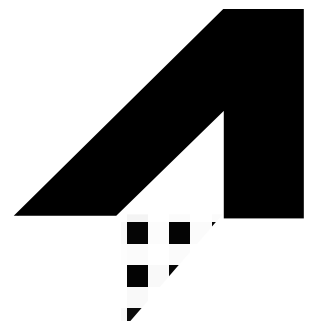


ITVA

ARBEITSHILFE – H1 - 6

Mai 1997

Thermische Verfahren zur Dekontamination



Herausgeber:

Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V., Pestalozzistraße 5-8
D-13187 Berlin

Mitglieder des Fachausschusses H1 zur Zeit der Erstellung der Arbeitshilfe:

Dr.-Ing. Peter Dreschmann, Aachen (Obmann); Dipl.-Ing. Martin Anemüller, Arnsberg; Dr.-Ing. Pertra Beckefeld, Essen; Dr.-Ing. Joachim Beckmann, Stuttgart; Reinhard A. Beine, Bochum; Dr.-Ing. Bernd Engelmann, Berlin; Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Klein, Hattingen; Dipl.-Ing. Gerhard Kmoch, Hattingen; Dr.-Ing. Volker Neumann, Berlin; Dipl.-Ing. Andreas Rebhan, Erkrath; Dipl.-Ing. Peter Schröder, Frankfurt/M.; Dr. rer. nat. Gerd Tremmel, Overath-Steinbrück; Dipl.-Ing. Stepanka Urban-Kiss, Stuttgart; Dipl.-Ing. Peter Zarbok, Mannheim.

Autoren dieser Arbeitshilfe:

Dr. rer. nat. Ansgar Fendel; Dr.-Ing. Joachim Beckmann; Dr.-Ing. Peter Dreschmann; Dipl.-Ing. Detlef Grimski; Dr. rer. nat. Wolfgang Haekel, Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heimhard; Dr.-Ing. Peter Jahns; Dipl.-Ing. Harald Kimmel; Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Klein; Dipl.-Ing. Gerhard Kmoch; Dr.-Ing. Volker Neumann; Dipl.-Ing. Andreas Rebhan; Dr. rer. nat. Gerd Tremmel; Prof. Dr. Dieter Uhlig.

© Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. · Berlin

Berlin 1997

Thermische Verfahren zur Bodendekontamination

Satzungsgemäß gehört zu den Aufgaben des Ingenieurtechnischen Verbandes Altlasten e.V. (ITVA) die Erarbeitung von Regelwerken sowie Handlungsempfehlungen für das Fachgebiet Altlasten. Dementsprechend hat sich der Fachausschuß H1 „Technologien und Verfahren“ zum Ziel gesetzt, ein Merkblatt Sanierungstechniken/-verfahren“ zu erstellen, in dem neben der Beschreibung des Ist-Zustandes von Sanierungstechniken u.a. die Bereiche Qualitätssicherung, Gewährleistung, Genehmigung, Wirksamkeit, Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz, Nachsorge und Bauartzulassung beschrieben werden.

Gemäß der Empfehlung des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) werden unter Sanierungsmaßnahmen sowohl Maßnahmen zur Sicherung als auch zur Dekontamination verstanden. Unter dem Begriff Bodenbehandlung werden Maßnahmen zur Beseitigung oder Verminderung der stofflichen Belastungen von Böden subsummiert, unabhängig davon, ob es sich um Altlasten oder sonstige Verunreinigungen handelt.

Um bereits vor Fertigstellung des Merkblattes frühzeitig informieren zu können, wird vom Fachausschuß im ersten Schritt der Ist-Zustand von Sanierungstechniken in Form von Arbeitshilfen veröf-

fentlicht. Diese behandeln schwerpunktmäßig nachfolgende Punkte:

- Grundprinzip
- Anwendungsbereich
- allgemeines Verfahrensprinzip
- Voraussetzungen für die Anwendung
 - schadstoff- und materialspezifisch
 - Vor- und Nachteile
- Anforderungen an Material bzw. Verfahren
- weiterführende Literatur

Die Arbeitshilfen berücksichtigen die mittlerweile aus zahlreichen Sanierungsprojekten vorliegenden Praxiserfahrungen. Die vom Fachausschuß erarbeitete Arbeitshilfe wurde inhaltlich mit externen Fachleuten abgestimmt. Die bewußt knappe Darstellungsform soll über die wichtigsten Punkte informieren und dem Interessierten die weiterführende Literatur aufzeigen.

