

**Vorplanung zur Entsorgung  
von belastetem Abbruchmaterial**

**am Beispiel der  
ehemaligen Metallhütte  
Carl Fahlbusch in Rastatt**

*Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
Griesbachstr. 1  
76185 Karlsruhe*

**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

<b>VORWORT</b> .....	<b>1</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
1.1 VORGANG.....	2
1.2 ZIELSETZUNG UND AUFGABENSTELLUNG .....	2
1.3 UNTERLAGEN .....	4
<b>2. MATERIALAUFKOMMEN, BISHERIGE ENTSORUNGSKATEGORIEN UND -WEGE</b> .....	<b>5</b>
<b>3. BELASTUNGSSITUATION</b> .....	<b>9</b>
<b>4. SANIERUNGSZEITPLAN</b> .....	<b>11</b>
<b>5. ALTERNATIVE BEHANDLUNGSVERFAHREN</b> .....	<b>13</b>
5.1 VORGEHENSWEISE.....	13
5.2 VERFAHRENSÜBERSICHT .....	14
5.3 THERMISCHE VERFAHREN .....	14
5.3.1 System ZÜBLIN.....	15
5.3.2 System WiTec .....	18
5.3.3 JUNG-Entsorgungstechnik .....	20
5.3.4 TIM-Entsorgungslogistik/RECHEM .....	20
5.4 WASCH-/EXTRAKTIONSVERFAHREN .....	21
5.4.1 Modifiziertes CBBR-Verfahren, ÖKO-CHEM.....	22
5.4.2 KLOECKNER-Verfahren, NORDAC .....	24
5.5 BIOLOGISCHE MIETENVERFAHREN .....	26
5.5.1 MYDOS-Verfahren, FUNGI CULTUR; Verfahren PREUSSAG/NOELL .....	27
5.5.2 Verfahren nach HÜTTERMANN.....	29
5.6 PHYSIKALISCH-CHEMISCHE VERFAHREN .....	30
5.6.1 Verfahren ULTRA SYSTEMS .....	30
5.6.2 Verfahren DEGUSSA.....	31
5.7 VERFESTIGUNGSVERFAHREN .....	31
5.7.1 HDT-Verfahren, G.A.A. ....	32
5.7.2 Verfahren HEIDELBERGER ZEMENT.....	33
<b>6. BEWERTUNG DER VERFAHREN NACH ÖKOLOGISCHEN, ORGANISATORISCHEN UND KRITERIEN DER WIRKSAMKEIT</b> .....	<b>35</b>
<b>7. KOSTENSCHÄTZUNG UND -VERGLEICH</b> .....	<b>40</b>
<b>8. GESAMTBEWERTUNG</b> .....	<b>43</b>
<b>9. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>48</b>
<b>ANLAGE</b> .....	<b>49</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>52</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>52</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS</b> .....	<b>53</b>

## Vorwort

Das Ingenieurbüro Trischler und Partner GmbH (TuP) hat im vorliegenden Bericht am Beispiel der ehemaligen Metallhütte Fahlbusch, Rastatt, die Vorplanung von Entsorgungsalternativen inklusive eines wertenden Vergleiches für potentielle Verfahren zur Behandlung und Entsorgung von dioxinbelastetem Abbruchmaterial durchgeführt. Dieser Bericht kann als qualifiziertes Beispiel für den methodischen Ansatz und die grundsätzliche Vorgehensweise bei derartigen Fragestellungen angesehen werden.

Der Bericht ist einzelfallspezifisch entstanden. Insofern können die angegebenen Zahlenwerte und die Wertung der Verfahren nicht ungeprüft und vorbehaltlos auf andere Fälle übertragen werden. Auch alle angegebenen Kosten sind als Richtpreise anzusehen und nicht verbindlich.

Das in einer Anlage zum Bericht enthaltene "Verzeichnis der angefragten Verfahrensanbieter, Entsorgungsunternehmen und Institute" erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und entspricht dem Bearbeitungsstand.

Karlsruhe, im Oktober 1992  
Dr.-Ing. Seng

# 1. Einleitung

## 1.1 Vorgang

Seit Mai 1991 ist Trischler und Partner in Zusammenarbeit mit dem chemischen Sachverständigenbüro Dr. Rackwitz vom Regierungspräsidiums Karlsruhe mit der Sanierung der ehemaligen Metallhütte Carl Fahlbusch in Rastatt beauftragt.

Nach ersten Sofortmaßnahmen zur akuten Gefahrenabwehr und Oberflächendekontamination und der Bestandsaufnahme sämtlicher Gebäudekomplexe hinsichtlich Bauzustand, Baumaterialien nach Art und Menge sowie der Belastungssituation durch polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (im folgenden vereinfachend als Dioxine/Furane bezeichnet) und Schwermetalle soll im Rahmen der Sanierung zunächst ein vollständiger Rückbau mit den erforderlichen Sicherheits- und Arbeitsschutzvorkehrungen und eine geordnete Entsorgung des Abbruchmaterials erfolgen.

Die Vorplanung zur Entsorgung des anfallenden belasteten Abbruchmaterials wird mit diesem Bericht vorgelegt. Nicht behandelt wird die Entsorgung/Verwertung (z. B. Baustoffrecycling) von praktisch unbelastetem Abbruchmaterial sowie die von Büro Rackwitz durchgeführten Waschversuche an kontaminierten Schamottsteinen ehemaliger Ofenanlagen. Ebenfalls nicht Gegenstand dieses Berichts ist die mögliche Boden-/Grundwassersanierung nach Abschluß des Rückbaus (voraussichtlich Ende 1993), über deren Erfordernis und Umfang erst nach der entsprechenden Bestandsaufnahme entschieden wird.

## 1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Bauschutt (Abbruchmaterial) mit schädlichen Verunreinigungen zählt zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, Abfallschlüssel 31441 /1/. Bei der Entsorgung von Abfällen ist daher dem Grundsatz der TA Abfall "Verwertung vor Deponierung" Rechnung zu tragen. Falls es für eine Verwertung erforderlich ist, ist das Material vorher zu behandeln (Dekontamination). Ist aufgrund der primären Schadstoffbelastung bzw. der zu erwartenden Restbelastung nach einer Dekontamination eine Verwertung des Abbruchmaterials nicht möglich, ist dennoch eine weitestgehende Zerstörung, Umwandlung, Abtrennung oder Immobilisierung der Schadstoffe durch geeignete Behandlungsmethoden anzustreben, um das Schadstoffpotential und damit die Anforderungen an die Deponierung des Materials zu reduzieren.

Vorrangiges Ziel der Entsorgungsvorplanung muß es daher sein, (alternative) Behandlungsmethoden für belastetes Abbruchmaterial ausfindig zu machen, die Möglichkeiten zur Verwertung (z. B. Baustoffrecycling, Verfüllung bzw. Wiedereinbau) eröffnen. Hierbei sind u. a. die Anforderungen der Verwaltungsvorschrift /5/ über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg zu berücksichtigen.

Ist eine Verwertung des behandelten Materials nicht möglich, ist eine Deponierung als praktisch unbelastetes oder gering belastetes mineralisches Abbruchmaterial anzustreben. Die ent-

sprechenden Entsorgungskonzepte und Deponieanforderungen für Alt- und Neuanlagen sind Gegenstand der Verwaltungsvorschrift /6/ zur Einführung der Informationsschrift zur Entsorgung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt bzw. der Verwaltungsvorschrift "Konzept für die Ablagerung von Massenabfällen" /7/.

Eine anderweitige Deponierung (z. B. Sonderabfalldéponie) ist erst ins Auge zu fassen, wenn die vorgenannten Möglichkeiten aus Gründen der Akzeptanz bzw. mangels entsprechender Deponiekapazität nicht realisiert werden können oder wenn es an technisch geeigneten und finanziell vertretbaren Behandlungsmethoden fehlt.

Die Aufgabenstellung der Entsorgungsvorplanung läßt sich im Detail wie folgt umreißen:

- Recherche alternativer Behandlungsmethoden für dioxin-/furan- und schwermetallbelasteten Bauschutt
- Anfragen an Verfahrensanbieter und Entsorgungsunternehmen
- Auswertung der Firmenanfragen, Verfahrensvorauswahl
- Technische Beschreibung ausgewählter Verfahren
- Gegenüberstellung und Bewertung nach monetären und nichtmonetären Kriterien
- Gesamtbewertung der Verfahren.

Die Entsorgungsvorplanung mündet in die Entsorgungsplanung, in der ein oder auch mehrere Verfahren hoher Priorität weiterzuverfolgen sind; dabei ist ihre Eignung anhand von Vorversuchen an repräsentativem Abbruchmaterial konkret nachzuweisen, die Ausführungsplanung vorzunehmen, und im Zuge der Ausschreibung sind verbindliche Kostenangebote einzuholen. Parallel dazu kann die Genehmigungsplanung ablaufen.

## 1.3 Unterlagen

Bei der Erarbeitung des vorliegenden Berichts wurden nachstehende Unterlagen verwendet:

- /1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (12.03.1991): 2. allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Teil 1. - Bonn
- /2/ Nicht öffentlich zugängliche Quelle
- /3/ Nicht öffentlich zugängliche Quelle
- /4/ Nicht öffentlich zugängliche Quelle
- /5/ Ministerium für Umwelt und Verkehrsministerium Baden-Württemberg (15.11.1991): Verwaltungsvorschrift über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg - Stuttgart.
- /6/ Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg (13.07.1988): Verwaltungsvorschrift zur Einführung der Informationsschrift zur Entsorgung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt. - Stuttgart
- /7/ Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg (13.05.1991): Konzept für die Ablagerung von Massenabfällen. - Stuttgart.
- /8/ Nicht öffentlich zugängliche Quelle
- /9/ Bundesministerium für Forschung und Technologie (März 1988): Statusbericht zur Altlastensanierung - Technologien und F + E-Aktivitäten. - Bonn
- /10/ Bundesministerium für Forschung und Technologie (Dezember 1990): Technologieregister zur Sanierung von Altlasten (TERESA). - Bonn
- /11/ A. Hüttermann (Oktober 1989): Verwendung von Weißfäulepilzen in der Biotechnologie. - in: GIT Fachz.Lab. 10/89
- /12/ Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (Dezember 1989): Sondergutachten Altlasten, Kurzfassung.- in: Abfallwirtschaftsjournal 2 (1990), Nr. 3
- /13/ Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg (19.09.1991): Leitfaden Siedlungsabfälle. - Stuttgart.
- /14/ Nicht öffentlich zugängliche Quelle

## 2. Materialaufkommen, bisherige Entsorgungskategorien und -wege

Auf dem Kenntnisstand vom Juli 1991 liegt eine grobe Abschätzung der nach dem Rückbau vom gesamten Gelände zu erwartenden Baustoffmengen vor /2/, /3/. Danach sind insgesamt folgende Volumina, bezogen auf den ungebrochenen Zustand der verschiedenen Baustoffe, zu erwarten:

**Tabelle 1: Materialaufkommen**

Baustoff	Volumen [m <sup>3</sup> ]
Hohlblocksteine*	rd. 1.800
Stahlbeton	rd. 3.000
Ziegelsteine	rd. 900
Kalksandsteine*	rd. 350
Schamottsteine*	rd. 200
Putz	rd. 450
gesamt	rd. 6.700

\* inklusive Mörtel

Nach dem Abbruch wird infolge der Auflockerung mit einer Volumenvergrößerung um den Faktor 1,6 gerechnet.

Ausgehend von einer Dichte von 2,0 g/cm<sup>3</sup> für Mauerwerk, Ziegel und Putz sowie 2,4 g/cm<sup>3</sup> für Stahlbeton ergibt sich eine Gesamtmasse von rund 15.000 t.

Für (derzeit) auch nach einer gegebenenfalls vorgeschalteten Behandlung nicht verwertbares Abbruchmaterial wird in Abhängigkeit des Schadstoffpotentials eine geeignete Deponierung oder unter Umständen eine Zwischenlagerung erforderlich.

Zur Zeit existieren in Baden-Württemberg folgende Deponietypen:

- I. Erddeponie **ohne** Basisabdichtung (auch innerhalb WSG) /6/
- II. Erdaushub- und Bauschuttdeponie **ohne** Basisabdichtung, unter Umständen mit bindiger Abdeckung /6/
- III. Bauschuttdeponie **mit** mineralischer Basisabdichtung (60 cm), Sickerwasserfassung und Ableitung /6/
- IV. Hausmülldeponie **mit** Kombinationsabdichtung (mineralisch plus Folie), Sickerwasserfassung und Behandlung (soweit erforderlich), Oberflächenabdichtung z. T. mit Entgasungseinrichtung
- V. Sonderabfalldeponie (obertägig), technische Ausstattung gemäß TA-Abfall, Teil 1 (erste Fassung vom 10.04.1990, aktuelle Fassung vom 12.03.1991).

Insbesondere zur Ablagerung von nicht verwertbarem Bauschutt und Bodenaushub mit schädlichen Verunreinigungen sowie Abfällen aus Boden- und Altlastensanierungen sollen in

Zukunft neue Deponietypen (Monodeponien) geschaffen bzw. alte Deponietypen mit neuen Standards (Monobereiche) ausgerüstet werden.

Die Monodeponien (bzw. -bereiche) sollen generell zur Ablagerung von mineralischen Massenabfällen (soweit nicht verwertbar) dienen, um durch eine gesonderte Ablagerung vorhandenes Hausmülldeponievolumen zu schonen. Nach /7/ werden zwei Kategorien von Monodeponien definiert.

- Kategorie A für "höher belastete mineralische Abfälle" mit Hausmülldeponiestandard nach Stand der Technik (vgl. bisheriger Typ IV).
- Kategorie B für "geringer belastete mineralische Abfälle", Ausstattung entsprechend Kategorie A, jedoch lediglich mineralische Basisabdichtung.

Deponien ohne Basisabdichtung (bisherige Typen I und II) sind zukünftig nicht mehr vorzusehen.

In dem Übergangszeitraum bis die Stadt- und Landkreise ausreichende Monodeponiekapazitäten eingerichtet haben, müssen kontaminierte mineralische Abfälle nach wie vor den vorhandenen Deponien behördlich zugewiesen werden. Dabei sind örtliche Gegebenheiten (Ausstattung, geologisch-hydrogeologische Verhältnisse) und gegebenenfalls bestimmte betriebliche Maßnahmen (z. B. Schaffung getrennter Ablagerungsbereiche) zu berücksichtigen.

Im Zuge der seit 1990 auf dem Fahlbusch-Gelände laufenden Sofortmaßnahmen (Sicherung einsturzgefährdeter Bereiche, Entstaubung) sowie der Bodensanierung im umliegenden Wohngebiet wurden bisher folgende Entsorgungspfade für dioxin-/ furan-belastetes Boden- bzw. Bauschuttmaterial beschränkt:

- Deponierung auf der Bauschuttdeponie "Bruch", Rastatt: Material der Belastungskategorie 1
- Deponierung auf einem Monobereich der Bauschuttdeponie "Bruch", Rastatt: Material der Belastungskategorie 2
- Deponierung in der Sonderabfalluntertageponie "Herfa-Neurode", Hessen: Material der Belastungskategorie 3.

Der jeweilige Deponiestandard führte im vorliegenden Fall unter Berücksichtigung der Empfehlungen des Umweltministeriums Baden-Württemberg hinsichtlich einer Dioxin-/ Furanbelastung von Böden zitiert in /14/ zu folgender Abgrenzung der drei vorgenannten Belastungs- bzw. Entsorgungskategorien:

- Kategorie 1: Dioxin-/Furangehalt < 100 ng TE/kg
- Kategorie 2: Dioxin-/Furangehalt 100 - 1.000 (10.000) ng TE/kg
- Kategorie 3: Dioxin-/Furangehalt > 10.000 ng TE/kg.

Neben den Dioxin-/Furangehalten ist auch die Schwermetallbelastung des "Fahlbuschmaterials" ein Zulassungskriterium zu einer Deponie. Für die Ablagerung von "praktisch unbelastetem Erdaushub" und "unbelastetem mineralischen Abbruchmaterial" auf vorhandenen Erdaushub- und Bauschuttdeponien (Typ II) wurden in /6/ folgende Maximalkonzentrationen im Eluat nach DEV S 4 festgelegt.



