

**FREIE UND HANSESTADT HAMBURG
UMWELTBEHÖRDE AMT FÜR UMWELTSCHUTZ
WIRTSCHAFTSBEHÖRDE STROM- UND HAFENBAU**

**Machbarkeitsstudie
über die Verwertung von belasteten Sedimenten**

Zusammenfassung

FRANKFURT/MAIN Januar 1995

 **LAHMEYER
INTERNATIONAL**

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Kurzdokumentation von Sedimentverwertungsverfahren	2
3	Detaildokumentation von Sedimentverwertungsverfahren	6
3.1	Systematik der Detaildokumentation	6
3.2	Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial durch Klassierung	9
3.3	Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial durch Sortierung (Flotation)	10
3.4	Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch Extraktion	11
3.5	Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch Thermische Desorption	12
3.6	Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch biologischen Abbau	13
3.7	Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch Nassoxidation	14
3.8	Verwertung von Sedimentmaterial bei der Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial	15
3.9	Verwertung von Sedimentmaterial bei der Herstellung von Ziegelprodukten	16
3.10	Verwertung von Sedimenten bei der Herstellung von Sinterprodukten	17
3.11	Verwertung von Sedimentmaterial bei der Herstellung von Glasprodukten	18
4	Vorgehensweise zur Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung	19
4.1	Strukturierung und Systematisierung der Beurteilung	19
4.2	Arbeitsschritte zur Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung	22
4.2.1	Charakterisierung des belasteten Sediments	22
4.2.2.	Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit der Verwertungsverfahren	23
4.2.3	Ermittlung von realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Bewertungsparametern für die Verwertungsverfahren	28
4.2.3.1	Mindestrealisierungszeitraum	28
4.2.3.2	Produktabsatz	28
4.2.3.3	Verwertungskosten	32
4.3	Zusammenfassende Bewertung der Verwertungsverfahren	33

5	Bewertung der Verfahren zur Verwertung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen und Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise	35
5.1	Klassierung als Vorbehandlungs- und Verwertungsverfahren	35
5.2	Konkurrierende Verfahren zur Sedimentmaterialverwertung	35
5.3	Handlungsempfehlung für ein weiterführendes Versuchsprogramm	38

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Überblick über die Aufteilung der Verfahren der Kurzdokumentation auf Verfahrenskategorien	3
Tab. 2: Einsatzbereiche der Verwertungsverfahren	24
Tab. 3 : Einsatzbereiche der Verwertungsverfahren (technische Parameter)	26
Tab. 4: Mindestrealisierungszeitraum der Verwertungsverfahren	28
Tab. 5: Spezifische Produktmenge	31
Tab. 6: Produktgestehungskosten (ohne Erlöse)	32
Tab. 7: Bewertung konkurrierender Verfahren zur Verwertung des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials	36

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Verknüpfungen der ausgewählten Verfahren zur Verwertung von belasteten Sedimenten	5
Abb. 2: Schematische Darstellung der Klassierung	9
Abb. 3: Schematische Darstellung der Flotation	10
Abb. 4: Schematische Darstellung der Extraktion	11
Abb. 5: Schematische Darstellung der thermischen Desorption	12
Abb. 6: Schematische Darstellung der Verfahrensvarianten für biologischen Abbau	13
Abb. 7: Schematische Darstellung der Nassoxidation	14
Abb. 8: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial	15
Abb. 9: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von Ziegelprodukten	16
Abb. 10: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von Sinterprodukten	17
Abb. 11: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von Glasprodukten	18
Abb. 12: Beurteilungssystematik bei der Verwertung von belasteten Sedimenten	20

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die umweltverträgliche Verwertung von gebaggerten Sedimenten ist zu einem großen Problem geworden, da die Sedimente in vielen Fällen mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen stark belastet sind.

Die Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg (Amt für Umweltschutz-, Gewässer- und Bodenschutz, W1) hat in enger Abstimmung mit der Wirtschaftsbehörde (Strom- und Hafenbau) Lahmeyer Internation (LI) beauftragt, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu untersuchen, welche technisch realisierbaren Verfahren zur Verwertung von belasteten Sedimenten kurzfristig zur Verfügung stehen. Der Untersuchungsrahmen umfasst ausschließlich Verfahren, durch die verwertbare Produkte (mineralischer Reststoff oder Veredelungsprodukt) aus gebaggerten Sedimenten gewonnen bzw. hergestellt werden können. In-situ-Behandlungsverfahren für Sedimente sowie Verfahren zur Ablagerung von gebaggerten Sedimenten (z.B. Unterwasserablagerung, Salzkavernen etc.) werden daher nicht betrachtet.

Unabhängig vom konkreten Anwendungsfall, und damit allgemein übertragbar, ist für die Beurteilung der Machbarkeit der Verwertung von kontinuierlich anfallenden Sedimentmengen eine Vorgehensweise zu entwickeln, die ökologische, technische, realisierungsrelevante und wirtschaftliche Parameter berücksichtigt. Ziel der Bewertung der Machbarkeit der Sedimentverwertung ist es, eine Vorauswahl von Verfahren zu treffen, deren Realisierbarkeit für den konkreten Anwendungsfall in Labor- und halbertechnischen Versuchen untersucht werden sollten.

Der vorliegende Kurzbericht, der die wesentlichen Ergebnisse der vier Teilberichte der Machbarkeitsstudie über die Verwertung von belasteten Sedimenten, umfasst, ist wie folgt gegliedert:

- Kurzdokumentation von mehr als 130 in Betracht kommenden Verwertungsverfahren
- Detaildokumentation von zehn ausgewählten Verfahrenskategorien, in der ökologische, technische, realisierungsrelevante und wirtschaftliche Verfahrensparameter dargestellt werden
- Allgemeine Vorgehensweise für die Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung
- Anwendung der allgemeinen Vorgehensweise auf Sedimente aus dem Hamburger Hafen

2 Kurzdokumentation von Sedimentverwertungsverfahren

Die Datenrecherche zu Sedimentverwertungsverfahren basiert auf folgenden Quellen:

- Fragebogenaktion bei Firmen
- Literatur- und Datenbankrecherche
- Fachgespräche

Die anhand der o.g. Quellen recherchierten 130 Sedimentverwertungsverfahren wurden in einer Kurzdokumentation erfasst. Diese enthält die vorhandenen Angaben zu den Verwertungsverfahren, strukturiert nach Quelle der Angaben, Verfahrensanbieter, Prinzip der Schadstoffbehandlung, Verfahrensbeschreibung, Entwicklungsstand, Referenzen, Input-Material, Zusatzstoffe, behandelte Schadstoffe, Absatzprodukte, Emissionen und beispielhafte Wirtschaftlichkeitsdaten sowie Kooperationspartner.

Bei der Auswertung der Informationen zu den angebotenen Verfahren konnte mit Ausnahme der Klassierung (METHA-Verfahren in Hamburg) und der Herstellung von Deponiedichtungsmaterial (Schlickdeponie Bremen) kein großtechnisch realisiertes Sedimentverwertungsverfahren ermittelt werden.

Konkrete Erfahrungen über die Verfahren bei der Behandlung von Sedimenten liegen nur in wenigen Fällen vor, wobei es sich meist um Labor- oder Technikumsversuche handelt. Die meisten der recherchierten Verfahren stammen aus dem Bereich der Behandlung von kontaminierten Böden/Altlasten oder Sonderabfällen, die auf die Behandlung von Sedimenten übertragen werden sollen, wobei Angaben zum Umfang der erforderlichen Verfahrensweiterentwicklungen fehlen. Bei den ermittelten Verfahren handelt es sich meist um Behandlungsverfahren mit dem Ziel des Wiedereinbaus des Materials bzw. um Verfahren zur Verbesserung der Deponierbarkeit. Das Ziel der Verwertung der Verfahrensprodukte stand häufig im Hintergrund.

Spezielle Untersuchungsprogramme zur Behandlung und Verwertung von belasteten Sedimenten werden derzeit in Holland (Development Program of Treatment Processes), USA (Assessment and Remediation of Contaminated Sediments Program) und Kanada (Contaminated Sediment Treatment Technologies Program) durchgeführt. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Versuche im Labor- bzw. Pilotmaßstab, die Aufschluss über die Einsatzmöglichkeiten verschiedener Verfahren erbringen sollen. Hauptzielrichtung dieser Programme ist die Dekontamination von hochbelasteten Sedimenten, deren Deponierung im unbehandelten Zustand nicht oder nur unter großem Aufwand möglich ist.

Hinsichtlich der Datenqualität waren die Angaben zum Verfahrensablauf der Materialbehandlung meist hinreichend genau, um das Verfahrensprinzip nachvollziehen zu können. Angaben zu den Umweltauswirkungen der Verfahren und den Kosten sind für die einzelnen Verfahren jedoch sehr lückenhaft.

Angaben zu den Verwertungsprodukten der Verfahren und insbesondere zu deren Absatz sind meist pauschal.

Die Verfahrensauswahl für die Detaildokumentation erfolgt über eine verfahrens- und produktbezogene Kategorisierung der in die Kurzdokumentation aufgenommenen Verwertungsverfahren. Um verwertbare Produkte aus einem schadstoffbelasteten Sediment zu erhalten, bestehen demnach die folgenden, in Tabelle 1 dargestellten Möglichkeiten (verfahrensbezogene Kategorisierung).

Tab. 1 : Überblick über die Aufteilung der Verfahren der Kurzdokumentation auf die Verfahrenskategorien

Verfahrensprinzip		Anzahl der Verfahren	
Abtrennung von schadstoffarmen Sedimentmaterial	Klassierung	57	
	Sortierung	11	
Schadstoffabtrennung	Chemische Extraktion	21	
	Thermische Desorption	12	
Schadstoffzerstörung	Biologischer Abbau	24	
	Chemische Oxidation	12	
	Thermische Oxidation	39	
Schadstoffeinbindung	Thermische Einbindung		
		Chemische Einbindung	22

Die Produkte aus den Verwertungsverfahren unterscheiden sich im wesentlichen darin, in welchem Umfang die ursprünglichen Eigenschaften des Sedimentmaterials verändert wurden. Entsprechend der Veränderung des Einsatzmaterials können die Verfahren drei Verwertungsebenen (produktbezogene Kategorisierung) zugeordnet werden :

- Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial (schadstoffarmer Sand, schadstoffarme Feinfraktion)
- Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial (behandelte Feinfraktion)
- Herstellung von Sedimentveredelungsprodukten (Ziegelprodukte, Sinterprodukte, Glasprodukte und mineralisches Deponiedichtungsmaterial)

Durch Überlagerung der verfahrens- und produktbezogenen Kategorien wurden die Verwertungsverfahren ausgewählt, die im Rahmen der Detaildokumentation ausführlich untersucht wurden. Im einzelnen wurden zehn Detaildokumentationen für folgende Verfahren erstellt:

- Klassierung zur Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial
- Sortierung (Flotation) zur Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial

- Chemische Extraktion zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial
- Thermische Desorption zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial
- Biologischer Abbau zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial
- Nasschemische Oxidation zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial
- Chemische Einbindung zur Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial

- Thermische Oxidation/thermische Einbindung zur Herstellung von Ziegelprodukten
- Thermische Oxidation/thermische Einbindung zur Herstellung von Sinterprodukten
- Thermische Oxidation/thermische Einbindung zur Herstellung von Glasprodukten

In Abbildung 1 sind die möglichen Verknüpfungen der ausgewählten Verwertungsverfahren dargestellt.

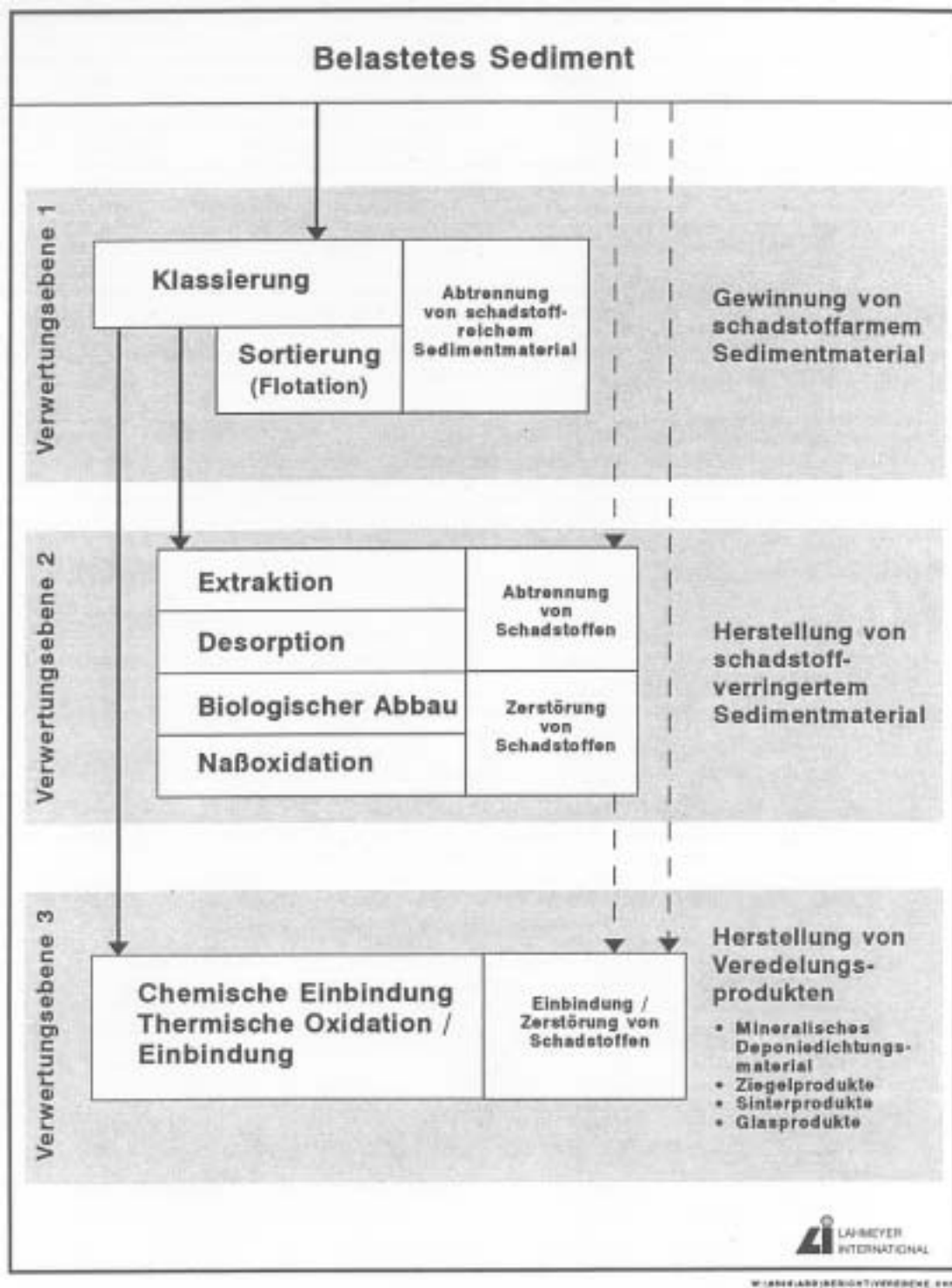


Abb. 1: Verknüpfungen der ausgewählten Verfahren zur Verwertung von belasteten Sedimenten.