Die Anwendung der Arbeitshilfe steht jedermann frei. Die Arbeitshilfe dient zur Unterstützung von Behörden, Gutachtern und Industrie. Durch sie wird eine ingenieurtechnische Projektbearbeitung keinesfalls ersetzt. Rechtliche Ansprüche aus der Anwendung ergeben sich nicht.

Arbeitshilfe

"Thermische Verfahren zur Bodendekontamination"

**erarbeitet im Fachausschuß H 1 des
Ingenieurtechnischen Verbandes Altlasten e.V. (ITVA)**

Gliederung

1. Grundprinzip
2. Allgemeines Verfahrensprinzip
 - 2.1 Vorbereitung des Aufgabegutes
 - 2.2 Thermische Behandlung
 - 2.2.1 Verfahren mit ausschließlicher Wärmeeinwirkung
 - 2.2.1.1 Direkte Erhitzung des Materials (Verbrennung)
 - 2.2.1.2 Indirekte Erhitzung des Materials (Pyrolyse)
 - 2.2.2 Verfahren mit Wärmeeinwirkung und additiven Zusatzmaßnahmen
 - 2.3 Abgasreinigung
3. Anwendungsbereiche
4. Voraussetzung für die Anwendung
5. Einsatz thermisch gereinigten Materials
6. Behandlungskosten
7. Weiterführende Literatur

1. Grundprinzip

Thermische Bodenreinigungsverfahren basieren auf dem Prinzip der Überführung von Schadstoffen aus dem Boden in die Gasphase durch thermischen Energieeintrag. Die Schadstoffbeseitigung erfolgt in Abhängigkeit vom Verfahren über eine pyrolytische Umsetzung, eine Verbrennung oder ein Ausdampfen der Schadstoffe, ohne daß es zu einer Schmelze der mineralischen Bodenmatrix kommt.

Im allgemeinen sind bei der thermischen Behandlung folgende Verfahrensschritte notwendig:

1. Bodenaufbereitung
2. Thermische Behandlung
3. Abgasreinigung

In der Bodenaufbereitung wird der zu behandelnde Boden von störenden Fremdstoffen (zum Beispiel Metallschrott, Folien) befreit und durch mechanische Aufbereitungsprozesse in seiner Korngröße und Konsistenz so homogenisiert, daß er die anlagenseitigen technischen Vorgaben erfüllt.

In der thermischen Behandlung werden die Schadstoffe aus dem Boden in die Gasphase überführt und als Abgas der Weiterbehandlung zugeführt.

Dort werden die entstandenen schadstoffhaltigen Abgase durch geeignete Techniken, zum Beispiel durch Nachverbrennung und Filtration, gereinigt.

2. Allgemeines Verfahrensprinzip

Da es unterschiedliche technische Ansätze gibt, die thermische Energie zur Behandlung von Böden auszunutzen, wird zum besseren Verständnis per Definition zwischen **Verfahren mit ausschließlicher Wärmeeinwirkung** und **Verfahren mit Wärmeeinwirkung und additiven Maßnahmen** unterschieden.

Bei den **Verfahren mit ausschließlicher Wärmeeinwirkung** wird die Energie entweder direkt über die Wärmeübertragung einer Energiequelle oder indirekt über eine wärmeleitende Wand in den Boden eingegeben, wobei der Prozeß des Austreibens im wesentlichen durch den Energieeintrag bestimmt wird.

