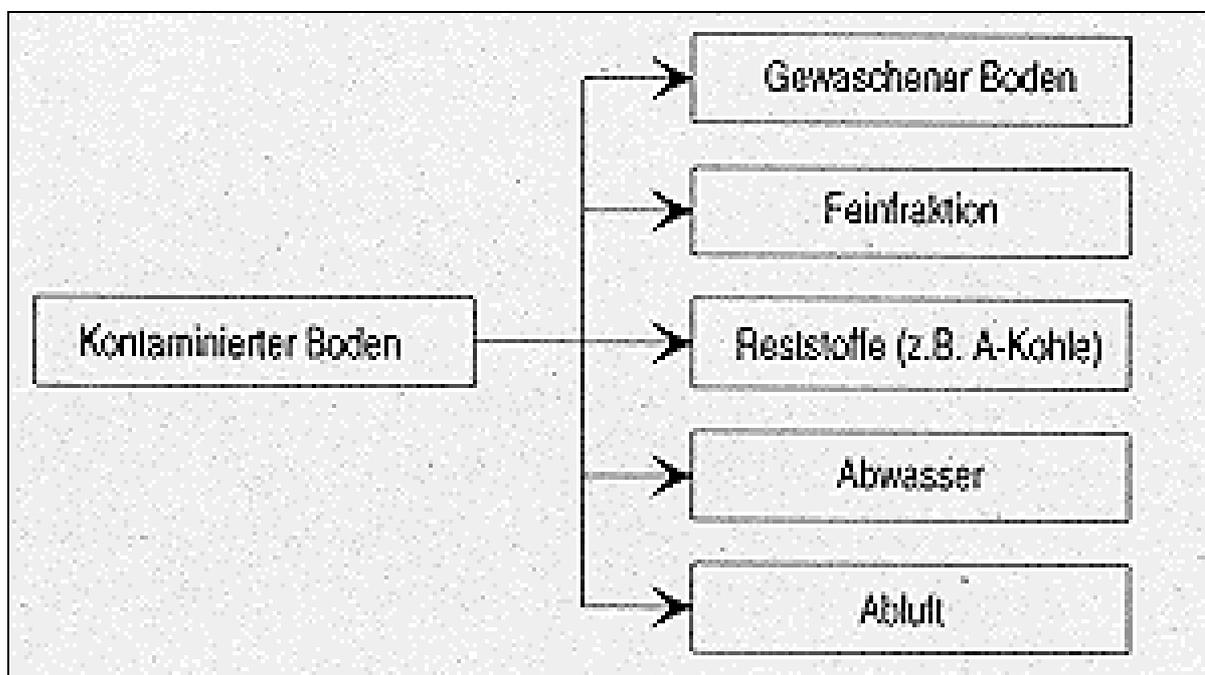
Im Zuge der Überwachung ist die Erstellung einer begleitenden **Dokumentation** erforderlich:

- Einrichtung von **Sanierungstagebüchern**
In dieser Dokumentation werden sämtliche relevante Betriebsdaten (Betriebs- und Produktionszeiten, Bedienungspersonal, Störfälle, Ausfallzeiten, Abwassermengen und deren Schadstoffgehalte, Art und Menge der eingesetzten Hilfsstoffe) der Sanierungsanlage festgehalten. Insbesondere sollten die Eingangs- und Ausgangsgehalte des kontaminierten Bodens sowie deren Massen erfaßt und dokumentiert werden. Weiterhin sind die Massen und Schadstoffgehalte der anfallenden Reststoffe zu erfassen. Diese Daten dienen einer späteren Bilanzierung der Schadstoffe zum Nachweis ihres Verbleibs.
- Einrichtung von **Abfallnachweisbüchern**
In der Regel müssen die Restschadstoffkonzentrate in geeigneten Anlagen entsorgt werden (z. B. Verbrennung von Flotatschlämmen, Verbringung der ausgeschleusten Feinstkorngelalte auf Sonderabfalldeponien). In den Abfallnachweisbüchern sind die Massen und Schadstoffgehalte zu dokumentieren und die notwendigen Abfallbegleitscheine aufzubewahren.

Bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen empfiehlt es sich, in gewissen Abständen **Koordinationsgespräche** durchzuführen, in denen der jeweilige Stand der Dinge dargelegt wird. Zu den Koordinationsgesprächen sind auch die jeweiligen Fachbehörden hinzuzuziehen.

Nach Abschluß der Sanierungsmaßnahme ist ein Abschlußbericht zu erstellen, der folgende Punkte beinhalten sollte:

- Auswertung des Sanierungstagebuchs
 - Zusammenstellung von Betriebszeiten und Produktions- sowie Stillstandszeiten
 - Nachweis der Reinigungsleistung (gewichtetes Mittel über alle Chargen)
 - Zusammenstellung sämtlicher Kontrollmessungen (Luft, Staub, Abwasser) zur Beweissicherung
- Auswertung des Abfallnachweisbuches
 - Darstellung sämtlicher Entsorgungs- und Verwertungsmengen und -pfade
- Aufstellen einer **Schadstoffbilanz**
 - Bilanzgrößen hinsichtlich der Schadstofffracht:



Der Abschlußbericht dokumentiert zum einen die Vertragserfüllung, dient damit auch als Abrechnungsgrundlage; zum anderen dokumentiert er den Sanierungserfolg aus ökologischer Sicht.

7 Verwendete Literatur

Grundlagen und Anwendungsbereiche der Bodenwäsche (Kap.2)

ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (1982):

Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. Auflage, Hannover.

HÖLTING, B. (1984):

Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 2. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.

PRINZ, H. (1982):

Abriß der Ingenieurgeologie: mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik sowie des Erd-, Grund- und Tunnelbaus. Enke Verlag, Stuttgart.

SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1984):

Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.

SEMMELE, A. (1985):

Periglazialmorphologie. Erträge der Forschung Bd. 231, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Einführung in die Verfahrenstechnik der Bodenwäsche (Kap. 3)

AKW APPARATE UND VERFAHREN GMBH (1991):

Sonderdruck aus Achema-Jahrbuch 1991, Band 2, S. 8.

BINDER, H. (1991):

Extraktions- und Spülverfahren zur Bodensanierung - Überblick. In: Handbuch der Altlastensanierung. Franzius; Stegmann; Wolf (Hrsg.), Loseblattsammlung, Ordner 2, Heidelberg. R. v. Deckers Verlag, G. Schenck, 1991, Kap. 5.4.1.3.0.

HELFRICHT, R.; SCHATZ, J. (1987):

Untersuchungen zur Kaolinläuterung in einer Laborläutertrommel. Silikattechnik 38 (1987) 8, S. 266 - 270.

HAHN, H.H. et. al. (1981):

Fortschritte bei der Anwendung des Flotationsverfahrens in der kommunalen Abwasserreinigung. Reihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Nr. 25.

HARTINGER, L. (1985/1):

In: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Bd. VII. Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften, Berlin 1985, S. 243ff.

HARTINGER, L. (1985/2):

In: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Bd. VII. Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften, Berlin 1985, S. 294 - 315 und S. 331 - 335.

HARTINGER, L. (1985/3):

In: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Bd. VII. Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften, Berlin 1985, S. 222 - 237.

HOFFMANN, E. (1988):

Schlammwässerung mit Siebbandpressen und Kammerfilterpressen bei der Kreislaufführung von Waschwasser in Kieswerken. Aufbereitungstechnik 29 (1988) 4, S. 212 - 217.

HOFFMANN, J. (1991):

Einsatz von Klassier- und Sortierverfahren bei der physikalischen Aufbereitung kontaminierter Böden. In: Erkundung und Sanierung von Altlasten (Hrsg. Jessberger, H. L.), A. A. Balkema (Rotterdam) Brookfield.

IVANAUSKAS, A.; NEESE, TH.; DOMASCH, K. (1985):

Zur Charakterisierung von Flockeneigenschaften. Freiburger Forschungsheft A 720 (1985) S. 47 - 62.

JUNGMANN, A.; NEUMANN, T. (1991):

alljig-Setzmaschinen zur Abtrennung schädlicher Bestandteile aus Kies, Sand und Recycling-Material. Aufbereitungstechnik 32 (1991) 1.