**Tabelle 2: Grenzwerte Erdaushub- und Bauschuttdeponie (Typ II) nach /6/**

Schwermetalle	max. Eluat-Konzentration "praktisch unbelasteten Erdaushub; unbelastetes min. Abbruchmaterial" <sup>o</sup>
Blei (Pb)	0,05 mg/l
Chrom, gesamt (Cr)	0,05 mg/l
Kupfer (Cu)	1,0 mg/l
Quecksilber (Hg)	0,001 mg/l
Zink (Zn)	5,0 mg/l

"Leicht verunreinigter Erdaushub" sollte nach /6/ vorrangig auf Bauschuttdeponien (Typ III), "stärker verunreinigter Erdaushub" sowie "verunreinigtes Abbruchmaterial" sollten nach behördlicher Einzelfallentscheidung abgelagert werden.

Aufgrund des neuen Konzeptes zur Ablagerung von Massenabfällen /7/ ist jedoch die Verwaltungsvorschrift zur Entsorgung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt /6/ und damit die in Tabelle 2 genannten Grenzwerte überarbeitungsbedürftig.

Eine vom Umweltministerium eingesetzte Arbeitsgruppe "Entsorgung kontaminierten Erdaushubs" ist daher derzeit damit befaßt, entsprechende Orientierungshilfen zu erarbeiten.

In einem noch unveröffentlichten Zwischenbericht werden sogenannte "Untere" und "Obere Orientierungswerte" (Brutto- und Eluatgehalte) für verschiedene Parameter angegeben. Wird der "Untere Orientierungswert" unterschritten, soll ein Aushub oder Abbruchmaterial in der Regel frei verwendet werden (Wiedereinbau, Recycling). Bei Überschreitung des "Oberen Orientierungswertes" soll das Material im allgemeinen als Sonderabfall entsorgt werden. Bei Schadstoffgehalten zwischen den beiden Orientierungswerten soll ein Material zukünftig auf einer Monodeponie (Kategorie A oder B) abgelagert werden. Tabelle 3 gibt die beiden Orientierungswerte für Schwermetalle als Bruttogehalt, Tabelle 4 als Eluatgehalt nach DEV S 4 wieder.

**Tabelle 3: Orientierungswerte (Bruttogehalte) der Arbeitsgruppe "Entsorgung kontaminierten Erdaushubs" zur Ablagerung auf Monodeponien**

Schwermetalle	Unterer Wert [mg/kg]	Oberer Wert [mg/kg]
Arsen (As)	20	100
Blei (Pb)	100	3.000
Cadmium (Cd)	3	50
Chrom, gesamt (Cr)	100	5.000
Chrom-VI	-	-
Kupfer (Cu)	100	5.000
Quecksilber (Hg)	2	50
Zink (Zn)	300	10.000

**Tabelle 4: Orientierungswerte (Eluatgehalte) der Arbeitsgruppe "Entsorgung kontaminierten Erdaushubs" zur Ablagerung auf Monodeponien**

Schadstoff	Unterer Wert [mg/l]	Oberer Wert [mg/l]
Arsen (As)	0,04	1
Blei (Pb)	0,1	2
Cadmium (Cd)	0,005	0,1
Chrom gesamt (Cr)	0,1	2
Chrom-VI	0,05	0,5
Kupfer (Cu)	0,1	2
Nickel (Ni)	0,1	2
Quecksilber (Hg)	0,001	0,05
Zink (Zn)	0,5	2

Orientierungswerte zur Zuordnung von kontaminiertem Material zu Monodeponien der Kategorie A (Hausmülldeponiestandard) oder der Kategorie B (neuer Bauschuttdeponiestandard) gibt es bisher nicht.

Im vorliegenden Fall ist allerdings bereits aufgrund der Dioxin-/Furangehalte eine behördliche Einzelfallentscheidung erforderlich.

Die für Fahlabbruchmaterial freigegebenen Deponiekapazitäten im Landkreis Rastatt stellen sich derzeit wie folgt dar /2/:

- Bauschuttdeponie "Bruch": ca. 1.000 m<sup>3</sup>
- Monobereich "Bruch": ca. 500 m<sup>3</sup>.

Weitere Kapazitäten für dioxin-/furanhaltiges Material der Belastungskategorie 1 bzw. 2 sind kurzfristig nicht in Aussicht.

Die Kapazität der Sonderabfalluntertageponie "Herfa-Neurode" ist vorläufig unbegrenzt.

### 3. Belastungssituation

Die Dioxin-/Furan- und Schwermetallbelastung der anfallenden Baustoffe ist bisher am besten bei den zuerst zum Abbruch anstehenden Hallen 6 und 7 erfaßt /8/. Die Ergebnisse der bisherigen Analytik sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt.

**Tabelle 5: Belastung Mauerwerk Halle 6 und 7 (ohne vorherige Oberflächendekontamination)**

Schwermetalle	Brutto-Konzentration [mg/kg]	Eluat-Konzentration [mg/kg]
Zn	300 - 5.400, Ø 1.800	0,03 - 0,16, Ø 0,05
Pb	100 - 900, Ø 300	0,10 - 0,32, Ø 0,20
Cu	50 - 300, Ø 130	0,01 - 0,12, Ø < 0,05
Ni	25 - 100, Ø 30	0,03 - 0,14, Ø 0,05
Cd	10 - 50, Ø 15	< 0,01 - 0,05, Ø < 0,05
Cr	10 - 25, Ø 10	0,01 - 0,02, Ø < 0,05
Dioxine/ Furane	[ng TE/kg] 100 - 2000, Ø 300 - 600	

x - y: Wertebereich von Einzelanalysen an Hohlblocksteinen, Mörtel und Putz

Ø z: vermuteter Durchschnittswert im nicht separierten Abbruchmaterial

Grundsätzlich zeigt das Mauerwerk aufgrund seiner Porosität eine durchgehende Belastung, die jedoch von den Außenflächen nach innen abnimmt.

Das Mauerwerk der Hallen 6 und 7 ist, da eine Separierung von Hohlblocksteinen, Mörtel und Putz wegen des meist innigen Verbundes technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll oder möglich ist, aufgrund der oben genannten Belastung insgesamt der bisherigen Entsorgungskategorie 2 (Monobereich "Bruch") zuzuordnen.

Aufgrund noch ausstehender Analysen wird zunächst davon ausgegangen, daß die Belastungssituation des Mauerwerks der übrigen Hallen in etwa mit der von Halle 6 und 7 vergleichbar ist.

Die Belastungssituation der übrigen Baustoffe (insbesondere Stahlbeton, Ziegel) und damit die entsprechende Einstufung ist derzeit ebenfalls noch nicht hinreichend durch Analysen geklärt.

Hinsichtlich des in Kapitel 2 genannten Gesamtvolumens von 6.700 m<sup>3</sup> (ungebrochen) wird mit mindestens 2.000 bis 2.500 m<sup>3</sup> Abbruchmaterial der Kategorie 2 gerechnet und im günstigsten Fall mit 4.200 bis 4.700 m<sup>3</sup> der Kategorie 1. Für Material der Kategorie 1 (< 100 ng TE) zeichnet sich ab, daß ein Großteil der anfallenden Menge als Baustoff recyclingfähig ist (z. B. Halle 8). Nach der Oberflächendekontamination und der Entkernung der Hallen (Abbau ehemaliger Produktionsanlagen) im Zuge der Sofortmaßnahmen wird hochkontaminiertes Material der Kategorie 3 (z. B. Stäube) nicht mehr oder nur in sehr geringem Umfang erwartet.

Die oben genannten Mengen zu entsorgenden Abbruchmaterials der Kategorie 1 und 2 übersteigen deutlich die derzeit für Fahlbuschmaterial zur Verfügung stehenden Deponiekapazitäten im Landkreis (Kap. 2).

## 4. Sanierungszeitplan

Als Zeitziel für die gesamte Sanierung des Fahlbusch-Geländes inklusive der Maßnahmen zur Boden-/Grundwassersanierung im Bereich der Hallen 1 bis 5 a ist derzeit Ende 1993 vorgesehen. Der Detailzeitplan für die einzelnen Abrißmaßnahmen und zugehörigen Planungsphasen ist der nachstehenden Abbildung zu entnehmen.

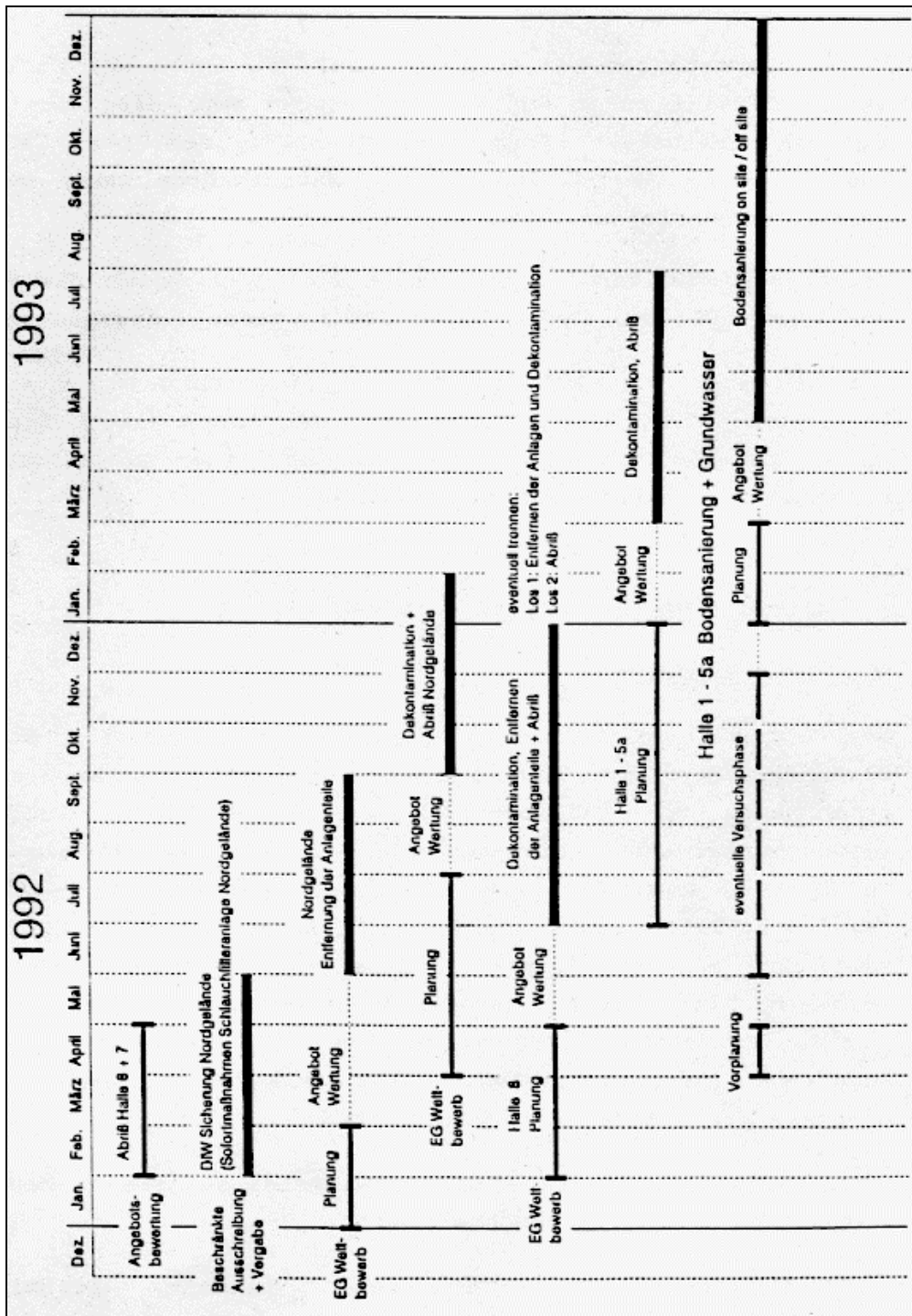


Abb. 1: Sanierungszeitplan

Die Planungsphasen beziehen sich auf den Abriß der Hallen und gegebenenfalls zuvor auf die Entfernung von Anlagenteilen und die Dekontamination. Spätestens zu Beginn der Phase "Planung, Ausschreibung Abriß" sollte die Entsorgungsplanung weitestgehend abgeschlossen sein.

Nach dem bisherigen Zeitplan ergeben sich damit für die Planung der Entsorgung des Abbruchmaterials folgende Zwangspunkte.

Für den Abriß von Halle 8 muß die Entsorgung bis spätestens Ende März 1992 gesichert sein, für den Abriß des Nordgeländes bis spätestens Mitte Mai 1992 und für den Abriß der Hallen 1 bis 5 a bis spätestens Ende Juli 1992.

## 5. Alternative Behandlungsverfahren

### 5.1 Vorgehensweise

Die Recherche alternativer Behandlungsmethoden für dioxin-/ furanbelasteten Bauschutt erfolgte auf der Grundlage eigener Erfahrungen von Kontakten zu Verfahrensanbietern und Entsorgungsunternehmen, zur Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg sowie der Veröffentlichungen des Bundesumweltamtes /9/, /10/ zu Technologien und F- und E-Aktivitäten der Altlastensanierung. Mit den in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführten Vorgaben hinsichtlich Materialaufkommen, Belastungssituation und Sanierungszeitrahmen wurden über 20 Firmen und Institute angefragt (Detailauflistung siehe Anlage). Folgende Fragenkomplexe standen dabei im Vordergrund:

- Behandlung von dioxin- und schwermetallbelastetem Bauschutt möglich, Verfahrensbeschreibung?
- Erprobungsstand (großtechnischer Einsatz, Technikums-, Labormaßstab, Planungsstadium)?
- Verfügbarkeit (Genehmigung, Materialzulassung, Betrieb)?
- Standort/Mobilität?
- Einschränkungen (behandelbare Korngröße, Kontamination)?
- Reinigungsleistung?
- Bodenmechanische, bodenkundliche Eigenschaften des behandelten Materials?
- Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials (Rücknahmeverpflichtung)?
- Kostenrahmen für eine Behandlung?
- Erfordernis, Umfang und Kosten von Voruntersuchungen?

Die Resultate der Anfragen waren sehr unterschiedlich und reichten von fehlender Reaktion oder Absagen über das Aufzeigen von Perspektiven bis hin zu konkreten Interessensbekundungen an Vorversuchen im Technikumsmaßstab. Aussichtsreiche Kontakte wurden vertieft und die entsprechenden Behandlungsverfahren im Sinne einer Vorauswahl berücksichtigt. Die Verfahrensvorauswahl erhebt hinsichtlich der Anbieter einer Verfahrensgruppe (z. B. Wasch-/Extraktionsverfahren) keinen Anspruch auf Vollständigkeit; vielmehr sollen exemplarisch möglichst konkrete Behandlungsperspektiven aufgezeigt und verglichen werden. Es ist durchaus denkbar, daß bei der Planung (im Zuge der Ausschreibung) weitere Anbieter hinzukommen.

## 5.2 Verfahrensübersicht

Aus der Altlastensanierung sind folgende Verfahren zur Behandlung kontaminierter Böden oder Auffüllungen bekannt, deren Anwendung grundsätzlich auf kontaminierten Bauschutt übertragbar erscheint:

- Thermische Verfahren
- Wasch-/Extraktionsverfahren
- (Mikro-) Biologische Mietenverfahren
- Physikalisch-chemische Verfahren
- Verfestigungsverfahren.

Unabhängig vom Verfahrensprinzip lassen sich nach dem Anwendungsort on-site- und off-site-Verfahren unterscheiden. Während bei off-site-Verfahren der Transport des Materials zu einer bestehenden Anlage und eine entsprechende Transportgenehmigung erforderlich werden und ein Entsorgungsnachweis zu führen ist, wird bei on-site-Verfahren eine Anlage auf dem Sanierungsgelände errichtet. Für die Errichtung und den Betrieb ist hierbei ein entsprechendes behördliches Zulassungsverfahren notwendig.

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die verfahrenstechnischen Grundprinzipien der genannten Verfahren sowie ihre spezielle Problematik besonders für den vorliegenden Fall kurz erläutert. Danach werden im Detail die konkreten Ergebnisse der Firmenanfragen dargestellt.

