



Aushub-, Rückbau-  
und Recycling-Verband  
Schweiz

Gerbegasse 10, CH-8302 Kloten  
Telefon 044 / 813 76 56, Fax 044 / 813 76 70  
Internet [www.arv.ch](http://www.arv.ch), E-mail [info@arv.ch](mailto:info@arv.ch)

## ■ MERKBLATT:

# Behandlung von belasteten Bauabfällen in Anlagen (ex situ)

## ■ Stand der Technik von Entsorgungs- und Verwertungsverfahren

### Inhalt

- Einleitung
- Betonwerk / Asphaltwerk
- Bodenluftabsaugung
- Bodenwäsche
- Nassaufbereitung von Kugelfängen
- Deponierung
- Immobilisierung
- Metallhütte
- Mikrobiologischer Abbau
- Sonderabfallverbrennung
- Thermische Bodenreinigung
- Trockensiebung
- Untertagedeponie
- Zementwerk
- Ziegelei

## ■ Einleitung

Das AWEL Zürich hat im Januar 2005 beschlossen, eine neue Regelung im Bereich der Verwertung von belasteten Bauabfällen einzuführen („Verwertungsregel“). Neu wird in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung eine Verwertungseffizienz für ein bestimmtes belastetes Material definiert. Die Verwertungseffizienz (in %) legt denjenigen Anteil eines Massenstromes belasteter Bauabfälle fest, welcher **nach** einer Behandlung stofflich verwertet wird.

Für die Verwertung und / oder Entsorgung von belasteten Bauabfällen steht eine Vielzahl von Verfahren mit unterschiedlichen Verwertungseffizienzen zur Verfügung. Um den Vollzug der neuen Verwertungsregel zu vereinfachen, hat das AWEL dem ARV den Auftrag erteilt, in der Rolle einer unabhängigen Fachstelle die angewendeten Verfahren technisch zu beschreiben und hinsichtlich der in der Praxis erreichbaren Verwertungseffizienzen zu untersuchen.

In einem nächsten Schritt wird der ARV im Jahr 2005, im Auftrag des AWEL die von verschiedenen Unternehmungen angebotenen Verwertungs- bzw. Entsorgungsverfahren akkreditieren. Die von den Entsorgungsunternehmen eingereichten Gesuche für die Akkreditierung von Verwertungs- bzw. Entsorgungsverfahren werden vom ARV aufgrund einer objektiven Kriterienliste bewertet. Insbesondere findet eine Beurteilung der Verwertungseffizienz des jeweiligen Verfahrens statt. Bei positiver Beurteilung des Verfahrens erhält die Unternehmung für das eingereichte Verfahren eine Akkreditierung.

Die akkreditierten Verfahren erleichtern die Arbeiten für die Ausschreibung und die Vergabe von Arbeiten zur Entsorgung von belasteten Bauabfällen seitens Bauherrschaft wie auch die Kontrolle und damit den Vollzug durch die kantonale Aufsichtsbehörde. Solange die Vorgaben der Verwertungsregel eingehalten werden, sind die Unternehmungen im konkreten Fall frei in der Wahl und damit im Angebot der Verwertungsverfahren, solange diese akkreditiert sind.

Der nachfolgende Katalog definiert den Begriff „Verwertung“ und „Stand der Technik“ bei den Behandlungsverfahren. Er stellt eine generelle Übersicht über die heute angewandten Verfahren zur Verwertung und / oder Entsorgung belasteter Bauabfälle dar. Die Verfahren werden kurz beschrieben, es wird eine Aussage gemacht über die Wirksamkeit des Verfahrens hinsichtlich der Schadstoffelimination und schliesslich wird die mit den Verfahren üblicherweise erreichbare Verwertungseffizienz eingegrenzt. Mit einer einfachen Checkliste können die Anwendbarkeit des Verfahrens und die zu erwartende Verwertungseffizienz im Einzelfall überprüft werden.

Der ARV ist überzeugt, dass mit der neuen Verwertungsregel in Kombination mit der Akkreditierung der Verwertungsverfahren ein einfaches, effizientes und kompetitives Instrument für den Umgang mit belasteten Bauabfällen geschaffen wurde, und dass damit weiterhin ein ökologisch und ökonomisch effizienter Umgang mit belasteten Bauabfällen ermöglicht wird.

---

Der vorliegende Katalog wird durch den ARV regelmässig aktualisiert und dem sich wandelnden Stand der Technik angepasst. „Stand der Technik“ ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind.

## ■ Definition Verwertung

Eine Verwertung von belasteten Bauabfällen liegt vor, wenn primäre Rohstoffe durch Produkte aus der Aufbereitung belasteter Bauabfälle substituiert werden.

## ■ Betonwerk / Asphaltwerk

### Beschreibung des Verfahrens

Grobkörnige schadstoffhaltige Materialien können nach Aufbereitung als Zuschlagstoffe bei der Beton- und Asphaltherstellung eingesetzt werden. Die Zuschlagsstoffe müssen die Anforderungen der Norm für Gesteinskörnungen (SN 670102) einhalten. Insbesondere müssen genormte Kornzusammensetzungen innerhalb festgelegter Grenzwertabweichungen erfüllt sein. Weiterhin müssen die in der Norm für Recyclingbeton (SN 562 162/4) angegebenen Fremdstoffanteile eingehalten werden. Die genannten Normen regeln sowohl die Zusammensetzung von Beton mit definierten Eigenschaften bezgl. Druckfestigkeit und Expositionsklasse als auch von Magerbeton ohne besondere Eigenschaften.