KELLERWESSEL, H. (1991):

Aufbereitung disperser Feststoffe, Mineralische Rohstoffe - Sekundärrohstoffe - Abfälle. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

MÖLLER-BREMER, CH. (1991):

Variationen der Bodenluftabsaugung mit Konzentrierung und Rückgewinnung der Schadstoffe. Abfallwirtschafts-Journal 3 (1991) 3.

MÜHLE, K.; DOMASCH, K.; NEESE; Th. (1988):

Zur Grenzflächenchemie und Hydrodynamik der Flockung in turbulenter Strömung. Mitteilungsblatt der Chem. Ges. 35 (1988) 1, S. 9 - 15.

NEESE, TH.; GROHS, H. (1990):

Die Aufbereitungstechnik des Bodenwaschens. Aufbereitungstechnik 31 (1990) 12, S. 656 - 662.

NEESE, TH; GROHS, H. (1991/1):

Waschen und Klassieren kontaminierter Böden. Aufbereitungstechnik 31 (1991) 2, S. 72 - 77.

NEESE, TH.; GROHS, H. (1991/2):

Fest/flüssig-Trennung für die Entsorgung in Bodenwaschanlagen. Aufbereitungstechnik 32 (1991) 6, S. 294 - 302.

NETZSCH-FILTRATIONSTECHNIK GMBH, SELB:

Filterpressen zur Fest/flüssig-Trennung. Firmenschrift.

SCHATZ, J. (1990):

Beitrag zur Modellierung des Läuterprozesses in der Kaolinaufbereitung. Diss. A, HAB Weimar, 1990.

SCHAUENBURG MAB GmbH, Mülheim/Ruhr (1991/1):

Hydrozyklone, Klassierer und Sortierer, Firmenschrift.

SCHAUENBURG MAB GmbH, Mülheim/Ruhr (1991/2):

Komponenten für Bodenwaschanlagen, Firmenschrift.

SCHUBERT, H. (1984):

Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Bd.III, 2. Auflage. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

SCHUBERT, H. (1986):

Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe Bd. II, 3.Auflage. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

SCHUBERT, H. (1989):

Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Bd. I, 4. Auflage. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

SCHULZE, H.J. (1984):

Physiko-chemical Elementary Prozesses in Flotation. Elsevier, Amsterdam.

SONNTAG, H. (1977):

Lehrbuch der Kolloidwissenschaften. Berlin.

TRAWINSKI, H. (1981):

Sind die Anwendungsgrenzen des Hydrozyklons konstruktiv zu erweitern? Maschinenmarkt 87 (1981) 34, S. 684 - 687.

TRAWINSKI, H. (1981):

Der Hydrozyklon hat seine Anwendungsgrenzen noch nicht erreicht. Maschinenmarkt 87 (1981) 52, S. 1069 - 1072.

UNKELBACH, K.H. (1990):

Magnetscheider, Wirkungsweise und Anwendung von Stoffen. KHD Humboldt Wedag AG, Dezember 1990.

VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE (VCI) (1985):

Verfahrensberichte zur Abwasserbehandlung, 10. Bericht: Abwasserreinigung durch Strippung und Destillation. Frankfurt/Main.

Stand der Technik (Kap. 4)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1990):

Deutsches Altlasten - Seminar 1990; 18. bis 19.10.1990 in Freiberg/
Sachsen, zugleich BMFT-Statusseminar, Berlin 1991.

WEBER, H.H. (Hrsg.) (1990):

Altlasten, Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

FÖRSTNER, U. (1991):

Umweltschutztechnik. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

Mobile Bodenwaschanlagen (on site; Kap. 4.1)

ContraCon (1991):

Beschreibung des mobilen Bodenwaschverfahrens. Firmeninformationen, Cuxhaven.

FA. DYWIDAG (1991):

Bodenwäsche mit den Dywinex-Verfahren. Firmeninformationsmaterial, München.

FRANZIUS, STEGMANN, WOLF:

Das Bodenwaschverfahren System Züblin. Handbuch Altlastensanierung, R. v. Deckers Verlag, G. Schenk, Heidelberg.

FA. IRU (1991):

BASR-Prozessing. Informationsschrift, Herne.

FA. POSSEHL (1991):

Das CBBR-Verfahren. Firmenschriften, Lübeck.

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1990):

BÖHNKE, B.; PÖPPINGHAUS, K.: Technologieregister zur Sanierung von Altlasten (TERESA). Berlin.

FA. WU-WALTER (1992):

Fahrbare Reinigungsanlage BOWA 20. Firmeninformation, Augsburg.

FA. ZÜBLIN (1991):

Katalog Umwelttechnik. Stuttgart.

Semimobile Bodenwaschanlagen (on site / off site; Kap. 4.2)

FA. AB-UMWELTTECHNIK (1991):

Firmeninformation der Wasch- und Klassierverfahren zur Aufbereitung verunreinigter Böden in Lägerdorf.

FA. ARGE TerraCon (1990/1991):

Verfahrensbeschreibungen, Prospekte, Referenzliste. Firmeninformationsmaterial.

DURST, F.-D. (1991):

Das Oeotec Hochdruck-Bodenwaschverfahren. Referat anlässlich des 1. Düsseldorfer Umweltgesprächs (21.05.1991).

ENTSORGA-MAGAZIN (1991):

SAN-Entsorgung eines Gaswerkgeländes. Beitrag im Entsorga-Magazin 9/1991, S. 104.

FRANZIUS, STEGMANN, WOLF (1990):

Bodenwäsche nach dem ASRA-Verfahren, R. v. Deckers Verlag, G. Schenk.

HAECKEL, W. (1990):

Reinigung kontaminierter Böden durch ein Extraktionsverfahren. Referat zur Fachveranstaltung Nr. F-70-701-092-0 "Aufbereitung fester Abfallstoffe", 12./13.09.1990, Essen.

HDW AG KIEL (1991):

Bodenwäsche mit dem HDW-Verfahren. Firmeninformationsmaterial, Kiel.

HEIMHARD, H.-J. (1991):

Präsentation der Oeotec-Hochdruck-Bodenwaschanlage 2000. Firmenschrift der Firma Klöckner Oeotec GmbH, Duisburg.

HENNIG, R.; WERNER, W. (1990):

Physikalische Bodenreinigung erfolgreich eingesetzt. WBL Wasser, Luft und Boden 10/90, Vereinigte Fachverlage, Mainz.

HENNIG, R.; WERNER, W. (1990):

Die Bodenreinigung nach dem Harbauer-Verfahren. Wasser + Boden 11/90, Paul Parey, Hamburg.

HENNIG, R.; WERNER, W. (1990):

Bodenreinigung mit dem Harbauer-Verfahren am Beispiel der mobilen Bodenreinigungsanlage in Wien. AT Aufbereitungstechnik Mineral Processing 7/90, AT Verlag für Aufbereitung GmbH, Wiesbaden.

HENNIG, R.; WERNER, W.:

Physikalisch-chemische Bodenreinigung nach dem Harbauer-Verfahren. Handbuch der Altlastensanierung, 7. Ergänzungslieferung, R. v. Deckers Verlag, Heidelberg.

HENTZSCHEL, W. (1990):

Waschen und Läutern - zum gegenwärtigen Stand der wissenschaftlichen Kenntnisse und deren Anwendung. Aufbereitungstechnik 31 Nr. 3, S. 126 - 130.

KUPCZIK UMWELTTECHNIK GMBH (1991):

Bodenwäsche nach dem ASRA-Verfahren. Firmenschrift.

FA. LURGI (1991):

Altlastensanierung durch naßmechanische Schadstoffabtrennung. Firmenprospekt.

PETERSON, U. G. O. (1990):

Bodenwäsche mit dem SAN-O-Clean-System. Firmenschrift.

FA. R.E.T. (1992):

Verfahrensbeschreibung. Firmenschrift.

FA. SAN (1989):

Bodenwäsche mit dem SAN-O-Clean-System. Firmenschrift, Bremen.

WLB Wasser, Luft und Boden (1989):

Zweistufige naßmechanische Verfahren zur Bodensanierung (DECONTERRA). Wasser, Luft und Boden 7-8/1989, S. 62 - 63.