## 5.3 Thermische Verfahren

Bei einer **thermischen Behandlung** sollen organische Schadstoffe durch einen thermischen Energieeintrag zerstört, letztlich zu Kohlendioxid oxidiert werden. Je nach Behandlungstemperatur wird für Schwermetalle in Abhängigkeit vom Siedepunkt nur ein bedingter Reinigungserfolg, teilweise eine Immobilisierung (Oxidation) erzielt. Hinsichtlich der vollständigen Zerstörung von Dioxinen/Furanen bzw. deren "de novo"-Synthese in der Flugasche bzw. Abluft sind hohe verfahrenstechnische Anforderungen zu stellen.

Nach einer thermischen Behandlung ist das behandelte Material biologisch tot und bei hohen Temperaturen zum Teil auch verglast (keramisiert), so daß eine Verwertung als zu bepflanzender Boden erst nach einer Rekultivierung möglich ist. Gesicherte Aussagen zur Wiederverwertbarkeit liegen zur Zeit jedoch nicht vor.

Thermische Verfahren der Abfallbehandlung werden in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Hauptkritikpunkt ist ungeachtet der gesetzlichen Auflagen (Bundesimmissionsschutzverordnung) bzw. deren verfahrenstechnische Umsetzung (Rauchgasreinigung) eine mögliche Problemverlagerung durch schädliche Emissionen in die Luft bzw. durch Niederschlag auch auf den Boden.

Allgemein verfügbare und im Betrieb befindliche Anlagen zur thermischen Behandlung von Böden bzw. Bauschutt im großtechnischen Maßstab existieren derzeit im Inland nicht. Aller-



dings bieten sich bei den Firmen ZÜBLIN und WiTec Perspektiven, nachdem hier die Genehmigungsverfahren für geplante Standorte im Inland abgeschlossen sind (Firmenangabe).

Die Firmen JUNG und TIM greifen auf Anlagen in Dänemark bzw. England zurück; die bekannten Anlagen zur thermischen Bodenbehandlung in den Niederlanden scheiden im vorliegenden Fall aus, da die Einfuhr von dioxin-/furanhaltigem Material nicht gestattet wird.

Aus Gründen der Akzeptanz und aus Zeitgründen ist die Genehmigung einer thermischen on-site-Anlage auf dem Fahlbuschgelände aussichtslos.

### **5.3.1 System ZÜBLIN**

Das von der Firma ZÜBLIN angebotene Verfahren eigener Entwicklung besteht in einer thermischen Bodenreinigung im Hochtemperaturbereich.

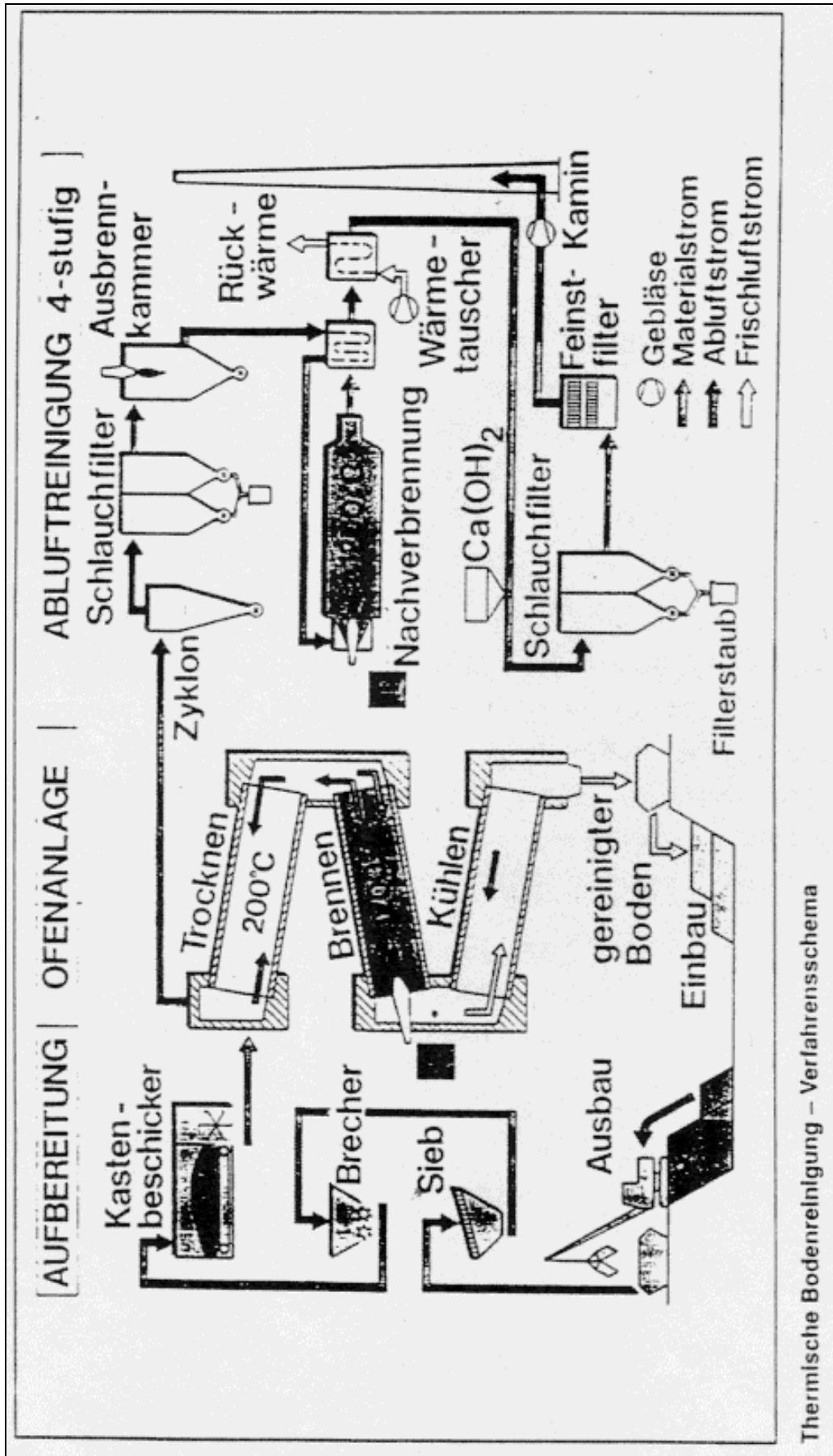


Abb. 2: Thermische Bodenreinigung System ZÜBLIN

Das Verfahren (Abb. 2) läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Materialzerkleinerung in mehrstufigen Brechern auf 30 bis 60 mm Korngröße
- Siebung und Förderung zur Ofenanlage, bestehend aus 3 Drehrohrtrommeln
- Trocknung (Trockentrommel) bei 200 bis 600° C und Ausbrand (Brenntrommel) bei bis zu 1.200° C, Verweilzeit 30 bis 60 Minuten.
- Wärmerückgewinnung (Kühltrommel -> ca. 150° C) und Materialabfuhr
- vierstufige Rauchgasreinigung:
  - Flugstaubabscheidung (Zyklon, Schlauchfilter)
  - Hochtemperaturnachverbrennung (1.200° C) gasförmiger organischer Verbindungen, Verweilzeit 1 - 2 Sekunden
  - Trockensorption saurer anorganischer Verbindungen (z. B. SO<sub>2</sub>, HCl) mit Kalkhydrat, Schlauchfilter
  - Feinstaubfilter (Kassettenfilter), Reststaubgehalt 0,01 mg/Nm<sup>3</sup>.

Nach Angaben der Firma ist seit kurzem eine entsprechende stationäre Anlage mit einem Durchsatz von 4 t/h bei der Stadt Dortmund planfestgestellt. Betriebsbeginn wird voraussichtlich ab Beginn 1993 sein.

Nach bisherigen Probeläufen - Referenzen liegen vor - geht man davon aus, daß chlororganische Schadstoffe in der Anlage bis unter die Nachweisgrenze zerstört werden können; durch einen zusätzlichen Einsatz von Aktivkohle nach der oben genannten Rauchgasreinigung sollen die TE-Werte für Dioxine und Furane im Abgas deutlich unter 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> abgesenkt werden.

In der Anlage in Dortmund darf laut Genehmigung Material mit einer Belastung bis 600 mg/kg Chlororganika sowie einer Dioxin-/Furanbelastung im ng/g-Bereich (1.000 ng TE/kg) behandelt werden.

Hinsichtlich der Schwermetalle findet bei der Hochtemperaturbehandlung eine "keramische Einbindung" statt, die zu einer Immobilisierung führt, so daß die Schwermetallgehalte im Eluat nach Angaben der Firma in der Regel unterhalb der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung liegen.

Auch hinsichtlich der Schwermetallbelastung des Fahlbusch-Materials gemäß Kapitel 3 werden seitens der Firma keine Annahmeeinschränkungen gemacht.

Hinsichtlich der Korngröße hält man allerdings eine Vorzerkleinerung auf maximal 150 mm für erforderlich.

Spezielle Voruntersuchungen oder Pilotversuche erachtet man als nicht notwendig. Der Kostenrahmen für eine Behandlung wird mit ca. 600 - 800 DM/t frei angeliefert angegeben. Nach der Behandlung hält man eine Ablagerung auf einer Erd- und Bauschuttdeponie für möglich; ob hierfür eine Deponie in Nordrhein-Westfalen in Frage kommt oder Rücknahme erforderlich wird, ist derzeit noch ungeklärt.



Das Verfahren (Abb. 3), das zur thermischen Behandlung kontaminierter Böden und schlammiger Rückstände aus Bodenwasch-/Extraktionsverfahren konzipiert wurde, läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Siebung auf maximal 20 mm Korngröße, Kalkhydratzumischung (Primärmaßnahme zur Rauchgasreinigung) und Materialaufgabe in den Wirbelschichtreaktor
- elliptische Zwangszirkulation des gesamten Bettmaterials durch basale Warmlufteindüsung (500° C) und Ausbrand bei ca. 900° C, Verweilzeit 5 Sekunden /10/.
- Teilabscheidung gereinigten Materials aus dem Reaktor durch Impulsabscheider (Umlenkung), wassergekühlte Schnecke
- Hochtemperaturnachverbrennung (1.200° C) des mit dem Abluftstrom ausgetragenen Materialsanteils, Abkühlung (-> ca. 800° C) und Materialabscheidung aus Nachbrennkammer
- Wärmetauscher (Abluft -> ca. 350°, Verbrennungsluft-> ca. 500° C)
- Rauchgasreinigung:
  - Flugstaubabscheidung (Zyklone)
  - Wassereindüsung zur Kondensation gasförmiger Schwermetalle, Verkürzung der Abkühlphase, Anhebung der Rauchgasfeuchte
  - Zudosierung von Kalkhydrat (Sekundärmaßnahme zur Rauchgasreinigung) und Trockensorption saurer anorganischer Verbindungen (z. B. SO<sub>2</sub>, HCl)
  - Feinststaubfilter (Gewebefilter)
  - Aktivkoksadsorber als Endreinigungsstufe für Quecksilber und organische Restgehalte.

Nach Angaben der Firma ist seit kurzem eine entsprechende stationäre Anlage mit einem Durchsatz von 10 t/h in Berlin genehmigt und derzeit im Bau. Der Betrieb wird für das 2. Quartal 1992 angestrebt.

Fahlbusch-Material mit der in Kapitel 3 dargestellten Belastung wird angenommen, wobei man laut Firmanprospekt davon ausgeht, ein Schadstoffemissionsniveau im Bereich der Nachweisgrenzen zu erreichen. Nähere Angaben zur Reinigungsleistung, insbesondere auch hinsichtlich der Schwermetallbelastung, wurden bisher nicht gemacht.

Da der Anlage keine Materialaufbereitung vorgeschaltet ist, muß es in gebrochenem Zustand angeliefert werden; die optimale Korngröße für das Wirbelschichtverfahren liegt zwischen 3 und 7 mm.

Auf erforderliche weitere Voruntersuchungen oder Pilotversuche wurde bisher nicht hingewiesen.

Die Kosten für eine Behandlung nimmt man mit ca. DM 400/t frei angeliefert an, weist jedoch einschränkend auf einen starken Einfluß der Parameter Kornverteilung, Feuchte und Kontaminationsgrad hin.

Nach der Behandlung hält man im Rahmen der Richtwerte des Berliner Senats eine Verfüllung/Deponierung als Bauschutt im Raum Berlin für möglich.



### 5.3.3 JUNG-Entsorgungstechnik

Die Firma JUNG-Entsorgungstechnik verfügt über eine stationäre Anlage zur thermischen Hochtemperaturbehandlung kontaminierter(n) Böden/Bauschutts in Dänemark. Das Verfahren läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Materialaufgabe und Förderung zur Ofenanlage
- Trocknung (Düsenbandtrockner) bei 200° C und Ausbrand (Sinterbandofen) bei 950° C, zur Verweilzeit keine näheren Angaben
- Hochtemperaturnachverbrennung (1.200° C)
- chemische und mechanische Rauchgasreinigung ohne nähere Angaben.

Nach Angaben der Firma bzw. ihres Kooperationspartners ALBERT SCHMID GmbH ist die Anlage ab April 1992 für Fahlbusch-Material verfügbar.

Probleme bei der Einfuhr des Fahlbusch-Materials nach Dänemark sieht man nicht. Vor der Behandlung wird das kontaminierte Material auf einer dänischen Deponie (Kapazität 50.000 t) zwischengelagert. Die Anlage hat einen Durchsatz von 10 t/h.

Hinsichtlich der Reinigungsleistung wird für die Summe organischer Verbindungen eine Restkonzentration von < 20 mg/kg im behandelten Material angegeben, Dioxine/Furane sollen dabei nicht mehr nachweisbar sein. Schwermetalle werden entfernt (verdampfen), soweit deren Siedepunkt unterhalb 950° C liegt. Schwermetalle mit höherem Siedepunkt werden aufoxidiert (Immobilisierung).

Einschränkungen hinsichtlich der Kontamination des zu behandelnden Materials gibt es keine; die maximale Korngröße beträgt 30 mm.

Zum analytischen Nachweis der Reinigungsleistung und zur Festlegung der Behandlungskosten ist unbedingt ein Pilotversuch mit ca. 40 kg kontaminiertem Material auf einer bestehenden Technikumsanlage in Deutschland erforderlich. Die Durchführung ist kurzfristig möglich und kostenfrei, Kosten für die chemische Analytik sind vom Auftraggeber zu übernehmen.

Nach der Behandlung muß das gereinigte Material zurückgenommen und einer weiteren Verwertung/Deponierung zugeführt werden.

### 5.3.4 TIM-Entsorgungslogistik/RECHEM

Über die Firma TIM-Entsorgungslogistik bietet sich die Entsorgungsmöglichkeit kontaminierter(n) Böden/Bauschutts nach England zu einer dortigen thermischen Anlage der RECHEM INTERNATIONAL LIMITED. Zum Verfahren, das mit dem ZÜBLIN-System vergleichbar ist, liegen folgende Informationen vor:

- thermische Hochtemperaturbehandlung bei 1.100° C (Drehrohrofen)
- Hochtemperaturnachverbrennung
- Abkühlung (-> ca. 90° C) durch Wassereindüsung
- Rauchgasreinigung

- Trockensorption saurer anorganischer Verbindungen mit Kalkhydrat
- Flugstaubabscheidung (2 Elektrofilter).

Bezüglich der Materialbeschreibung (Kap. 3) hat die englische Betreiberfirma die Annahme des Fahlbusch-Materials bestätigt und für eine erste Probecharge einen derzeitigen Behandlungspreis von 1.100 Pfund/t (entsprechend etwa DM 3.100/t) inklusive der weiteren Verwertung/Deponierung angegeben. Dieser Preis kann sich je nach Entsorgungsmöglichkeit des behandelten Materials noch ändern.

Aus derzeitiger Sicht der TIM-Entsorgungslogistik steht einer Aus- bzw. Einfuhr nach England nichts im Wege.

Hinsichtlich der Reinigungsleistung liegen nur wenige Angaben vor; die Zerstörungsrate von polychlorierten Biphenylen (PCB) wird mit 99,99995 % angegeben, PCB oder Dioxin-Emissionen werden verneint. Es ist anzunehmen, daß die Reinigungsleistung hinsichtlich organischer Schadstoffe und Schwermetalle grundsätzlich mit der anderer Hochtemperaturbehandlungsanlagen vergleichbar ist.