Bei den **Verfahren mit Wärmeeinwirkung und additiven Maßnahmen** wird der Prozeß des Austreibens nicht nur durch die Wirkung thermischer Energie auf die Schadstoffe bestimmt, sondern auch über die Ausnutzung zusätzlicher physikalischer Eigenschaften der Schadstoffe, wie zum Beispiel Siedepunktserniedrigung im Vakuum oder Erhöhung der Flüchtigkeit dieser Schadstoffe beim Durchleiten von Wasserdampf (Strippen und/oder Partialdruckerniedrigung).

2.1 Bodenaufbereitung

Beide Verfahrensprinzipien beinhalten eine Aufbereitung des zu reinigenden Bodens. In Abhängigkeit von der Anlagenkonzeption werden die störenden Fremdstoffe aus dem Boden entfernt. Weiterhin wird in der Regel der Boden durch eine Kombination von Sieb- und Zerkleinerungsprozessen so behandelt, daß die verfahrensbedingte Maximalkorngröße zwischen 20 und 80 mm (Wirbelschicht < 20 mm) erreicht wird und er bezüglich seiner Kornverteilung, seines Wassergehaltes

und seiner Inhaltsstoffe eine gewisse Homogenisierung erfährt.

2.2 Thermische Behandlung

2.2.1 Verfahren mit ausschließlicher Wärmeeinwirkung

Den Verfahren mit ausschließlicher Wärmeeinwirkung kommt aufgrund der großtechnischen Verfügbarkeit und der schon längeren Betriebserfahrung in der Praxis die größere Bedeutung zu. Bei diesen Verfahren lassen sich grundsätzlich zwei Verfahrenstypen unterscheiden. Beiden gemeinsam ist die Behandlung des Bodens (Abbildung 1) in einem Ofen (zum Beispiel Drehrohr-ofen, Wirbelschicht-, Flugstromreaktor und Sinterband), dem je nach Verfahren ein Vortrockner vorgeschaltet sein kann, sowie eine Abgasbehandlung, bestehend aus einer Hochtemperaturnachverbrennung und einer Rauchgasreinigung. Verfahrensabhängig können in der Abgasbehandlung auch entstandene kondensierte Wässer über eine Wasserbehandlung gereinigt werden.

Nach der Reinigung wird der Boden zur Abkühlung befeuchtet. Alle Verfahren nutzen in unterschiedlicher Weise und Umfang anfallende Abwärme zur Wärmerückführung.

2.2.1.1 Direkte Erhitzung des Materials

Die direkte Erhitzung des Bodens erfolgt in oxidierender Atmosphäre mit einer offenen Flamme und deren heißen Rauchgasen (Verbrennung). Die Schadstoffe werden unter teilweiser Oxidation verdampft und anschließend der Abgasreinigung zugeführt. Durch die verfahrenstechnisch bedingte und erwünschte Vermischung von Brennergas mit verflüchtigten Schadstoffen bzw. deren Oxidationsprodukten entsteht ein relativ großer Volumenstrom an Abgas, das einen geringen Heizwert hat. Die Anlagen werden großtechnisch in Abhängigkeit vom Schadstoff-, Wasser- und Feinkornge-