WLB Wasser, Luft und Boden (1990):

Betriebserfahrungen mit der HD-Bodenwaschanlage. Wasser, Luft und Boden 11.12/1990, S. 90 - 91.

WLB Wasser, Luft und Boden (1991):

Bodenwäsche mit dem HDW-Verfahren. Wasser, Luft und Boden 7-8/1991, S. 81 - 82.

Stationäre Bodenwaschanlagen (off site; Kap. 4.3)

NORDAC (1991):

Flächenrecycling in Hamburg. Erfahrungsbericht 1991, Firmenschrift, Hamburg.

NORDAC (1991):

Errichtung und Betrieb eines Bodenrecyclingzentrums. Economica-Verlag, Bonn.

In-situ Bodenwaschverfahren (Kap. 4.4)

BALTHAUS, H. (1990):

In-situ-Bodenreinigung nach dem System Holzmann. FGU-Seminar 1989.

BALTHAUS, H. (1990):

Sanierung eines Gaswerksgeländes durch In-situ-Bodenwäsche, WLB Wasser, Luft und Boden 4/1990, S. 58 - 61.

FA. KELLER: (1990/1991):

Bodensanierung mit dem Soilcrete Verfahren der Fa. Keller. Firmenschriften, Offenbach.

SONDERMANN, W. (1991):

In-situ/On-site-Sanierungsverfahren zur Reinigung kontaminierter Böden. Entsorgungspraxis 3/1991, S. 76 - 82.

Zusammenfassende Bewertung der Bodenwaschverfahren (Kap. 4.5)

FÖRSTNER, U. (1991):

Umweltschutztechnik. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1990):

BÖHNKE, B.; PÖPPINGHAUS, K.: Technologieregister zur Sanierung von Altlasten (TERESA). BMFT-Forschungsbericht (FKZ 1460505).

Entwicklungsstand und -tendenzen (Kap. 5)

Grenzen des Verfahrens (Kap. 5.1)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1990):

BÖHNKE, B.; PÖPPINGHAUS, K.: Technologieregister zur Sanierung von Altlasten (TERESA). BMFT-Forschungsbericht (FKZ 1460505), Berlin.

UMWELTBUNDESAMT i. A. d. BMFT (Hrsg.) (1990):

Altlastensanierung '90, Dritter internationaler TNO/BMFT-Kongreß über Altlastensanierung vom 10. bis 14.12.1990 in Karlsruhe. Berlin.

WEBER, H. H.:

Altlasten: Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

Verfahren in der Entwicklung, F+E-Vorhaben (Kap. 5.2)

HEIMHARD, H.-J. (1991):

Präsentation der Oecotec Hochdruck-Bodenwaschanlage 2000, Firmenschrift der Firma Klöckner Oecotec GnbH, Duisburg.

IRU INGENIEURGESELLSCHAFT MBH FÜR RÜCKGEWINNUNG UND UMWELTSCHUTZ (1991):

BASR-Processing: Abschnitte - Verfahren - Neue Lösungswege, Anforderungen an ein Sanierungsverfahren, Herne.

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1990):

BÖHNKE, B.; PÖPPINGHAUS, K.: TERESA, BMFT-Forschungsbericht (FKZ 1460505), Berlin.

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1991):

Projekträgererschaft Abfallwirtschaft und Altlastensanierung. Vorhaben 1984 bis 1990, Berlin.

Erfolgsaussichten und Bewertung (Kap. 5.3)

UMWELTBUNDESAMT i. A. d. BMFT (Hrsg.):

Altlastensanierung '90. Dritter internationaler TNO-BMFT-Kongreß über Altlastensanierung vom 10. bis 14.12.1990 in Karlsruhe.

UMWELTBUNDESAMT i. A. d. BMFT (Hrsg.):

Deutsches Altlasten-Seminar vom 18. bis 19.10.1990 in Freiberg/Sachsen, zugleich BMFT-Statusseminar 1990.

Praktische Vorgehensweise bis zur Anwendung einer Bodenwäsche, Entscheidungshilfen (Kap. 6)

Sanierungsvorplanung (Kap. 6.3)

BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (1990):

Technologieregister zur Sanierung von Altlasten (TERESA). Bonn.

EIKMANN, T.; KLOKE, A. (1988):

Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden. In: ROSENKRANZ, D. (Hrsg.): Bodenschutz: ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin.

GÜTEGEMEINSCHAFT RECYCLING-BAUSTOFFE (1991):

Aufbereitung und Wiederverwendung von kontaminierten Böden und Bauteilen. Bonn.

LEIDRAAD BOSEMSANERING, DEEL II (1989):

Technisch Inhoudelijk DEEL in Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg: Grenz- und Richtwerte für die Umweltmedien Luft, Wasser, Boden.

MINISTERIUM FÜR UMWELT, BADEN-WÜRTTEMBERG:

Fortschreibung des Altlastenhandbuchs Baden-Württemberg, Stufe E₃₋₄ (in Vorbereitung).

RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1989):

Sondergutachten Altlasten. In: AbfallwirtschaftsJournal 2/1990, Nr. 3, EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH, Berlin.

Sanierungshauptplanung (Kap. 6.5)

AbfBestV:

Verordnung zur Bestimmung von Abfällen nach § 2 Abs. 2 des Abfallgesetzes (Abfallbestimmungs-Verordnung- AbfBestV) vom 3. April 1990, BGBl Jg. 1990, Teil 1.

AbfRestÜberwV:

Verordnung über das Einsammeln und Befördern sowie über die Überwachung von Abfällen und Reststoffen (Abfall- und Reststoffüberwachungs-Verordnung-AbfRestÜberwV) vom 3. April 1990, BGBl, JG 1991, Teil 1.

Bau-BG (1990):

Atenschutz bei Bauarbeiten. Heft 4/1990.

BIRN, H.; JUNG, G. (1991):

Abfallbeseitigungsrecht für die Betriebliche Praxis, Stand November 1991, Bd. 1 - 3, WEKA Fachverlage GmbH (Augsburg).

BUNDESMINISTERIUM FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU (1991):

Bekanntmachung über die Behandlung von Bauschutt, Baustellenabfällen und Erdaushub bei der Durchführung von Bauaufgaben des Bundes im Zuständigkeitsbereich der Finanzbauverwaltungen. In: Bundesanzeiger, 23. Mai 1991, Bonn.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1991):

Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall). Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991, Berlin.

BURMEIER H. (1987):

Arbeiten im Bereich kontaminierter Standorte - Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten. Die Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Heft 9/1987.

FACHAUSSCHUSS TIEFBAU DES HAUPTVERBANDES DER GEWERBLICHEN BERUFSGENOSSENSCHAFTEN (Hrsg.):

Richtlinien für Arbeiten in kontaminierten Bereichen.

GefStoffV:

Verordnung über gefährliche Stoffe (Gefahrstoffverordnung-GefStoffV) vom 26. August 1986 (BGBl. I S. 1470) in der Fassung vom 5. Juni 1991 (BGBl. I S. 1218).

HEIERMANN; RIEDL; RUSAM (1992):

Handkommentar zur VOB, Teile A und B. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin.

RestbestV:

Verordnung zur Bestimmung von Reststoffen nach § 2 Abs. 3 des Abfallgesetzes (Reststoffbestimmungs-Verordnung-RestbestV) vom 3. April 1990.

SANDER, H.P. (1991):

Immissionsschutzrecht geändert. In: Umweltmagazin 11/91, S. 78 - 80.

SONDERMANN, W.D. (1990):

Rechtliche Fragen und Öffentlichkeit. In: WEBER et al. (Hrsg.): Altlasten. Springer Verlag Berlin, S 6 - 38.

SONDERMANN, W.D. (1991):

Altlasten - eine ökologische Herausforderung. ITVA Symposium, Berlin 1991.

SONDERMANN, W.D. (1991):

Bodenbehandlungsanlagen im Bundesimmissionsschutzgesetz. In: WLB Aktuell 11-12/1991, S.118.

VERLAG NEUE WIRTSCHAFTSBRIEFE (1990):

Wichtige Umweltgesetze für die Wirtschaft. Herne/Berlin.