Hinsichtlich der Materialanlieferung wird eine Verpackung in 200-l-Fässer mit einem Maximalgewicht von 200 kg pro Faß gefordert. Das Material selbst muß frei von Eisenteilen sein; weitere Einschränkungen werden nicht gemacht.

## 5.4 Wasch-/Extraktionsverfahren

Ziel von **Wasch- oder Extraktionsverfahren** ist es, kontaminiertes Material mit einer Wasch-/Extraktionsflüssigkeit so zu behandeln, daß die Schadstoffe freigesetzt und weitestgehend vom Boden/Bauschutt separiert werden. Als Wasch-/Extraktionsflüssigkeit werden Wasser eventuell unter dem Zusatz von Lösungsvermittlern (Tensiden), wäßrige Lösungen von Säuren/ Laugen oder auch organische Lösungsmittel verwendet.

Durch das eigentliche Wasch-/Extraktionsverfahren werden die Schadstoffe nicht zerstört, sondern in den anfallenden Reststoffen (Schlamm, Abwasser) aufkonzentriert, die weiterbehandelt oder entsorgt werden müssen.

Im vorliegenden Fall sind spezielle verfahrenstechnische Anforderungen an die Abtrennung der Schadstoffe besonders aus den Poren des Bauschuttkorns zu stellen. Außerdem erfordert der Umgang mit aufkonzentrierten dioxin-/furanreichen Reststoffen erhöhte sicherheitstechnische Vorkehrungen.

Die öffentliche Akzeptanz von Wasch-/Extraktionsverfahren zur Reinigung kontaminierter Böden ist gegenüber thermischen Verfahren vergleichsweise hoch, vor allem deshalb, weil während der Behandlung keine neuen Schadstoffe (z. B. Dioxine) gebildet werden. Eine vergleichbare Emissionsproblematik gibt es daher bei Wasch-/Extraktionsverfahren nicht.

Dem steht allerdings die Reststoffproblematik (Schlamm-/ Abwasserbehandlung bzw. -entsorgung) gegenüber.

Während der verfahrenstechnische Aufwand eines Wasch-/ Extraktionsverfahrens in der Regel dem eines thermischen Verfahrens entspricht, ist jedoch der finanzielle Aufwand aufgrund des geringeren Energieeinsatzes - thermische Verfahren benötigen kostenintensive Stützbrennstoffe - geringer.

Wasch-/Extraktionsverfahren bieten außerdem den Vorteil, daß sie in der Lage sind, Schwermetalle aus einem kontaminierten Boden zu entfernen.

Aus den vorgenannten Gründen gibt es derzeit zahlreiche Anbieter von Wasch-/Extraktionsverfahren, meist als on-site-Verfahren konzipiert, auf dem Markt, wobei in vielen Fällen großtechnische Erfahrungen und Referenzen vorliegen.

Der Anwendungsbereich erstreckt sich bisher jedoch, was organische Stoffe anbelangt, im wesentlichen auf Kontaminationen sandig-kiesiger Böden mit Mineralölkohlenwasserstoffen, aromatischen und polycyclischen Kohlenwasserstoffen sowie leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen.

Die Mischkontamination (Schwermetalle plus Dioxine/Furane) des Fahlbusch-Materials sowie der Umstand, daß die Baustoffe nicht nur oberflächlich belastet, sondern von den Kontaminanten durchdrungen sind, bedeuten einen Sonderfall in der Anwendung eines Wasch-/Extraktionsverfahrens. Es gibt jedoch Perspektiven in Form einer on-site-Behandlung durch die Firma ÖKOCEM sowie einer off-site-Behandlung im Norddeutschen Altlastensanierungs-Centrum (NORDAC) in Hamburg.

### 5.4.1 Modifiziertes CBBR-Verfahren, ÖKOCEM

Das von der Fa. ÖKOCEM, vormals CHEMICOR als Lizenznehmer der POSSEHL GmbH angebotene CBBR-Verfahren (Chemisch-Biologisches-Bodenrecycling) stellt ein on-site-Verfahren zur Reinigung und biologischen Reaktivierung kontaminierter Böden in Form eines Waschverfahrens mit Wasser unter Zusatz von Tensiden und "aktivierter" Mikroflora dar.

Für das Verfahren, das kurz als "Flotationsverfahren mit ruhendem Boden" charakterisiert wird, liegen eine Reihe von Praxiserfahrungen aus der Behandlung belasteter Böden vor (Mineralöl-, PAK-Schäden). Für den vorliegenden Fall soll das Verfahren in der Form modifiziert werden, daß der eigentlichen Wäsche mit Wasser zunächst eine Extraktion der wasserunlöslichen Dioxine/Furane mit einem organischen Lösemittel (Petroleum) vorgeschaltet wird.

Das modifizierte CBBR-Verfahren läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Materialaufgabe in den Wasch-/Extraktionscontainer mittels Radlader o. ä. (Füllvolumen ca. 9 m<sup>3</sup>)
- Extraktionsphase:
  - Zugabe von 3 bis 4 m<sup>3</sup> organischem Lösemittel (Petroleum) zur Extraktion von Dioxinen/Furanen
  - Vermischung und Verwirbelung durch basale Druckluftinjektion zum Materialaufschluß und zur Schadstofffreisetzung in das Waschmedium



- Verdrängung des schadstoffhaltigen Lösemittels durch frisches Lösemittel von unten nach oben
- Abzug des schadstoffhaltigen Lösemittles über eine Fließrinne am oberen Containerrand
- Waschphase analog zur Extraktionsphase, jedoch mit Wasser unter Zusatz von Tensiden und Mikroorganismen zur Reinigung des nach der Extraktionsphase lösemittelgesättigten Materials und zur Entfernung wasserlöslicher Schadstoffe (Schwermetalle) bzw. zur biologischen Reaktivierung
- Trocknungsphase: Abziehen des Oberflächenwassers, Trocknung über Vakuumfilterkerzen (Restfeuchte 5 bis 15 %)
- hydraulische Entleerung des Containers und Materialabtransport
- Lösemittelaufbereitung und Reststoffbehandlung
  - Vakuumdestillation und Rückführung des Destillats in den Lösemittelkreislauf
  - Dechlorierung des aufkonzentrierten Destillationsrückstandes mit elementarem Natrium (gekapseltes System)
  - Zerstörung verbleibender größerer organischer Molekülkomplexe (z. B. Phenole) durch UV-Oxidation
  - thermische (off-site) Behandlung des verbleibenden flüssigen Reststoffes (frei von organischen Halogenverbindungen)
- Waschwasseraufbereitung ohne nähere Angaben und Rückführung in den Wasserkreislauf.

Nach Angaben der Firma wurde bereits dioxinkontaminierter Boden nach dem modifizierten Verfahren im Labormaßstab erfolgreich behandelt. Bei einer Eingangskonzentration von etwa 10.000 ng TE/kg wurden Restkonzentrationen von 10 bis 50 ng/kg erreicht (Reinigungsgrad 99,5 bis 99,9 %). Hinsichtlich der Schwermetalle liegen bisher keine Angaben zum Reinigungsgrad vor.

Nach der Behandlung wird ein Restgehalt an nicht mehr auswaschbaren Mineralölkohlenwasserstoffen (Petroleum) von < 300 mg/kg im gereinigten Material erwartet (zum Vergleich: A-Wert Hollandliste = 100 mg/kg, B-Wert = 1.000 mg/kg).

Zur Überprüfung dieser Laborergebnisse hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf das Fahlbusch-Material sowie auf den großtechnischen Maßstab sind zunächst entsprechende Technikumsversuche in der Pilotanlage (Füllvolumen 250 dm<sup>3</sup>) erforderlich. Die Kosten für 10 Versuche werden mit rund DM 120.000,00 (ohne Analytik) angegeben, wobei die Firma ÖKOCHEM 50 % der Gesamtversuchskosten selbst übernehmen würde. Die restlichen 50 % wären vom Auftraggeber zu tragen, würden jedoch im Falle einer Auftragserteilung zur Sanierung angerechnet.

Aus der vorgeschlagenen Versuchsserie wird sich eine Verfahrensoptimierung ergeben, nach der die Rahmenparameter (z. B. Verweilzeit) für die Reinigung von Fahlbusch-Material in der Großanlage festgelegt werden. Für die Durchführung der Versuchsserie sind etwa 2 Monate zu veranschlagen. Für die Umsetzung in den großtechnischen Maßstab, die im wesentlichen in der Ergänzung der bestehenden Anlage um die Lösemittelaufbereitung und Reststoffbehandlung besteht, sind weitere 2 Monate anzusetzen.

Hinsichtlich der Genehmigung der Anlage wird seitens der Firma eine Zulassung nach der Bauart gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz angestrebt; mit der Erteilung durch die für den Herstellungsort zuständige Behörde wird im Mai 1992 gerechnet.

Nach bisheriger Schätzung der Firma werden die Behandlungskosten DM 450,00 bis 500,00/t nicht überschreiten. Das Material ist allerdings vorher auf eine Korngröße < 40 mm zu brechen. Nach der on-site-Behandlung wird eine weitere Verwertung/ Deponierung des gereinigten Materials erforderlich. Nach /5/ ist jedoch aufgrund des Restpetroleumgehaltes (vgl. oben) eine Verwertung im Straßenbau Baden-Württemberg fraglich.

#### **5.4.2 KLOECKNER-Verfahren, NORDAC**

Die Firma NORDAC, Norddeutsches Altlastensanierungs-Centrum GmbH, ist Lizenznehmer für das KLOECKNER-Hochdruckbodenwaschverfahren und betreibt eine stationäre Anlage mit einem Durchsatz von bis zu 30 bis 50 t/h in Hamburg.

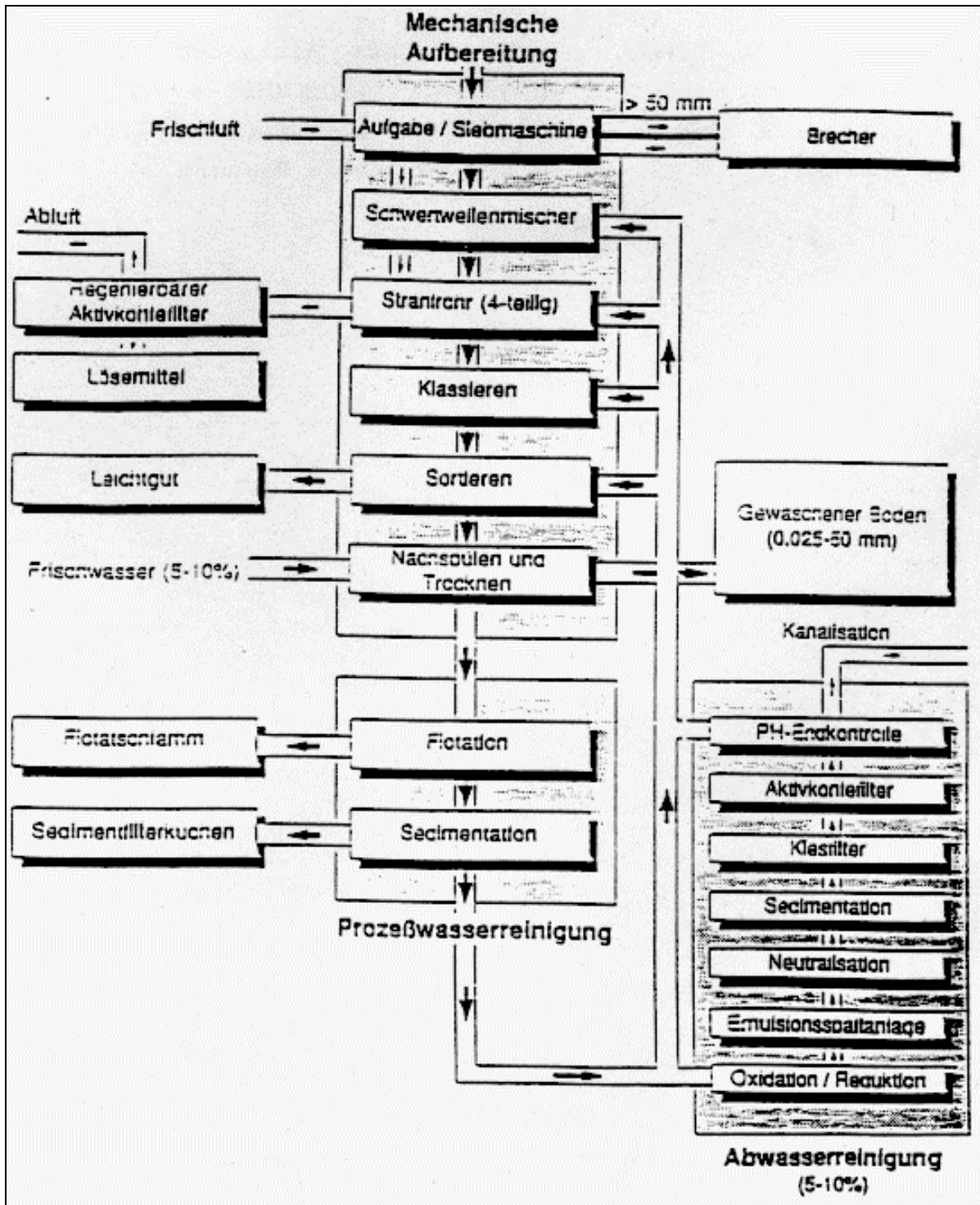


Abb. 4: KLOECKNER-Hochdruckbodenwaschverfahren

Das Verfahren (Abb. 4) läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Materialaufgabe und Bodenvorbereitung (Siebung, Magnetabscheider)
- Zugabe von Prozeßwasser und Homogenisierung (Naßaufschluß)
- Durchtritt des Materials durch ein Hochdruck-Strahlrohr mit ringförmig angeordneten Wasserdüsen (Druck bis 350 bar)
- allseitiger Wasserbeschuß (ohne Hilfschemikalien) der Materialkörner, Beschleunigung ( $V = \text{ca. } 900 \text{ km/h}$ ) und Aufprall zur "Abspaltung" anhaftender Schadstoffe

- Korngrößenklassierung und Dichtesortierung
- Nachspülen mit Frischwasser
- Trocknung und Abfuhr des gereinigten Materials
- Prozeßwasseraufbereitung:
  - Flotation (Schwebstoffabtrennung)
  - Fällung/Flockung (Schnellklärsystem)
  - Rückführung in den Waschkreislauf
- Abwasserreinigung:
  - Oxidation/Reduktion
  - Emulsionsspaltung
  - Neutralisation
  - Kiesbettfilter
  - Aktivkohlefilter
  - teilweise Verwendung zur Frischwasserspülung/Einleitung in die Kanalisation
- Abluftreinigung:
  - Wasserabscheider
  - Einweg-Aktivkohlefilter
  - regenerierbarer Aktivkohlefilter, Lösemittelrückgewinnung.

Die NORDAC ist grundsätzlich daran interessiert, das Fahlbusch-Material zu behandeln. Zur endgültigen Klärung der Waschbarkeit ist jedoch eine Probewäsche in der Großanlage mit Originalmaterial (ca. 200 t) erforderlich.

Die Kosten für die reine Behandlung (Wäsche ohne Entsorgung der festen Reststoffe) werden mit DM 240,00/t angegeben. Der Reststoffanfall und die Entsorgungsmöglichkeit hat jedoch einen entscheidenden Einfluß auf die Behandlungskosten insgesamt. Bei einem Reststoffanfall von 30 % der Eingangsmasse und einer Entsorgung über die WiTec-Anlage (Kap. 5.3.2) sind für die Behandlung insgesamt ca. DM 450,00/t (Wäsche inklusive Entsorgung der festen Reststoffe) anzusetzen, bei einer Entsorgung nach Herfa-Neurode ca. DM 600,00/t.

Das zu behandelnde Material sollte eine Korngröße von 500 mm nicht überschreiten. Nach der Behandlung geht man nach bisheriger Einschätzung davon aus, daß das behandelte Material auf einer Bauschuttdeponie abgelagert werden kann.