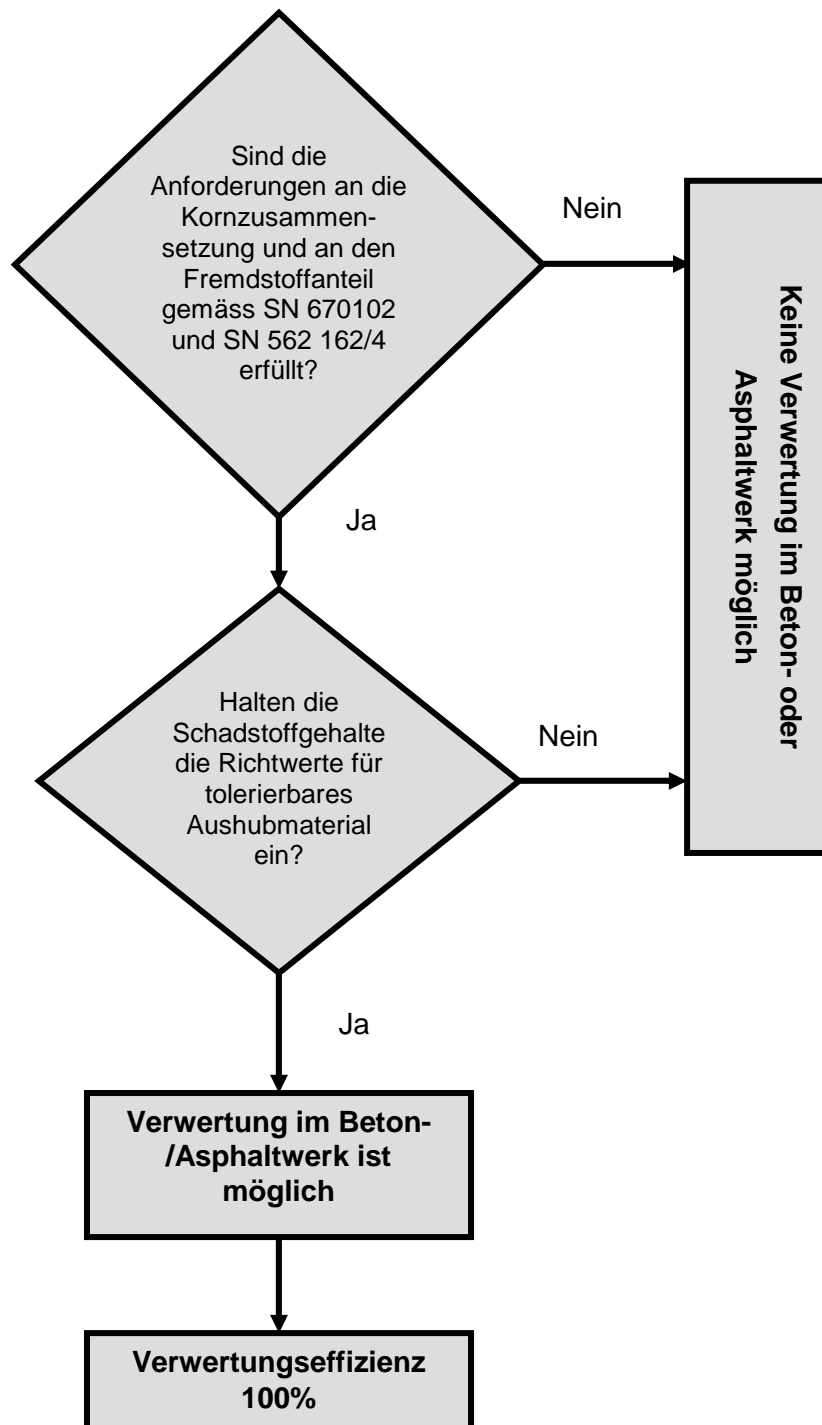
### Schadstoffe

Die Schadstoffgehalte müssen die Richtwerte für tolerierbares Aushubmaterial erfüllen, damit sie als Rohstoffersatz für die Beton- oder Asphaltherstellung eingesetzt werden können.

### Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 100%.

## Checkliste



---

## ■ Bodenluftabsaugung

### **Beschreibung des Verfahrens**

Das kontaminierte Material wird zu Halden aufgeschichtet. In der Halde ist ein Bodenbelüftungssystem installiert. Es muss sichergestellt werden, dass der Boden homogen geschichtet wird und keine Bereiche mit zu hoher Verdichtung entstehen. An die Entlüftungsrohre wird mit einer Pumpe ein Unterdruck angelegt. Die schadstoffhaltige Bodenluft wird von den Entlüftungsrohren erfasst und abgesaugt. Die abgesaugte schadstoffbeladene Luft wird mit Adsorptionsfiltern oder Biofiltern gereinigt.

Bei der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung wird mit Hilfe von eingebrachten Heizstäben oder auch durch Einpressen von Heissluft oder Dampf eine Erwärmung des belasteten Bodens erreicht, durch welche der Übergang der Schadstoff in die Bodenluft beschleunigt wird.

### **Schadstoffe**

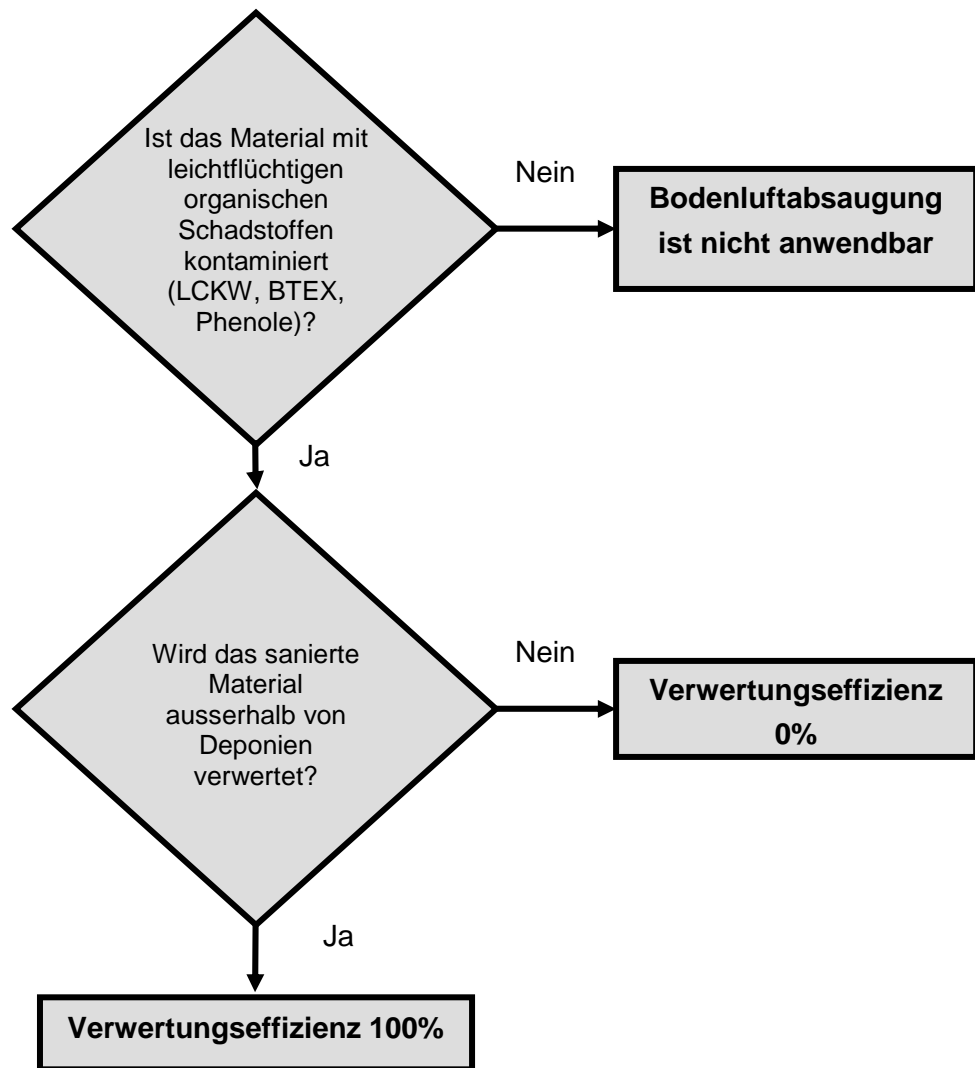
Alle leichtflüchtigen organischen Verbindungen können mit dem Verfahren der Bodenbelüftung reduziert werden. Insbesondere CKW, BTEX und aliphatische, kurzkettige Kohlenwasserstoffe können mit der Bodenbelüftung entfernt werden.

### **Verwertungseffizienz**

Die Verwertungseffizienz beträgt 100%, falls das sanierte Material ausserhalb von Deponien verwertet wird.

Findet im Anschluss an die Bodenbelüftung eine Deponierung des Materials statt, beträgt die Verwertungseffizienz 0%.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Input Bodenluftabsaugung	Output Bodenluftabsaugung	Verwertung
Reststoff, kiesig LCKW = 10 ppm	100 t	100 t LCKW = 0.1 ppm	Fundationsschicht im Strassenbau ⇒ Verwertungseffizienz 100%
Reststoff, bindig LCKW = 10 ppm	100 t	100 t LCKW = 0.3 ppm	Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie ⇒ Verwertungseffizienz 0%
Reststoff PAK = 100 ppm	⇒ PAK-Kontaminationen können mit der Bodenluftabsaugung nicht verringert werden		

## ■ Bodenwäsche

### Beschreibung des Verfahrens

In einer Bodenwaschanlage wird das Aushubmaterial mit Wasser aufgeschlämmt und in Läuterapparaten (Waschtrommel, Schwertwäscher, etc.) intensiv mechanisch beansprucht. Dabei werden Schadstoffe von den Oberflächen der Bodenpartikel freigesetzt. In mechanischen Klassier- und Sortiereinrichtungen wird das Material nach Korngrößen fraktioniert und die Schadstoffe vom Kiessand abgetrennt. Beim Waschen werden auch nicht schadstoffhaltige aber die nachfolgende Verwertung störende Bestandteile entfernt (Eisenschrott, Holz, ev. Ziegel, ev. Backstein, andere anthropogene Bestandteile). Eine dem Stand der Technik entsprechende Bodenwaschanlage verfügt in der Regel über Dichtesortiereinrichtungen in der Kies- und Sandfraktion sowie über eine Attrition und Sandflotationsanlage. Zudem ist eine Kreislaufführung des Prozesswassers mit einer Prozesswasseraufbereitung Bestandteil einer Bodenwaschanlage.