3. **Detaildokumentation von Sedimentverwertungsverfahren**

3.1 **Systematik der Detaildokumentation**

Zehn ausgewählte Kategorien von Verwertungsverfahren werden in der Langfassung detailliert dargestellt. Den Detaildokumentationen liegt eine einheitliche Gliederungsstruktur zugrunde, die im folgenden erläutert wird.

Allgemeine Angaben zum Verfahren

Zunächst wird kurz das **Verfahrensprinzip** vorgestellt, das anschließend anhand der **Verfahrensschritte** und der **schematischen Darstellung des Verfahrens** näher erläutert wird. Die Erläuterung der Funktionsweise des Verfahrens erfolgt auf allgemeiner Ebene unter weitgehendem Verzicht auf anbieterspezifische Besonderheiten.

Zusammenhänge zwischen den Verfahrensparametern und den Sedimentparametern

Die Zusammenhänge zwischen den Sedimentparametern und den ökologischen und technischen sowie den realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Verfahrensparametern werden beschrieben. Die Zusammenhänge werden, soweit wie möglich, auf allgemeingültiger Ebene dargestellt und durch konkrete Einzelfallbeispiele ergänzt. Hierbei ist auf die eingeschränkte Übertragbarkeit der vorliegenden exemplarischen Daten und auf die Notwendigkeit von Vorversuchen im Einzelfall hinzuweisen.

Der **Entwicklungsstand**, in dem sich das Verfahren befindet, wird benannt. Die Einteilung erfolgt in Laborversuche, halbtechnische Versuche (Pilotanlagen), technische Versuche (Betriebsversuchsanlage, umgerüstete Anlage aus anderen Anwendungsbereichen) oder geplante/realisierte großtechnische Anlagen. Der Entwicklungsstand wird anhand von ausgewählten Projektbeispielen konkretisiert, die bei den Recherchen für die Detaildokumentation von besonderer Bedeutung waren.

Zentrale Bedeutung für die Detaildokumentation der Verwertungsverfahren haben **ökologische Produkteigenschaften** und **technische Produkteigenschaften**. Hier werden die Zusammenhänge zwischen Sedimentparametern und den Produkteigenschaften untersucht, die unmittelbar die Verwertbarkeit der Produkte beeinflussen und damit Rückschlüsse auf die Einsatzbereiche der Verfahren bei gegebenen Sedimentbelastungen ermöglichen.

Für die Beurteilung der ökologischen Produkteigenschaften von schadstoffarmen bzw. schadstoffverringerten Sedimentmaterialien werden die Anforderungen der „Technischen Regeln für die Verwertung: Mineralische Reststoffe und Abfälle aus dem Baubereich, Altlasten und Schadensfällen“ der

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) herangezogen. Der Anwendungsbereich dieser Richtlinie umfasst unter anderem auch „Boden, der in Bodenbehandlungsanlagen (z.B. Bodenwaschanlagen, Biobeeten) gereinigt worden ist“, und wird im Rahmen dieser Untersuchung sinngemäß auf behandelte Unterwasserböden, d.h. Sedimente übertragen. Dies ist naheliegend, da die zu betrachtenden Absatzbereiche („Einbau: Wiederverwendung bzw. Verwertung von Reststoffen/(Abfällen bei Baumaßnahmen im weitesten Sinne, z.B. im Erd-, Straßen-, Landschafts- und Deponiebau sowie bei der Verfüllung von Baugruben und Rekultivierungsmaßnahmen“) in beiden Fällen übereinstimmen. Die technischen Regeln der LAGA enthalten Zuordnungswerte für Schadstoffkonzentration im Feststoff und Eluat, anhand derer die Zulässigkeit des uneingeschränkten Einbaus (Z 0), des eingeschränkt offenen Einbaus (Z 1.1 bzw. Z 1.2) und des eingeschränkten Einbaus mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (T 2) festgelegt wird.

Für die Beurteilung der ökologischen Produkteigenschaften für Veredelungsprodukte existieren keine vergleichbaren technischen Regeln. In den Detaildokumentationen werden statt dessen Daten und Informationen von Verfahrensanbietern aufgeführt, anhand derer die ökologische Verträglichkeit der Produkte z.B. gegenüber genehmigenden Behörden im Einzelfall nachgewiesen worden ist. Als Vergleichswerte für die Schadstoffverfügbarkeit werden zusätzlich die Zuordnungswerte Z 0 und Z 2 für Elutate für Boden nach LAGA aufgeführt.

Für die Beurteilung der technischen Eigenschaften von Veredelungsprodukten werden die relevanten technischen Normen aufgeführt. Die Beurteilung der technischen Produkteigenschaften für Einbaumaterial, z.B. in Form von bodenmechanischen Mindestanforderungen, kann nicht auf allgemeingültiger Ebene erfolgen, da dies nur im konkreten Verwendungsfall – z.B. im Rahmen von Standsicherheitsnachweisen für ein Bauwerk – möglich ist. In den Detaildokumentationen werden daher die verfügbaren Informationen über Einflussgrößen auf diese Produkteigenschaften (z.B. Kornverteilung, Entwässerbarkeit) aufgeführt.

Im Kapitel **Einsatzbereiche** werden, abgeleitet aus den ökologischen und technischen Produkteigenschaften, die Einsatzbereiche für das Verfahren in einer Übersicht zusammengestellt.

Weiterhin erfolgt die detaillierte Darstellung weiterer Anforderungen für den Einsatz des Verwertungsverfahrens und dessen Auswirkungen. Zunächst werden die **Zusatzstoffe**, die in das Produkt eingehen, und die für das Verfahren erforderlichen **Hilfsstoffe** aufgeführt. Anschließend werden die **Emissionen (feste Reststoffe, flüssige Reststoffe, Abgas)** des Verfahrens untersucht. Mit Angaben zum **Energiebedarf**, zu den **Anlagenkapazitäten** und zum **Flächenbedarf** ist der ökologisch-technische Teil der Detaildokumentation abgeschlossen.

Als realisierungsrelevante und wirtschaftliche Verfahrensparameter werden zunächst der **Entwicklungsbedarf** und der zugehörige Zeitbedarf für die großtechnische Realisierung des Verwertungsverfahrens untersucht. Weiterhin werden die formalen Anforderungen an die **Anlagengenehmigung**

aufgeführt, wobei an dieser Stelle auf den Einzelfallcharakter einer konkreten Anlagengenehmigung hinzuweisen ist.

Die Abschätzung der **Produktgestehungskosten** erfolgt auf Basis von Anbieterangaben und von Analogieschlüssen. Hierbei ist insbesondere bei Verfahren mit hohem Entwicklungsbedarf eine große Unsicherheit der Angaben zu berücksichtigen. Um eine Vergleichbarkeit der Angaben zu ermöglichen, wurden die Abschätzungen der Produktgestehungskosten nach einem einheitlichen Schema vorgenommen.

Die **Produktabsatzbereiche** bilden die Ausgangsbasis für die Untersuchung der Absatzmöglichkeiten, deren Vorgehensweise in Kapitel 4.2.3.2 dokumentiert ist.

Für die Kurzdarstellung der Detaildokumentation der zehn Verfahrenskategorien in den nachfolgenden Kapitel 3.2 bis 3.11 wurde eine überwiegend graphische Darstellung des Verfahrensprinzips gewählt. Die wesentlichen Ergebnisse aller weiteren oben aufgeführten Gliederungspunkte werden in Kapitel 5 wiedergegeben, da sie die Grundlage für die Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung bilden. Für ausführliche Informationen zur Detaildokumentation und für Quellennachweise sei auf den Teilbericht 2 der Langfassung der Studie verwiesen.

3.2 Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial durch Klassierung

Die Klassierung von Sedimenten beruht auf der Abtrennung der schadstoffreichen Feinfraktion und der organischen Grobfraktion von der schadstoffarmen, anorganischen Grobfraktion (Sand). Die gewonnene Grobfraktion kann einer Verwertung zugeführt werden. Durch Klassierung kann grundsätzlich nur ein Teil des eingesetzten Materials direkt verwertet werden. Die Verwertung der verbleibenden schadstoffreichen Feinfraktion muß in zusätzlichen Verfahren erfolgen. Abbildung 2 zeigt schematisch die einzelnen Schritte des Verfahrens.

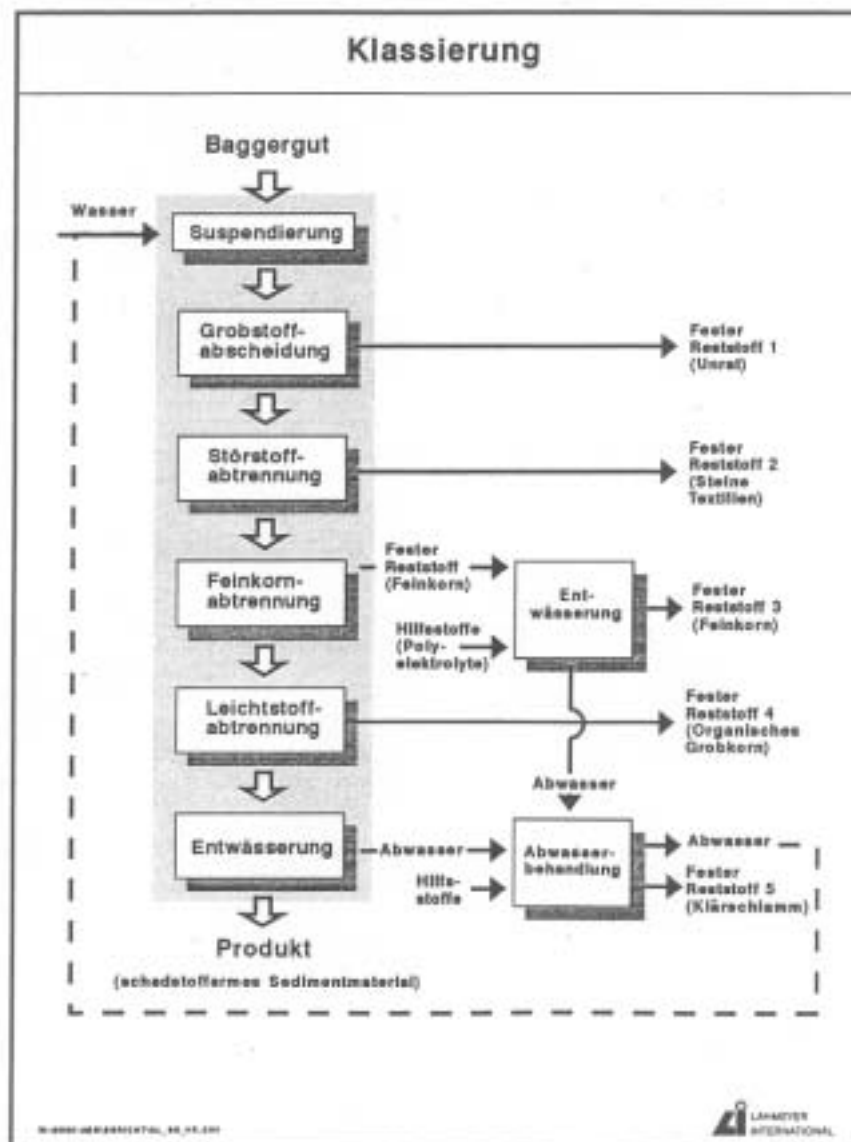


Abb. 2: Schematische Darstellung der Klassierung

3.3 Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial durch Sortierung (Flotation)

Die Sortierung wird im folgenden anhand des für die Sedimentverwertung besonders relevanten Verfahrens der Flotation behandelt. Bei der Flotation erfolgt eine Trennung der schadstoffreichen Sedimentpartikel (im wesentlichen organische Substanz mit anhaftenden Schadstoffen) von den schadstoffarmen Sedimentpartikeln (im wesentlichen anorganisches Material) aufgrund ihrer unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften und Dichten. Mit Hilfe von Flotationsmitteln werden an die schadstoffreichen Sedimentpartikel feine Luftblasen angelagert und die Partikel zur Suspensionsoberfläche aufgeschwemmt, wo sie abgezogen werden. Die schadstoffarmen Sedimentpartikel verbleiben in der Suspension und werden abfiltriert. Das somit gewonnene schadstoffarme Sedimentmaterial ist das Produkt der Flotation. Abbildung 3 zeigt schematisch die einzelnen Schritte des Verfahrens.