## 5.5 Biologische Mietenverfahren

(Mikro-) **Biologische Verfahren** nutzen die Fähigkeit natürlicher (Mikro-) Organismen wie z. B. Bakterien oder Pilze aus, organische Schadstoffe in ihren Stoffwechselhaushalt aufzunehmen und zu unbedenklichen Endprodukten (Kohlendioxid, Wasser) abzubauen. Das zu behandelnde Material muß dazu vorher auf sogenannten Mieten ausreichend mit Biomasse angereichert und homogen vermischt werden, was zu einer beträchtlichen Volumenvergrößerung führen kann. Außerdem sind für die Abbauorganismen optimale Lebensbedingungen

einzustellen, d. h. es ist für eine ausreichende Versorgung mit Sauerstoff, Wasser und Nährsalzen zu sorgen.

Organische Schadstoffe unterliegen häufig einem selektiven Abbau, d. h. verschiedene Schadstoffe werden unterschiedlich schnell abgebaut, so daß nach einer bestimmten Zeit sehr unterschiedliche Abbauraten registriert werden können. Je komplizierter die Struktur der Ausgangsverbindungen ist, desto eher ist beim Abbau mit möglicherweise ebenfalls toxischen Zwischenprodukten zu rechnen. Der Abbau organischer Schadstoffe kann durch die toxische Wirkung von Schwermetallen auf die (Mikro-) Organismen in Abhängigkeit von der Konzentration nachteilig beeinflußt werden.

Schwermetalle selbst werden biologisch nicht abgebaut, allenfalls in der Biomasse angereichert. Sie sind daher im behandelten Material nach wie vor enthalten, weshalb die Möglichkeit einer Verwertung des behandelten Materials im vorliegenden Fall fraglich ist.

Biologische Mietenverfahren zur Sanierung kontaminierter Böden zeichnen sich grundsätzlich jedoch durch ihre Umweltverträglichkeit (keine Emissions- oder Reststoffproblematik) und daher hohe öffentliche Akzeptanz aus. Der im Vergleich zu thermischen Verfahren und Wasch-/Extraktionsverfahren geringere verfahrenstechnische Aufwand wirkt sich zudem günstig auf die Kosten aus.

Unter der Grundvoraussetzung, daß in dem kontaminierten Material ein biologisch abbaubares Schadstoffspektrum in physiologisch unschädlichen Konzentrationsbereichen vorliegt, liegt die Hauptproblematik bei biologischen Verfahren in der Kontrolle und in der Optimierung des Abbauprozesses, verbunden mit Sanierungszeiträumen je nach Schadensfall von mehreren Monaten bis hin zu Jahren.

Vergleichsweise schnelle und umfassende Sanierungserfolge sind am ehesten bei überschaubaren Schadstoffspektren (z. B. Benzin-/Mineralölkohlenwasserstoffe oder BTX-Aromaten) zu erwarten.

Aufgrund der guten Akzeptanz gibt es derzeit zahlreiche Anbieter von biologischen Mietenverfahren auf dem Markt, wobei in einigen Fällen großtechnische Erfahrungen und Referenzen vorliegen.

Der Anwendungsbereich erstreckt sich bisher jedoch nicht auf dioxinbelastetes Material, in dieser Richtung wird allerdings verstärkt Forschungs- und Entwicklungsarbeit betrieben. Derzeitige Perspektiven werden in den folgenden Kapiteln aufgezeigt.

### **5.5.1 MYDOS-Verfahren, FUNGI CULTUR; Verfahren PREUSSAG/NOELL**

Die Firmen FUNGI CULTUR und PREUSSAG/NOELL sind beide im Begriff, ein Verfahren zur biologischen Bodenreinigung, bei dem komplexe aromatische Verbindungen (z. B. PCB, Dioxine) unter Einsatz von Weißfäulepilzen abgebaut werden sollen, im Labor- bzw. Technikumsmaßstab zu testen und zur großtechnischen Anwendung zu bringen. Grundsätzlich will man sich dabei die Fähigkeit der Weißfäulepilze - u. a. gehört auch der als Speisepilz bekannte Austernpilz dazu - zum natürlichen Abbau von Lignin zunutze machen. Lignin ist



neben Zellulose der wichtigste Bestandteil pflanzlicher Zellwände, so daß der Ligninabbau zu Kohlendioxid und Wasser (z. B. bei der Zersetzung von Holz, Stroh, etc.) in der Natur im Rahmen des biologischen Kohlenstoffkreislaufs in großem Umfang vollzogen wird.

Das Lignin selbst ist ein komplexes Molekül, das aus zahlreichen aromatischen Grundbausteinen (Benzolringe) besteht und aufgrund seiner Bindungsstruktur resistent gegen bakteriellen Abbau ist (Schutzfunktion für die Pflanze).

Der Abbau von Lignin durch Weißfäulepilze wird außerhalb der Pilzorganismen (extrazellulär) in sehr unspezifischer Weise durch Enzyme (Oxidasen, Peroxidasen) katalysiert. Durch diese besondere Abbaustrategie können auch neben dem Lignin vorhandene organische Schadstoffe ähnlicher Struktur (PAK, PCB, Chlorphenole, PCDD/PCDF) mit erfaßt und zerstört werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Behandlung kontaminierter Böden ist jedoch, daß der Pilz von seinem "gewohnten" Lignin-Substrat aus in den Boden einwächst; im Boden allein ist der Pilz nicht lebensfähig.

Die beiden eingangs genannten Firmen arbeiten jeweils an einem Mietenverfahren, bei dem der zu behandelnde Boden in einer bestimmten Art und Weise mit einem durch Weißfäulepilze "aktivierten" Strohsubstrat vermischt wird.

Das MYDOS-Verfahren (Mycelial Decontamination of Soils) der Firma FUNGI CULTUR läßt sich bis zu einer großtechnischen Anwendung in folgende Phasen unterteilen:

- Substrat-Aufbereitung (Zerkleinern von z. B. Stroh, Hygenisieren, Abpressen)
- Pilz-Substrat-Herstellung (Aufbringen der Pilzbrut, Wachstumsphase)
- Vorversuche unter kontrollierten Bedingungen (Klimakammer) im Labormaßstab
- Feldversuche (on-site-Verfahren) unter realitätsnahen Bedingungen im m<sup>3</sup>-Maßstab
- Aufbau der Infrastruktur (Miete, Labor) für den großtechnischen Einsatz.

Das Verfahren befindet sich derzeit u. a. für einige dioxinbelastete Böden in der Laborversuchsphase; im ersten Quartal 1991 rechnet man mit dem Start erster Feldversuche.

Die Firma stellt folgende spezifische Eigenschaften und Vorteile des Verfahrens heraus:

- minimaler Energieverbrauch gegenüber thermischen oder Wasch-/ Extraktionsverfahren
- breites Abbauspektrum, u. a. für PCB, PCDD, PCDF nachgewiesen
- Abbau auch schwerlöslicher Schadstoffe bis an die Nachweisgrenze
- die biologische Bodenaktivität bleibt erhalten bzw. wird zusätzlich verbessert
- Prognose erreichbarer Sanierungsziele nach den Voruntersuchungen
- eigene Erzeugung von Pilzsubstrat in großtechnischem Maßstab.

Hinsichtlich der gesamten Sanierungsdauer werden folgende Zeitangaben gemacht:

Pilzsubstratherstellung	ca. 1/2 Monat
Laborversuche	ca. 1 Monat
Feldversuche	ca. 3 Monate
eigentliche Sanierung	3 - 9 Monate

Insgesamt ist danach mit einer Sanierungsdauer von über 1 Jahr zu rechnen.

Die Firma ist bereit, auch mit Fahlbuschmaterial (Menge ca. 10 kg) Laborversuche durchzuführen; Analysenkosten wären vom Auftraggeber zu tragen.

Die Kosten für eine Behandlung im großtechnischen Maßstab werden seitens der Firma derzeit mit DM 255,00/t (ohne begleitende Analytik) geschätzt. Bei einer on-site-Behandlung auf dem Fahlbusch-Gelände ist in der Logistik des Abbruchs der Platzbedarf der Miete zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der für die Behandlung geeigneten Korngröße werden 3 bis 4 mm angegeben. Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß Schwermetalle nicht beseitigt werden.

Da dem zu behandelnden Material Pilz-Stroh-Substrat in einem Gewichtsverhältnis von 20 % und mehr zugesetzt wird, ist mindestens mit einer Volumenverdoppelung zu rechnen. Die Möglichkeit einer Verwertung des behandelten Materials, das noch schwermetallhaltig ist und einen hohen Anteil an zersetzten organischem Material enthält, ist ungewiß.

Die Firma PREUSSAG/NOELL hat ihr Weißfäulepilzverfahren im Labormaßstab u. a. an PCB-belastetem Boden (45 kg) angewendet und bei einer Ausgangskonzentration von rund 1 mg/kg PCBgesamt nach 10 Wochen einen Restgehalt von rund 0,002 mg/kg ermittelt (Abbaurate > 99 %). Erfahrungen mit Dioxinen gibt es bisher nicht, es ist jedoch geplant, ab Mai 1992 Forschungen in dieser Richtung zu betreiben.

Das Verfahren der PREUSSAG/NOELL dürfte aufgrund der Ähnlichkeit auch kostenmäßig dem MYDOS-Verfahren von FUNGI CULTUR entsprechen.

## **5.2.2 Verfahren nach HÜTTERMANN**

Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) ist zusammen mit Prof. Hüttermann vom Forstbotanischen Institut der Universität Göttingen im Begriff, ein Forschungsvorhaben zum biologischen Abbau von Dioxinen zu realisieren. Dabei soll für ein von Hüttermann entwickeltes Verfahren, bei dem es sich ebenfalls um ein Weißfäulepilzverfahren handelt, systematisch und umfassend Abbauvorgänge und Abbauraten von Dioxinen und Furanen untersucht werden.

Das Forschungsprogramm sieht zunächst Laborversuche und Abbautests an einzelnen ausgewählten Dioxinverbindungen, sogenannte Kongenere (synthetische Probe) vor. Danach soll mit radioaktiv markierten Kongeneren gearbeitet werden, um Abbauvorgänge selbst und die mögliche Entstehung von Metaboliten oder Polymeren zu untersuchen.

Nach Abschluß der Laborphase sollen Versuche im Technikumsmaßstab folgen.

Bei erfolgreichem Abschluß, d. h. wenn ein entsprechender Abbaunachweis für Dioxine erbracht wird, kann nach Angaben der LfU auf ein "serienreifes" Verfahren, von Hüttermann für PCB und PAKs entwickelt, zurückgegriffen werden.

Das Grundprinzip des Dioxinabbaus durch Weißfäulepilze entspricht dem im vorangegangenen Kapitel dargestellten. Der wesentliche Unterschied des Verfahrens nach HÜTTERMANN gegenüber dem Verfahren von FUNGI CULTUR bzw. PREUSSAG/NOELL liegt im Pilzsubstrat. Hüttermann verwendet anstelle von Stroh ein flüssiges Substrat (Wasser plus ligninhal-

tige pflanzliche Biomasse), mit dem der zu behandelnde Boden vermischt wird. Hüttermann sieht folgende Vorteile seines Verfahrens:

- vergleichsweise geringe Volumenvergrößerung
- gute Homogenisierung
- geringere Temperaturerhöhung (kein Komposthaufeneffekt) im Innern der Miete (Anmerkung: Weißfäulepilze sterben bei  $T > 40^\circ \text{C}$  ab).

Nach Auffassung der LfU ist mit den Endergebnissen des Forschungsvorhabens frühestens Ende 1992 zu rechnen, so daß eine Umsetzung des Verfahrens in einen großtechnischen Maßstab nicht vor Mitte 1993 zu erwarten ist.

## 5.6 Physikalisch-chemische Verfahren

Bei **physikalisch-chemischen Verfahren** wird eine Zerstörung/ Oxidation organischer Schadstoffe durch Strahlungsenergie und/oder durch Behandlung des kontaminierten Materials mit chemischen Oxidationsmitteln (Wasserstoffperoxid, Ozon) angestrebt. Schwermetalle werden nicht zerstört, eine Verwertung des behandelten Materials ist daher fraglich.

Im Gegensatz zur Behandlung von Flüssigkeiten, sind bei der Behandlung von Böden und insbesondere Bauschutt spezielle verfahrenstechnische Anforderungen an die Exposition des Materials bei einer Bestrahlung bzw. an die Vermischung mit einem Oxidationsmittel zu stellen.

Physikalisch-chemische Verfahren sind aus der Wasseraufbereitung bzw. Grundwassersanierung bekannt und am Markt etabliert (z. B. UV-Behandlung, Ozonierung), bei der Bodenreinigung spielen sie bisher eine unbedeutende Rolle.

Die Umweltverträglichkeit bzw. das Störfallrisiko insbesondere beim Einsatz großer Chemikalienmengen ist im Einzelfall kritisch zu analysieren.

Zwei für den vorliegenden Fall interessante Entwicklungsansätze der Firmen ULTRA SYSTEMS und DEGUSSA sollen kurz behandelt werden.

### 5.6.1 Verfahren ULTRA SYSTEMS

Die Firma ULTRA SYSTEMS bietet auf dem Markt ein Verfahren zur Behandlung kontaminierter Wässer in Form einer "katalytischen UV-Behandlung" an.

Mit Hilfe ultravioletter Strahlung bestimmter Wellenlänge und Zusatz geringer Mengen von Oxidationsmitteln (Wasserstoffperoxid, Ozon) werden die Bindungen organischer Schadstoffmoleküle (z. B. chlorierte Kohlenwasserstoffe) gespalten und die Schadstoffe zu Kohlendioxid und anorganischem Chlorid mineralisiert. Sehr kompakte stationäre und mobile Anlagen verschiedener Durchsatzleistung sind verfügbar.

Hinsichtlich einer Anwendbarkeit des Verfahrens auch für kontaminierte Böden befindet sich das Verfahren derzeit in der Entwicklung; eine erste Pilotanlage zur Behandlung von Böden soll 1992 verfügbar sein.



Detailangaben zur Verfahrenstechnik (bezüglich Böden) liegen derzeit nicht vor, grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, daß bei der Behandlung keine Emissionen auftreten und keine Reststoffe anfallen. Ein Reinigungserfolg für Schwermetalle kann nicht erzielt werden.

## 5.6.2 Verfahren DEGUSSA

Bei der Firma DEGUSSA liegen nach eigenen Angaben Erfahrungen zur chemischen Oxidation von Dioxinen/Furanen mit "aktiviertem" Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) vor. Unter Aktivierung ist hier der katalytisch angeregte Zerfall von Wasserstoffperoxid in Wasser und reaktivem Sauerstoff (Hydroxyl-Radikale) zu verstehen. Bei Einsatz von Eisensalzen des  $H_2O_2$  (FENTONs Reagenz) als Katalysator wurden Dioxin-Abbauraten von je nach Einzelverbindung zwischen 60 und 90 % in einer Behandlungsstufe im Labor erzielt. Zur Verbesserung der Aktivierungsmethoden sind hierbei noch weitere Laborversuche erforderlich.

Darüber hinaus ist eine weitere völlig neue Aktivierungsmethode für Wasserstoffperoxid entwickelt worden, bei der an einer synthetischen Probe in einem Behandlungsschritt Abbauraten > 99 % erzielt wurden. Auch bei dieser aussichtsreichen Methode ist bis zur Entwicklung eines Dekontaminationsverfahrens im technischen Maßstab noch Entwicklungsarbeit, zunächst im Labor zu leisten. Aus patentrechtlichen Gründen werden technische Details derzeit noch nicht preisgegeben.

Die DEGUSSA ist jedoch sehr daran interessiert, Abbautests an Originalmaterial (z. B. Fahlbusch-Material) durchzuführen, um die genannten Dekontaminationsmöglichkeiten weiterzuentwickeln.

## 5.7 Verfestigungsverfahren

Ziel von **Verfestigungsverfahren** ist es, kontaminiertes Material durch Zugabe geeigneter hydraulischer Bindemittel und homogene Vermischung und Verdichtung zu verfestigen. Die Schadstoffe werden dabei nicht zerstört, sondern sollen kristallin eingekapselt und dadurch immobilisiert werden. Der Gesamtgehalt an Schadstoffen im behandelten Material bleibt unverändert, das Elutionsverhalten der Schadstoffe wird aber weitestgehend reduziert.

Der Rückhalteeffekt der Schadstoffe durch eine Verfestigung ist abhängig von der Langzeitbeständigkeit des Bindemittels. Neben dem Schadstoffrückhalt zeichnet sich das behandelte Material durch eine erhöhte Druckfestigkeit und eine verminderte Wasserdurchlässigkeit aus.