Die Schadstoffe werden in einer im Vergleich zum gereinigten Aushub massenmässig geringen Fraktion (Filterkuchen) konzentriert. Der belastete Filterkuchen wird in Zementwerken als Rohmehlersatz verwertet oder auf eine geeignete Deponie verbracht.

Die Bodenwäsche ist für kiesiges und sandiges Aushubmaterial ein sehr gutes und wirksames Reinigungsverfahren.

### Schadstoffe

Die Bodenwäsche ist für die meisten Schadstoffarten geeignet (z.B. Mineralöle, PAK, PCB, Schwermetalle). Die Schadstoffe können in einer dem Stand der Technik entsprechenden Anlage in der Regel bei Aushubmaterial mit einem Faktor 10 - 40 (Abreicherungsfaktor 10 für Schwermetalle, 40 für Organika) aus den Produkten (Kies und Sand) ausgewaschen werden. Bei Beton und Mischabbruch ist mit deutlich geringeren Abreicherungsfaktoren zu rechnen.

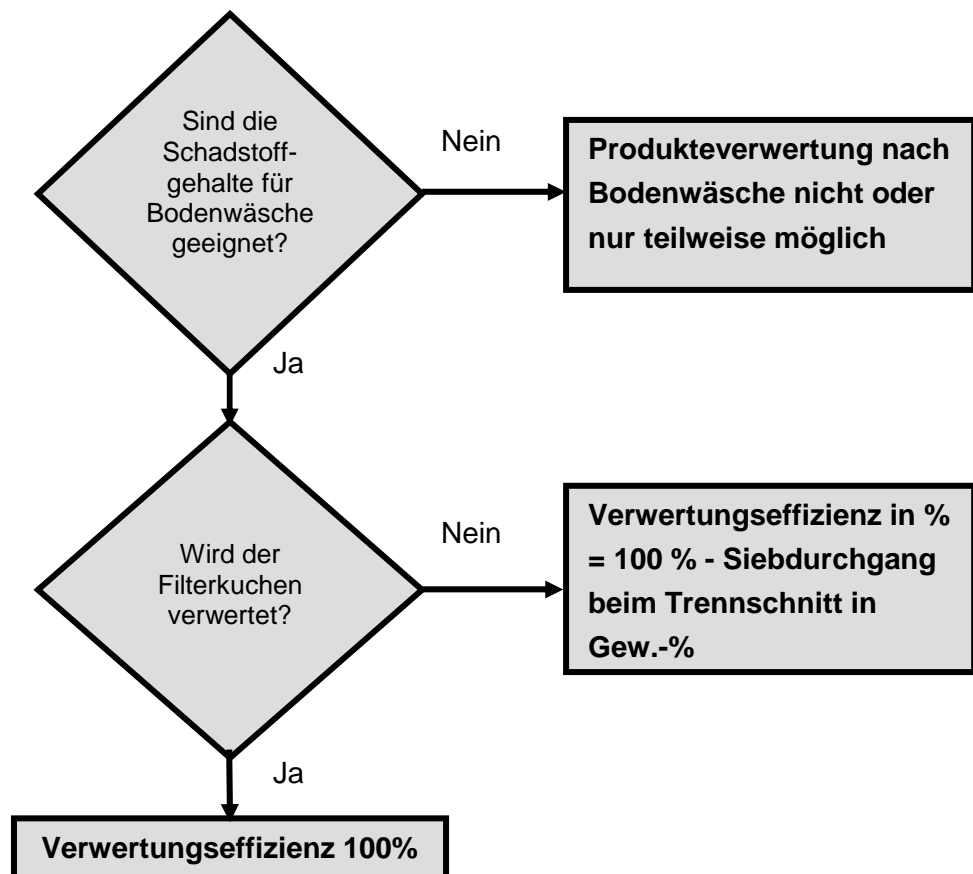
Kontaminationen von ausgewählten Schadstoffen, die mit dem Verfahren der Bodenwäsche bis auf T-Wert gewaschen werden können.

<b>Parameter</b>	<b>T-Wert</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Aushub</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Beton/Misch- abbruch</b> <b>[mg/kg]</b>
Blei, Chrom, Kupfer, Nickel	250	ca. 2'500	ca. 1'500
Zink	500	ca. 5'000	ca. 2'500
Kohlenwasserstoffe	250	ca. 10'000	ca. 2'500
PAK	15	ca. 600	ca. 150
PCB	0.1	ca. 4	ca. 1

## Verwertungseffizienz

Die erzielbaren Verwertungseffizienzen sind abhängig vom Anlagentrennschnitt und vom Entsorgungsweg des Filterkuchens. Der Anlagentrennschnitt gibt an, bis zu welcher Korngrösse Sand- und Schluffteilchen aus dem Waschwasser entfernt und den Produkten zugeführt werden können. Bodenwaschanlagen haben in der Regel einen Anlagentrennschnitt von 63 µm, d.h. Schluff- und Tonbestandteile < 63 µm verbleiben im Filterkuchen, der in Abhängigkeit des Schadstoffgehaltes entweder z. B. in einem zugelassenen Zementwerk verwertet oder auf einer Deponie abgelagert wird. Bei Verwertung des Filterkuchens beträgt die Gesamtverwertungsquote der Bodenwäsche 100%. Wird der Filterkuchen nicht verwertet, reduziert sich die Verwertungseffizienz um den Gewichtsanteil des Siebdurchgangs des Aushubmaterials bei 63 µm.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Input Bodenwäsche	Output Bodenwäsche	Verwertung
Inertstoff Feinkornanteil 25% PAK = 20 ppm	100 t	75 t Kies/Sand PAK = 1 ppm  25 t Filterkuchen PAK = 77 ppm	Kies/Sand für Betonherstellung  Filterkuchen für Zementwerk  ⇒ Verwertungseffizienz 100%
Inertstoff Feinkornanteil 10% Blei = 500 ppm	100 t	90 t Kies/Sand Blei = 50 ppm  10 t Filterkuchen Blei = 4'600 ppm (0.9 mg/l im TVA-Eluat)	Kies/Sand für Betonherstellung  Filterkuchen zur Ablagerung auf Reststoffdeponie  ⇒ Verwertungseffizienz 90%
Betonabbruch PCB = 100 ppm	⇒ PCB-Kontamination ist zu hoch für Bodenwäsche		

## ■ Nassaufbereitung von Kugelfängen

### Stand der Technik bei der Nassaufbereitung von Kugelfängen

Stand der Technik zur Abtrennung der Geschosse aus Kugelfangmaterialien ist die Aufbereitung mittels eines Nassaufbereitungsverfahrens in einer Bodenwaschanlage mit nachfolgender Wirbelstromsortierung der gewaschenen Kiesfraktionen. Wichtig ist ebenfalls die Anwendung einer dem Vorliegen von partikulären Schadstoffen gerechten Probenaufbereitung bei der Messung des Bleigehaltes.