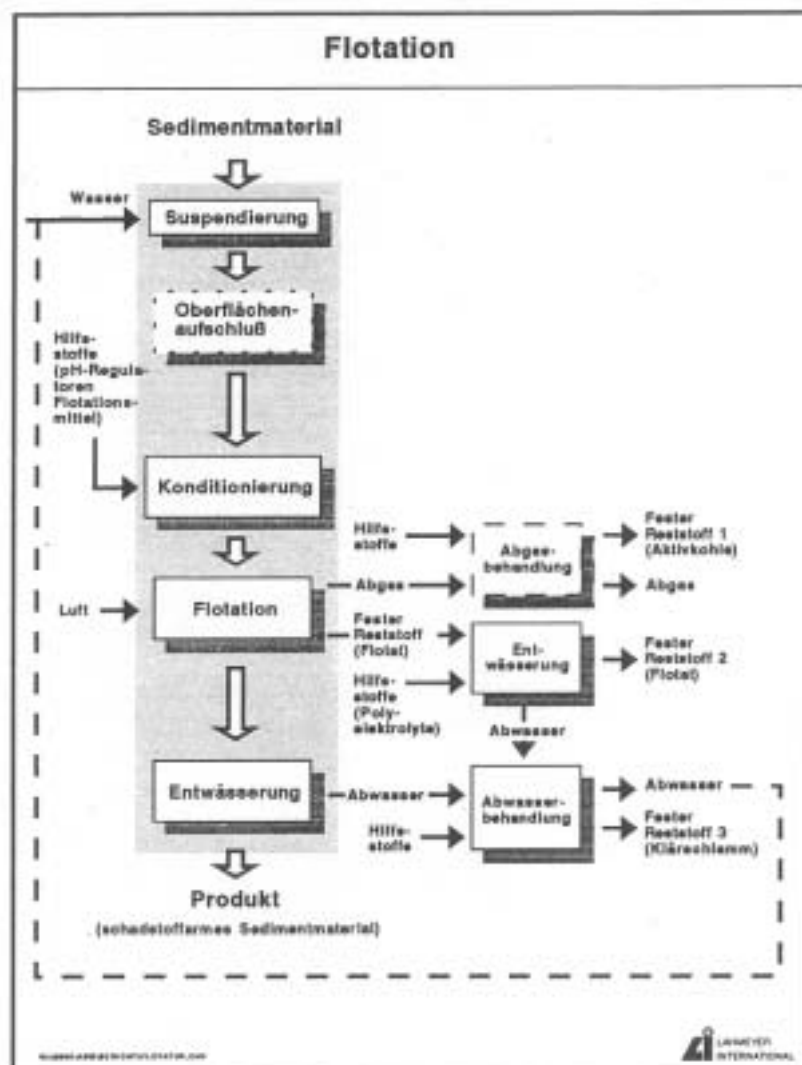


Abb. 3: Schematische Darstellung der Flotation

3.4 Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch chemische Extraktion

Die Extraktion von Sedimenten beruht auf dem Herauslösen von Schadstoffen aus dem Sedimentmaterial mit Hilfe geeigneter Extraktionsmittel. Je nach verwendetem Extraktionsmittel können organische Schadstoffe oder Schwermetalle aus dem Sedimentmaterial in die flüssige Phase überführt und mit ihr abgetrennt werden. Das schadstoffverringerte Sedimentmaterial ist das Produkt der Extraktion. In Abbildung 4 werden die Verfahrensschritte der Extraktion schematisch dargestellt.

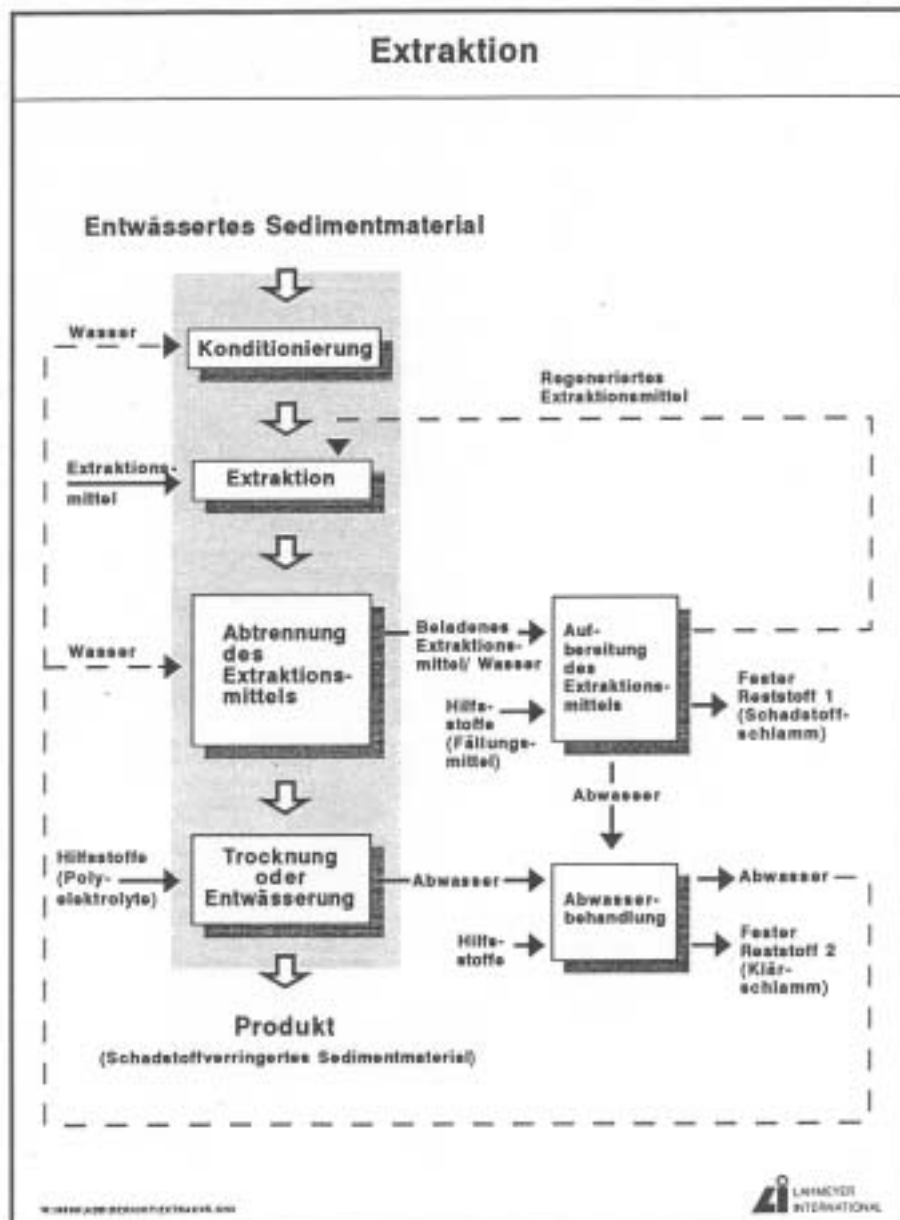


Abb. 4: Schematische Darstellung der chemischen Extraktion

3.5 Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch thermische Desorption

Die thermische Desorption von Sedimentmaterial beruht auf der Flüchtigkeit von zu entfernenden Schadstoffen im belasteten Sedimentmaterial. Durch Erhitzung des schadstoffhaltigen Sedimentmaterials gegebenenfalls bei erniedrigtem Druck können flüchtige organische Schadstoffe sowie Quecksilber aus dem Sedimentmaterial abgedampft und in die Gasphase überführt werden. Das gewonnene schadstoffverringerte Sedimentmaterial ist das Produkt der thermischen Desorption. Abbildung 5 zeigt schematisch die einzelnen Schritte des Verfahrens.

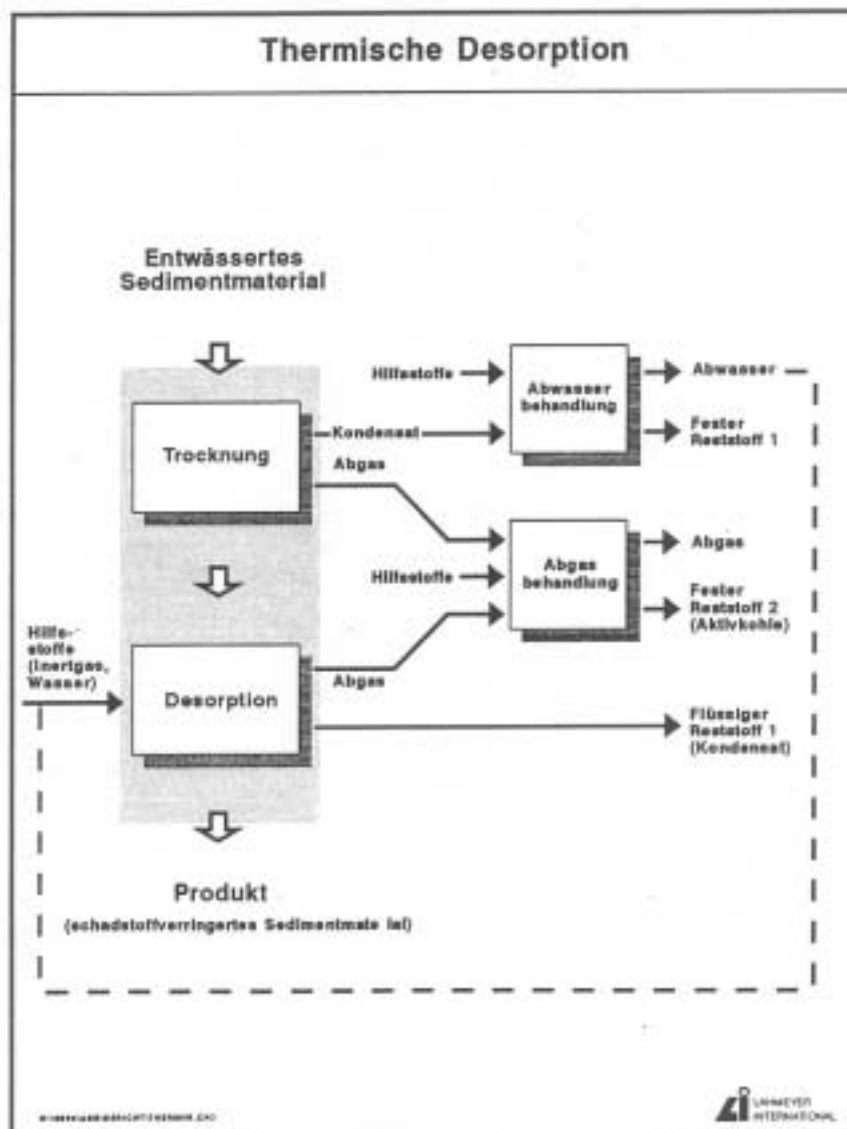


Abb. 5: Schematische Darstellung der thermischen Desorption

3.6 Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch biologischen Abbau

Bei der biologischen Behandlung von Sedimenten wird durch Einstellen von optimalen Milieubedingungen für die Mikroorganismen der natürliche Prozess des biologischen Abbaus einiger organischer Schadstoffe gezielt beschleunigt. Die Mikroorganismen können selektiv in einem bestimmten Konzentrationsbereich und unter definierten Bedingungen einen Teil der organischen Schadstoffe zu nicht toxischen Stoffen mineralisieren (Schadstoffzerstörung). Die Abbaueiten sind je nach angewandter Technik relativ hoch, teilweise mehrere Jahre. Das Produkt des biologischen Abbaus ist ein an organischen Schadstoffen verringertes Sedimentmaterial. In Abbildung 6 sind die Verfahrensvarianten zum biologischen Schadstoffabbau in Sedimentmaterial schematisch dargestellt.