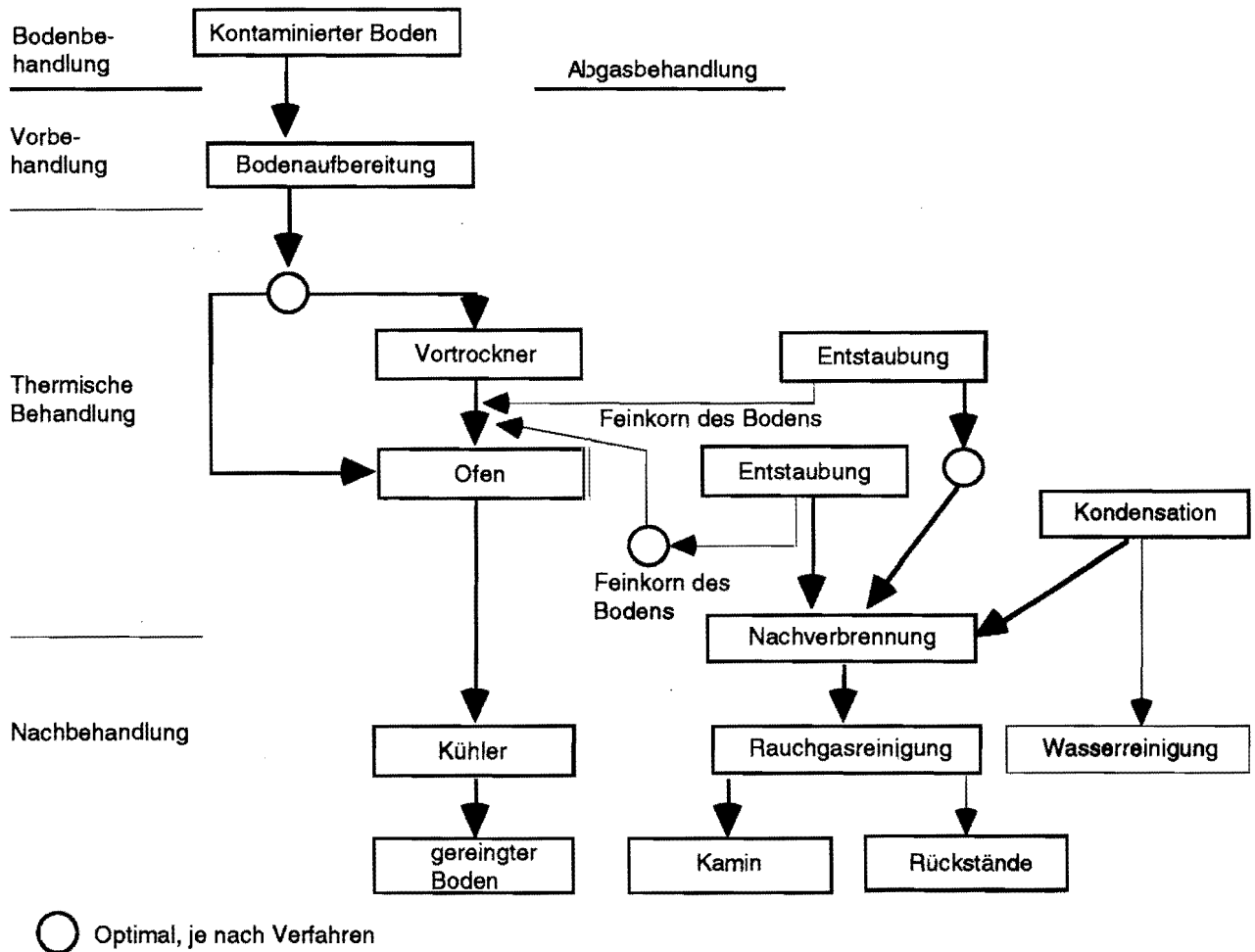


Abbildung 1: Prinzipschema für Verfahren mit ausschließlicher Energiewirkung

halt entweder in einem Temperaturbereich von 350 °C bis 550 °C (Niedrigtemperaturverfahren) oder von 800 °C bis 1100 °C (Hochtemperaturverfahren) im behandelten Boden gefahren. Die Verweilzeiten des Bodens im Ofen betragen bei dem ersten Verfahren zwischen 10 und 20 Minuten und bei dem letzteren 20 bis 45 Minuten.

Der übliche Durchsatz an Boden liegt bei den Niedrigtemperaturverfahren bei 20-30 t/h und bei den Hochtemperaturverfahren bei 2-7 t/h. Bei den Hochtemperaturverfahren findet zusätzlich eine Versinterung des Bodens statt.