Sanierungsdurchführung (Kap. 6.6)**SPECK, J.; MASCHER, W.(1988):**

Fahrerkabinen mit Filteranlagen auf Erdbau-Spezialmaschinen des Tiefbaus und Kabinenfilter für Erdbaumaschinen zur Bodensanierung. Sonderdruck aus Die Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Heft 2 und 3/1988.

TIEFBAU-BERUFSGENOSSENSCHAFT (Hrsg.) (1989):

Altlastensanierung. Sonderdruck, München.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.2-1 Verbreitung von Locker- und Festgesteinen in Mitteleuropa (nach E. SCHLICHTING).....	11
Abb. 2.2-2 Summenkurve von Lößkorngrößen (nach MÜLLER 1962).....	12
Abb. 2.2-3 Deflationswanne und Düne am Frankfurter Flughafen über kaltzeitlichen Flußschottern mit einer Tonlage (nach SEMMEL 1985).....	13
Abb. 2.2-4 Dauerfrostboden und Solifluktionsschutt (nach SEMMEL 1985).....	14
Abb. 2.2-5 Profil durch das obere Maintal mit seinem Terrassensystem (nach KÖRBER 1962).....	15
Abb. 2.2-6 Verknüpfung von Solifluktionsschutt, Löß, Flußkies und Auensedimenten im Talrandbereich (nach SEMMEL 1985).....	16
Abb. 2.2-7 Glaziale Serie (nach PENCK und BRÜCKNER 1906).....	17
Abb. 2.2-8 Erscheinungsformen des Unterirdischen Wassers (nach HÖLTING 1984).....	20
Abb. 2.2- 9 Kornverteilungskurven einiger typischer Lockergesteine (nach PRINZ 1982).....	23
Abb. 2.3-1 Tonteilchen mit Kationenbelag (schematisch nach PALLMANN 1938).....	28
Abb. 2.3-2 Der Ionenaustausch (schematisch nach ROEMER und SCHEFFER 1949).....	29
Abb. 2.3-3 Die Sorptionsfähigkeit von Kolloiden in Abhängigkeit von ihrem Aufbau.....	29
Abb. 3.1-1 Verfahrensschritte bei der Bodenwäsche.....	36
Abb. 3.1-2 Verfahrensschema einer Bodenwaschanlage (Beispiel).....	38
Abb. 3.2-1 Beanspruchung zwischen zwei Flächen.....	40
Abb. 3.2-2 Beanspruchung an einer Festkörperoberfläche (Prall).....	41
Abb. 3.2-3 Einsatzbereiche von Zerkleinerungsmaschinen (SCHUBERT 1989).....	42
Abb. 3.2-4 Schadstoffaufschluß beim Läutern (NEESSE und GROHS 1990).....	44
Abb. 3.2-5 Einteilung der Läuterapparate (HELFRICHT und SCHATZ 1987).....	47
Abb. 3.2-6 Einsatzbereiche bekannter Läuterapparate.....	49
Abb. 3.2-7 Vibrationswaschschncke.....	52
Abb. 3.2-8 Zentrifugalprallapparat.....	53
Abb. 3.2-9 Hochdruckstrahlapparat.....	54
Abb. 3.2-10 Siebprozeß, schematisch.....	56
Abb. 3.2-11 Einteilung der Ausrüstungen zum Siebklassieren nach der Siebgutbewegung (SCHUBERT 1989).....	58
Abb. 3.2-12 Hydrozyklon normaler Bauart (Schauburg Maschinen- und Anlagen-Bau 1991/1).....	61
Abb. 3.2-13 Wirbelströmungen im Hydrozyklon (SCHUBERT 1989).....	62
Abb. 3.2-14 Flachbodenhydrozyklon, Bauart Amberger Kaolinwerke (TRAWINSKI 1981).....	64
Abb. 3.2-15 Hydrozyklon mit Unterlaftasche Bauart Schauenburg Maschinen- und Anlagenbau (NEESSE und GROHS 1991/1).....	65
Abb. 3.2-16 Trennwirkung einer Gegenstromklassierung.....	66
Abb. 3.2-17 Aufstromklassierer, schematisch Bauart Schauenburg Maschinen- und Anlagenbau (NEESSE und GROHS 1991).....	67
Abb. 3.2-18 Aufstromklassierer, schematisch (HOFFMANN 1991).....	68
Abb. 3.2-19 Aufstromsortierer, schematisch (HOFFMANN 1991).....	69
Abb. 3.2-20 Wirkprinzip der Sortierung im pulsierenden Aufstrom (Setzen).....	71
Abb. 3.2-21 Luftgesteuerte Setzmaschine, schematisch.....	72
Abb. 3.2-22 Zellenradaustrag einer Setzmaschine, schematisch.....	73
Abb. 3.2-23 Strömung in einer Wendelrinne.....	74
Abb. 3.2-24 Wendelrinnenbatterie.....	76

Abb. 3.2-25 Zur Erläuterung des Trennvorganges in einer Herdrille.....	77
Abb. 3.2-26 Schwingherd, schematisch	79
Abb. 3.2-27 Prozeßschritte bei der Flotation.....	81
Abb. 3.2-28 Mechanismen der Aggregatbildung (HAHN et. al. 1981).....	82
Abb. 3.2-29 Einteilung der Flotationsverfahren	84
Abb. 3.2-30 Einteilung der Flotationsapparate.....	85
Abb. 3.2-31 Turboflotationsapparat	86
Abb. 3.2-32 Druckentspannungsflotation.....	86
Abb. 3.2-33 Die verschiedenen grundlegenden Verfahren in der Magnetscheidung (UNKELBACH 1990)	88
Abb. 3.2-34 Teilprozesse in einem Rundeindicker, schematisch (SCHUBERT 1984)	91
Abb. 3.2-35 Kompressionseindicker Typ AKASET, Bauart AKW	92
Abb. 3.2-36 Wirkungsweise eines Schrägklärers (SCHUBERT 1984).....	92
Abb. 3.2-37 Schrägklärer, Bauart MAB (NEESSE und GROHS 1991/2).....	93
Abb. 3.2-38 Kuchenbildung in einer Kammerfilterpresse, schematisch (Netzsch - Filtrationstechnik).....	93
Abb. 3.2-39 Funktion einer Siebbandpresse, Bauart RPE (HOFFMANN 1988).....	94
Abb. 3.3-1 Verfahrensfließbild für ein typisches Verfahren zur Bodenwäsche	96
Abb. 3.3-2 Massenströme für ein typisches Verfahren zur Bodenwäsche	97
Abb. 3.3-3 Einfaches Waschfließbild.....	98
Abb. 3.3-4 Nachwaschen des Hydrozyklonüberlaufs (Feingut).....	99
Abb. 3.3-5 Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Grobgut).....	100
Abb. 3.3-6 Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Sand) im Aufstromklassierer	100
Abb. 3.3-7 Fließbild mit zweistufigem Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Sandfraktion) und zwischengeschalteter Attritionsstufe (System Schauenburg MAB 1991/2).....	101
Abb. 3.3-8 Mehrstufige Hydrozyklongegenstromwäsche (AKW 1991)	102
Abb. 3.3-9 Eindickung und Nachklärung	103
Abb. 3.3-10 Klärung und Nacheindickung.....	103
Abb. 3.3-11 Fließbild einer mehrstufigen Prozeßwasseraufbereitung	104
Abb. 4.1-1 Fließschema.....	114
Abb. 4.1-2 Fließschema.....	120
Abb. 4.1-3 Fließschema.....	126
Abb. 4.1-4 Fließschema.....	130
Abb. 4.2-1 Fließschema.....	135
Abb. 4.2-2 Fließschema.....	145
Abb. 4.2-3 Fließschema.....	151
Abb. 4.2-4 Fließschema.....	156
Abb. 4.2-5 Fließschema.....	160
Abb. 4.2-6 Fließschema.....	163
Abb. 4.2-7 Fließschema.....	168
Abb. 4.2-8 Fließschema.....	173
Abb. 4.2-9 Fließschema.....	177
Abb. 4.3-1 Schematische Übersicht des NORDAC - Geländes (nach NORDAC).....	181
Abb. 4.3-2 Bereich Behandlung/ Lagerung/ Zwischenlager (nach NORDAC).....	182
Abb. 4.3-3 Behandlungsbereich/HDBW (nach NORDAC)	183
Abb. 4.4-1 Hochdruckinjektion	186
Abb. 6.1-1 Ablaufschema einer Sanierung.....	209