In Abhängigkeit von der Menge des zugegebenen Bindemittels und des Verdichtungsgrades kommt es bei Verfestigungsverfahren zu Massenerhöhungen bzw. Volumenvergrößerungen gegenüber dem Ausgangsmaterial.

Verfestigungsverfahren haben gegenüber den bisher dargestellten Dekontaminationsverfahren, die für das zu behandelnde Material zumindest hinsichtlich der organischen Schadstoffbelastung einen Reinigungseffekt erzielen, eher den Rang von Sicherungsverfahren der Altlastensanierung. Das Ziel von Sicherungsverfahren ist nicht die Beseitigung von Schadstoffen, sondern die Vermeidung eines Schadstofftransportes zu den Schutzgütern (z. B. Grundwasser).

Dies kann durch eine Unterbrechung von Schadstoffpfaden z. B. durch Einkapselungsmaßnahmen oder aber durch eine Immobilisierung der Schadstoffe erreicht werden.

Nach Auffassung des Sachverständigenrates für Umweltfragen /8/ ist die Anwendung von Sicherungsmaßnahmen dann sinnvoll, wenn es an technisch geeigneten und finanziell vertretbaren Dekontaminationsmaßnahmen fehlt.

Im vorliegenden Fall erlangen Verfestigungsmaßnahmen also Bedeutung, wenn die in Kapitel 1.2 erklärte Zielsetzung einer Behandlung im Rahmen des Sanierungszeitplanes durch keines der Dekontaminationsverfahren erreicht werden kann bzw. wenn der finanzielle Aufwand unverhältnismäßig hoch wäre.

Im Anwendungsfall ist nach der Eignungsprüfung in Vorversuchen und der Gütekontrolle während der großtechnischen Durchführung auch der dauerhafte Verfestigungserfolg und damit der Langzeit-Schadstoffrückhalt durch geeignete Überwachungsmaßnahmen sicherzustellen.

### 5.7.1 HDT-Verfahren, G.A.A.

Die Firma G.A.A., Gesellschaft für Abfall-Aufbereitung, bietet auf dem Markt ein Verfahren zur Aufbereitung kontaminierter Böden, Bauschutt in Form eines Einbinde- und Verfestigungsverfahrens an.

Das sogenannte HDT-Verfahren (Hydrophobische Bindung durch Trägerstoffe) läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Zerkleinerung des Materials auf ca. 20 mm Korngröße und Aussortierung von Fremdstoffen (Eisen, Holz, etc.)
- Zugabe und Vermischung mit schadstoffabsorbierenden Additiven (Kationenaustausch), sogenannte Hydrophobierung
- Zugabe und Vermischung mit dichtenden und bindenden Additiven zur Verfestigung
- Verdichtung des erdfeuchten Materials nach Einbau als hydraulisch gebundene Tragschicht oder in Formen (Blöcke von 1 m<sup>3</sup>) zur Deponierung.

Hinsichtlich der großtechnischen Durchführung des Verfahrens, das zur Schrottplatzsanierung, Schlammaufbereitung und Bodensanierung konzipiert wurde, liegen eine Reihe von Referenzen vor. Nach Angaben der Firma stehen mobile Anlagen mit einem Durchsatz bis zu 150 t/Tag zur Verfügung, die am Schadensort (on-site) oder eventuell auf einer Deponie (off-site) aufgebaut werden können; Platzbedarf in der Regel 20 x 20 m.

Folgende Eigenschaften des behandelten Materials werden angestrebt:

- weitestgehender Schadstoffrückhalt, Unterschreitung behördlich vorgegebener Eluatkonzentrationen für organische und anorganische Schadstoffe
- Frostsicherheit
- Druckfestigkeit (nach 28 Tagen)  $q_u = 6,0 - 12,0 \text{ N/mm}^2$
- Wasserdurchlässigkeit  $k_f = 2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ .

Einschränkungen werden gemacht, wenn das zu behandelnde Material in nennenswertem Maße folgende Inhaltsstoffe enthält:

- Stahlbeton (Einfluß auf den Brecher)
- Fremdstoffe wie Eisen, Holz, etc. (Einfluß auf die Beständigkeit)
- leichtflüchtige, zündfähige Schadstoffe (Einfluß auf die Arbeitssicherheit).

Vor einer großtechnischen Anwendung ist eine auf den Einzelfall zugeschnittene Additiv-Rezeptur zu entwickeln und ein Pilotversuch mit anschließender Eignungsprüfung insbesondere in Form von Eluatuntersuchungen und Festigkeitsuntersuchungen am verfestigten Material durchzuführen. Hierfür sind ca. 100 kg Material erforderlich; die Kosten belaufen sich auf DM 5.000,00 (ohne Analytik und bodenmechanische Laborversuche) für die 1. Rezeptur, für jede weitere DM 1.200,00.

Ein Pilotversuch mit Fahlbusch-Material ist möglich. Danach sind konkrete Aussagen zu den erreichbaren Materialeigenschaften, Massenerhöhungen und möglichen Volumenänderungen und verbindliche Kostenangaben möglich.

Im vorliegenden Fall hält aufgrund der bisherigen Erfahrungen man eine Verwertung/Einbau des behandelten Materials mit hoher Wahrscheinlichkeit für möglich; eine konkrete Verwertungsmöglichkeit wurde jedoch nicht angegeben. Die Kosten für eine großtechnische Anwendung werden bisher mit DM 230,00 bis 280,00/t (ohne Zerkleinerung) geschätzt.

## 5.7.2 Verfahren HEIDELBERGER ZEMENT

Die Firma HEIDELBERGER ZEMENT bietet auf unsere Anfrage hin für das Fahlbusch-Material ein Einbinde- und Verfestigungsverfahren unter Verwendung eines für die Dioxinproblematik speziell zugeschnittenen (Firmenangabe) hydraulischen Bindemittels an.

Erfahrungen mit dieser Art von Einbindung liegen nach Angaben der Firma aus der Verfestigung von Filterstäuben aus Müllverbrennungsanlagen vor. Die Nachweisführung der Schadstoffeinbindung erfolgte nach den Bestimmungen des Landesamtes für Umweltschutz, München sowie der "Technischen Verordnung über Abfälle (TVA)" des Schweizerischen Departement des Inneren.

Das von der HEIDELBERGER ZEMENT vorgeschlagene Verfahren läßt sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Zerkleinerung auf maximal 8 bis 10 mm Korngröße (Mühle oder Brecher, Sieb)
- Transport (Förderband) und Materialaufgabe
- Vermischung mit dem Bindemittel (Durchlauf- oder Chargenmischer)
- Materialabtransport in transportable Mulde
- Verdichtung in der Mulde oder in Würfelformen.

Die Durchsatzleistung der verfügbaren Mischer wird mit 1,5 bis 10 t/h angegeben; wird jedoch entschieden auch von der Abbindezeit beeinflusst. Sämtliche Anlagenkomponenten sind mobil; der Platzbedarf für einen on-site-Betrieb beträgt 200 bis 400 m<sup>2</sup>.

Die Eigenschaften des behandelten Materials, insbesondere der Grad des Schadstoffrückhaltes, sind auch hier durch geeignete Vorversuche mit ca. 100 kg Material zu ermitteln bzw. zu optimieren.

Aus der Behandlung resultiert eine Volumenzunahme von 20 bis 50 %; für die Dichte wird ein Zielwert von 2 bis 2,2 t/m<sup>3</sup> angestrebt.

Für eine Vorversuchsphase vor Ort in Rastatt werden Kosten von ca. DM 7.000,00 (ohne Analytik) veranschlagt. Er beinhaltet:

- Beurteilung des gebrochenen Materials als Betonzuschlag
- Herstellung dreier Bindemittelrezepturen
- Versuchsdurchführung und Herstellung von 4 würfeligen und 2 zylindrischen Prüfkörpern
- Ermittlung der Druckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen. (Eluatversuche und die Analytik sind vom Auftraggeber durchzuführen).

Als Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens wird genannt, daß das zu behandelnde Material frei von zementschädlichen Bestandteilen nach DIN 4226 (z. B. erhärtungsstörende anorganische Salze) sein muß. Hierzu wird relativierend ausgeführt, daß z. B. höhere Zinkgehalte, die das Abbinden verzögern würden, durch eine entsprechende Rezeptur "beherrschbar" sind.

Die Kosten für eine großtechnische Anwendung des Verfahrens werden mit ca. DM 150,00/t angegeben.

## 6. Bewertung der Verfahren nach ökologischen, organisatorischen und Kriterien der Wirksamkeit

Die in den vorangegangenen Kapiteln im Detail beschriebenen Verfahren sollen nun einer Bewertung nach nichtmonetären Kriterien unterzogen werden. Unterschieden wird dabei zwischen ökologischen, organisatorischen und Kriterien der Wirksamkeit. Die Bewertung der einzelnen Verfahren erfolgt in Form von drei möglichen Einstufungen ("+, o, -"). Die Einstufung "+" bedeutet bezüglich der oben genannten Kriterien positiver oder kein negativer Einfluß auf die Ökologie, kein Organisationsaufwand bzw. aussichtsreiche Anwendung des Verfahrens. Die Einstufung "-" bedeutet negativer ökologischer Einfluß, Organisations- und damit Zeitaufwand bzw. geringe Anwendungsaussichten.

Die Einstufung "o" nimmt eine entsprechende Mittelstellung ein oder steht für derzeit noch ungeklärte Punkte, z. B. hinsichtlich der Verwertungs-/Entsorgungsmöglichkeiten des behandelten Materials.

Die Bewertung erfolgt in Form von drei Matrices, in deren unteren Zeilen jeweils die Summe der Plus- bzw. Minuspunkte für jedes Verfahren eingetragen sind. Mit einer Ausnahme werden dabei sämtliche Kriterien als gleichgewichtig betrachtet; lediglich eine echte Schadstoffzerstörung wurde mit "Doppelplus" gewichtet, um der Höherwertigkeit eine Dekontamination gegenüber einer Sicherung Rechnung zu tragen.

Die letzte Zeile der Matrix enthält jeweils die Bilanz der für ein Verfahren insgesamt vergebenen Plus- und Minuspunkte, die als Kennzahl zur vergleichenden Bewertung der Verfahren herangezogen wird. Verfahren mit einer ähnlichen Bewertungsbilanz werden als gleichwertig bezüglich der entsprechenden Kriterien angesehen. Zur Übersicht seien die alternativen Behandlungsverfahren noch einmal aufgelistet und mit Buchstaben codiert (Tab. 6).

**Tabelle 6: Alternative Behandlungsverfahren**

Code	Anbieter	Verfahrensgruppe
A	ZÜBLIN	thermische Verfahren
B	WITEC	
C	JUNG	
D	TIM	
E	ÖKOCEM	Wasch-/Extraktionsverfahren
F	NORDAC	
G	FUNGI CULTUR, PREUSSAG NOELL	biologische Verfahren
H	HÜTTERMANN	
I	ULTRA SYSTEMS	phys.-chemische Verfahren
J	DEGUSSA	
K	G.A.A.	Verfestigungsverfahren
L	HEIDELBERGER ZEMENT	

Ökologische Kriterien	Thermische Verfahren												Verfe- stigung K L	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		
(teilweise) Schadstoffzerstörung	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Energieeinsatz	-	-	-	-	0	0	+	+	-	-	+	+	+	+
Emissionen														
a) Schadstoffe	-	-	-	-	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+
b) Geruchsstoffe	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+
c) Lärm	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0
Reststoffanfall	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Störfallrisiken	+	+	+	+	-	+	+	+	0	0	+	+	+	+
Transportrisiken	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Summe +	3	3	3	3	2	2	8	8	4	4	4	6	6	6
-	4	4	4	4	2	3	0	0	2	2	2	1	1	1
Bilanz	-1	-1	-1	-1	0	-1	8	8	2	2	2	5	5	5

Tabelle 7: Nichtmonetäre Bewertung, ökologische Kriterien



organisatorische Kriterien	Thermische Verfahren												Verfe- stigung K L			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L				
Voruntersuchungen erforderlichlich	+	+	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Genehmigungen																
a) Bau, Betrieb	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b) Transport	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
c) Ausfuhr	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
d) Deponierung	0	0	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
e) Abwasser	+	+	+	+	0	+	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+
Materialaufbereitung	0	-	0	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
Infrastrukturmaßnahmen (On-site)	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Transport	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Verwertung/Entsorgung behandeltes Material	0	0	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe +	5	5	3	3	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
-	2	3	6	3	6	3	6	6	7	6	4	4	4	4	4	4
Bilanz	3	2	-3	0	-3	1	-3	-3	-3	-3	-2	0	0	0	0	0

Tabelle 8: Nichtmonetäre Bewertung, organisatorische Kriterien

Kriterien der Wirksamkeit	Thermische Verfahren												Wäsche/Extraktion		Biologie		Physik/Chemie		Verfeinerung			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
Dekontamination																						
a) Dioxine/Furane	++	++	++	++	++	0	++	++	++	++												
b) Schwermetalle	0	0	0	0	++	++	-	-	-	-												
Immobilisierung																						
a) Dioxine/Furane	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
b) Schwermetalle	+	0	+	+	/	/	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stand der Technik, Erfolgsaussichten	+	+	+	+	0	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verfügbarkeit	0	0	+	+	0	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Material Eigenschaften nach Behandlung	0	0	0	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Behandlungsdauer	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe +	5	4	6	6	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
-	0	0	0	0	1	0	4	5	3	4	4	2	2	3	4	2	2	2	2	2	2	2
Bilanz	5	4	6	6	4	5	-2	-3	-1	-2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

1) Überwachungsbedarf

/ nicht mehr relevant

Tabelle 9: Nichtmonetäre Bewertung, Kriterien der Wirksamkeit



Nach ökologischen Kriterien (Tab. 7) lassen sich deutlich 2 Verfahrensgruppen unterscheiden. Zum einen sind es die thermischen und Wasch-/Extraktionsverfahren, die ökologisch eine etwa ausgeglichene Bewertungsbilanz (Differenz annähernd Null) aufweisen und damit weder als besonders umweltfreundlich noch als umweltschädlich einzustufen sind. Zum anderen sind es die biologischen, physikalisch-chemischen und Verfestigungsverfahren, die eine positive Bewertungsbilanz zeigen. Deutlich am umweltverträglichsten erweisen sich die biologischen Verfahren. Eine nur mäßige Umweltverträglichkeit kommt den physikalisch-chemischen Verfahren zu. Die Verfestigungsverfahren nehmen eine Mittelstellung zwischen beiden ein.

Nach organisatorischen Kriterien (Tab. 8) schneiden die thermischen off-site Verfahren im Inland (ZÜBLIN, WiTec) am besten ab, vor allem, weil der Genehmigungsaufwand gering ist, keine Voruntersuchungen und Infrastrukturmaßnahmen notwendig sind und eine Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials am Behandlungsort in Aussicht gestellt wird.

Bei den thermischen off-site Verfahren im Ausland (JUNG, TIM) sowie den on-site Verfahren liegen überwiegend negative Bewertungsbilanzen vor; negativ wirken sich hier die Erfordernis von Voruntersuchungen und Infrastrukturmaßnahmen sowie der Organisationsaufwand zur Verwertung/Entsorgung des behandelten Materials aus. Ein mittlerer Organisationsaufwand (Bewertungsbilanz etwa Null) ergibt sich bei der thermischen Behandlung in England (TIM), der off-site Bodenwäsche (NORDAC) sowie den Verfestigungsverfahren.

Nach den Kriterien der Wirksamkeit (Tab. 9) liegen deutlich positive Bewertungsbilanzen bei den thermischen Hochtemperaturverfahren (ZÜBLIN, JUNG, TIM) vor, dicht gefolgt von den Wasch-/Extraktionsverfahren, dem Wirbelschichtverfahren (WiTec) und den Verfestigungsverfahren. Negative Bewertungsbilanzen zeigen die biologischen und physikalisch-chemischen Verfahren, vor allem deshalb, weil für Schwermetalle weder eine Dekontamination noch eine Immobilisierung erfolgt. Tabelle 4 gibt einen Gesamtüberblick über das Ergebnis der nichtmonetären Bewertung der Verfahren.