2.2.1.2 Indirekte Erhitzung des Materials (Pyrolyse)

Die indirekte Erhitzung des Bodens erfolgt in einer nahezu sauerstofffreien und dadurch reduzierenden Atmosphäre (Pyrolyse). Die Schadstoffe im Boden werden in dem speziell abgedichteten Ofen im Unterdruck verdampft oder nach pyrolytischer Zersetzung in die Gasphase überführt. Der Boden kommt hierbei nicht mit den Rauchgasen der Heizbrenner in Berührung, so daß das während der thermischen Behandlung entstehende Pyrolysegas einen hohen Heizwert hat

und in geringen Volumina anfällt. Je nach Schadstoff-, Wasser-, und Feinkorngehalt des Bodens erfolgt die Behandlung in einem Temperaturbereich von 400 °C bis zu 650 °C. Die Verweilzeit des Bodens liegt im Mittel bei ca. 45 Minuten. Die übliche Durchsatzleistung beträgt je nach Anlagenkonzept zwischen 5-13 t/h.

2.2.2 Verfahren mit Wärmeeinwirkung und additiven Zusatzmaßnahmen

Im wesentlichen handelt es sich um Verfahren, die in der Regel im Niedrigtemperaturbereich unter 350 °C betrieben werden, zum Beispiel im Vakuum-Drehrohr, im Schaufeltrockner oder in Wirbelbettrinnen mit Wasserdampfeindüsung. Die Erwärmung der Luft oder anderer Trägermedien erfolgt im allgemeinen über Wärmeaustauscher. In manchen Fällen wird die benötigte Wärmeenergie durch stark exotherm reagierende Stoffe, wie zum Beispiel durch Branntkalk, in das System eingetragen.

Die Reinigung der anfallenden Gasphase erfolgt, da im allgemeinen nur bestimmte Schadstoffe erfaßt werden, nicht über eine Hochtemperaturverbrennung, sondern nur über chemisch-physikalische Verfahren, wie zum Beispiel Adsorption und Kondensation.

2.3 Abgasreinigung

Wie aus Abbildung 1 zu entnehmen ist, umfaßt die Abgasreinigung der **Verfahren mit ausschließlicher Wärmeeinwirkung** im wesentlichen drei Teileinheiten:

- Entstaubung
- Hochtemperaturnachverbrennung
- Rauchgasreinigung

Das aus dem Behandlungssofen zugeführte Abgas ist mit Feinkornanteilen des Bodens, die durch den entstehenden Gasstrom mitgerissen werden, beladen. Um eine Krustenbildung in der Nachverbren-

nung durch Silikatphasen zu vermeiden, muß eine möglichst weitgehende Abtrennung der feinen Bodenpartikel aus dem Gasstrom durchgeführt werden. Dies erfolgt je nach Verfahren im allgemeinen durch Zyklone, Heißgasfilter oder durch Kombinationen verschiedener Filtertechniken.

In der Nachverbrennung werden die feinkornfreien Abgase auf Temperaturen von 900 °C bis 1300 °C aufgeheizt, so daß die organischen Schadstoffe vollständig oxidiert werden. Die Wirksamkeit der Nachverbrennung wird von den Verbrennungstemperaturen, durch die Verweilzeit, die Anströmgeschwindigkeit des Gases sowie durch den Sauerstoffgehalt und den Temperaturgradienten im Nachverbrenner bestimmt.

Die Rauchgase der Hochtemperaturnachverbrennung müssen einer weiteren Reinigung unterzogen werden, bevor sie in einem Kamin in die Umgebung abgegeben werden. Reststaubanteile und anorganische Verbindungen, wie zum Beispiel Schwefeloxide, Chlor- und Fluorwasserstoffe oder Schwermetalle, sind ebenso wie Reste organischer Verbindungen zu entfernen.

Im allgemeinen werden mehrstufige Verfahrenskombinationen eingesetzt, in denen mit alkalischen Medien (zum Beispiel Kalkstein, Kalkhydratsuspension, Natronlauge) eine Neutralisation der sauren Gaskomponenten und zum Teil eine Fällung von Schwermetallen stattfindet und an organischen Adsorptionsmitteln (Aktivkohle, Aktivkoks) das Abscheiden von organischen Verbindungen und einem Teil der Schwermetalle erfolgt. In der Filterstufe mit Adsorbentien werden auch mögliche Spurenkonzentrationen an PCDD/PCDF abgeschieden. Für alle Stoffe im Rauchgas sind die vorgeschriebenen Grenzwerte der 17. BImSchV einzuhalten.