Eine dem Stand der Technik entsprechende Aufbereitungsanlage verfügt über nachfolgend aufgeführte mechanische Trennapparate, mit denen die Trennung des Kugelfangmaterials nach Teilchengröße (Klassierung) und nach Dichte sowie Suszeptibilität (Sortierung) mit einer hohen Trennschärfe durchgeführt werden kann:

- Aufschlännen
- Siebmaschinen zur Klassierung der Kies- und Sandfraktionen
- Hydrozyklone zur Klassierung der Feinfraktionen
- Wendelscheider zur Sortierung der Sandfraktion
- Setzmaschine zur Sortierung der Kiesfraktionen
- Trommelmagnetscheider
- Wirbelstromscheider zur Sortierung der Kiesfraktionen

---

Die erste Verfahrensstufe der Aufbereitung ist ein Nassaufschluss des Kugelfangmaterials, wobei durch AufschlÄmmen mit Wasser und Einbringen mechanischer Röhrenergie eine weitestgehende Auflöfung aller Bodenaggregate angestrebt wird. In den nachfolgenden Klassierapparaten wird das Kugelfangmaterial nach Korngröfssen fraktioniert. Die dabei gewonnenen Kies- und Sandfraktionen werden zur Abtrennung von schadstoffhaltigen Partikeln den genannten Sortierapparaten zugeföhrt. Die kontaminierte Feinkornfraktion kleiner 0.063 mm wird nach einer Entwässerung in einer Kammerfilterpresse mit anschliessender Immobilisierung auf eine TVA-konforme Deponie verbracht. Eine Kreislaufföhung des zum AufschlÄmmen notwendigen Prozesswassers ist ein wesentlicher Bestandteil einer nach dem Stand der Technik arbeitenden Bodenwaschanlage. Dazu wird das Prozesswasser kontinuierlich durch eine Abwasserreinigungsanlage geföhrt.

#### Sortierung der Sandfraktion

Die Dichtesortierung der Sandfraktion 0.063-2 mm geschieht in Wendelscheidern, wobei dem Stand der Technik entsprechend diese Sortierung zweistufig ausgeföhrt wird. Nur durch eine optimale Wahl von Rinnengeometrie, Windungszahl und Ganghöhe der Wendeln kann eine hohe Trennschärfe erreicht werden.

Die Wendelrinnen bzw. **Leichtgutspirale** der ersten Stufe sind zur Abtrennung von spezifisch leichteren Partikeln ausgelegt. Was das **Rinnenprofil** anbelangt, so sind nach dem Stand der Technik elliptische Profile am günstigsten mit einem Achsenverhältnis von 2:1. Die Abtrennung von spezifisch schwereren bleihaltigen Sandpartikeln erfolgt in der zweiten Stufe mittels der **Schwertgutspirale** welche demgegenüber ein flacheres Rinnenprofil mit steilen Wandungen erfordert.

Damit sich die Körner entlang des Strömungsweges entsprechend ihrer Dichte in radial unterschiedlichen Bahnabständen von der Rinnenachse einordnen können, muss die **Windungszahl** des Rinnenscheiders genügend hoch sein. Dem Stand der Technik entsprechend muss die Trübe in 5 bis 6 Schraubwindungen abwärts fließen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist.

Grössere **Ganghöhen**, d.h. grössere Rinnenneigungswinkel, ermöglichen höhere Durchsätze bewirken aber auch ein schlechteres Sortierergebnis. Es hat sich herausgestellt, dass bei geringen Dichtedifferenzen und grösserer Feinheit des Aufgabegutes, wie in der Bodenwäsche üblich, die Ganghöhe der Wendeln zwischen 300 und 400 mm liegen muss.

#### Sortierung der Kiesfraktion

Die Kiesfraktion 2-63 mm wird einer Setzmaschine aufgegeben, mit der insbesondere spezifisch leichtere Stoffe wie Holz, Ziegel, Backstein sowie sonstige anthropogene Bestandteile abgetrennt werden. Die spezifisch schwereren Geschosse verbleiben jedoch beim Setzsörtieren in den Kiesfraktionen. Nach Stand der Technik werden daher nach entsprechender Vorklassierung die gewaschenen, geschosshaltigen Kiesfraktionen im Magnetfeld nachsörtiert. Dabei erfolgt die Aussörtierung von magnetischen Geschossen und Geschossteilen mit einem Trommelmagnetscheider. Und die Abtrennung der unmagnetischen reinen Bleipartikel gelingt mit einem Wirbelstromscheider. Ein optimales Trennergebnis auch bei Teilstückgröfssen bis zu etwa 2 mm ist nach dem Stand der Technik jedoch nur dann erreichbar, wenn das zur Erzeugung des magnetischen Wechselfeldes angewandte Polrad des Wirbelstromscheiders über Nd-Fe-B-Magnete in Feinpolteilung verfügt. Bei einer gegebenenfalls erforderlichen mehrstufigen Durchföhung der Wirbelstromsörtierung kann in den Kiesfraktionen der Bleigehalt bis auf Konzentrationen unter 500 ppm abgereichert werden, während die gewonnenen magnetischen und nichtmagnetischen Fraktionen eine für das Metallrecycling ausreichend hohe Reinheit haben.

### Bleirückgewinnungsrate / Bleientfrachtung

Gemäss dem oben beschriebenen Stand der Technik lässt sich eine Bleirückgewinnungsrate (bezogen auf die rückgewinnbare Bleifragmente > 2mm) von grösser 90% erzielen.

### Ermittlung des Bleigehaltes / Materialklassierung

Dem Umstand, dass Kugelfangmaterial auch Blei in partikulärer Form enthält, muss bei der Bestimmung des Bleigehaltes besonders Rechnung getragen werden. Das Kugelfangmaterial lässt sich durch die bei der Schwermetallbestimmung üblichen Aufbereitungsmethoden (brechen, mahlen) nicht homogenisieren. Um den Bleigehalt trotzdem zuverlässig ermitteln zu können, empfehlen wir folgende Verfahrensweise:

Bei den Probenahmen ist darauf zu achten, dass mindestens 10 kg TS (ca. 12 kg NS) gezogen werden. Die Proben werden zuerst bei 8 mm abgesiebt. Im Anteil >8 mm wird der Geschossschrott von Hand aussortiert und in die Kategorien reines Blei und Blei mit Stahlmantel eingeteilt. Die Masse der reinen Bleifraktion plus  $2/3^*$  der Masse der Fraktion Blei mit Stahlmantel ergibt, zurückgerechnet auf die ursprüngliche Probemenge, den Bleigehalt aus der Fraktion >8 mm (**Bleigehalt aus Bleischrott** > 8mm). Aus dem Siebdurchgang werden 2 kg gezogen und dem Labor mit dem ermittelten Bleigehalt aus der Fraktion >8 mm übergeben. Im Labor wird das Material getrocknet und im Backenbrecher zerkleinert (evt. Teilprobe für die Messung von Organischen Schadstoffen und Quecksilber vorgängig ziehen). Das zerkleinerte Material wird bei 2 mm abgesiebt. In der Fraktion >2 mm wird wie vorher der Bleigehalt des partikulär vorliegenden Blei bestimmt (**Gehalt aus Geschosssplitter** 2 – 8 mm). Aus dem Siebdurchgang (<2 mm) wird eine 100 g Probe gezogen und in einer Schlagkreuzmühle mit Siebeinsatz von 0.5 mm weiter zerkleinert. Der auf dem Sieb der Schlagkreuzmühle zurückbleibende Rückstand besteht grossteils aus Blei. Dessen Gewicht wird ebenfalls auf die Ursprungsprobe umgerechnet (**Gehalt aus Bleifragmente** 2 – 0.5 mm). Am Anteil < 0.5 mm wird eine Bleianalyse durchgeführt (**Bleikonzentration im Feinkorn** < 0.5 mm). Durch zusammenzählen des Bleigehaltes aus Bleischrott, Geschosssplitter, Bleifragmente und der Bleikonzentration im Feinkorn erhält man den Bleigehalt der Originalprobe.

\* Ein übliches Stahlmantelgeschoss besteht aus etwa  $2/3$  Blei und  $1/3$  Eisen (Massenanteile)

## ■ Deponierung

### **Beschreibung des Verfahrens**

In der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) sind drei Deponietypen definiert:

- Inertstoffdeponie
- Reststoffdeponie
- Reaktordeponie

Eine Reststoffdeponie kann sowohl als eigenständige Deponie aber auch in Form eines abgegrenzten Bereiches auf dem Gelände in einer Reaktordeponie ausgeführt sein. In ähnlicher Weise ist in einer Reaktordeponie ein Schlackenkompartiment zur Ablagerung von Schlacken aus

---

Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle realisiert, das quasi als ein vierter Deponietyp aufgefasst werden kann.