**Tabelle 10: Nichtmonetäre Bewertung, Übersicht**

Code	Verfahrensprinzip	Bewertungsbilanz Ökologie	Bewertungsbilanz Organisation	Bewertungsbilanz Wirksamkeit
A	Thermik	o	+	+
B		o	+	+
C		o	-	+
D		o	o	+
E	Wäsche / Extraktion	o	-	+
F		o	o	+
G		+	-	-
H	Biologie	+	-	-
I		+	-	o
J		+	-	o
K		+	o	+
L	Verfestigung	+	o	+
		+	o	+

+ positiv

o ausgeglichen

- negativ

## 7. Kostenschätzung und -vergleich

Die Frage, welches Behandlungsverfahren am geeignetsten ist, kann nicht allein danach beurteilt werden, ob ein optimaler Behandlungserfolg erzielt werden kann, sondern auch danach, ob dies mit einem vertretbaren finanziellen Aufwand möglich ist. Tabelle 11 zeigt daher eine Kostenschätzung für die einzelnen Behandlungsverfahren, bezogen auf 5.000 t zu behandelndem Material. Neben den reinen Behandlungskosten und Kosten für erforderliche Voruntersuchungen (entsprechend den Firmenangaben) werden in der Schätzung gegebenenfalls auch Kosten für Aufbereitung, Transport, Baustelleneinrichtung sowie Rücktransport und weitere Verwendung/Entsorgung des Materials berücksichtigt. Dabei wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Kosten für Materialaufbereitung (Brechen, Mahlen) je nach Anforderungen (mm-, cm-, dm-Bereich): DM 20,00, DM 25,00 bzw. DM 30,00/t
- Verpackung des Materials in 200-l-Fässer, Kosten DM 200,00/t\*
- Transportkosten inklusive Logistikkosten DM 750,00/km
- Baustelleneinrichtung bei on-site-Verfahren einheitlich DM 50.000,00
- Verwertung bei thermischer Behandlung und off-site-Wäsche, Kosten DM 25,00/t
- Deponierung als Bauschutt oder "Hausmüll" falls keine Verwertung, Kosten DM 100,00/t (Massenveränderungen wurden berücksichtigt).

\* (ohne Personalkosten bei Verpackung und Verladung)

Schätz- kosten	Thermische Verfahren						Wäsche/ Extraktion		Biologie		Physik/ Chemie		Verfe- stigung	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		
Vorunter- suchungen (ohne Analytik)	/	/	0	/	60.000	100.000	0	?	?	0	8.000	7.000		
Material- aufbe- reitung (DM/t)	100.000 (20)	150.000 (30)	125.000 (25)	100.000 (20)	125.000 (25)	100.000 (20)	150.000 (30)	150.000 (30)	125.000 (25)	125.000 (25)	In Be- halten handlung	In Be- halten handlung		
Verpackung, Transport Logistik (km)	1.340.000 (450)	1.600.000 (800)	1.600.000 (800)	1.750.000 (1.000)	/	1.490.000 (650)	/	/	/	/	/	/		
Baustel- lenein- richtung	/	/	/	/	50.000	/	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000		
Behand- lung (DM/t)	3.500.000 (700)	2.000.000 (400)	? (5 Mio.) (1000)	15500.000 (3100)	2.375.000 (475)	2.625.000 (525)	1.275.000 (255)	?	?	?	1.275.000 (255)	750.000 (150)		
Rücktrans- port, Logistik	?	?	600.000	/	/	?	/	/	/	/	/	/		
Verwertung/ Entsorgung	125.000	125.000	125.000	In Be- handlung enthalten	400.000	85.000	600.000	600.000	500.000	500.000	600.000	600.000		
Summe (Mio)	5,065	3,875	7,45	17,35	3,01	4,4	2,075	?	?	?	1,933	1,407		

Tabelle 11: Kostenschätzung

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, daß sämtliche Kostenangaben grob geschätzt sind, da im Stadium der Vorplanung noch keine verbindlichen Kostenangebote vorliegen. Dies ist erst in der Planungsphase nach der Ausschreibung der Fall. Sinn und Zweck der vorliegenden Kostenschätzung ist es, Größenordnungen aufzuzeigen und einen eher halb-quantitativen Kostenvergleich der Verfahren (kostenintensiv, kostengünstig, mittlere Kosten) zu ermöglichen.

Tabelle 12 faßt in diesem Sinne das Ergebnis der Kostenschätzung zusammen.

**Tabelle 12: Kostenschätzung, Übersicht**

Code	Verfahrensprinzip	Gesamtkostenbewertung
A	Thermik	o
B		o
C		o
D		-
E	Wäsche / Extraktion	o
F		o
G	Biologie	+
H		?
I	Physik / Chemie	?
J		?
K	Verfestigung	+
L		+

+ kostengünstig (1,5 bis 2 Mio.)

o mittlere Kosten (2 - 5 Mio.)

- kostenintensiv (> 10 Mio.)

? Bewertung nicht möglich (Verfahren nicht serienreif)

## 8. Gesamtbewertung

Bei der bisherigen Verfahrensbewertung wie auch der Kostenschätzung (Kap. 6 bzw. 7) wurden zum Großteil unverbindliche bzw. mit weiteren Vorbehalten behaftete Firmenangaben zugrunde gelegt. Um die ohnehin schwierige Objektivierbarkeit einzelner Bewertungen nicht zusätzlich zu erschweren, wurde dort jedoch auf weitere Wichtungen (z. B. bei Zweifeln an der angegebenen Verfügbarkeit oder dem Entwicklungsstand) verzichtet. In der Gesamtbewertung sollen daher für die weitere Entsorgungsplanung im vorliegenden Fall wesentliche Kriterien herausgestellt und die entsprechenden Firmenangaben kritisch beurteilt werden. Darüber hinaus wird halbquantitativ das Kosten-/Nutzen-Verhältnis alternativer Entsorgungswege betrachtet.

Vor dem Hintergrund des Sanierungszeitplans (Kap. 4) kommt dem Kriterium Verfügbarkeit (einer großtechnischen Anlage!) eine entscheidende Bedeutung zu. Die planmäßige Entsorgung des Abbruchmaterials in Form einer Behandlung (Dekontamination) und nachgeschalteter Verwertung/Deponierung (Bauschuttdeponie) ist am ehesten über **bereits in Betrieb befindliche off-site-Anlagen** realisierbar. Dazu gehören die

- thermische Anlage in England (TIM/RECHEM)
- thermische Anlage in Dänemark (JUNG)
- Bodenwaschanlage in Hamburg (NORDAC).

Der Zeitraum für die Entsorgungsplanung bezüglich Halle 8 und auch des Nordgeländes (weitestgehend abzuschließen bis Ende März bzw. Mitte Mai 1992) ist jedoch äußerst knapp. Das Erwirken einer verbindlichen Annahmeerklärung bzw. eines verbindlichen Kostenangebots kann sich aus folgenden Gründen verzögern.

Das zu behandelnde Material muß hinsichtlich Schadstoffgehalt exakt (vollständig und repräsentativ) deklariert werden. Die entsprechenden Analyseergebnisse der Bestandsaufnahme müssen daher vorliegen.

Der Kontakt zur englischen Betreiberfirma besteht derzeit nur über die TIM-Entsorgungslogistik, der Informationsfluß ist bisher langsam und nur wenig umfassend.

Es ist daher mit Verzögerungen bei weiteren Verhandlungen zu rechnen. Ein Kontakt mit den zuständigen Ausfuhr-/ Einfuhrbehörden wurde bisher nicht aufgenommen, so daß die Erteilung der entsprechenden Genehmigungen zumindest zeitlich noch ein gewisses Risiko darstellt. Die weitere Verwertung/Deponierung soll in England erfolgen.

Die Firma JUNG benötigt einen Probeversuch im Technikumsmaßstab (40 kg), um verbindliche Angaben insbesondere auch zu den Kosten machen zu können. Auch bei der Firma JUNG ist der Informationsfluß unbefriedigend. Das behandelte Material muß nach Deutschland zurückgeführt werden; die weitere Verwertung/ Deponierung ist noch ungeklärt.

Die Firma NORDAC benötigt einen Probeversuch im großtechnischen Maßstab (200 t), um verbindliche Angaben insbesondere zur Reinigungsleistung und zum Reststoffanfall (Entsor-

gungskosten!) machen zu können. Die weitere Verwertung/Deponierung des behandelten Materials ist auch hier noch ungeklärt.

Eine **voraussichtliche Inbetriebnahme im 2. Halbjahr 1992** erfolgt nach Angaben der Betreiberfirmen bei folgenden Anlagen:

- thermische Anlage in Berlin (WiTec)
- Extraktionsanlage on-site auf dem Fahlbuschgelände oder einer Bauschuttdeponie (ÖKOCEM).

Gemäß Zeitplan kämen diese Anlagen allenfalls noch für die Entsorgungsplanung bezüglich der Hallen 1 bis 5 a (weitestgehend abzuschließen bis Ende Juli 1992) in Frage. Einschränkend ist hierbei zu berücksichtigen, daß die Firmenangaben zur Inbetriebnahme möglicherweise zu optimistisch sind bzw. daß es in der Test - und Optimierungsphase zu unerwarteten technischen Schwierigkeiten und damit zu Verzögerungen kommen kann. In beiden Fällen ist die weitere Verwertung/Deponierung des behandelten Materials noch nicht geklärt. Bei der Extraktionsanlage ist zunächst ein Pilotversuch (10 x 400 kg) auf dem Gelände erforderlich. Die angestrebte Bauartzulassung der großtechnischen Anlage steht noch aus, worin ein grundsätzliches Risiko hinsichtlich der Verfügbarkeit besteht.

Eine **großtechnische Realisierung** weiterer Behandlungsverfahren ist **1992 nicht zu erwarten**. Gemäß Zeitplan können daher folgende Anlagen/Verfahren bei der Entsorgungsplanung nicht berücksichtigt werden:

- thermische Anlage in Dortmund (ZÜBLIN)
- biologische Verfahren on-site auf dem Fahlbuschgelände (FUNGI CULTUR bzw. PREUSSAG/NOELL, HÜTTERMANN)
- physikalisch-chemische Verfahren on-site auf dem Fahlbuschgelände (ULTRA SYSTEMS, DEGUSSA).

Neben dem Kriterium "Verfügbarkeit" ist das Kriterium "Stand der Technik" eines Verfahrens wesentlich für eine erfolgreiche Behandlung (Dekontamination) und weitere Entsorgung (Verwertung/ Deponierung) des behandelten Abbruchmaterials. Hinsichtlich der Behandlung von dioxin-/furanhaltigem Material ist am ehesten bei den thermischen off-site-Verfahren von einem "Stand der Technik" auszugehen, wenngleich die "de novo-Synthese" von Dioxinen in der Flugasche/Rauchgasphase erst in jüngster Zeit Gegenstand von F + E-Arbeiten war. Dieser Aspekt ist vor allem für die Reststoffe bzw. die Rauchgasreinigung, nicht jedoch für das behandelte Material von Bedeutung.

Das off-site-Bodenwaschverfahren der Firma NORDAC kann für kiesig-sandige Böden als "Stand der Technik" angesehen werden, nicht jedoch für die Behandlung von porösem Bauschutt. Es ist nicht auszuschließen, daß der gewünschte Reinigungserfolg, Kategorie 1 (vgl. Kap. 2), nicht erreicht werden kann oder die anfallenden Reststoffmengen das Verfahren unwirtschaftlich machen. Im ungünstigsten Falle ist das Material des Probeversuchs (vgl. oben) wieder zurückzunehmen.

Das on-site-Extraktionsverfahren der Firma ÖKOCEM existiert in der modifizierten Form (vgl. Kap. 5.4.1) noch nicht als großtechnische Anlage. Auch hier ist in dem entsprechenden Maßstab der gewünschte Reinigungserfolg und der angestrebte Restpetroleumgehalt im behandelten Material bisher nicht nachgewiesen. Außerdem ist die Betriebssicherheit insbeson-



dere der Aufbereitung des dioxin-/furanangereicherten Lösemittels und die Reststoffbehandlung (vgl. Kap. 5.4.1) als ein kritischer Punkt zu sehen.

Die biologischen und physikalisch-chemischen on-site-Verfahren sind, was den Abbau von Dioxinen/Furanen angeht, nicht "Stand der Technik". Laufende F + E-Arbeiten sind abzuwarten bzw. vom Auftraggeber selbst in Form von Vorversuchen zu leisten. Für biologische Verfahren ist bei positiven Ergebnissen mit einer verhältnismäßig schnellen Umsetzung in einen großtechnischen Maßstab zu rechnen, da auf bewährte Techniken von Mietenverfahren zurückgegriffen werden kann.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die meisten der möglichen Dekontaminationsverfahren bzw. Entsorgungswege aus Gründen der Verfügbarkeit oder des Entwicklungsstandes dem Sanierungszeitplan nicht gerecht werden oder noch mit zahlreichen Unwägbarkeiten behaftet sind. Letztere können zum Teil durch Vorversuche beseitigt werden, die jedoch einen Zeitaufwand von schätzungsweise 2 bis 4 Monaten haben.

Eine **Alternative (vgl. Kap. 5.7) zu den möglicherweise 1992 verfügbaren Dekontaminationsverfahren** stellen die

- Verfestigungsverfahren on-site auf dem Fahlbuschgelände oder auf einer Bauschuttdeponie (G.A.A., HEIDELBERGER ZEMENT)

dar. Die entsprechenden Anlagen sind vergleichsweise kurzfristig verfügbar, da auf konventionelle Misch- und Verdichtungstechniken zurückgegriffen werden kann. Allerdings sind auch hier Vorversuche im Technikumsmaßstab (100 kg) erforderlich. Die weitere Verwertung/Deponierung von verfestigtem Material ist jedoch bisher noch nicht geklärt. Verwertungsmöglichkeiten im Straßenbau oder als Versatzmaterial unter Tage werden derzeit geprüft. Die Verfestigung von Abfallmaterial kann als "Stand der Technik" angesehen werden, wengleich die Frage der Langzeitstabilität des Bindemittels unter Ablagerungsbedingungen über Jahrzehnte noch nicht ausreichend geklärt ist (Überwachung!).

Im folgenden sollen den Ausführungen über Verfügbarkeit und Entwicklungsstand der Verfahren und daraus resultierender Vor- und Nachteile im Hinblick auf eine planmäßige Entsorgung auch Kostengesichtspunkte gegenübergestellt werden.

Die thermischen Verfahren bzw. entsprechenden Entsorgungswege sind in ihrer Wirksamkeit vergleichbar, zeigen jedoch deutliche Unterschiede in der Kostenschätzung. Das ungünstigste Kosten-/Nutzen-Verhältnis mit einem spezifischen Entsorgungspreis von rund DM 3.500,00/t hat eine thermische Behandlung in England (TIM/ RECHEM). Ein vergleichsweise hohes Kosten-/Nutzen-Verhältnis zeigt die thermische Behandlung im Inland (WiTec, ZÜBLIN) mit spezifischen Entsorgungspreisen von rund DM 800 bis 1.000,00/t. Beide Anlagen sind jedoch noch nicht verfügbar. Eine Mittelstellung nimmt vermutlich die thermische Behandlung in Dänemark (JUNG) ein; die spezifischen Entsorgungskosten werden mit rund DM 1.500,00/t angenommen. Zur exakten Kostenschätzung sollte der Vorversuch (vgl. Kap. 5.3.3) durchgeführt werden.

Gegenüber den thermischen Verfahren weisen die Wasch-/Extraktionsverfahren größere Unsicherheiten hinsichtlich der Wirksamkeit auf, weshalb Vorversuche mit Kosten zwischen DM 60.000,00 und 100.000,00 zuzüglich Kosten für die chemische Analytik erforderlich sind.

Scheitern die Vorversuche, so wären die Kosten als Fehlinvestition zu betrachten. Verlaufen sie positiv und kommt ein Verfahren großtechnisch zum Einsatz, würden die Kosten angerechnet.

In der Gesamtbetrachtung wäre das Kosten-/Nutzen-Verhältnis des verfügbaren Waschverfahrens in Hamburg (NORDAC) mit einem spezifischen Entsorgungspreis von rund DM 900,00/t etwa mit der günstigsten thermischen Behandlung (WiTec) vergleichbar; das Kosten-/Nutzen-Verhältnis des on-site-Extraktionsverfahrens (ÖKOCHEM) wäre mit einem spezifischen Entsorgungspreis von rund DM 600,00/t besser als die thermische Behandlung. Das Verfahren ist jedoch noch nicht verfügbar.