Besonders bei den Hochtemperaturverfahren besteht die Notwendigkeit einer zusätzlichen Entstickungsstufe, bei der die Stickoxide zu elementarem Stickstoff reduziert werden. In allen derzeit angewandten Verfahren werden zur abschließenden Abtrennung von Feststoffen zusätzlich Staubfilter (Gewebe- oder Elektrofilter) eingesetzt.

In den meisten Anlagen ist darüber hinaus noch eine Abwärmenutzung vorgesehen. Bei den **Verfahren mit Wärmeeinwirkung und additiven Maßnahmen** läßt sich nicht die grundsätzliche Dreiteilung der Abgasbehandlung aufzeigen. Im allgemeinen ist diesen Verfahren keine Hochtemperaturnachverbrennung angeschlossen. Die Abreinigung der Abgase kann über Kondensation oder durch Adsorptionsmittel oder durch eine Kombination aus beiden erfolgen.

3. Anwendungsbereiche

Prinzipiell können thermische Verfahren bei Schadstoffen eingesetzt werden, die sich unter der Einwirkung von Wärmeenergie aus dem Boden austreiben lassen.

In den Tabellen 1 und 2 sind die grundsätzlichen Korngrößen-, boden- und schadstoffspezifischen Anwendungsmöglichkeiten als Orientierung aufgezeigt, die sich aber im Einzelfall auch anders darstellen können.

4. Voraussetzung für die Anwendung

Eine der wesentlichsten Voraussetzungen für die thermische Behandlung ist die Überführbarkeit der zu behandelnden Schadstoffe durch die Einwirkung thermischer Energie in die Gasphase, ohne daß es zu einem Schmelzen der mineralischen Matrix kommt. Aus diesem Grund lassen sich Schwermetalle, bis auf die in Tabelle 2 angeführten, nicht durch eine thermische Behandlung aus dem Boden wirkungsvoll entfernen. Eine weitere Beschränkung erfährt die thermische Bodenreinigung durch den Heizwert des zu behandelnden Bodens. Ein zu hoher Heizwert kann zu anlagentechnisch bedingten Problemen führen.

Weiterhin lassen sich nur bedingt Stoffe behandeln, die explosiv sind. Eine Behandelbarkeit ist abhängig von der Konzentration der Stoffe und der eingesetzten Technik. Ebenso muß der zu behandelnde Boden stichfest sein, d. h., er darf nicht auf Grund eines hohen Gehaltes an Flüssigkeiten fließen. Nicht stichfeste Materialien müssen konditioniert werden.

Boden/Korngröße Mineralgemenge	geeignet	mit Einschränkung geeignet	nicht geeignet
Kies 1)	X		
Mittelsand 1)	X		
Feinsand 1)	X		
Schluff 1)	X		
Ton 1)	X		
Lehm	X		
Bauschutt 2)	X		
Schlamm 2)		X	
Feinkonrückstände aus der Bodenwäsche 2)	X		

1) nach DIN 18 196

2) nach entsprechender Aufbereitung

Tabelle 1: Boden-/Korngrößenspezifische Eignung von thermischen Verfahren

Schadstoffe	geeignet	mit Einschränkung geeignet	nicht geeignet
MKW	X		
PAK	X		
BTEX	X		
phenolische Verbindungen	X		
Cyanide	X		
chlorierte Verbindungen 3)	X		
organische Verbindungen: mit N, S, O, P 4)		X	
Hg, Cd, As, Sb, Zn		X	
alle anderen Schwermetalle 5)			X