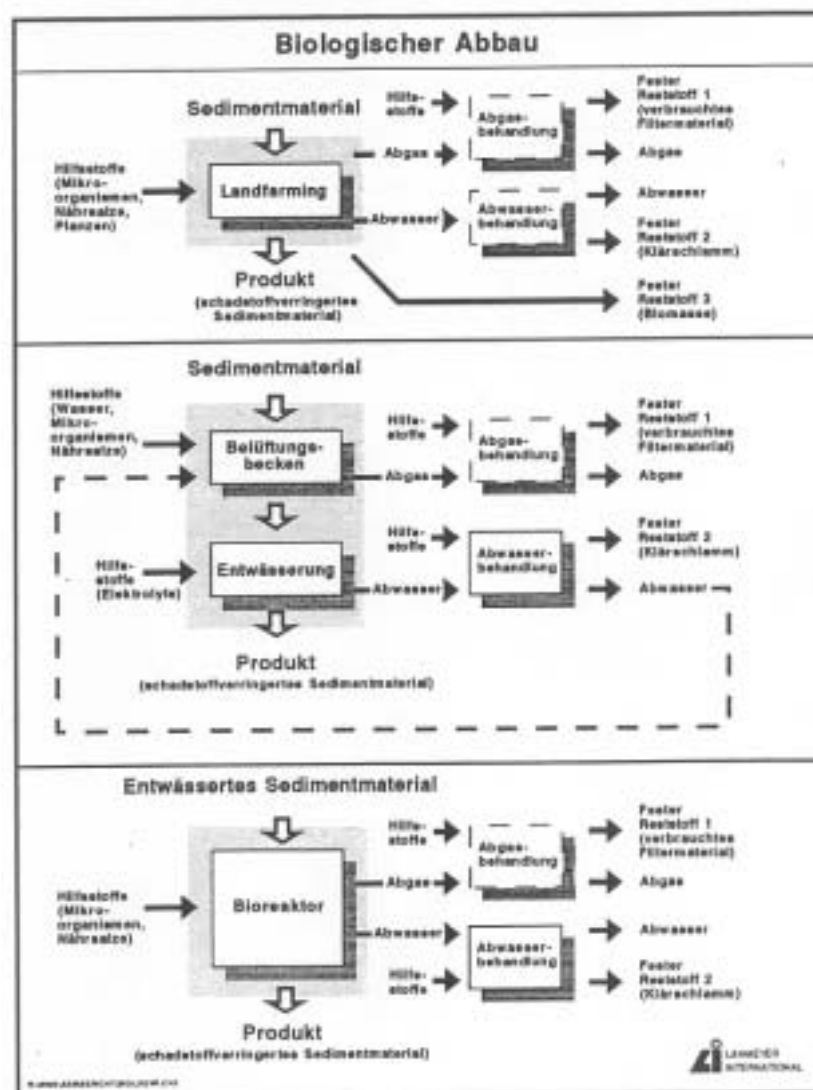


Abb. 6 : Schematische Darstellung der Verfahrensvarianten für biologischen Abbau

3.7 Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial durch Nassoxidation

Bei der Nassoxidation wird gasförmiger Sauerstoff als Oxidationsmittel eingesetzt, um in wässriger Phase organische Sedimentinhaltsstoffe zu oxidieren. Die Reaktion findet unter erhöhten Temperaturen und Rücken, gegebenenfalls unter Einsatz von Katalysatoren, statt. Das schadstoffverringerte Sedimentmaterial ist das Produkt der Nassoxidation. Abbildung 7 zeigt schematisch die einzelnen Schritte der Nassoxidation.

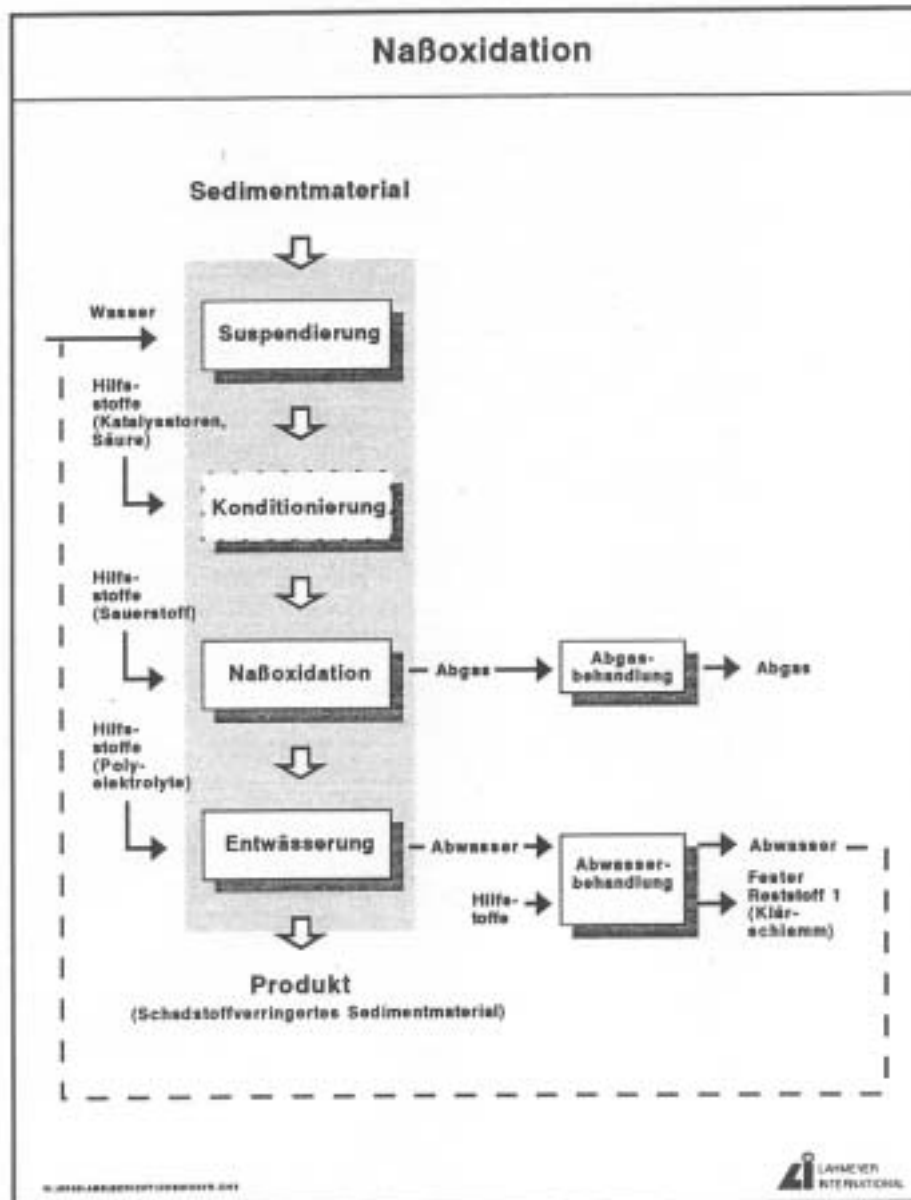


Abb. 7: Schematische Darstellung der Nassoxidation

3.8 Verwertung von Sedimentmaterial bei der Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial

Bei der Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial wird das Sedimentmaterial mit speziell abgestimmten Zusatzstoffen (z.B. Tonmehl, Kalk, Zement) durchmischt. Die dadurch bewirkte Stabilisierung (d.h. sowohl chemische Reaktion mit Schadstoffkomponenten als auch Verfestigung) führt zu einer verringerten Mobilität von Schadstoffen und zur Veränderung der bodenmechanischen Eigenschaften. Das Produkt ist als mineralisches Dichtungsmaterial im Deponiebau verwertbar. In Abbildung 8 wird das Verfahren zur Herstellung von Deponiedichtungsmaterial aus Sedimentmaterial schematisch dargestellt.

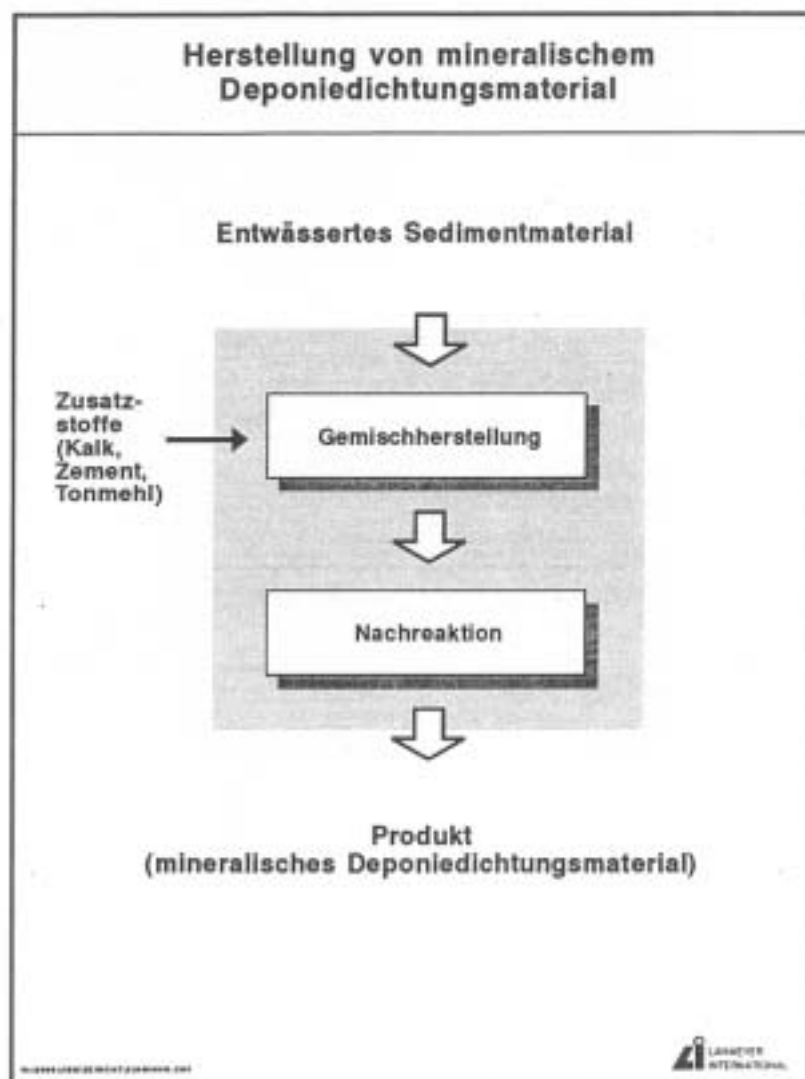


Abb. 8 : Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial

3.9 Verwertung von Sedimentmaterial bei der Herstellung von Ziegelprodukten

Bei der Herstellung von Ziegelprodukten wird das feinkörnige Sedimentmaterial mit Zusatzstoffen (Ziegelton etc.) gemischt und zu Ziegeln gebrannt. Organische Schadstoffe werden beim Brennprozeß weitgehend zerstört, Schwermetalle teilweise in das Produkt eingebunden. Das Verfahren erfordert eine aufwendige Abgasbehandlung zur Minimierung der Emissionen, Abbildung 9 zeigt schematisch die einzelnen Schritte des Verfahrens zur Herstellung von Ziegelprodukten.

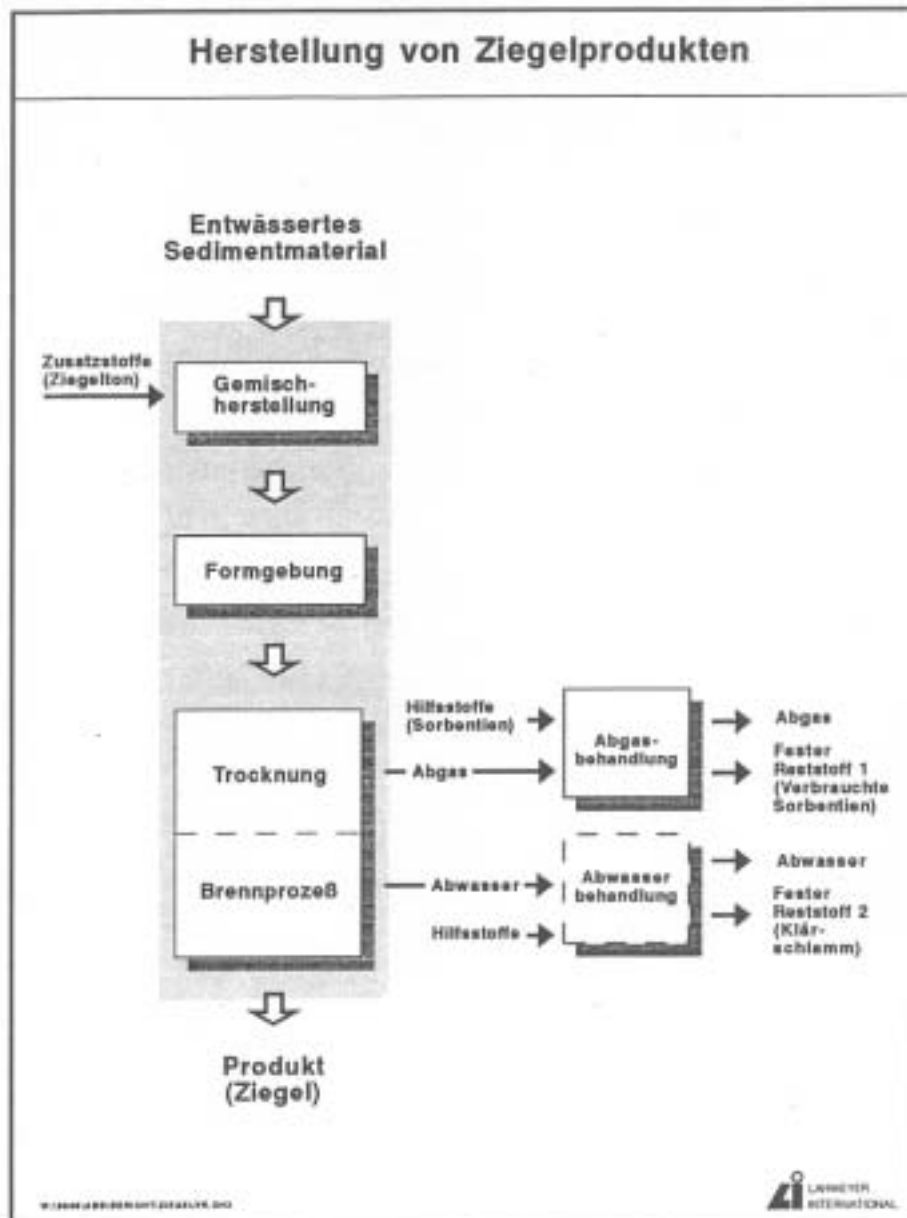


Abb. 9: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von Ziegelprodukten

3.10 Verwertung von Sedimenten bei der Herstellung von Sinterprodukten

Bei der Herstellung von Sinterprodukten wird das feinkörnige Sedimentmaterial gegebenenfalls mit Zusatzstoffen gemischt, pelletiert und gebrannt. Organische Schadstoffe werden beim Brennprozeß weitgehend zerstört, Schwermetalle teilweise in das Produkt eingebunden. Das Verfahren erfordert eine aufwendige Abgasbehandlung zur Minimierung der Emissionen. Abbildung 10 zeigt schematisch die einzelnen Schritte des Verfahrens zur Herstellung von Sinterprodukten.