### **Schadstoffe**

#### Inertstoffdeponie

Auf Inertstoffdeponien können nur gesteinsähnliche Materialien abgelagert werden, deren Schadstoffgehalte und Eluatwerte die Grenzwerte der TVA und der zugehörigen BUWAL-Empfehlung nicht überschreiten.

#### Reststoffdeponie

Auf Reststoffdeponien kann Aushubmaterial mit weniger als 5 Gew.-% organischer Kohlenstoff abgelagert werden. Zusätzlich ist mit Eluattests nachzuweisen, dass die in der TVA festgelegten Grenzwerte nicht überschritten werden.

#### Reaktordeponie

Auf Reaktordeponien dürfen Abfälle abgelagert werden, die in Bezug auf Zusammensetzung, Wasserlöslichkeit und Verhalten vergleichbar sind mit Inertstoffen oder Schlacken aus Verbrennungsanlagen oder nicht brennbaren Bauabfällen.

### **Verwertungseffizienz**

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

## **■ Immobilisierung**

### **Beschreibung des Verfahrens**

Mit Immobilisierungsverfahren werden Schadstoffe durch chemische Reaktion oder Sorption in weniger schädliche oder weniger mobile Bindungsformen umgewandelt oder fixiert. Das kontaminierte Material wird hierzu in einer Mischanlage mit stabilisierenden/fixierenden Reagenzien vermischt und anschliessend deponiert.

### **Schadstoffe**

Die Immobilisierung eignet sich primär für Schwermetalle.

### **Verwertungseffizienz**

Bei der Immobilisierung kommt es zu keiner Schadstoffzerstörung und demzufolge findet auch keine Schadstoffreduktion statt. Das immobilisierte Material muss daher deponiert werden. Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

## ■ Metallhütte

### Beschreibung des Verfahrens

Aushubmaterialien mit hohen Gehalten an Blei, Kupfer, Zink und Aluminium können direkt in Metallhütten eingesetzt werden. Ab einem Metallgehalt grösser 5% ist die Verwertung in einer Metallhütte möglich. Aluminium muss zu mehr als 20% im Material vorhanden sein, damit eine Verwertung in einer Aluminiumhütte möglich wird. Aber auch Materialien, die Metallgehalte unter 5% aufweisen, dafür aber mehr als 60%  $\text{SiO}_2$  enthalten, sind für eine Verwertung in der Metallhütte geeignet.

Geeignete Materialien werden in der Metallhütte zuerst in einem Drehrohr vorbehandelt, bevor sie in den Schachtofen eingebracht werden. Im Schachtofen werden die Metalle aufgeschmolzen und können als Rohmetall zur Weiterverarbeitung gewonnen werden.  $\text{SiO}_2$ -haltige, mineralische Bestandteile wirken als Schlackenbildner und werden in Form von Schlacke aus dem Ofen abgezogen.

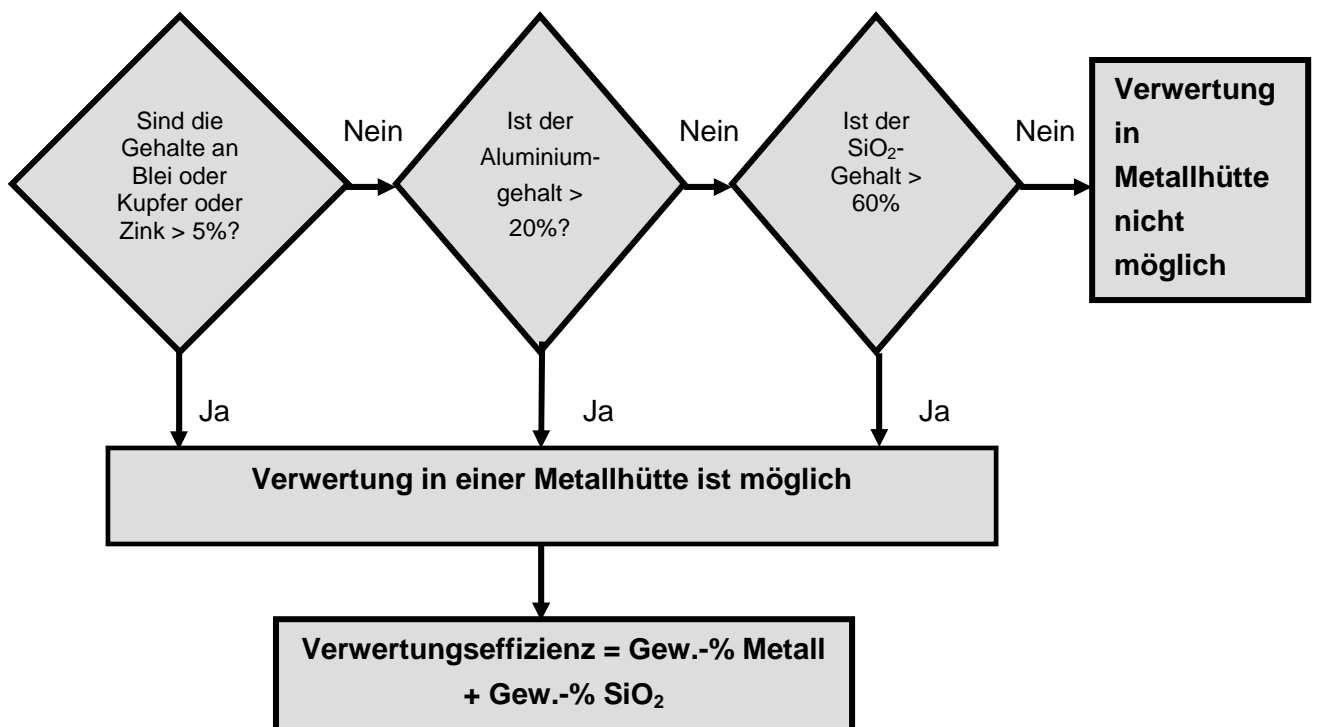
### Schadstoffe

Es sind die Anforderungen der Metallhütten einzuhalten.

### Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz entspricht der Summe aus Metallgehalt und  $\text{SiO}_2$ -Gehalt des Materials.

### Checkliste



---

## ■ Mikrobiologischer Abbau

### **Beschreibung des Verfahrens**

Biologische Reinigungsverfahren nutzen die Fähigkeit von Mikroorganismen, verschiedenste organische Schadstoffe abzubauen. Ziel des Verfahrens ist es, den mikrobiellen Schadstoffabbau in Bezug auf Mineralstoffversorgung, Sauerstoffbedarf, Säuregehalt, Feuchte und Temperatur durch technische Massnahmen zu optimieren und dadurch die Abbaugeschwindigkeit wesentlich zu beschleunigen.