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1-1 Mobilisierbare Schadstoffe.....	9
Tabelle 2.2-1 Einteilung der Porengrößen nach Porendurchmesser und der Wasserspannung (cm Wassersäule bzw. pF-Wert)	19
Tabelle 2.2-2 Kapillare Steighöhe von Wasser in Lockergesteinen (nach HABETHA 1969).	21
Tabelle 2.2-3 Einteilung der Lockergesteine nach DIN 4022	22
Tabelle 2.2-4 Gruppeneinteilung der Lockergesteine nach DIN 18196	25
Tabelle 2.2-4a Gruppeneinteilung der Lockergesteine nach DIN 18196 (Fortsetzung).....	26
Tabelle 2.3-1 Einstufung der Böden nach dem pH-Wert	30
Tabelle 3.1-1 Physikalisch-chemische Behandlungsverfahren für Böden.....	34
Tabelle 3.2-1 Beanspruchungsbedingungen in Läutertrommeln	50
Tabelle 3.2-2 Einsatz von Siebmaschinen in der Bodenwäsche.....	59
Tabelle 3.2-3 Prozeßparameter bei der Wendelrinnensortierung	75
Tabelle 3.2-4 Prozeßbestimmende Parameter der Herdsortierung	78
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Trommelwaschverfahren System ContraCon	115
Tabelle 4.1-1 Einsatzfälle Trommelwaschverfahren System ContraCon.....	116
Tabelle 4.1-2 Reinigungsleistungen Trommelwaschverfahren System ContraCon	117
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ CBBR-Verfahren System Possehl.....	121
Tabelle 4.1-3 Behandlungsdauer (in min) für die einzelnen Bodenfraktionen CBBR-Verfahren System Possehl	122
Tabelle 4.1-4 Reinigungsleistungen CBBR-Verfahren System Possehl	122
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Bodenwaschverfahren Fa. SAN Umwelttechnik	127
Tabelle 4.1-5 Reinigungsleistungen Bodenwaschverfahren Fa. SAN Umwelttechnik	128
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Bodenwaschverfahren BOWA 20 System WU- Walter	132
Tabelle 4.1-6 Reinigungsleistungen Bodenwaschverfahren BOWA 20 System WU-Walter	133
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Hochdruckstrahl-Verfahren System Klöckner Oecotec	139
Tabelle 4.2-1 Reinigungsleistungen Hochdruckstrahl-Verfahren System Klöckner Oecotec	141
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Vibrations-Verfahren System Harbauer	146
Tabelle 4.2-2 Auszüge Referenzliste Bodenreinigungsanlage Berlin Vibrations-Verfahren System Harbauer Stand: Dezember 1991 Gesamtmenge des bisher gereinigten Bodens: ca. 120 000 t	146
Tabelle 4.2-3 Reinigungsleistungen Vibrations-Verfahren System Harbauer.....	148
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik	152
Tabelle 4.2-4 Sanierungsbeispiele Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik	153
Tabelle 4.2-5 Reinigungsleistungen Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik	154
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ DYWINEX-Verfahren System DYWINEX.....	157
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Bodenwaschverfahren System Hafemeister	161
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Preussag Anlagenbauverfahren System Heijmans	165
Tabelle 4.2-6 Reinigungsleistungen Preussag Anlagenbauverfahren System Heijmans.....	166
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Deconterra-Verfahren System Lurgi	170
Tabelle 4.2-7 Reinigungsleistungen Deconterra-Verfahren System Lurgi.....	171

Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ Bodenwaschverfahren System R.E.T.....	174
Leistungsangaben und technische Daten ¹⁾ TerraCon-Verfahren	178
Tabelle 4.3-1 Stationäre Reinigungsanlagen (nach FRANZIUS in NORDAC - Errichtung und Betrieb eines Bodenreinigungszentrums, aktualisiert).....	180
Tabelle 4.5-1 Übersicht über die Bandbreite von Behandlungskosten.....	193
Marktübersicht: Bodenwaschanlagen, Anbieter, Leistungsdaten.....	198
Tabelle 6.3-1 Entscheidungsmatrix zur nicht-monetären Bewertung (Beispiel).....	217

Indexverzeichnis

A

- Abluftreinigung
 - Allgemeines 109
- Abwasser- / Prozeßwasserbehandlung
 - adsorptive Fällung 107
 - Allgemeines 105
 - Elektrophorese 107
 - Fällung 106
 - Ionenaustausch 105
 - Löseprozeß 105
 - Mikro / Ultrafiltration 107
 - Oxidationsverfahren 105
 - Strippen 107
 - Umkehrosmose 105
- Adsorption
 - Allgemeines 83
- adsorptive Fällung 107
- Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik
 - Allgemeines 148, 150
 - Ergebnisse und Bewertung 152
 - Reinigungsleistung 153
 - Sanierungsbeispiele 153
 - technische Daten 152
- Auelehm 15
- Auffüllungen 17
- Aufstromklassierer 67
- Aufstromklassierung / -sortierung 65
- Aufstromsortierer 68
- Austauschkapazität 28
- B**
- Bandpreßfilter 94
- Boden
 - Allgemeines 17
 - Aufbau und Zusammensetzung 17
 - pH-Wert 30
 - physikalisch-chemische
Behandlungsverfahren 34
- Bodenklassifikation nach DIN 18196 24
- Bodenluft
 - Allgemeines 21
- Bodenreaktion 30
- Bodenreinigungsverfahren
 - Allgemeines 4
 - biologische Verfahren 5
 - Erkundungsumfang 31
 - ex-situ-Verfahren 5
 - Extraktionsverfahren 5
 - geochemische Grundlagen 28
 - in-situ-Verfahren 5
 - off-site-Verfahren 5
 - on-site-Verfahren 5
 - Spülverfahren 5
 - thermische Verfahren 5
 - Überblick 4
 - Voruntersuchung 31
- Bodenstruktur 21
- Bodenteilchen 18
- Bodenwaschanlagen, mobile (on-site)
 - Allgemeines 112
 - Bodenwaschverfahren BOWA 20
System WU-Walter 129, 130
 - Bodenwaschverfahren der Fa. SAN
Umwelttechnik 123, 125
 - CBBR-Verfahren System Possehl 118,
119
 - Sanierungsbeispiel Gaswerksboden . 127
 - Sanierungsbeispiel Hydraulikölschaden
in Rheinsedimenten 123
 - Sanierungsbeispiel Stadtwerke
Heidenheim 117
 - Trommelwasch-Verfahren System
ContraCon 112, 113
- Bodenwaschanlagen, semimobile (on-site /
off-site)
 - Allgemeines 134
 - Attritions-Verfahren System AB-
Umwelttechnik 148, 150
 - Bodenwaschverfahren System
Hafemeister 157, 159
 - Bodenwaschverfahren System R.E.T.
..... 171, 172
 - Deconterra-Verfahren System Lurgi 167
 - DYWINEX-Verfahren System
DYWIDAG 154, 155
 - Hochdruckstrahl-Verfahren System
Klöckner Oecotec 134
 - Preussag Anlagenbau-Verfahren System
Heijmans 162
 - Sanierungsbeispiel Projekt Düsseldorf-
Lierenfeld, Sanierung des Geländes
eines ehemaligen Röhrenwerkes 140