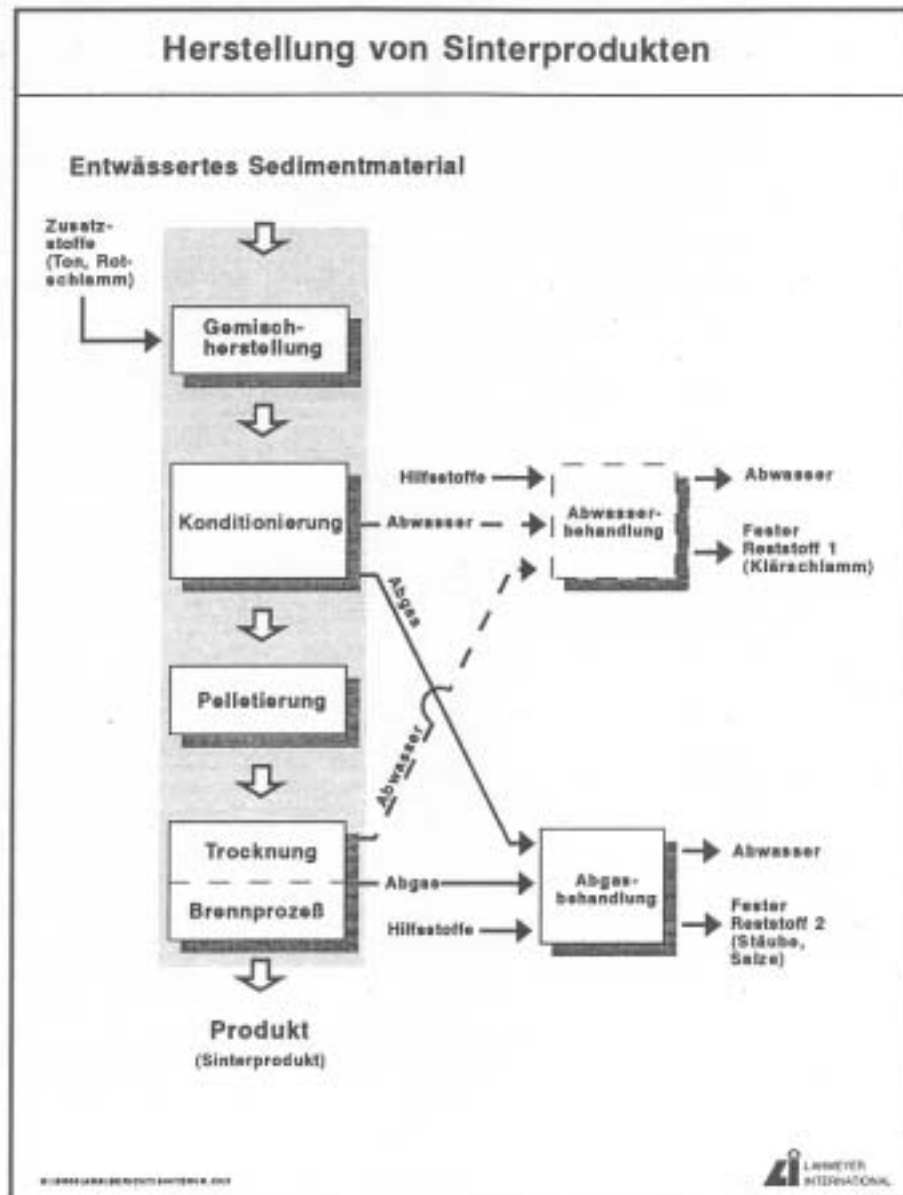


Abb. 10: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung von Sinterprodukten.

3.11 Verwertung von Sedimentmaterial bei der Herstellung von Glasprodukten

Bei der Herstellung Glasprodukten wird das Sedimentmaterial mit Zusatzstoffen (z.B. Quarzsand, Soda, Kalkstein, Dolomit, Pottasche) vermengt und geschmolzen. Bei der Schmelze wird die Struktur der Einsatzstoffe aufgebrochen. Organische Schadstoffe werden thermisch zerstört und Schwermetalle teilweise immobil in die Glasmatrix eingebunden. Das Verfahren erfordert eine aufwendige Abgasbehandlung zur Minimierung der Emissionen. Das Produkt des Verfahrens ist ein Granulat, das je nach Formgebung zu weiteren Glasprodukten veredelt werden kann. Abbildung 11 zeigt schematisch die Schritte des Verfahrens zur Herstellung von Glasprodukten aus Sedimentmaterial.

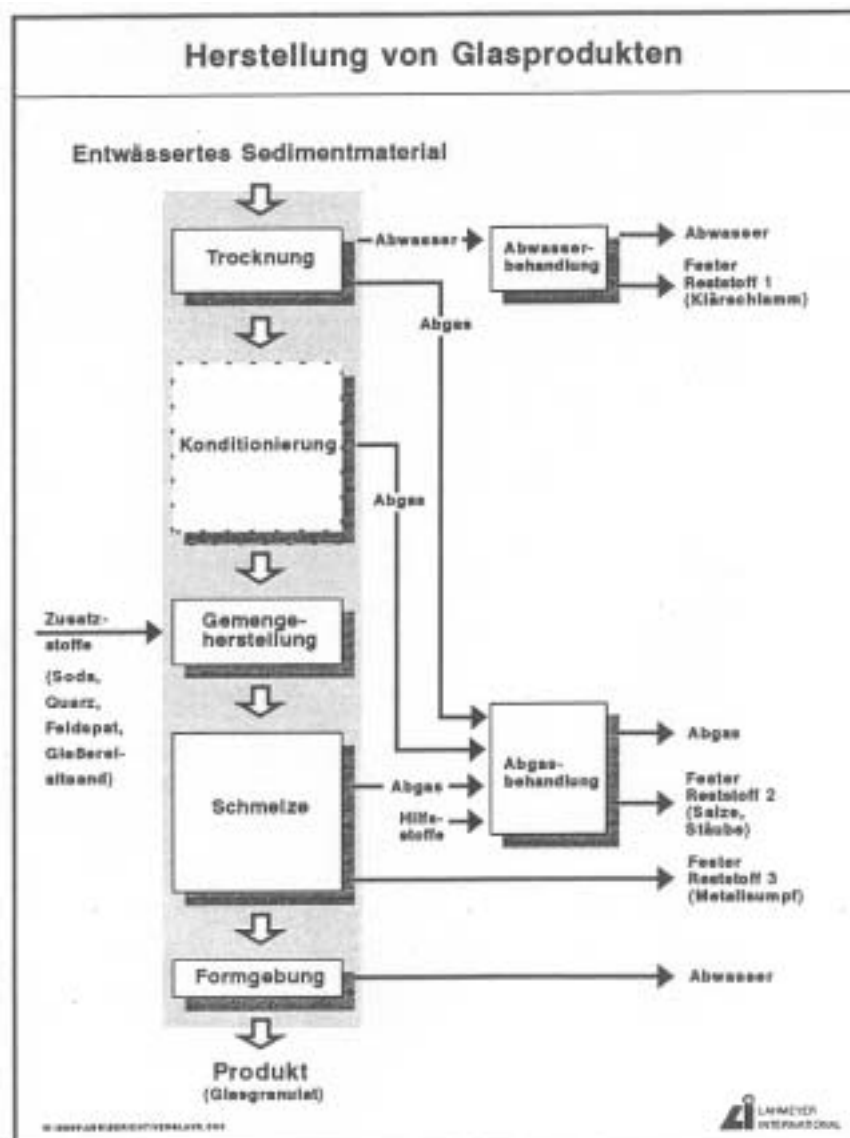


Abb. 11 : Schematische Darstellung des Verfahrens zur Herstellung Glasprodukten

4 Vorgehensweise zur Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung

4.1 Strukturierung und Systematisierung der Beurteilung

Die systematische Untersuchung der Möglichkeiten zur Verwertung von belasteten Sedimenten erfolgt auf drei Verwertungsebenen (vgl. Abbildung1) :

Verwertungsebene 1 :	Abtrennung von schadstoffreichem Sedimentmaterial zur Gewinnung von schadstoffarmem Sedimentmaterial
Verwertungsebene 2 :	Abtrennung oder Zerstörung von Schadstoffen zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial
Verwertungsebene 3 :	Einbindung und/oder Zerstörung von Schadstoffen bei der Herstellung von Sedimentveredelungsprodukten

In Abbildung 12 ist die Beurteilungssystematik in Form eines Ablaufdiagramms im Überblick dargestellt.

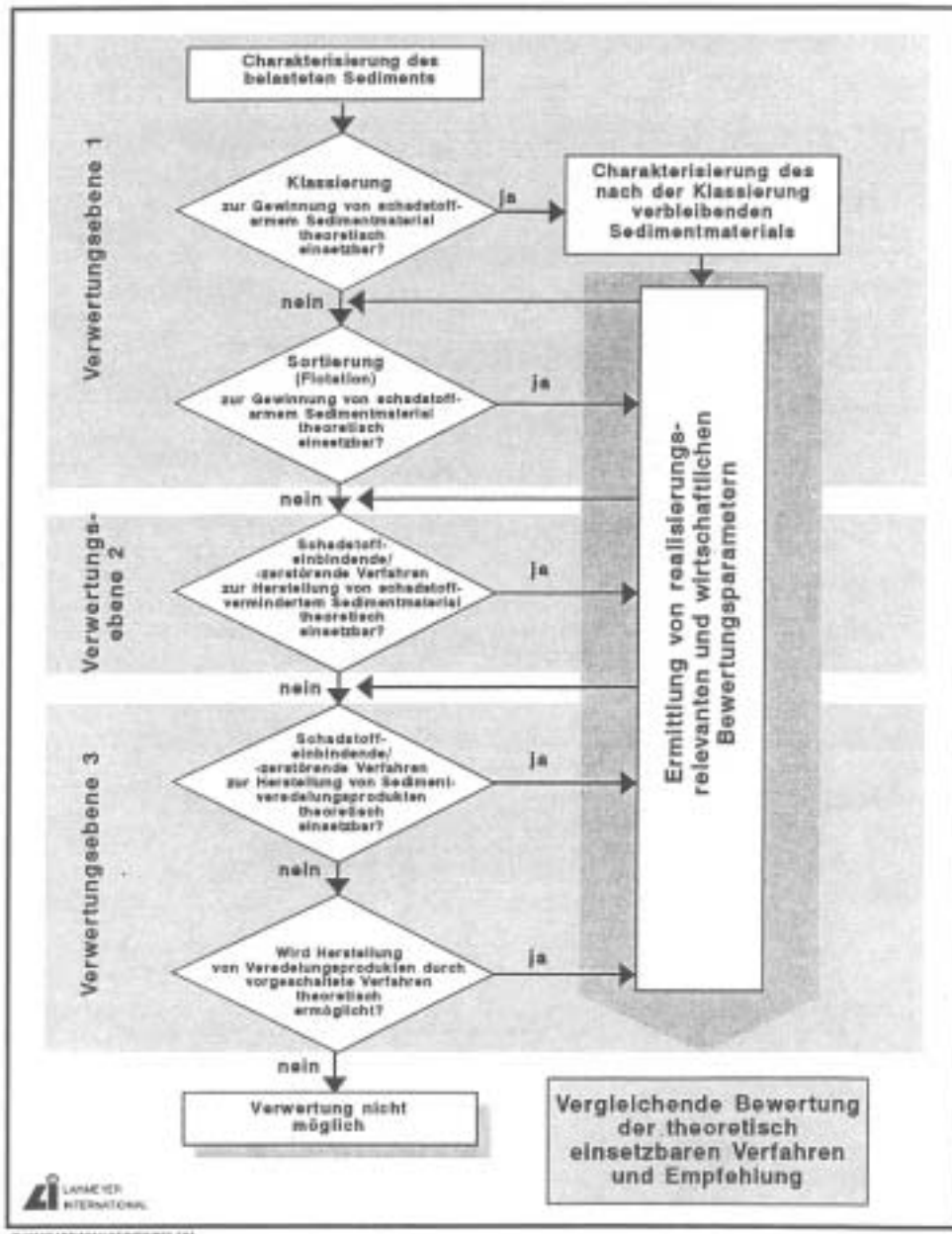


Abb. 12 : Beurteilungssystematik bei der Verwertung von belasteten Sedimenten

Nachfolgend werden die verschiedenen Untersuchungsschritte bei der Beurteilung im Überblick dargestellt.

Auf Verwertungsebene 1 erfolgt als erster Arbeitsschritt die Charakterisierung des zu verwertenden Sediments anhand von vorliegenden Sedimentdaten. Die Charakterisierung des Sedimentmaterial ist der Ausgangspunkt für die nachfolgende Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit der Klassierung zur Gewinnung von verwertbarem Sedimentmaterial. Ziel ist die maximale Produktausbeute und damit auch die weitgehende Mengenreduzierung des verbleibenden Sedimentmaterials. Wird die Klassierung als theoretisch einsetzbar beurteilt, erfolgt die Ermittlung der zugehörigen realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Bewertungsparameter. Das nach der Klassierung verbleibende Sedimentmaterial unterscheidet sich in seinen Eigenschaften und Mengen vom ursprünglichen Sediment und muß daher erneut charakterisiert werden. Diese Charakterisierung ist die Basis für die weiteren Untersuchungsschritte.