Dem ausgekofferten Boden werden je nach Verfahren Strukturverbesserer (Rindenhäcksel, Hackschnitzel, Kompost etc.) zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung oder weitere Zusatzstoffe beigemischt. Nach diesen vorbereitenden Massnahmen wird das Material in dafür eingerichteten Anlagen bestehend aus einem dichten Untergrund, Mess- und Regeltechnik und evtl. einer Einhausung, zu Regenerationsmieten aufgehaldet. In den Mieten werden die Lebensbedingungen (z.B. Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Wassergehalt) für die abbauenden Mikroorganismen kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

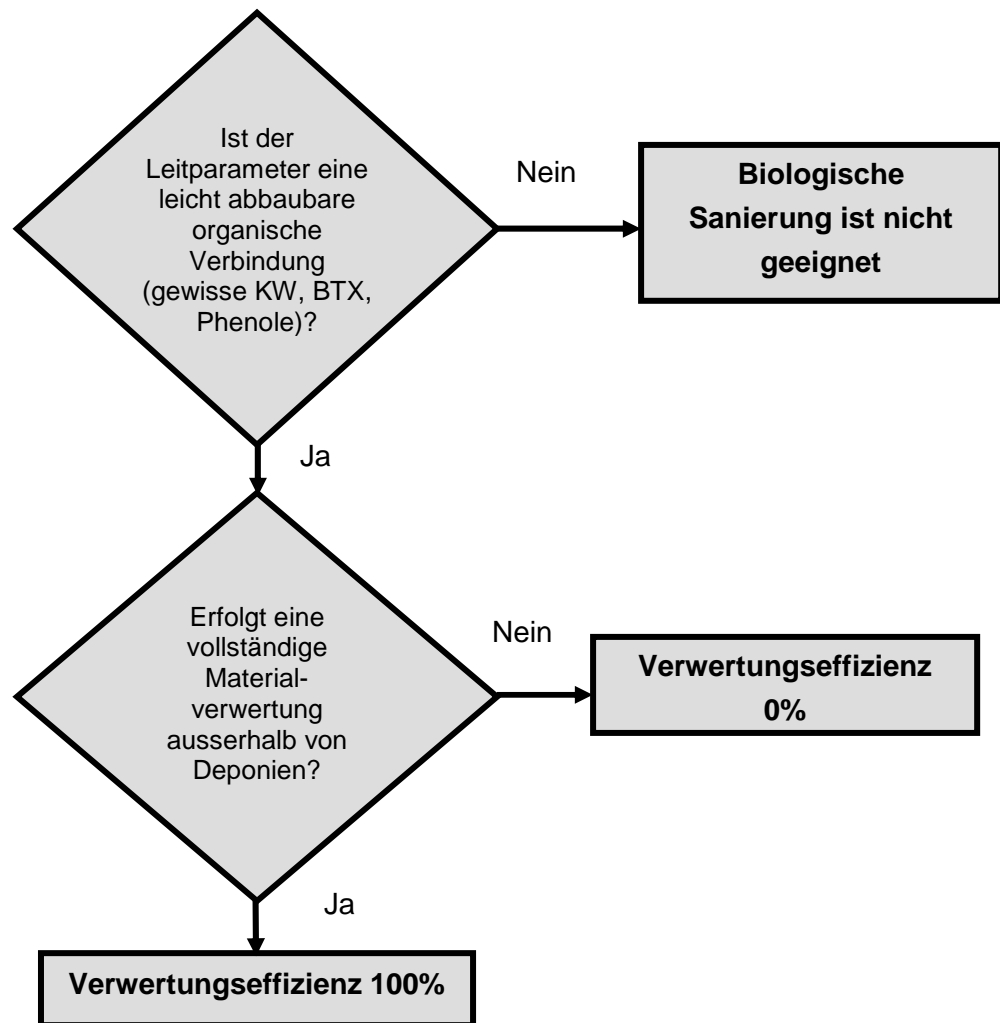
### **Schadstoffe**

Biologische Verfahren sind für biologisch leicht abbaubare organische Schadstoffe (z.B. gewisse Mineralöle, BTX, Phenole) geeignet. Nicht geeignet sind biologische Verfahren für schwer abbaubare Stoffe wie chlororganische Verbindungen oder PAK (Ausnahme Naphthalin), bzw. nicht abbaubare Stoffe wie Schwermetalle.

### **Verwertungseffizienz**

Die Verwertungseffizienz beträgt 100%, falls das sanierte Material ausserhalb von Deponien verwertet wird. Findet im Anschluss an die biologische Behandlung eine Deponierung des Materials statt, beträgt die Verwertungseffizienz 0%.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Input biologische Sanierung	Output biologische Sanierung	Verwertung
Reststoff (bindiger Aushub) BTEX = 100 ppm	100 t	100 t BTEX = 3 ppm	Ablagerung auf Inertstoffdeponie ⇒ Verwertungseffizienz 0%
Reststoff (kiesiger Aushub) BTEX = 100 ppm	100 t ohne Zuschlag von organischem Strukturmaterial	100 t BTEX = 3 ppm	Zuschlagstoff zur Betonherstellung ⇒ Verwertungseffizienz 100%
Reststoff PAK = 200 ppm	⇒ biologische Sanierung für PAK nicht geeignet		

---

## ■ Sonderabfallverbrennung

### **Beschreibung des Verfahrens**

Sonderabfälle werden in Drehrohrofenanlagen verbrannt. Eine dem Stand der Technik entsprechende Anlage besteht aus einem Drehrohr mit Brenner, einer Nachbrennkammer, einem Abhitzekegel zur Wärmenutzung und einer Abgasreinigung. Die Verbrennung in einem Drehrohr hat den Vorteil, dass Abfälle unterschiedlichster Konsistenz (z.B. fest, flüssig oder pastös) und variabler Stückigkeit (z.B. auch Gebinde) aufgenommen werden können. Durch die Drehbewegung und Schrägstellung des Drehrohres werden die festen und pastösen Stoffe langsam durch das Drehrohr bewegt und dabei zuerst entgast und bei 1'200°C verbrannt. Am Ende des Drehrohrs werden die Verbrennungsrückstände je nach Temperatur als feste oder flüssige Schlacke in den Nassentschlacker ausgetragen.

### **Schadstoffe**

Mit der Sonderabfallverbrennung können alle Arten von Schadstoffen behandelt werden.

### **Verwertungseffizienz**

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

## ■ Thermische Bodenreinigung

### **Beschreibung des Verfahrens**

Bei der thermischen Bodenreinigung wird das belastete Aushubmaterial in ein beheiztes Drehrohr eingebracht. Die organischen Schadstoffe werden aufgrund der im Drehrohr herrschenden Temperaturen entweder oxidiert oder verdampft. Die benötigte Temperatur ist von den Siedepunkten der vorhandenen Schadstoffe abhängig.

Die Beheizung des Drehrohrs kann entweder direkt oder indirekt erfolgen. Im direkten Verfahren befindet sich im Drehrohr eine offene Flamme und es stellen sich Temperaturen von 1'000 bis 1'200°C ein unter denen die organischen Schadstoffe vollständig verbrannt werden. Bei indirekter Beheizung ist das Drehrohr abgedichtet und die erforderliche Wärme wird über den Mantel des Rohres von aussen zugeführt. Das Material wird dadurch unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen bis 600°C pyrolysiert. Eine Verbrennung der organischen Schadstoffe erfolgt erst in einer nachgeschalteten Verbrennungskammer.

Die thermische Bodenbehandlung ist mit einem hohen technischen Aufwand verbunden, da wegen der erhöhten Freisetzung von Schadstoffen eine leistungsfähige Rauchgasreinigung eingesetzt werden muss.