- 3) Zu diesen gehören alle chlororganischen Verbindungen, wie z.B. PCB, PCP, CKW, chlorierte Pestizide und PCDD/PCDF. Sonstige halogenierte Verbindungen lassen sich grundsätzlich auch behandeln, kommt in der Praxis keine Bedeutung zu.
- 4) Zu den NSOP-Verbindungen werden alle organischen Verbindungen gerechnet, die nicht halogeniert sind, aber in denen mindestens eines der vier Elemente N, S, O, P enthalten ist. Hierunter fallen z.B. Pestizide, TNT etc.; auch Verständnisgründen werden Phenole gesondert aufgeführt.
- 5) Nicht flüchtige Schwermetalle

Tabelle 2: Schadstoffspezifische Eignung von thermischen Verfahren

In Abbildung 2 ist ein generelles Entscheidungsschema für die Anwendung der thermischen Behandlung dargestellt.

Die Verfahren mit **ausschließlicher Wärmeeinwirkung** besitzen ein weites Anwendungsspektrum. Sie kommen dann bevorzugt zur Anwendung, wenn hohe Ausgangskonzentrationen an organischen Verbindungen vorliegen und ein hoher Abreinigungsgrad gefordert wird. Verfahren mit Wärmeeinwirkung und additiven Zusatzmaßnahmen werden bei Monokontaminationen mit leichtflüchtigen Schadstoffen eingesetzt, wie zum Beispiel niedrigsiedende Kohlenwasserstoffe. Weiterhin werden sie als Vor- oder Nachbehandlungsstufe in Ergänzung zu anderen Verfahrenstechniken eingesetzt, um Konzentrationserniedrigungen zu erzielen.

5. Verwendung thermisch gereinigten Materials

Die größten Erfahrungen liegen bei den Böden vor, die in **Verfahren mit ausschließlicher Wär-**

meeinwirkung in Temperaturbereichen bis zu 640 °C abgereinigt wurden. Diese Böden weisen im Hinblick auf die organischen Inhaltsstoffe keinerlei Beschränkungen bezüglich der Wiederverwendung auf.

Thermisch gereinigtes Material kann, wie es zur Zeit gängige Praxis ist, für bautechnische Zwecke eingesetzt werden. Im Einzelfall sind die jeweiligen standortbezogenen bauphysikalischen Anforderungen zu überprüfen.

Da im thermisch gereinigten Material der für die Revitalisierung notwendige Feinkornanteil erhalten bleibt, ist zudem eine Rekultivierung ohne großen Aufwand mit Kompost als Zuschlagsstoff des Bodens innerhalb einer Vegetationsperiode möglich. Mengenmäßig kommt der Revitalisierung derzeit kaum eine Bedeutung zu.

6. Behandlungskosten

Die Behandlungskosten für die thermische Bodenreinigung liegen zwischen 150,00 und 550,00