Sanierungsbeispiel Projekt ehemalige AEG-Trafo-Union, Stuttgart-Bad-Cannstatt	140	Bodenwaschanlagen, mobile (on-site) Allgemeines	112
Sanierungsbeispiel Projekt Hamburg-Freihafen, Sanierung eines ehemaligen Werftgeländes (Stülckenwerft)	140	Bodenwaschanlagen, semimobile (on-site / off-site)	134
Sanierungsbeispiel Referenzliste Bodenreinigungsanlage Berlin	146	Bodenwaschanlagen, stationäre (off-site)	179
Sanierungsbeispiele	153	Bodenwaschverfahren BOWA 20 System WU-Walter	129, 130
TerraCon-Verfahren	175, 176	Bodenwaschverfahren der Fa. SAN Umwelttechnik	123, 125
Bodenwaschanlagen, stationäre (off-site) Allgemeines	179	Bodenwaschverfahren System Hafemeister	157, 159
NORDAC-Anlage	181, 182, 183	Bodenwaschverfahren System R.E.T.	171, 172
Sanierungsbeispiel Entsorgungszentrum Hamburg	180	Bodenwaschverfahren, in-situ	185
Bodenwäsche		CBBR-Verfahren System Possehl 118, 119	
Abfallnachweisbücher	242	chemische Prozesse in der Sekundärtechnik	105
Abfallrecht	228	Deconterra-Verfahren System Lurgi	167
Ablaufschema einer Sanierung	208	Dichtesortierung	37, 70
Abluftbehandlung	109	Dichtstromtrennung (Strangaustrag) ..	61
Abwasser- / Prozeßwasserbehandlung	105	Dispersionsmittel	54
Adsorption	83	Dokumentation	242
Allgemeines zur Verfahrenstechnik 34, 39		Druckentspannungsflotation	86
Analyseverfahren	238	Dünnstromtrennung (Schirmaustrag) ..	61
Anbieter	198	Durchsatzleistung und Zeitbedarf, Bauzeitenplan	224
Anwendungsbereiche	4	DYWINEX-Verfahren System DYWIDAG	154, 155
Arbeitsschutz	240	Eignung von Lockergesteinen	27
Arbeitsschutzkonzepte	224	Eindickung und Nachklärung	102
Attritions-Verfahren System AB-Umwelttechnik	148, 150	Einsatzbereiche und Grenzen	7
Aufstromklassierer	67	Einschlußflockung	95
Aufstromklassierung / -sortierung	65	Einschränkung durch den Boden	7
Aufstromsortierer	68	Elektrolytflockung oder Koagulation ..	95
Ausführungsplanung	223	Ellipsenschwinger	57
Ausschreibung und Vergabe	232	entfernbar Schadstoffe	8
Bandpreßfilter	94	Entscheidungshilfen	207
Baurecht	230	Entscheidungsmatrix zur nicht-monetären Bewertung (Beispiel)	217
Baustelleneinrichtung	240	Entsorgung der Reststoffe, Beschaffung erforderlicher Genehmigungen	225
Baustelleneinrichtungsplan	225	Entsorgung der Reststoffe	239
Behandlungskosten im Vergleich zu anderen Bodensanierungsverfahren .	193	Entspannungsflotationsapparat	84
Beprobungsumfang und Probennahmeverfahren zur Erfolgskontrolle	224	Entwicklung, F+E-Vorhaben	203
beschränkte Ausschreibung	233	Entwicklungsstand und -tendenzen ..	201
Beweissicherungsverfahren	226	Erfahrungen	202
Bodenreinigung	240	Erfolgsaussichten und Bewertung	206
Bodenvorbereitung	35	Erkundungsumfang	31

Ermittlung Bodenarten und Korngrößen	223	Läuterapparat.....	48
Fällung	83	Läuterapparat mit rotierendem	
Fest/flüssig-Trennung	37	Prozeßraum.....	49
Filterpresse.....	93	Läuterapparat mit rotierenden Einbauten	
Filtration.....	93	(Agitationsorgane).....	51
Firmenanfragen	210	Läutern.....	43
Flachbodenhydrozyklon.....	64	Läutern mit Hilfe der Durchströmung	
Flockung	83, 95	von Schüttungen.....	53
Flotation	37, 79, 80, 83	Läutertrommeln.....	49
Flotationsapparat.....	84, 85	Leistungsbeschreibung	234, 237
freihändige Vergabe.....	233	Leistungsdaten der in Betrieb	
Gegenstromklassierung	66	befindlichen Bodenwaschanlagen	
Genehmigungsplanung, behördliche		197,	
Zulassungsverfahren	227	198	
Genehmigungspraxis.....	232	Leistungsnachweis.....	239
Genehmigungsverfahren nach §10		Linearschwinger	57
BImSchG (Spalte 1).....	228	luftgesteuerte Setzmaschine	72
geochemische Grundlagen	28	Luftschadstoffmessung.....	227
Gesamtbewertung	218	Luftstaubmessung.....	227
Gewährleistung	237	Magnetscheidung.....	87
Grenzen des Verfahrens.....	201	Marktübersicht	198
Grundlagen und Anwendungsbereiche	4	Massenermittlung	223
Grundlagenermittlung	207, 210	Massenströme für ein typisches	
Herdrille	77	Verfahren.....	97
Herdsortierung	77, 78	mechanische Flüssigkeitsabtrennung	
Hochdruckstrahlapparat	54	. 89	
Hochdruckstrahl-Verfahren System		mehrstufige	
Klößner Oecotec.....	134	Hydrozyklongegenstromwäsche.....	101
Hydrozyklon.....	60, 61	mehrstufige Prozeßwasseraufbereitung	
Hydrozyklon mit Unterlaufertasche	65	.....	103
Hydrozyklonklassierung	60	mobile Bodenwaschanlagen (on-site)	
Immissionsschutzrecht.....	227	.....	112
Infrastruktureinrichtungen	225	mobilisierbare Schadstoffe	9
Inputkontrolle.....	237	Nachwaschen des	
in-situ-Verfahren.....	185, 197	Hydrozyklonüberlaufs (Feingut)	99
Kammerfilterpresse.....	93	Nachwaschen des	
Klärung und Nacheindickung	103	Hydrozyklonunterlaufs (Grobgut)	99
Klassierung	55	Nachwaschen des	
Koaleszenz.....	83	Hydrozyklonunterlaufs (Sand) im	
Kombinationen beim Waschen und		Aufstromklassierer	100
Klassieren.....	98	Naßaufschluß.....	36
Kompetenzverteilungen	225	Naturschutzrecht.....	230
Kompressionseindicker.....	91	nicht-monetäre Bewertung	215
Kosten-Nutzen-Betrachtung	214	NORDAC-Anlage	181, 182, 183
Kostenschätzung	210	öffentliche Ausschreibung.....	233
Kreisschwinger	57	Öffentlichkeitsarbeit.....	226
Lärm-, Staub- bzw.		off-site-Verfahren.....	196
Luftschadstoffgehalte.....	242	ökologische Kriterien	216
Lärmmessung	227	on-site-Verfahren.....	196
		organisatorische Kriterien	216
		Outputkontrolle	237
		Planung des Erdaushubs.....	225