## Schadstoffe

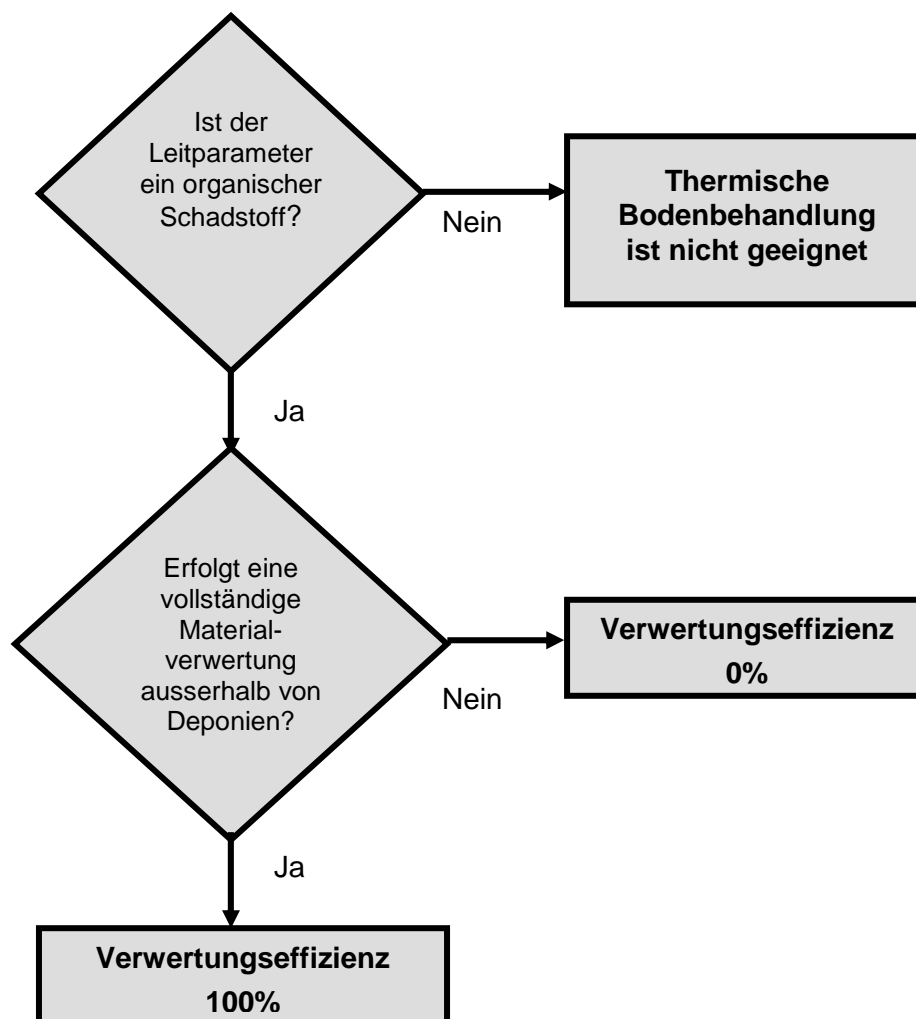
Mit der thermischen Bodenbehandlung ist in der Regel eine nahezu vollständige Abtrennung und Zerstörung von organischen Schadstoffen möglich. Sowohl flüchtige organische Substanzen, z.B. Lösungsmittel, Benzin, BTX, aber auch schwerflüchtige organische Verbindungen, z.B. Mineralöle, PAK, PCB, Dibenzodioxine, Dibenzofurane sind für thermische Verfahren geeignet.

Schwermetalle hingegen können mit einem thermischen Verfahren weder abgetrennt noch zerstört werden. Eine Ausnahme bildet das leichtflüchtige Quecksilber, das bei geeigneter Rauchgasreinigung abgetrennt werden kann.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz ist abhängig von der nachfolgenden Verwendung des thermisch behandelten Materials. Bei geringen Schwermetallgehalten ist eine Wiedereinsatz möglich und die Verwertungseffizienz beträgt 100%. Ist aufgrund zu hoher Schwermetallgehalte eine Deponierung des thermisch behandelten Materials notwendig, beträgt die Verwertungseffizienz 0%.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Input Thermische Bodenreinigung	Output Thermische Bodenreinigung	Verwertung
Reststoff KW = 30'000 ppm Kupfer = 100 ppm	100 t	100 t KW = 10 ppm Kupfer = 100 ppm	Fundationsschicht im Strassenbau ⇒ Verwertungseffizienz 100%
Reststoff PCB = 250 ppm Chrom = 600 ppm	100 t	100 t PCB = 0.1 ppm Chrom = 600 ppm	Material wird auf Deponie abgelagert ⇒ Verwertungseffizienz 0%

## ■ Trockensiebung

### Beschreibung des Verfahrens

Bei der trockenen Klassierung wird das Material einer Siebmaschine aufgegeben und in zwei oder mehrere Fraktionen zerlegt. Nach der Siebklassierung können die Grobfraktionen, die in der Regel weniger Schadstoffe enthalten als feinkörnige Bestandteile, dem Baustoffrecycling zugeführt werden. Die schadstoffhaltigen Feinfraktionen werden im Zementwerk verwertet oder auf eine geeignete Deponie verbracht oder anderweitig behandelt.

Die Effektivität der Trockensiebung hängt in erster Linie vom Wassergehalt des zu siebenden Materials ab und kann nur bei trockenen, grobkörnigen und rieselfähigen Materialien effizient eingesetzt werden. Ab einem Wassergehalt von > 5% ist aufgrund von Anbackungen und Blockieren der Siebeläge in der Regel keine zufriedenstellende Klassierung mehr möglich.

### Schadstoffe

Das Verfahren ist sowohl für organische (Mineralöle, PAK) als auch für anorganische Schadstoffe (Schwermetalle) geeignet. Da jedoch die Abreicherungsfaktoren relativ gering sind, sind nur Materialien mit geringen Verunreinigungen geeignet. Nur Kontaminationen bis ca. zum 3-fachen T-Wert sind verarbeitbar, um Produkte mit T-Qualität zu erhalten.

Kontaminationen von ausgewählten Schadstoffen, die mit dem Verfahren der trockenen Klassierung behandelt werden können.

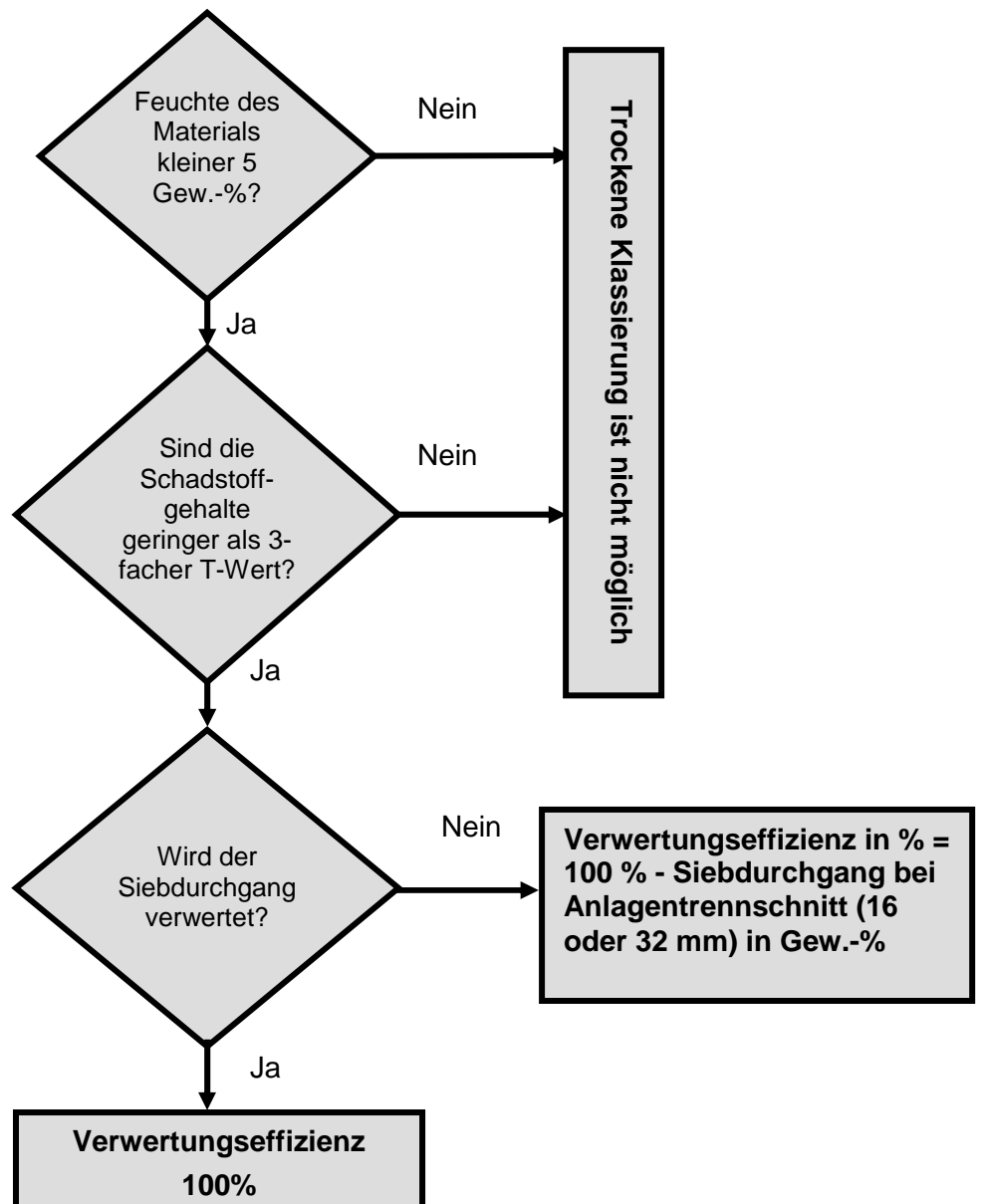
<b>Parameter</b>	<b>T-Wert</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Maximale Kontaminationen</b> <b>bei Abreicherungsfaktor 3</b> <b>[mg/kg]</b>
Blei, Chrom, Kupfer, Nickel	250	750
Zink	500	1500
Kohlenwasserstoffe	250	750
PAK	15	45
PCB	0.1	0.3