Eine weitgehende Verwertung des Sedimentmaterials auf Verwertungsebene 1 kann nur durch den Einsatz der Sortierung erreicht werden. Hierzu ist die theoretische Einsetzbarkeit der Sortierung (im folgenden am Beispiel der Flotation betrachtet) zu beurteilen. Wird die Flotation als theoretisch einsetzbar beurteilt, erfolgt die Ermittlung der zugehörigen realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Bewertungsparameter.

Auf Verwertungsebene 2 erfolgt die Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit von schadstoffabtrennenden/- zerstörenden Verfahren zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial. Es ist zu untersuchen, ob die Schadstoffparameter des Sedimentmaterials, die eine direkte Verwertung des Sedimentmaterials als mineralischer Reststoff ausschließen, durch Extraktion, Desorption, biologischen Abbau oder Nassoxidation theoretisch verringert werden können. Ziel ist die Verringerung der Schadstoffparameter auf ein Niveau, das eine Verwertung des Sedimentmaterials ermöglicht. Ist die Herstellung eines solchen Sedimentmaterials durch den Einsatz eines Verfahrens nicht möglich, sind auch Verfahrenskombinationen zu berücksichtigen. Für die als theoretisch einsetzbar beurteilten Verfahren erfolgt die Ermittlung der zugehörigen realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Parameter.

Auf Verwertungsebene 3 erfolgt die Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit von schadstoffeinbindenden/- zerstörenden Verfahren zur Herstellung von Sedimentverwertungsprodukten. Es ist zu untersuchen, ob die Schadstoffparameter und sonstigen Sedimentparameter des untersuchten Sedimentmaterial den Einsatzbereichen der Veredelungsverfahren entsprechen. Ziel ist die vollständige Verwertung des Sedimentmaterials bei der Herstellung von Veredelungsprodukten. Ist eine Verwertung auf Verwertungsebene 3 nicht möglich, ist zu untersuchen, ob das Sedimentmaterial durch Einsatz von Vorbehandlungsverfahren (Verfahren der Verwertungsebene 1 und 2) so verändert werden kann, daß anschließend eine Verwertung auf Verwertungsebene 3 möglich ist. Für die als theoretisch einsetzbar beurteilten Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen erfolgt die Ermittlung der zugehörigen realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Parameter.

Die Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit der Verfahren auf den drei Verwertungsebenen erfolgt auf Basis der Einsatzbereiche, die in den Detaildokumentation aus den ökologischen und technischen Produkteigenschaften abgeleitet wurden.

Die Ermittlung von realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Parametern erfolgt nur für Verfahren, deren theoretische Einsetzbarkeit nicht ausgeschlossen wird. Basis der Ermittlung sind ebenfalls die Daten der Detaildokumentationen sowie zusätzliche Angaben zu den Produktabsatzmöglichkeiten.

Die abschließende Bewertung der Machbarkeit der Sedimentverwertung erfolgt durch eine vergleichende Untersuchung der konkurrierenden Verfahren aller Verwertungsebenen anhand realisierungsrelevanter und wirtschaftlicher Parameter. Auf Grundlage dieser Bewertung erfolgt eine Empfehlung, welche erfahren in weitergehenden Labor- und halbtechnischen Versuchen untersucht werden sollen.

4.2 Arbeitsschritte zur Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung

4.2.1 Charakterisierung des zu verwertenden Sedimentmaterial

Im Hinblick auf die Verwertung sind für die Charakterisierung des Sedimentmaterials insbesondere die Schadstoffparameter von Bedeutung, die eine unmittelbare Verwertung des Sedimentmaterials als mineralischen Reststoff verhindern. Zur Identifizierung dieser verwertungsrelevanten Schadstoffparameter werden im folgenden die Anforderungen der „Technischen Regeln für die Verwertung: Mineralische Reststoffe und Abfälle aus dem Baubereich, Altlasten und Schadensfällen“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA 1994) zugrunde gelegt. Im Anwendungsfall können auch andere Anforderungen (z.B. Holland-Liste, Listen aus dem Altlastenbereich etc.) oder die im Anwendungsfall von den zuständigen Behörden vorgegebenen Zielwerte herangezogen werden.

Im Anwendungsfall ist zu überprüfen, ob entsprechende Daten zur Charakterisierung des Sedimentmaterials bzw. des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials vorliegend. Liegen die erforderlichen Daten nicht vor, so ist die Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung nicht bzw. nur auf Basis von hypothetischen Annahmen durchführbar.

4.2.2 Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit der Verwertungsverfahren

Unter Verwendung der ökologischen Parameter (Schadstoffgehalte, Schadstoffverfügbarkeit) wird bei der Beurteilung der theoretischen Einsetzbarkeit nach dem Ausschlussprinzip vorgegangen, das heißt: Liegen keine Gründe für einen Ausschluss eines Verfahrens vor, wird davon ausgegangen, dass die Gewinnung bzw. Herstellung von verwertbaren Produkten zumindest theoretisch möglich ist. Anhand der technischen Parameter (Kornverteilung, TS-Gehalt, oTS-Gehalt) erfolgt die Beurteilung, ob die technischen Schnittstellenanforderungen der Verfahren theoretisch eingehalten werden oder ob der Einsatz von Vorbehandlungsverfahren erforderlich ist. Die tatsächliche Verwertbarkeit des Sedimentmaterials kann in jedem Fall nur durch praktische Versuche verifiziert werden. Hierbei ist darauf hinzuweisen, daß die Verfahren zur Verwertung von Sedimenten laufend fortentwickelt werden. Die Detaildokumentation muss entsprechend fortgeschrieben und erweitert werden.

Für die Beurteilung anhand ökologischer Parameter sind in Tabelle 2 die Einsatzbereiche der Verfahren aufgeführt.

Tab. 2: Einsatzbereiche der Verwertungsverfahren (ökologische Parameter)

Verfahren	Schadstoffgehalt		Schadstoffverfügbarkeit
	Organische Schadstoffe	Schwermetalle	
Klassierung	Keine grundsätzlichen Einschränkungen, schadstoffunspezifisch, Schadstoffverteilung auf Kornklassen ist ausschlaggebend.	Keine grundsätzlichen Einschränkungen, schadstoffunspezifisch, Schadstoffverteilung auf Kornklassen ist ausschlaggebend.	Keine gezielte Veränderung der Schadstoffverfügbarkeit, die über die Auswirkungen durch verringerte Schadstoffgehalte hinausgeht.
Flotation	Keine grundsätzliche Einschränkung, schadstoffspezifisch, Schadstoffverteilung auf die flotierbare Substanz ist ausschlaggebend.	Keine grundsätzliche Einschränkung, schadstoffspezifisch, Schadstoffverteilung auf die flotierbare Substanz ist ausschlaggebend.	Keine gezielte Veränderung der Schadstoffverfügbarkeit, die über die Auswirkungen durch verringerte Schadstoffgehalte hinausgeht.

Verfahren		Schadstoffgehalt		Schadstoffverfügbarkeit
		Organische Schadstoffe	Schwermetalle	
Extraktion	Einsatz organischer Extraktionsmittel	<p>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Polychlorierte Biphenyle (PCB) - Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) 	Keine Extraktion von Schwermetallen	Die Verfügbarkeit von Schwermetallen wird durch die Behandlung mit organischen Extraktionsmittel nicht verändert.
	Einsatz von Mineralsäuren oder Komplexbildnern	Keine Extraktion organischer Schadstoffe	Bislang nicht geeignet für Quecksilber	Restkonzentrationen von Schwermetallen sind unter natürlichen Bedingungen kaum mehr eluierbar (Ausnahme : Quecksilber). Organische Schadstoffeluate bleiben unverändert.
Desorption		<p>Anwendbarkeit der thermischen Desorption beschränkt auf Schadstoffe mit definierten Siedepunkten, die sich unter Betriebsbedingungen nicht thermisch zersetzen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) - Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) - Polychlorierte Biphenyle (PCB) <p>Einsatz bislang nur für hochbelastete Materialien.</p>	Einsatz beschränkt auf Quecksilber, bislang nur hochbelastete Materialien	Keine gezielte Veränderung der Schadstoffverfügbarkeit, die über die Auswirkungen durch verringerte Schadstoffgehalte hinausgeht.
Biologischer Abbau		Einsatz bislang für MKW- und PAK-belastetes Sedimentmaterial.	Keine gezielte Schwermetallabtrennung, Einsatz von „bakteriellem Leaching“ noch offen.	Keine gezielte Veränderung der Schadstoffverfügbarkeit, die über die Auswirkungen durch verringerte Schadstoffgehalte hinausgeht.
Nassoxidation		Einsatz bislang für MKW- und PAK-belastetes Sedimentmaterial. Für aromatische Organochlorverbindungen (PCB, DDT) nicht einsetzbar.	Keine gezielten Schwermetallabtrennung.	Keine gezielte Veränderung der Schadstoffverfügbarkeit, die über die Auswirkungen durch verringerte Schadstoffgehalte hinausgeht.

Verfahren	Schadstoffgehalt		Schadstoffverfügbarkeit
	Organische Schadstoffe	Schwermetalle	
Herstellung von Deponiedichtungsmaterial	Einschränkungen für organische Schadstoffe bislang nicht untersucht.	Einschränkungen für Schwermetalle müssen durch Elutionsversuche im Einzelfall ermittelt werden. Einsatz bislang für schwach-belastetes Sedimentmaterial; für Sedimentmaterial aus Belastungsschwerpunkten („hot-spots“) bislang nicht untersucht.	Keine grundsätzliche Einschränkung für Schadstoffverfügbarkeit im Einsatzmaterial, Verfahrensziel ist die Einbindung von Schadstoffen.
Herstellung von Ziegelprodukten	Organische Schadstoffe werden weitgehend zerstört. Konzeption ist bislang beschränkt auf die Verwertung schwach bis mittelstark belasteter Sedimentmaterialien; für Sedimentmaterial aus Belastungsschwerpunkten („hot-spots“) bislang nicht untersucht.	Einschränkungen für Schwermetalle müssen durch Elutions- und Emissionsmessungen im Einzelfall ermittelt werden. Konzeption ist bislang beschränkt auf die Verwertung von schwach bis mittelstark belastetem Sedimentmaterial, für Sedimentmaterial aus Belastungsschwerpunkten („hot-spots“) bislang nicht untersucht.	Keine grundsätzliche Einschränkung für Schadstoffverfügbarkeit im Einsatzmaterial. Verfahrensziel ist die Einbindung von Schadstoffen.
Herstellung von Sinterprodukten	Organische Schadstoffe werden weitgehend zerstört. Konzeption bislang beschränkt auf die Verwertung von schwach bis mittelstark belastetem Sedimentmaterial; für Sedimentmaterial aus Belastungsschwerpunkten („hot-spots“) bislang nicht untersucht.	Einschränkungen für Schwermetalle müssen durch Elutions- und Emissionsmessungen im Einzelfall ermittelt werden. Konzeption bislang beschränkt auf die Verwertung von schwach bis mittelstark belastetem Sedimentmaterial, für Sedimentmaterial aus Belastungsschwerpunkten („hot-spots“) bislang nicht untersucht.	Keine grundsätzliche Einschränkung für Schadstoffverfügbarkeit im Einsatzmaterial. Verfahrensziel ist die Einbindung von Schadstoffen.
Herstellung von Glasprodukten	Organische Schadstoffe werden weitgehend zerstört. Konzeption ist bislang beschränkt auf hochbelastete Materialien (z.B. Filterstäube, Reststoffe aus der industriellen Produktion).	Einschränkungen für Schwermetalle müssen durch Elutions- und Emissionsmessungen im Einzelfall ermittelt werden. Konzeption ist bislang beschränkt auf hochbelastete Materialien (z.B. Filterstäube, Reststoffe aus der industriellen Produktion).	Keine grundsätzliche Einschränkung für Schadstoffverfügbarkeit im Einsatzmaterial. Verfahrensziel ist die Einbindung von Schadstoffen.

Im Anwendungsfall können theoretisch denkbare Verfahrenskombinationen durch Vergleich der verwertungsrelevanten Schadstoffparameter, die eine unmittelbare Verwertung des Sedimentmaterials verhindern, mit den in Tabelle 2 aufgeführten Einsatzbereichen der Verfahren erfolgen. Die daraus abgeleitete Verfahrenskombination wird in die weitere Beurteilung einbezogen, wobei als Basis die Bewertungsparameter der einzelnen Verfahren dienen.

Für die Beurteilung anhand technischer Parameter sind in Tabelle 3 die Einsatzbereiche der Verwertungsverfahren aufgeführt.

Tab. 3: Einsatzbereiche der Verwertungsverfahren (technische Parameter)

Verfahren	Kornverteilung	TS-Gehalt	OTS-Gehalt
Klassierung	Einschränkungen bei geringem Anteil der schadstoffarmen Grobfraction oberhalb der erforderlichen Trennkorngröße aufgrund der begrenzten Trennschärfe der Klassierung	10 bis 15 % TS.	Keine grundsätzlichen Einschränkungen.
Flotation	Flotation wird getrennt nach Kornklassen durchgeführt. Sandflotation in der Grobfraction > 63 µm erfolgt getrennt von Flotation der Feinfraktion > 63 µm kann zur Optimierung der Schadstoffabtrennung eine weitere Eingrenzung des Kornspektrums (z.B. Entschlammung des Sedimentmaterials und Flotation in der Fraktion 20 bis 63 µm erforderlich sein.	10 bis 20 % TS.	Keine grundsätzliche Einschränkung bekannt.
Extraktion	Einsatz in der Regel für die Feinfraktion > 63 µm	Extraktion organischer Schadstoffe: 30 bis 60 % TS. Extraktion von Schwermetallen : 20 bis 30 % TS.	Keine grundsätzliche Einschränkung bekannt.
Desorption	Thermische Desorption wird in der Regel in der Feinfraktion > 63 µm eingesetzt. Einsatz für Korngrößen bis maximal 25 mm möglich.	TS-Gehalt möglichst > 50 %.	Keine grundsätzliche Einschränkung bekannt.