pneumatische Apparate	84	Siebklassierung.....	55, 58
Polymerflockung	95	Siebmaschinen.....	59
praktische Vorgehensweise.....	207	Siebprozeß.....	56
Preussag Anlagenbau-Verfahren System Heijmans	162	Soilcrete Verfahren System Keller...	189
Prozeßwasser- und Abwasserbehandlung	38	Sonderbauarten.....	53
Rechtsbereiche	227, 231	Sortierung im pulsierenden Aufstrom (Setzen).....	70
Rührwerksapparat	84	Sortierverfahren.....	69
Rundeindicker	91	Spülverfahren System Holzmann....	186
Sanierungsbeispiel ehemaliges Gaswerk in Bremen-Woltmershausen.....	189	Stand der Technik.....	110
Sanierungsbeispiel Entsorgungszentrum Hamburg	180	stationäre Bodenwaschanlagen (off-site)	179
Sanierungsbeispiel Gaswerksboden.	127	technische Kriterien.....	215
Sanierungsbeispiel Hydraulikölschaden in Rheinsedimenten.....	123	TerraCon-Verfahren	175, 176
Sanierungsbeispiel Projekt Düsseldorf- Lierenfeld, Sanierung des Geländes eines ehemaligen Röhrenwerkes.....	140	Transportwege.....	226
Sanierungsbeispiel Projekt ehemalige AEG-Trafo-Union, Stuttgart-Bad- Cannstatt	140	Trommelwasch-Verfahren System ContraCon	112, 113
Sanierungsbeispiel Projekt Hamburg- Freihafen, Sanierung eines ehemaligen Werftgeländes (Stülckenwerft)	140	Turboflotationsapparat	86
Sanierungsbeispiel Referenzliste		Überwachungsmessungen	242
Bodenreinigungsanlage Berlin.....	146	vereinfachtes Verfahren nach §19 BImSchG (Spalte 2).....	228
Sanierungsbeispiel Stadtwerke Heidenheim.....	117	Verfahrensablaufplan	226
Sanierungsdurchführung	208, 241	Verfahrensfließbild für ein typisches Verfahren.....	96
Sanierungsentscheidung.....	207, 222	Verfahrensschema	36, 38
Sanierungshauptplanung	208, 223	Verfahrensvorauswahl.....	210
Sanierungstagebücher	242	Vergabe	235
Sanierungsvorplanung.....	207	Vibrations-Verfahren System Harbauer	141, 144
Sanierungsvorschlag	218	Vibrationswaschschnecke	51
Sanierungsziele	213, 237	Voruntersuchung	31, 33
Schadstoffablösung	45	Waschen und Läutern.....	43
Schadstoffbilanz.....	243	Waschfließbild	98
Schadstoffseparierung	45	Wasserrecht	230
Schlammbehandlung.....	108	Wendelrinne	74
Schrägklärer	91	Wendelrinnen- und Herdsortierung....	73
Schwingherd	79	Wendelrinnenbatterie	76
Schwingläuterapparat.....	52	Wendelrinnensortierung.....	73, 75
Sedimentation	90	Wurfsieb.....	57
Sekundärprozesse.....	37	Zellenradaustrag einer Setzmaschine .	72
semimobile Bodenwaschanlagen (on- site / off-site).....	134	Zentrifugalprallapparat.....	53
Setzarbeit	70	Zerkleinerung	39
Siebbandpressen.....	94	Zerkleinerungsmaschinen.....	42
		zusammenfassende Bewertung.....	192
		zweistufiges Nachwaschen des Hydrozyklonunterlaufs (Sandfraktion) und zwischengeschalteter Attritionsstufe.....	101

- Bodenwaschverfahren BOWA 20 System
WU-Walter
Allgemeines 129, 130
Ergebnisse und Bewertung..... 132
Reinigungsleistung..... 132
technische Daten 132
- Bodenwaschverfahren der Fa. SAN
Umwelttechnik
Allgemeines 123, 125
Ergebnisse und Bewertung..... 127
Reinigungsleistung..... 128
Sanierungsbeispiel Gaswerksboden. 127
technische Daten 127
- Bodenwaschverfahren System Hafemeister
Allgemeines 157, 159
Ergebnisse und Bewertung..... 161
technische Daten 161
- Bodenwaschverfahren System R.E.T.
Allgemeines 171, 172
Ergebnisse und Bewertung..... 174
technische Daten 174
- Bodenwaschverfahren, in-situ
Allgemeines 185
Sanierungsbeispiel ehemaliges Gaswerk
in Bremen-Woltmershausen..... 189
Soilcrete Verfahren System Keller .. 189
Spülverfahren System Holzmann 186
- Bodenwasser
Allgemeines 19
- C**
CBBR-Verfahren System Possehl
Allgemeines 118, 119
Behandlungsdauer..... 122
Ergebnisse und Bewertung..... 121
Reinigungsleistung..... 122
Sanierungsbeispiel Hydraulikölschaden
in Rheinsedimenten..... 123
technische Daten 121
- chemische Extraktion 108
- D**
Dauerfrostboden und Solifluktionsschutt 13
Deconterra-Verfahren System Lurgi
Allgemeines 167
Ergebnisse und Bewertung..... 170
Reinigungsleistung..... 170
technische Daten 170
- Dichtesortierung..... 37, 70
Dichtstromtrennung (Strangaustrag)..... 61
Druckentspannungsflotation 86
Dünnstromtrennung (Schirmaustrag)..... 61
DYWINEX-Verfahren System DYWIDAG
Allgemeines..... 154, 155
Ergebnisse und Bewertung..... 157
technische Daten 157
- E**
Einschlußflockung 95
Elektrolytflockung oder Koagulation..... 95
Elektrophorese 107
Ellipsenschwinger 57
Entspannungsflotationsapparat 84
- F**
Fallbeispiele
Bodenwäsche ehemaliges Gaswerk in
Bremen-Woltmershausen 189
Bodenwäsche Entsorgungszentrum
Hamburg..... 180
Bodenwäsche Gaswerksboden 127
Bodenwäsche Hydraulikölschaden in
Rheinsedimenten 123
Bodenwäsche Projekt Düsseldorf-
Lierenfeld, Sanierung des Geländes
eines ehemaligen Röhrenwerkes 140
Bodenwäsche Projekt ehemalige AEG-
Trafo-Union, Stuttgart-Bad-Cannstatt
..... 140
Bodenwäsche Projekt Hamburg-
Freihafen, Sanierung eines ehemaligen
Werftgeländes (Stülckenwerft)..... 140
Bodenwäsche Referenzliste
Bodenreinigungsanlage Berlin 146
Bodenwäsche Stadtwerke Heidenheim
..... 117
- Fällung
Allgemeines..... 83, 106
Fest/flüssig-Trennung 37
Filterpresse 93
Filtration
Allgemeines..... 93
Flachbodenhydrozyklon..... 64
Fließerden und Solifluktionsschutt 13
Flockung
Allgemeines..... 83, 95

Flotation.....	37, 79, 80	K	Kammerfilterpresse	93	
Flotationsapparat	84, 85	kapillare Steighöhe.....	21	kapillares Grundwasser	19
Flotationsverfahren	83	Keramisieren (Verglasen)	108	Koaleszenz	83
Flugsande und Dünen	13	Kompressionseindicker.....	91	Korngröße	22
G		Korngrößenverteilung	22	Kornverteilungskurven.....	23
geochemische Grundlagen.....	28	Kreisschwinger.....	57	L	
Grundwasser		Läuterapparat.....	48, 49, 51	Linearschwinger.....	57
Allgemeines	19	Lockergesteine nach DIN 18196.....	24	Lockergesteine nach DIN 4022.....	22
H		Lockergesteinsarten.....	10	Löseprozeß	105
Haftwasser	19	Löb	12	luftgesteuerte Setzmaschine.....	72
Herdrille.....	77	M		Magnetscheidung	87
Herdsortierung	73, 77, 78	mechanische Flüssigkeitsabtrennung	89	Mikro / Ultrafiltration	107
Hochdruckstrahlapparat	54	Mikro / Ultrafiltration	107	mobile Bodenwaschanlagen (on-site) ...	112
Hochdruckstrahl-Verfahren System		Molasse	17	Moränen und Sanderflächen	16
Klößner Oecotec		N		NORDAC-Anlage.....	181, 182, 183, 184
Allgemeines	134	O		off-site-Verfahren	
Ergebnisse und Bewertung.....	139	zusammenfassende Bewertung.....	196	on-site-Verfahren	
Reinigungsleistung.....	140	zusammenfassende Bewertung.....	196	Oxidationsverfahren.....	105
Sanierungsbeispiel Projekt Düsseldorf- Lierenfeld, Sanierung des Geländes eines ehemaligen Röhrenwerkes	140	P		pneumatische Apparate	84
Sanierungsbeispiel Projekt ehemalige AEG-Trafo-Union, Stuttgart-Bad- Cannstatt	140	polymerflockung	95	Porengrößen	19
Sanierungsbeispiel Projekt Hamburg- Freihafen, Sanierung eines ehemaligen Werftgeländes (Stülckenwerft)	140	Porensystem	18	Porenvolumen	18
technische Daten	139	Preussag Anlagenbau-Verfahren System Heijmans		Allgemeines.....	162
Hydrozyklon	60, 61	Ergebnisse und Bewertung.....	165	Reinigungsleistung	166
Hydrozyklon mit Unterlauftasche.....	65	technische Daten	165		
Hydrozyklonklassierung	60				
I					
in-situ-Verfahren	185, 197				
Ionenaustausch					
Allgemeines	28, 105				