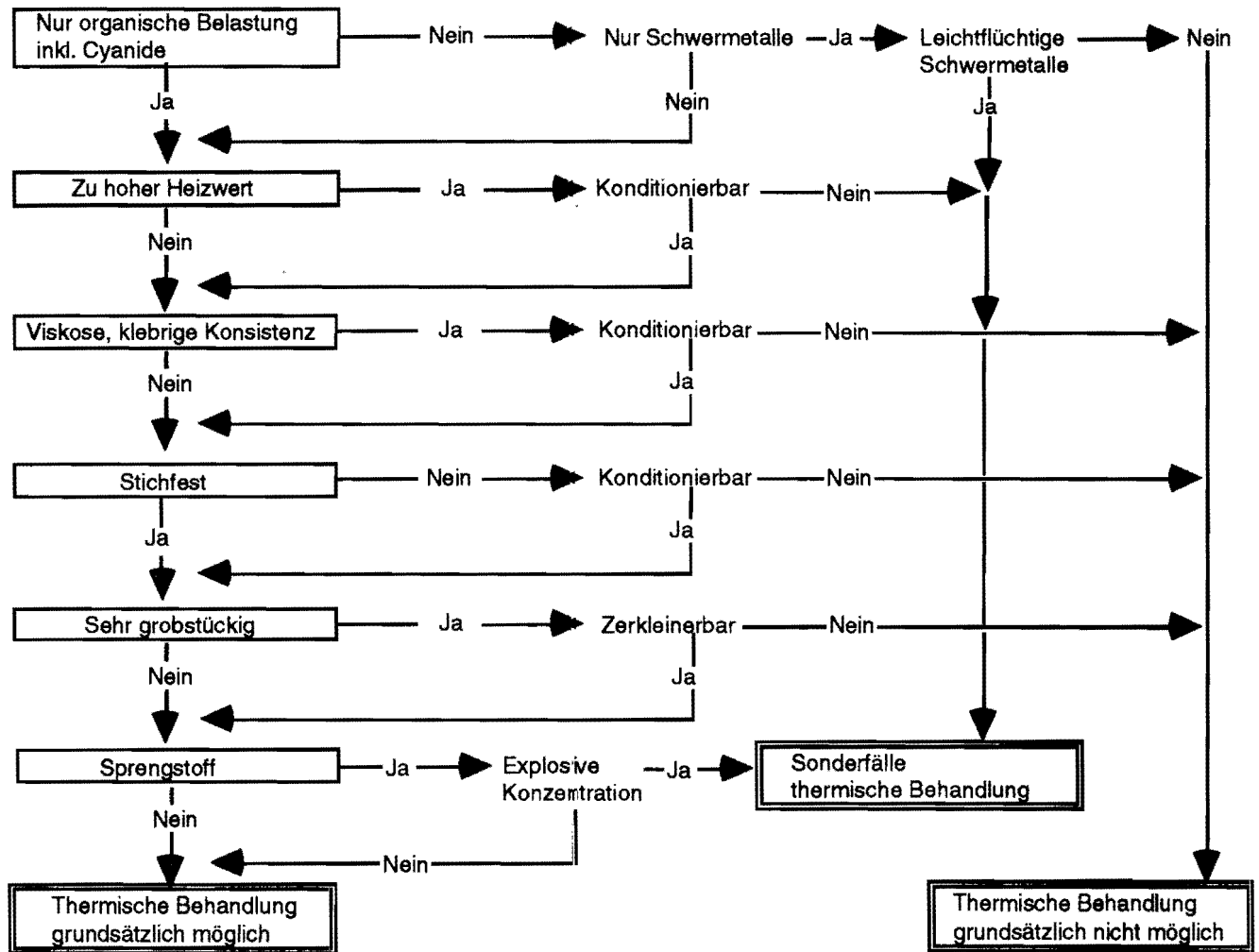


Abbildung 2: Kriterien für den Einsatz thermischer Bodenreinigungsverfahren

DM/t, wobei das durchschnittliche Preisniveau bei ca. 150,00 bis 210,00 DM/t liegt. Die Behandlungspreise hängen von der Bodenstruktur, dem Wassergehalt und den Schadstoffen ab.

7. Weiterführende Literatur

Doetsch, P. & Dreschmann, P. (1992/1993): Verfahrensdokumente zur thermischen Bodenbehandlung. In Franzius, V.; Stegmann, R.; Wolf, K & Brandt, E. (eds.): Handbuch der Altlastensanie-

rung, Ordner 2, Kap.. 5.4.1.4.0.0., Dekkers Verlag, G. Schenk, Heidelberg.

Stegmann, R. & Franzius, V. (1990): Reinigung kontaminierter Böden, Grundlagen, Genehmigung und Praxis, TU Hamburg, UBA, Monographie: Hamburger Berichte, Abfallwirtschaft, Band 3, Economica-Verlag, Bonn

Weber, H. H. & Neumaier, H. (eds.) (1992): Altlasten, Erkennen - Bewerten - Sanieren, Springer Verlag, Berlin.

Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie,
4. überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag
Chemie, Weinheim/Bergstraße, Bd. 1-4 (ab 1972)