Die biologischen und physikalisch-chemischen Verfahren zeichnen sich durch einen noch bestehenden Entwicklungsbedarf aus. Führen noch erforderliche Vorversuche und Untersuchungen zum Erfolg, ist bei einer großtechnischen Realisierung der biologischen Verfahren mit einem spezifischen Entsorgungspreis von rund DM 400,00/t (FUNGI CULTUR, PREUSSAG) zu rechnen. Die Wirksamkeit ist nicht direkt mit den vorgenannten Verfahren zu vergleichen, da Schwermetalle weder zerstört noch immobilisiert werden. Dies gilt ebenso für physikalisch-chemische Verfahren; ein spezifischer Entsorgungspreis ist hierfür noch nicht abzuschätzen.

Die verfügbaren Verfestigungsverfahren sind gegenüber den Dekontaminationsverfahren als Sicherungsverfahren einzuschätzen.

In Abhängigkeit der Langzeitbeständigkeit einer Verfestigung ist für einen befristeten Zeitraum, für den nach unserem Dafürhalten mindestens 50 Jahre anzusetzen sind, von einem vergleichsweise hohen Kosten-/Nutzen-Verhältnis auszugehen. Die spezifischen Entsorgungskosten liegen bei rund DM 300,00 bis 400,00/t (HEIDELBERGER ZEMENT).

Aus der Gegenüberstellung der Gesichtspunkte zur Verfügbarkeit der Verfahren und den Kostengesichtspunkten ergibt sich, daß ein Zeitgewinn für die Entsorgungsplanung durch eine Zwischenlagerung von Abbruchmaterial die Anzahl der verfügbaren Verfahren erhöhen und durch die Auswahl eines kostengünstigeren Verfahrens zu einer erheblichen Kostensenkung führen kann.

Zwischenlager im Sinne der TA-Abfall ist eine ortsfeste Abfallentsorgungsanlage, in der Abfälle entgegengenommen, vorbereitend behandelt (z. B. separiert, gebrochen), für die weitere Entsorgung zusammengestellt oder gelagert werden. An das Zwischenlager werden hinsichtlich der Abdichtung im Vergleich zu Deponien nur geringe natürliche bzw. technische Anforderungen gestellt.

Eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung eines Behandlungsverfahrens mit günstigem Kosten-/Nutzen-Verhältnis ist auch die Klärung der weiteren Verwertung/Deponierung des behandelten Materials mit seinen verfahrensspezifischen Eigenschaften. Eine Verwertung in Form von Baustoffrecycling oder Verfüllung z. B. auf dem Fahlbuschgelände ist denkbar für thermisch behandeltes Material oder gewaschenes Material. Für extrahiertes Material (Schwermetallgehalt) kommt eine Deponierung als Bauschutt in Frage. Die konkreten Möglichkeiten des Baustoffrecycling, der Verfüllung bzw. Deponierung als Bauschutt im Landkreis Rastatt müssen vor der weiteren Entsorgungsplanung festgestellt werden. Besonders die entsprechende Akzeptanz für verfestigtes Material ist zu prüfen.

Einer Entsorgung des kontaminierten Fahlbusch-Materials in Form einer Behandlung (De-kontamination oder Verfestigung) mit nachgeschalteter Verwertung oder Deponierung als Bauschutt steht als letzte Alternative die Deponierung in der Untertagedeponie Herfa-Neurode gegenüber; der spezifische Entsorgungspreis liegt derzeit bei DM 700,00 bis 800,00/t (ohne Personalkosten für Verpackung und Verladung).

## 9. Zusammenfassung

Gegenstand dieses Berichtes von Trischler und Partner ist die Recherche und Bewertung alternativer Behandlungsmethoden für das im Zuge der Sanierung des Fahlbusch-Geländes in Rastatt anfallende mit Dioxinen/Furanen und Schwermetallen kontaminierte Abbruchmaterial. Ziel einer Behandlung soll es sein, das behandelte Material möglichst einer Verwertung oder aber einer Deponierung als Bauschutt zuzuführen. Ergebnis durchgeführter Firmenanfragen ist, daß es derzeit nur eine geringe Anzahl von Verfahrensanbietern gibt, die eine erfolgreiche Behandlung für möglich halten.

Dazu zählen bestimmte thermische Verfahren, Wasch-/Extraktionsverfahren, biologische Mietenverfahren, physikalisch-chemische Verfahren und Verfestigungsverfahren. Die Eignung muß teilweise jedoch erst durch Vorversuche bzw. durch weitere Forschungen nachgewiesen werden.

Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und des Entwicklungsstandes der Verfahren reduziert sich die Anzahl der Verfahren, die bei der Entsorgungsplanung gemäß Sanierungszeitplan berücksichtigt werden können, noch einmal deutlich.

Noch erforderliche Vorversuche und Untersuchungen (vgl. oben) können sich bei Mißerfolg als Fehlinvestitionen erweisen; bei Erfolg kann sich jedoch ein in der Gesamtbetrachtung vergleichsweise kostengünstiges Verfahren als geeignet erweisen. Risiko bzw. Kosten des Vorversuchs und mögliche Kostenersparnis bei der Entsorgung sind gegeneinander abzuwägen.

Die halbquantitative Betrachtung des Kosten-/Nutzen-Verhältnisses der Verfahren zeigt große Unterschiede; die spezifischen Entsorgungskosten bewegen sich nach der Kostenschätzung zwischen DM 300,00 und 3.500,00/t.

Ein Zeitgewinn bei der Entsorgungsplanung, der z. B. zu Vorversuchen oder Testphasen genutzt werden kann, könnte die Palette realisierbarer Verfahren vergrößern und durch Auswahl eines Verfahrens mit einem günstigeren Kosten-/Nutzen-Verhältnis eine deutliche Kostensenkung bei der Entsorgung bewirken. Möglichkeiten der Zwischenlagerung von zu behandelndem Material ist daher zu erörtern.

Maßgeblich für die Realisierung eines Behandlungsverfahrens sind außerdem die Möglichkeiten der Verwertung oder Deponierung des behandelten Materials mit seinen verfahrensspezifischen Eigenschaften.

Diese kann bei off-site-Verfahren unter Umständen außerhalb von Baden-Württemberg erfolgen, bei einer Rücknahme oder bei on-site-Verfahren tritt jedoch der Landkreis Rastatt erneut in die Entsorgungspflicht. Vor der weiteren Entsorgungsplanung sind daher für das behandelte Material die Möglichkeiten des Baustoffrecycling, der Verfüllung (z. B. auf dem Fahlbuschgelände) bzw. der Deponierung auf einer Bauschuttdeponie festzustellen. Dabei ist besonders die Akzeptanz von verfestigtem Material zu prüfen; Verfestigungsverfahren zeigen das günstigste Kosten-/ Nutzen-Verhältnis.

# Anlage

## Verzeichnis der angefragten **Verfahrensanbieter, Entsorgungsunternehmen, Institute**

1. **Bilfinger und Berger**  
Bauaktiengesellschaft  
Herr Zarbock  
Carl-Reiss-Platz 1 - 5  
6800 Mannheim 1
2. **Richard Buchen GmbH**  
Umweltservice  
Herr Fischer  
Gewerbering 4 - 6  
7500 Karlsruhe 31
3. **Degussa AG**  
Herr Barenschee  
Rodenbacher Chaussee 4  
6450 Hanau 1
4. **Deutsche Babcock Anlagen GmbH**  
Herr Mackenbrock  
Parkstr. 29  
4150 Krefeld 11
5. **Dyckerhoff und Widmann AG**  
Herr Rudat  
Hohenzollernstr. 20  
7500 Karlsruhe 1
6. **Fungi Cultur**  
Gesellschaft für biotechnische  
Verfahren/Pilzanbau mbH  
Herr Dietschmann  
Olbrichstr. 50  
6000 Frankfurt 90
7. **G.A.A. Gesellschaft für  
Abfallaufbereitung**  
Herr Tober  
Berliner Str. 87  
2838 Sulingen
8. **Heidelberger Zement AG**  
Umwelttechnik  
Herr Kassautzky  
Im Breitspiel 19  
6900 Heidelberg
9. **Jung Entsorgungstechnik**  
Herr Jung  
Salamanderweg 3  
7000 Stuttgart 31

10. **Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg**  
Herr Kohl  
Hertzstr. 173  
7500 Karlsruhe 21
11. **NORDAC - Norddeutsches  
Altlastensanierungs-Centrum**  
Herr Krebs  
Oberwerder Damm 1 - 5  
2000 Hamburg 26
12. **Ökochem - Gesellschaft für  
umwelttechnologische Verfahren mbH**  
Herr Zingelmann  
Nordbahnhofstr. 135  
7000 Stuttgart 10
13. **Preussag/Noell AG**  
Herr Trude  
Postfach  
8700 Würzburg
14. **R + T Entsorgung GmbH**  
Herr Grossmann  
Greefsallee 1 - 5  
4060 Viersen 1
15. **Ruhrkohle Umwelttechnik GmbH**  
Herr Puschmann  
Rellinghauser Str. 1  
4300 Essen 1
16. **Albert Schmidt GmbH**  
Herr Morlock  
Motorstr. 32  
7000 Stuttgart 31
17. **TIM Entsorgungslogistik**  
Herr Neef  
Rheinkaistr. 2  
6800 Mannheim 1
18. **Ultra Systems GmbH**  
Maasstr. 24  
6900 Heidelberg
19. **Universität Tübingen**  
Institut für organische Chemie  
Prof. Dr. Hagenmaier  
Auf der Morgenstelle 18  
7400 Tübingen
20. **USEG Umweltservice Südwest**  
Entsorgungsgesellschaft mbH  
Herr Rück  
Badenwerkstr. 2  
7500 Karlsruhe 1



**21. WESTAB Entsorgung GmbH**

Q4/18  
6800 Mannheim

**22. WiTec Wirbelschicht-**

technologie GmbH

Herr Wolf  
Altmoabit 91 c  
1000 Berlin 21

**23. Ed. Züblin AG**

Herr Beitinger  
Albstadtweg 3  
7000 Stuttgart 80

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sanierungszeitplan.....	11
Abb. 2: Thermische Bodenreinigung System ZÜBLIN.....	16
Abb. 3: Thermische Bodenreinigung System WiTec .....	18
Abb. 4: KLOECKNER-Hochdruckbodenwaschverfahren .....	25

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialaufkommen.....	5
Tabelle 2: Grenzwerte Erdaushub- und Bauschuttdeponie (Typ II) nach /6/ .....	7
Tabelle 3: Orientierungswerte (Bruttogehalte) der Arbeitsgruppe "Entsorgung kontaminierten Erdaushubs" zur Ablagerung auf Monodeponien.....	7
Tabelle 4: Orientierungswerte (Eluatgehalte) der Arbeitsgruppe "Entsorgung kontaminierten Erdaushubs" zur Ablagerung auf Monodeponien.....	8
Tabelle 5: Belastung Mauerwerk Halle 6 und 7 (ohne vorherige Oberflächendekontamination) .....	9
Tabelle 6: Alternative Behandlungsverfahren .....	35
Tabelle 7: Nichtmonetäre Bewertung, ökologische Kriterien .....	36
Tabelle 8: Nichtmonetäre Bewertung, organisatorische Kriterien.....	37
Tabelle 9: Nichtmonetäre Bewertung, Kriterien der Wirksamkeit.....	38
Tabelle 10: Nichtmonetäre Bewertung, Übersicht.....	39
Tabelle 11: Kostenschätzung .....	41
Tabelle 12: Kostenschätzung, Übersicht .....	42

# Indexverzeichnis

## A

Altlastensanierung	
Bewertung der Verfahren.....	35
biologische Mietenverfahren .....	26
Entsorgungsunternehmen .....	49
Gesamtbewertung .....	43
Institute .....	49
Kostenschätzung und -vergleich.....	40
physikalisch-chemische	
Sanierungsverfahren .....	30
thermische Sanierungsverfahren.....	14
Verfahrensanbieter.....	49
Verfahrensübersicht .....	14
Verfestigungsverfahren.....	31
Wasch-/Extraktionsverfahren .....	21

## B

biologische Mietenverfahren	
Allgemeines .....	26
MYDOS-Verfahren, FUNGI CULTUR	
.....	27
Verfahren nach HÜTTERMANN.....	29
Verfahren PREUSSAG/NOELL.....	27
Bodenreinigung	
Bewertung der Verfahren.....	35
biologische Mietenverfahren .....	26
Entsorgungsunternehmen .....	49
Gesamtbewertung .....	43
HDT-Verfahren, G.A.A. ....	32
Institute .....	49
JUNG-Entsorgungstechnik.....	20
KLOECKNER-	
Hochdruckbodenwaschverfahren ...	24
KLOECKNER-Verfahren, NORDAC	24
Kostenschätzung und -vergleich.....	40
modifiziertes CBBR-Verfahren,	
ÖKOCEM .....	22
MYDOS-Verfahren, FUNGI CULTUR	
.....	27
physikalisch-chemische	
Sanierungsverfahren .....	30
System WiTec.....	18
System ZÜBLIN .....	15
thermische Sanierungsverfahren.....	14
TIM-Entsorgungslogistik/RECHEM..	20
Verfahren DEGUSSA.....	31

Verfahren HEIDELBERGER ZEMENT	
.....	33
Verfahren nach HÜTTERMANN .....	29
Verfahren PREUSSAG/NOELL .....	27
Verfahren ULTRA SYSTEMS .....	30
Verfahrensanbieter .....	49
Verfahrensübersicht .....	14
Verfestigungsverfahren .....	31
Wasch-/Extraktionsverfahren.....	21

## Bodenwäsche

Allgemeines .....	21
KLOECKNER-	
Hochdruckbodenwaschverfahren....	24
KLOECKNER-Verfahren, NORDAC	24
modifiziertes CBBR-Verfahren,	
ÖKOCEM .....	22

## E

Entsorgungsunternehmen.....	49
-----------------------------	----

## F

Fahlbusch, ehemalige Metallhütte in	
Rastatt	
Belastungssituation .....	9
Entsorgungskategorien und -wege .....	5
Materialaufkommen .....	5
Sanierungszeitplan .....	11
Wasch-/Extraktionsverfahren.....	21

## H

HDT-Verfahren, G.A.A. ....	32
----------------------------	----

## I

Immobilisierung	
Allgemeines .....	31
HDT-Verfahren, G.A.A. ....	32
Verfahren HEIDELBERGER ZEMENT	
.....	33

## M

MYDOS-Verfahren, FUNGI CULTUR..	27
---------------------------------	----

## P

physikalisch-chemische	
Sanierungsverfahren	
Allgemeines .....	30
Verfahren DEGUSSA .....	31
Verfahren ULTRA SYSTEMS .....	30

## S

Sanierungsverfahren	
Bewertung der Verfahren.....	35
biologische Mietenverfahren.....	26

Entsorgungsunternehmen .....	49	<b>V</b>	
Gesamtbewertung .....	43	Verfahren DEGUSSA .....	31
Institute .....	49	Verfahren HEIDELBERGER ZEMENT	33
Kostenschätzung und -vergleich.....	40	Verfahren nach HÜTTERMANN .....	29
physikalisch-chemische		Verfahren PREUSSAG/NOELL .....	27
Sanierungsverfahren .....	30	Verfahren ULTRA SYSTEMS .....	30
thermische Verfahren.....	14	Verfestigungsverfahren	
Verfahrensanbieter .....	49	Allgemeines .....	31
Verfahrensübersicht .....	14	HDT-Verfahren .....	32
Verfestigungsverfahren.....	31	HEIDELBERGER ZEMENT .....	33
Wasch-/Extraktionsverfahren .....	21	<b>W</b>	
<b>T</b>		Wasch-/Extraktionsverfahren	
thermische Sanierungsverfahren		Allgemeines .....	21
Allgemeines .....	14	KLOECKNER-	
JUNG-Entsorgungstechnik .....	20	Hochdruckbodenwaschverfahren....	24
System WiTec.....	18	KLOECKNER-Verfahren, NORDAC	24
System ZÜBLIN .....	15	modifiziertes CBBR-Verfahren,	
TIM-Entsorgungslogistik/RECHEM..	20	ÖKOCHEM .....	22