Pufferkapazität.....	30	technische Daten	178
R		thermische Sanierungsverfahren	
Redoxpotential.....	31	Bodenwäsche.....	108
Rührwerksapparat.....	84	Trommelwasch-Verfahren System	
Rundeindicker.....	91	ContraCon	
S		Allgemeines.....	112, 113
Schlammbehandlung		Einsatzfälle	116
Allgemeines	108	Ergebnisse und Bewertung.....	116
chemische Extraktion.....	108	Reinigungsleistung	116
Keramisieren (Verglasen)	108	Sanierungsbeispiel Stadtwerke	
thermische Verfahren.....	108	Heidenheim	117
Verfestigung.....	108	technische Daten	115
Schräglklärer.....	91	Turboflotationsapparat.....	86
Schwingherd	79	U	
Schwingläuterapparat	52	Umkehrosmose	
Sedimentation (Schlammanalyse, DIN 18 123).....	23	Allgemeines.....	105
semimobile Bodenwaschanlagen (on-site / off-site)		V	
Allgemeines	134	Verfahrenstechnik Bodenwäsche	
Setzarbeit	70	Abluftbehandlung.....	109
Sicherung und Sanierung von Altlasten		Abwasser- / Prozeßwasserbehandlung	
Flotation	37	.....	105
Sickerwasser		Adsorption.....	83
Allgemeines	19	Allgemeines.....	34
Siebanalyse (DIN 18 123).....	23	Attritions-Verfahren System AB-	
Siebbandpressen	94	Umwelttechnik	148, 150
Siebklassierung.....	55, 58	Aufstromklassierer	67
Soilcrete Verfahren		Aufstromklassierung / -sortierung.....	65
System Keller.....	189, 191	Aufstromsortierer	68
Sorption		Bandpreßfilter.....	94
Allgemeines	28	Bodenvorbereitung	35
Kolloide und Cosolventien	29	Bodenwaschanlagen, mobile (on-site)	
Sortierung im pulsierenden Aufstrom		.....	112
(Setzen).....	70	Bodenwaschanlagen, semimobile (on-	
Sortierverfahren	69	site / off-site)	134
Spülverfahren System Holzmann		Bodenwaschanlagen, stationäre (off-	
Allgemeines	186	site).....	179
Ergebnisse und Bewertung.....	189	Bodenwaschverfahren BOWA 20	
Sanierungsbeispiel ehemaliges Gaswerk		System WU-Walter	129, 130
in Bremen-Woltmershausen.....	189	Bodenwaschverfahren der Fa. SAN	
stationäre Bodenwaschanlagen (off-site)		Umwelttechnik	123, 125
Allgemeines	179	Bodenwaschverfahren System	
Strippung		Hafemeister	157, 159
Allgemeines.....	107	Bodenwaschverfahren System R.E.T.	
T		.....	171, 172
Talschotter und Terrassen.....	14	Bodenwaschverfahren, in-situ	185
TerraCon-Verfahren		CBBR-Verfahren System Possehl 118,	
Allgemeines	175, 176	119	
Ergebnisse und Bewertung.....	179	chemische Prozesse in der	
		Sekundärtechnik	105
		Deconterra-Verfahren System Lurgi	167

Dichtesortierung.....	37, 70	Magnetscheidung.....	87
Dichtstromtrennung (Strangaustrag)..	61	Massenströme für ein typisches	
Dispersionsmittel	54	Verfahren.....	97
Druckentspannungsflotation	86	mechanische Flüssigkeitsabtrennung .	89
Dünnstromtrennung (Schirmaustrag). 61		mehrstufige	
DYWINEX-Verfahren System		Hydrozyklongegenstromwäsche.....	101
DYWIDAG	154, 155	mehrstufige Prozeßwasseraufbereitung	
Eindickung und Nachklärung	102	.....	103
Einschlußflockung	95	mobile Bodenwaschanlagen (on-site)	
Elektrolytflockung oder Koagulation. 95		.....	112
Ellipsenschwinger	57	Nachwaschen des	
Entspannungsflotationsapparat	84	Hydrozyklonüberlaufs (Feingut)	99
Fällung	83	Nachwaschen des	
Fest/flüssig-Trennung	37	Hydrozyklonunterlaufs (Grobgut)	99
Filterpresse.....	93	Nachwaschen des	
Filtration.....	93	Hydrozyklonunterlaufs (Sand) im	
Flachbodenhydrozyklon.....	64	Aufstromklassierer	100
Flockung	83, 95	Naßaufschluß.....	36
Flotation	79, 80	NORDAC-Anlage	181
Flotationsapparat.....	84, 85	pneumatische Apparate	84
Flotationsverfahren	83	Polymerflockung	95
Gegenstromklassierung	66	Preussag Anlagenbau-Verfahren System	
Herdriche	77	Heijmans.....	162
Herdsortierung	77, 78	Prozeßwasser- und	
Hochdruckstrahlapparat	54	Abwasserbehandlung.....	38
Hochdruckstrahl-Verfahren System		Rührwerksapparat.....	84
Klöckner Oecotec.....	134	Rundeindicker	91
Hydrozyklon.....	60, 61	Sanierungsbeispiel Entsorgungszentrum	
Hydrozyklon mit Unterlauftasche	65	Hamburg.....	180
Hydrozyklonklassierung	60	Schadstoffablösung	45
in-situ-Verfahren.....	185	Schadstoffseparierung	45
Kammerfilterpresse.....	93	Schlammbehandlung	108
Klärung und Nacheindickung	103	Schrägklärer.....	91
Klassierung	55	Schwingherd.....	79
Koaleszenz	83	Schwingläuterapparat	52
Kombinationen beim Waschen und		Sedimentation.....	90
Klassieren.....	98	Sekundärprozesse	37
Kompressionseindicker.....	91	semimobile Bodenwaschanlagen (on-	
Kreisschwinger	57	site / off-site)	134
Läuterapparat	48	Setzarbeit.....	70
Läuterapparat mit rotierendem		Siebbandpressen	94
Prozeßraum	49	Siebklassierung.....	55, 58
Läuterapparat mit rotierenden Einbauten		Siebmaschinen.....	59
(Agitationsorgane)	51	Siebprozeß.....	56
Läutern	43	Soilcrete Verfahren System Keller... 189	
Läutern mit Hilfe der Durchströmung		Sonderbauarten.....	53
von Schüttungen	53	Sortierung im pulsierenden Aufstrom	
Läutertrommeln.....	49	(Setzen).....	70
Linearschwinger.....	57	Sortierverfahren.....	69
luftgesteuerte Setzmaschine.....	72	Spülverfahren System Holzmann.....	186

stationäre Bodenwaschanlagen (off-site)		zweistufiges Nachwaschen des	
.....	179	Hydrozyklonunterlaufs (Sandfraktion)	
TerraCon-Verfahren.....	175, 176	und zwischengeschalteter	
Trommelwasch-Verfahren System		Attritionsstufe.....	101
ContraCon.....	112, 113	Verfestigung	
Turboflotationsapparat.....	86	Allgemeines.....	108
Verfahrensfließbild für ein typisches		Vibrations-Verfahren System Harbauer	
Verfahren	96	Allgemeines.....	141, 144
Verfahrensschema.....	36, 38	Ergebnisse und Bewertung.....	146
verfahrenstechnische Grundoperationen		Reinigungsleistung	147
.....	39	Sanierungsbeispiel Referenzliste	
Vibrations-Verfahren System Harbauer		Bodenreinigungsanlage Berlin	146
.....	141, 144	technische Daten	146
Vibrationswaschschnecke	51	Vibrations-Verfahren System Harbauer	
Waschen und Läutern	43	.....	141, 144
Waschfließbild	98	Vibrationswaschschnecke	51
Wendelrinne	74	W	
Wendelrinnen- und Herdsortierung ...	73	Wasserspannung.....	19
Wendelrinnenbatterie	76	Wendelrinne.....	74
Wendelrinnensortierung.....	73, 75	Wendelrinnenbatterie	76
Wurfsieb.....	57	Wendelrinnensortierung.....	73, 75
Zellenradaustrag einer Setzmaschine.	72	Wurfsieb.....	57
Zentrifugalprallapparat.....	53	Z	
Zerkleinerung	39	Zellenradaustrag einer Setzmaschine	72
Zerkleinerungsmaschinen	42	Zentrifugalprallapparat.....	53