Verfahren	Kornverteilung	TS-Gehalt	OTS-Gehalt
Biologischer Abbau	Belüftungsbecken : Feinfraktion >63 µm. Landfarming/Bioreaktor : Einsatz der Feinkornfraktion beschränkt möglich.	Landfarming : 40 bis 60 % TS. Belüftungsbecken : 10 bis 15 % TS. Bioreaktor : 30 bis 60 % TS.	Keine grundsätzliche Einschränkung bekannt.
Nassoxidation	Einsatz insbesondere für feinkörniges Sedimentmaterial > 63 µm.	Niederdruckoxidation: 10 bis 15 % TS. Hochdruckoxidation : 15 bis 30 % TS.	Keine grundsätzliche Einschränkung bekannt.
Herstellung von Deponiedichtungsmaterial	Feinstkornanteil > 2 µm sollte mindestens 20 Gew.-% betragen. Grobstoffe/ Fremdstoffe müssen zuvor abgetrennt worden sein. .	45 bis 65 % TS.	Anteil organischer Substanz sollte 5 % nicht überschreiten.
Herstellung von Ziegelprodukten	Feinkörniges Sedimentmaterial > 63 µm. grundsätzlich geeignet, hohe Tonanteile >2 µm von Vorteil.	Weitgehende mechanische Entwässerung erforderlich, TS-Gehalt möglichst > 50 %.	OTS-Gehalt (Heizwert) kann Anteil des Sedimentmaterials im Produkt begrenzen.
Herstellung von Sinterprodukten	Feinkörniges Sedimentmaterial >63 µm ist grundsätzlich geeignet für den Einsatz.	Weitgehende mechanische Entwässerung erforderlich. TS-Gehalt möglichst > 50 %.	OTS-Gehalt (Heizwert) kann Anteil des Sedimentmaterials im Produkt begrenzen.
Herstellung von Glasprodukten	Bislang Einsatzbereich für Reststoffe zwischen 1 bis 4 mm. Für Einsatz von feinkörnigem Sedimentmaterial ist Konditionierung erforderlich.	Weitgehende mechanische Entwässerung erforderlich. TS-Gehalt möglichst > 50 %.	Bislang Einsatzbereich für Reststoffe mit oTS-Gehalt < 5 %. Für Einsatz von Reststoffen mit höherem oTS-Gehalt ist Konditionierung erforderlich.

4.2.3 Ermittlung von realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Verwertungsparametern für die Verwertungsverfahren

Nachfolgend werden der Mindestrealisierungszeitraum, der Produktabsatz und die Verwertungskosten der Verfahren betrachtet.

4.2.3.1. Mindestrealisierungszeitraum

Tab. 4: Mindestrealisierungszeitraum der Verwertungsverfahren

Verfahren	Mindestrealisierungszeitraum (a)
Klassierung	2,5
Flotation	3,5
Extraktion	4,5
Desorption	4
Biologischer Abbau	4
Nassoxidation	4,5
Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial	2,5
Herstellung von Ziegelprodukten	2,5
Herstellung von Sinterprodukten	3,5
Herstellung von Glasprodukten	4,5

In Anwendungsfall ist zu ermitteln, ob es Gründe für Abweichungen vom oben genannten Mindestrealisierungszeitraum gibt. Eine Verkürzung des Realisierungszeitraums kann vorliegen, wenn einzelne Realisierungsschritte für einen Anwendungsfall bereits durchgeführt wurden (z.B. bereits durchgeführte Vorversuche, Standorte für die Anlage bereits geklärt). Entsprechend ist der für den Anwendungsfall zu erwartende Realisierungszeitraum abzuschätzen.

4.2.3.2 Produktabsatz

Die Vorgehensweise zur Abschätzung des standortspezifisch möglichen Produktabsatzes wird nachfolgend zusammengefasst.

Schritt 1: Identifizierung der Einsatzgebiete

Die grundsätzlichen Einsatz- und Anwendungsgebiete für die einzelnen Sedimentverwertungsprodukte werden vorgegeben. Zu prüfen ist, ob es neben diesem allgemeinen Anwendungsspektrum zusätzliche (regionalspezifische) bedarfsrelevante Einsatzfelder in der Region gibt.

Schritt 2 : Abgrenzung der spezifischen potentiellen Absatzgebiete

Die Abmessung des Untersuchungsgebietes sollte ungefähr dem potentiellen Absatzgebiet für die einzelnen Sedimentverwertungsprodukte entsprechen. Wesentlich für dessen Größe sind die noch akzeptablen Transportkosten. Dabei gilt die generelle Regel, dass Transportkosten für ein Produkt um so höher sein dürfen, je wertvoller bzw. knapper es ist. Daraus folgt, daß für veredelte oder sehr knappe Güter größere Transportleistungen erbracht werden können als für minderwertige bzw. reichlich vorhandene Produkte oder Rohstoffe. Für die einzelnen Sedimentverwertungsprodukte werden daher pauschale Radien vorgegeben. Es ist dann jeweils zu prüfen, ob es begründete Anhaltspunkte dafür gibt, das Markterkundungsgebiet auszuweiten. Das Untersuchungsgebiet sollte entsprechend bestehender Landkreisgrenzen festgelegt werden, da viele der statistischen Daten im notwendigen Detaillierungsgrad nur auf Kreisebene vorliegen. Die Kreise bzw. kreisfreien Städte sind einzeln aufzuführen.

Schritt 3 : Ermittlung des zugänglichen Absatzvolumens für Sedimentverwertungs-Endprodukte

Die Basis zur Ermittlung des (theoretisch) größtmöglichen Absatzpotentials stellt der Bedarf an solchen Endprodukten dar, in denen Sedimentverwertungsprodukte Verwendung finden bzw. die aus ihnen bestehen. Da es sich ausschließlich um Baustoffe/-produkte handelt, ist der Absatz im wesentlichen am Baubedarf zu orientieren. Zu berücksichtigen sind hierbei die baukonjunkturellen Einflüsse, die zu Veränderungen führen können. Da es hierzu statistische Kennziffern in der gewünschten Weise nicht gibt, wird der Bedarf mit Hilfe von Angaben zur Bautätigkeit auf Kreisebene (gegebenenfalls auch auf Landesebene) geschätzt. Eine geeignete statistische Kenngröße stellt das Bauvolumen dar, das unter anderem im Rahmen der Beschreibung der Bautätigkeit verwendet wird. Im Falle fehlender Kreisdaten – in den neuen Bundesländern durchaus möglich – werden als Hilfsgrößen zur Darstellung entsprechender Kreisdaten die Kreisanteile an der Gesamteinwohnerzahl des jeweiligen Landes (bzw. des Bundesgebietes) verwendet. Das relevante (d.h. für Sedimentverwertungsprodukte erreichbare) Bauvolumen wird mit Hilfe einer geeigneten Umrechnungsmethodik ermittelt.

Zu prüfen ist schließlich, ob es beim Einsatz der verschiedenen Sedimentverwertungsprodukte (als Vorprodukt oder Endprodukt) regionale Besonderheiten im Hinblick auf deren Image und Akzeptanz

gibt. Zu denken ist etwa an eine höhere Akzeptanz für derartige Produkte im Zusammenhang mit ihrer Anwendung bei Baumaßnahmen an Flüssen, Kanälen, Seen oder in Häfen. Imagehemmend könnten etwa regional geführte Diskussionen über Umweltverträglichkeit und gesundheitliche Aspekte insbesondere im Wohnungsbau wirken, wo Baustoffe, die in Verdacht stehen, Allergien auszulösen oder zu anderen gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu führen, auf schwindende Akzeptanz bei Verbrauchern, Bauherren bzw. künftigen Bewohnern treffen.

Schritt 4 : Berücksichtigungen regionaler Besonderheiten/Ermittlung von regionalen „Abschlägen“

Zu ermitteln sind Abschläge, die sich aus regionalen absatzmindernden Einflüssen ergeben können. Nacheinander ist zu prüfen, ob es relevanten Einflüsse gibt, die die möglichen Absatzmengen spürbar verändern können. Sollte es regionale absatzfördernde Einflüsse geben, so sind die Abschläge zu mindern bzw. aufzuheben. Da eine quantitative Abschätzung dieser Effekte in jedem Falle schwierig ist, werden qualitative, bestenfalls halbquantitative Abschläge zu formulieren sein. Auch sollte wegen der Ungenauigkeit der Aussagen auf jeden Fall im Sinne von Spannweiteren argumentiert werden.

Als regional potentiell besonders wirksam wurden ermittelt:

- Wettbewerbssituation
- Preise und Abnahmekonditionen
- Rechtliche Rahmenbedingungen
- Imagegesichtspunkte

Bei der Überprüfung der **Wettbewerbssituation** wird zunächst die Präsenz von Produktionsstätten im Absatzgebiet berücksichtigt, die abhängig ist erstens von vorhandenen Rohstoffvorkommen (wie z.B. Sand- und Kiesgruben, Tongruben etc.) und zweitens von der Nähe zu den Absatzmärkten (wie im Falle von Transportbetonwerken, Betonwerken, Werken zur Herstellung von Glasfasern, Steinwolle und Schaumglas). Danach wird geprüft, in welchen Mengen Konkurrenzprodukte in der Region hergestellt werden bzw. anfallen. Im Falle von Sekundärrohstoffen, wie z.B. Bauschutt, wird das Aufkommen sehr stark durch die Deponiegebühren im Einzugsbereich beeinflusst.

Wichtige Größen für den Absatz von Sekundärrohstoffen stellen die **Abnahme- bzw. Lieferbedingungen** dar. Die größte Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem Preis zu. Da diese Stoffe im allgemeinen mit Blick auf qualitative Anforderungen und garantierte Produkteigenschaften im Wettbewerb mit Primärrohstoffen nicht bestehen könne, bleibt als Alternative zur Absatzförderung, günstige Abnahmepreise zu offerieren. Grundsätzlich gilt hier, daß Preisvorteile um so eher Absatzchancen eröffnen, je höher bzw. je bedeutsamer der Anteil eines Sekundärrohstoffes am Endprodukt ist. Andere vorteilhafte Abnahmekonditionen können bei Rohstoffen kaum angeboten werden.

Zu den **rechtlichen Besonderheiten** zählen unterschiedliche Sachverhalte. Zu denken ist etwa daran, ob und in welcher Weise die für die potentielle Absatzregion administrativ und politisch zuständigen Gebietskörperschaften (in der Regel das Land) die Verwertung von Reststoffen und Abfällen, die in Konkurrenz zu solchen Produkten aus Sedimenten angeboten werden, durch Rechtsverordnungen und/oder andere Lenkungsinstrumente fördern (wollen). Entsprechende Lenkungsinstrumente zur Umsetzung der genannten Zielsetzungen finden sich sowohl im Abfallrecht als auch im Bauordnungsrecht der Länder. In diese Kategorie fällt beispielsweise auch eine restriktive „Baugenehmigungspolitik“ in Städten und Landkreisen. Zu denken ist auch an solche Anforderungen an Produkte, die Sekundärrohstoffe diskriminieren, da sie für den Einatzzweck selbst nicht erforderlich sind.

Durch Vergleich des möglichen Produktabsatzes mit der gewinnbaren Produktmenge (aus spezifischer Produktmenge und Sedimentmaterialaufkommen berechnet) ist der theoretisch mögliche Marktanteil des Produkts zu ermitteln.

In Tabelle 5 werden die spezifischen Produktmengen der Verfahren zusammengestellt.

Tab. 5: Spezifische Produktmengen

Verfahren	Produktabsatz (t _{TS Produkt} / t _{TS Einsatzmaterial})
Klassierung	0,1 – 0,7
Flotation	ca. 0,5 bis 0,9
Extraktion	ca. 1
Desorption	ca. 1
Biologischer Abbau	ca. 1
Nassoxidation	ca. 1
Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial	ca. 1,07
Herstellung von Ziegelprodukten	ca. 2
Herstellung von Sinterprodukten	ca. 0,9 (dichtes Gefüge) ca. 1,2 (porige Gefüge)
Herstellung von Glasprodukten	ca. 3

4.2.3.3 Verwertungskosten

In Tabelle 6 sind relative Vergleichsangaben für die Produktgestehungskosten (ohne Berücksichtigung der Erlöse) der Verwertungsverfahren aufgeführt.

Tab. 6: Relative Vergleichsangaben für die Produktgestehungskosten (ohne Erlöse)

Verfahren	Produktgestehungskosten (DM/t _{TS Produkt})	Bemerkungen
Klassierung	14 bis 40	ca. 0,5 t _{TS Produkt} /t _{TS Einsatzmaterial} ohne Entwässerung und Verwertung der Feinfraktion
Flotation	65 bis 90	ca. 0,85 t _{TS Produkt} /t _{TS Einsatzmaterial} ohne Produktentwässerung
	75 bis 100	ca. 0,85 t _{TS Produkt} /t _{TS Einsatzmaterial} mit Produktentwässerung
Extraktion	70 bis 180	Organische Schadstoffextraktion
	80	Schwermetallextraktion nach Komplexbildner-Verfahren
Desorption	200 bis 400	-
Biologischer Abbau	85	Landfarming
	175	Belüftungsbecken
	525	Bioreaktor
Nassoxidation	75 bis 135	Hochdruckoxidation
	220	Niederdruckoxidation
Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial	30 bis 40	-
Herstellung von Ziegelprodukten	165 – 240	-
Herstellung Sinterprodukten	150 bis 260	Dichtes Gefüge
	260 bis 350	Poriges Gefüge
Herstellung von Glasprodukten	440	Glasgranulat

Die Kosten für die Entwässerung des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials hängen vom Durchsatz, von der Kornverteilung und vom Entwässerungsgrad ab. Für die weitgehende mechanische Entwässerung der Feinfraktion (50 bis 60 % TS) liegen die Kosten im Bereich zwischen 75 und 150 DM/t_{TS Feinfraktion}.

In der Regel sind die regional zu ermittelnden Erlöse für Sedimentverwertungsprodukte niedriger als deren Gesteungskosten. Die sich ergebende Differenz muß durch eine Zuzahlung für die Sedimentverwertung ausgeglichen werden. Wird die Zuzahlung auf die eingesetzte Sedimentmenge umgelegt, erhält man die Verwertungskosten.

4.3 Zusammenfassende Bewertung der Verwertungsverfahren

Die vergleichende Bewertung der Verwertungsverfahren soll als Grundlage für die fachliche Entscheidung dienen, für welche erfahren weiterführende Versuche zur Verwertung des Sedimentmaterials durchgeführt werden sollten.

Die Möglichkeit zur Sedimentverwertung durch Klassierung ist getrennt von den nachfolgenden Verwertungsverfahren zu bewerten, da es sich hierbei gleichzeitig um ein Vorbehandlungsverfahren handelt.

Die konkurrierenden Verwertungsverfahren im Anschluss an die Klassierung, deren theoretische Einsetzbarkeit anhand von ökologischen und technischen Parametern nicht ausgeschlossen wurde, werden anhand der ermittelten realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Bewertungsparameter vergleichend bewertet.

Auf Basis der Bewertungsparameter können den Verfahren jeweils Ränge zugeordnet werden. Dabei erhält das unter dem jeweils betrachteten Parameter am günstigsten beurteilte erfahren den Rang 1, das nächstgünstigste den Rang 2, und so weiter. Ist eine Unterscheidung nicht möglich, werden gleiche Ränge vergeben.

Für den Parameter Realisierungszeitraum erfolgt die Rangbildung nach abnehmenden Zeiträumen, die für die großtechnische Realisierung der Verfahren mindestens erforderlich sind. Das heißt, das erfahren mit dem kürzesten Realisierungszeitraum erhält den ersten Rang.

Die Rangbildung für den Parameter Produktabsatz erfolgt durch relativen Vergleich der absetzbaren Anteile der jeweils gewinnbaren Produktmenge. Das Verfahren, bei dem das Verhältnis zwischen möglichem Produktabsatz und Produktmenge am größten ist, erhält den ersten Rang.

Für den Parameter Verwertungskosten erfolgt die Rangbildung nach ansteigenden Kosten, das heißt, das kostengünstigste Verfahren erhält den Rang 1.

Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen erfahren auf Basis der ermittelten Rangfolgen. Ausgehend von dieser Rangfolge ist eine Empfehlung auszuarbeiten, für welche Verfahrenstechniken praktische Versuche zur Sedimentverwertung unternommen werden sollen.

5 Bewertung der Verfahren zur Verwertung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen und Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise

5.1 Klassierung als Vorbehandlungs- und Verwertungsverfahren

Die Klassierung des Hamburger Sedimentmaterials ist durch die METHA-Anlage bereits für eine Trennkorngröße von 63 µm realisiert. In umfangreichen Untersuchungen zu Schadstoffgehalten in der abgetrennten Sandfraktion ist die Einsetzbarkeit nachgewiesen worden. Zukünftig ist zu prüfen, bei welcher niedrigeren Trennkorngröße das gewonnene Produkt noch den ökologisch und technisch geforderten Produkteigenschaften genügt.

Die gewinnbare Menge an Produkt (derzeit maximal 350.0000 t_{Sand}/a) aus der Klassierung kann auch bei zukünftig verringerter Trennkorngröße und damit höherer Produktausbeute entsprechend der Marktrecherche vollständig abgesetzt werden (regional möglicher Absatz ca. 1.5400.000 bis 2.500.000 t_{Produkt}/a). Der Mindestzeitraum für die großtechnische Realisierung einer weiteren Klassierungsstufe mit verringerter Trennkorngröße ist im Vergleich zu den anderen Verwertungsverfahren kurz (mindestens 1,5 Jahre). Die Realisierung der vorgeschalteten Klassierung hat daher keine Auswirkung auf die Mindestrealisierungszeiträume anderer Verwertungsverfahren. Die Verwertungskosten für Sedimentmaterial liegen bei ca. 6 DM/t_{TS Sediment} (ohne Berücksichtigung der Entwässerungs- und Entsorgungskosten für die Feinfraktion). Damit stellt die Klassierung das kostengünstigste Verwertungsverfahren dar.

5.2 Konkurrierende Verfahren zur Sedimentmaterialverwertung

Das nach der Klassierung verbleibende Sedimentmaterial (Feinfraktion) überschreitet die LAGA-Zuordnungswerte Z 1.1 bei Kohlenwasserstoffen (Mineralkohlenwasserstoffe und polyaromatische Kohlenwasserstoffe). Die Zuordnungswerte für anorganische Schadstoffgehalte im Feststoff werden von mehreren Parametern (u.a. Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber) sowie bei den Eluat von Arsen überschritten.

Bei der vorliegenden Mischkontamination aus organischen und anorganischen Schadstoffen werden aufgrund der Einschränkungen, die sich durch die Einsatzbereiche der Verfahren ergeben, nur noch die Flotation, die Verfahrenskombination aus Extraktion und Desorption sowie alle Verfahren zur Herstellung von Sedimentveredelungsprodukten betrachtet. Diese sechs Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen konkurrieren um die Verwertung des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials aus der Hamburger METHA-Anlage.

Die vergleichende Bewertung erfolgt anhand der nach fallspezifischen Randbedingungen modifizierten realisierungsrelevanten und wirtschaftlichen Bewertungsparameter, die gemeinsam mit der ermittelten Rangfolge in Tabelle 7 zusammenfassend dargestellt sind.

Tab. 7: Bewertung konkurrierender Verfahren zur Verwertung des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials

Verfahren	Realisierungszeitraum		Produktabsatz : Absetzbarer Anteil		Verwertungskosten (relative Vergleichsangaben)	
	(a)	Rang	(%)	Rang	(DM/t _{TS} Sedimentmaterial)	Rang
Flotation	3,0	2	100 (>2fach)	2	120	2
Verfahrenskombination Extraktion und Desorption	6	4	100 (>3fach)	1	500	5
Herstellung von Deponie- dichtungsmaterial	2,5	1	17 – 28	4	60 - 70	1
Herstellung von Ziegelprodukten	3,0	2	9 – 12	5	200	3
Herstellung Sinterprodukten (dichtes Gefüge)	3,0	2	100 (>2fach)	2	175 – 230	3
Herstellung von Glas- produkten (Granulat)	4,5	3	100 (>1fach)	3	460	4

Hinsichtlich des Realisierungszeitraums stellt sich das Verfahren zur Herstellung von Deponiedichtungsmaterial am günstigsten dar, die Kombination aus Extraktion und Desorption wird mit dem höchsten Mindestzeitraum für eine großtechnische Realisierung eingeschätzt.

Für den Produktabsatz ergibt sich, daß nur die Gewinnung bzw. Herstellung von Einbaumaterial und von Sinterprodukten (Betonzuschlagstoffen) einen vollständigen Absatz ermöglicht. Hierbei wurde unterschiedlich gewichtet, inwieweit das Absatzmarktpotential die Produktmenge des jeweiligen Verwertungsverfahrens übersteigt. Bei der Herstellung von Ziegelprodukten und Deponiedichtungsmaterial ist der Produktabsatz nur eingeschränkt abgegeben. Änderungen können sich ergeben, wenn durch eine Optimierung der vorgeschalteten Klassierung die verbleibenden Sedimentmengen, die in nachfolgenden Verfahren verwertet werden müssen, reduziert werden. Damit würden die Anteile verschiedener Verfahren zueinander bleiben jedoch unverändert. Folglich würde sich aufgrund einer weitergehenden Klassierung die Rangfolge nicht verändern.

Entsprechend der relativen Vergleichsangaben für die Verwertungskosten ist die Herstellung von Deponiedichtungsmaterial das kostengünstigste Verfahren für die Verwertung des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials. Weiterhin ist die Flotation – unter der Annahme einer Produktausbeute von 85 % - kostengünstiger als die übrigen vier konkurrierenden Verwertungsverfahren. Falls die tatsächlichen Entsorgungskosten die die zugrundegelegten Kosten für die Beseitigung des Flotats (vgl. Teilbericht 2) übersteigen, ändern sich auch die veranschlagten Verwertungskosten für die Flotation. Die kostenintensivsten Verfahren sind die Herstellung von Glasprodukten und die Verfahrenskombination aus Extraktion und Desorption.

Zusammenfassend lässt sich folgendes aus den drei Bewertungskriterien ableiten:

Die Optimierung der bereits realisierten Klassierung im Hinblick auf eine Verringerung der Trennkorngröße stellt das unter zeitlichen, absatztheoretischen und ökonomischen Kriterien effektivste Verfahren dar, um mittelfristig eine erhöhte Menge von Sedimentmaterial zu verwerten.

Für die Verwertung des nach der Klassierung verbleibenden Sedimentmaterials sollte nur die Realisierung von Verfahren erwogen werden, für deren Produktabsatz im Untersuchungsgebiet ein ausreichender Markt besteht. Damit werden die konkurrierenden Verfahren eingeengt auf die Verfahrenskombination Flotation, Extraktion und Desorption, Herstellung von Sinterprodukten und Herstellung von Glasgranulat. Für die beiden Verfahren zur Herstellung von mineralischem Deponiedichtungsmaterial und Herstellung von Ziegelprodukten scheint der Produktabsatz am wenigsten gesichert.

Unter Abwägung von zeit- und kostenbestimmenden Faktoren werden die Verfahren der Flotation und der Herstellung von Sinterprodukten ausgewählt, da sie innerhalb von drei Jahren großtechnisch realisierbar erscheinen und hinsichtlich der Verwertungskosten mit ca. 120 bzw. ca. 250 DM/t_{TS} Sedimentmaterial etwa um ein Drittel bis zur Hälfte kostengünstiger sind als die Herstellung von Glasgranulat oder die Verfahrenskombination aus Extraktion und Desorption zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial.

Die Entwicklung der Verfahrenskombination aus Extraktion und Desorption sowie die Herstellung von Glasprodukten sollten zunächst nicht vorrangig verfolgt werden, da sie sich im Vergleich mit den anderen Verwertungsverfahren hinsichtlich des Mindestzeitraums für die großtechnische Realisierung und der Verwertungskosten darstellen.

5.3 Handlungsempfehlung für ein weiterführendes Versuchsprogramm

Auf Basis der durchgeführten Beurteilung der Machbarkeit der Sedimentverwertung wird folgende Empfehlung für das weitere Vorgehen zur Verwertung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen abgeleitet :

Die mit der METHA-Anlage bereits realisierte Gewinnung von schadstoffarmen Sedimentmaterial durch Klassierung sollte ausgeweitet werden. Hierfür sind Labor- und halbtechnische Versuche durchzuführen, in denen die Schadstoffverteilung auf die Kornklassen bzw. Klassierungsfractionen untersucht wird. Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung der Trennkorngröße, die eine maximale Gewinnung von schadstoffarmen, verwertbarem Sedimentmaterial ermöglicht. Parallel dazu sollte eine schadstoffbezogene Charakterisierung des verbleibenden Sedimentmaterials und die Untersuchung der mechanischen Entwässerbarkeit des Materials erfolgen.

Nach Vorliegen von Ergebnissen aus diesen Untersuchungen sollte als Verwertungsmöglichkeit für das verbleibende Sedimentmaterial vorrangig ein Versuchsprogramm zur Flotation durchgeführt werden. Bei der Eignungsprüfung der Flotation ist parallel die Flotatentsorgung zu untersuchen. Dabei ist zu klären, welche Produktausbeute bei Einhaltung der ökologischen und technischen Produkteigenschaften tatsächlich realisiert werden kann und welche Auswirkungen sich gegebenenfalls durch Abweichungen zu den im vorliegenden Bericht getroffenen Annahmen auf die Kosten ergeben.

Sind die Ergebnisse der Flotationsversuche unbefriedigend, d.h. ist eine Verwertung des Sedimentmaterials unter Praxisbedingungen nicht durchführbar, so stellt sich die Herstellung von Sinterprodukten als eine weitere Möglichkeit für die vollständige Sedimentverwertung dar. Auch für dieses Verfahren ist dann die Einhaltung der ökologischen und technischen Produkthanforderungen für Sinterprodukte, die aus dem verbleibenden Sedimentmaterial der optimierten Klassierung hergestellt werden, nachzuweisen. Parallel zu diesen Vorversuchen ist eine Konkretisierung der Kostenangaben vorzunehmen.

Die Herstellung von Deponiedichtungsmaterial und von Ziegelprodukten aus Sedimentmaterial sowie die Herstellung von Glasprodukten und die Verfahrenskombination aus Extraktion und Desorption zur Herstellung von schadstoffverringertem Sedimentmaterial sollten zunächst nicht gezielt durch Versuchsprogramme verfolgt werden. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Dritter sollten jedoch positiv begleitet werden.