### **Verwertungseffizienz**

Die trockene Klassierung ist vor allem für kieshaltige Materialien mit geringem Schluffanteil geeignet. Der Anlagentrennschnitt des Verfahrens wird definiert durch das kleinste noch abzutrennende Korn. Dieser liegt bei Materialien mit einem Wassergehalt um 5 Gew.-% bei 32 mm, ist der Wassergehalt kleiner als 5 Gew.-% kann auch bei 16 mm klassiert werden. Kleinere Maschenweiten sind in der Regel nicht einsetzbar.

Wird der Siebdurchgang z.B. in einem Zementwerk verwertet, beträgt die Verwertungseffizienz des Verfahrens 100%. Bei Deponierung des Siebdurchgangs reduziert sich die Effizienz um den Gewichtsanteil des Siebdurchgangs.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Input Trockensiebung	Output Trockensiebung	Verwertung
T-Material 60% < 16 mm Wassergehalt 3% Zink = 500 ppm	100 t	40 t > 16 mm Zink = 200 ppm 60 t < 16 mm Zink = 700 ppm	40 t zur Betonherstellung 60 t auf Inertstoffdeponie ⇒ Verwertungseffizienz 40%
T-Material 80% < 32 mm Wassergehalt 6% Zink = 500 ppm	100 t	20 t > 32 mm Zink = 200 ppm 80 t < 32 mm Zink = 575 ppm	20 t zur Betonherstellung 80 t auf Inertstoffdeponie ⇒ Verwertungseffizienz 20%
T3-Material Wassergehalt 10%	⇒ eine Trockensiebung ist aufgrund der zu hohen Materialfeuchte nicht möglich		

## ■ Untertagedeponie

### Beschreibung des Verfahrens

Untertagedeponien sind geordnete Räume in ehemaligen Salzbergwerken zur Einlagerung von Abfällen. Eine geordnete Deponierung umfasst ein ausführliches Berichtswesen über den einzulagernden Abfallstoff inklusive einer vollständigen Dokumentation der Abfallzusammensetzung und des genauen Ortes der Einlagerung, damit ein Wiederauffinden des Abfalls möglich ist. Die Abfälle müssen zur Einlagerung in Container oder Big Bag's abgefüllt sein.

### Schadstoffe

Es sind die Anforderungen der jeweiligen abfallrechtlich genehmigten Untertagedeponie einzuhalten.

### Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

---

## ■ Zementwerk

### **Beschreibung des Verfahrens**

Die Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist, dass das Zementwerk über eine für organische Stoffe geeignete Abgasreinigung verfügt.

Das Aushubmaterial wird nach entsprechender Vorbereitung (Brechen, Mahlen) in das Drehrohr der Zementanlage eingebracht und bei Temperaturen bis zu 1500°C zu Klinker gebrannt. Organische Schadstoffe werden beim Brennprozess vollständig oxidiert. Schwer flüchtige anorganische Schadstoffe (Schwermetalle) werden unlöslich in den Klinker eingebunden.

### **Schadstoffe**

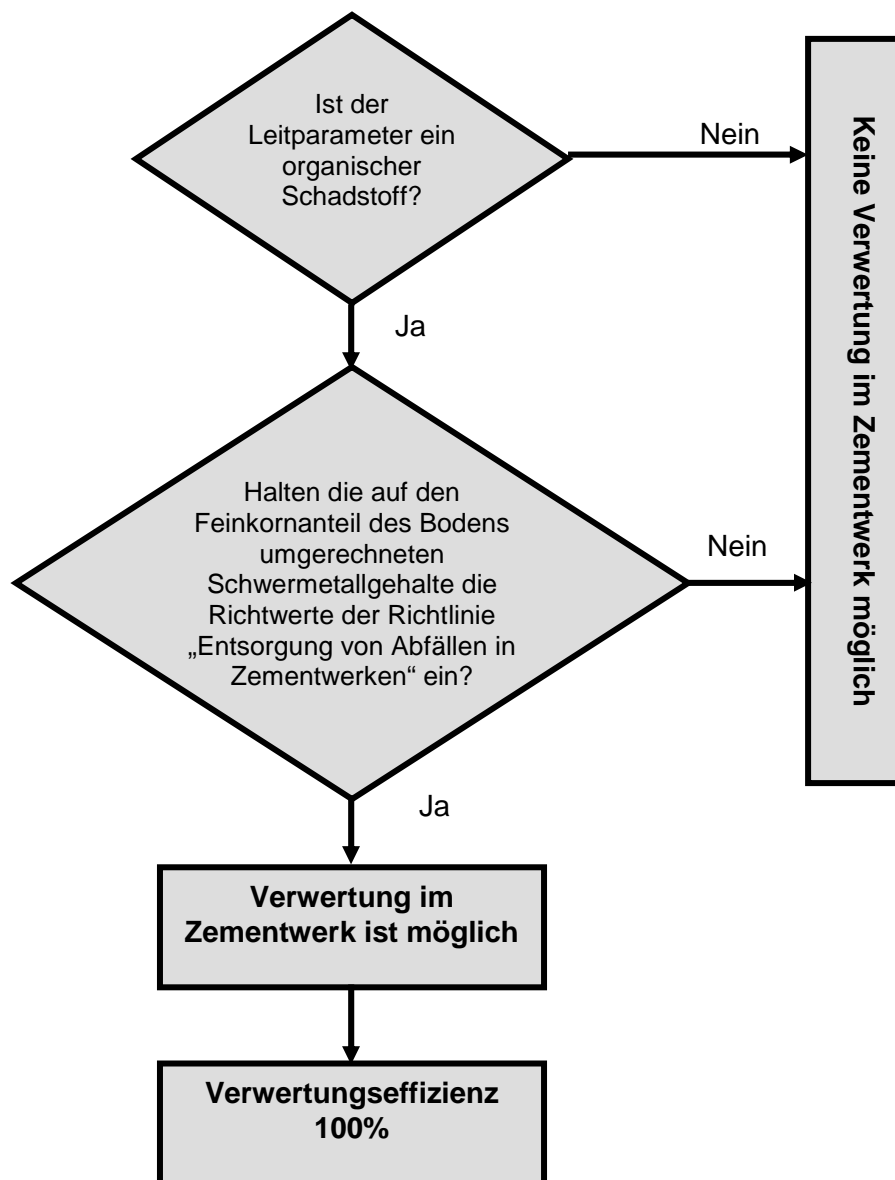
Nur organische Schadstoffe können im Drehrohr eines Zementwerkes zerstört werden. Daher dürfen nur Materialien mit einem organischen Schadstoff-Leitparameter im Zementwerk als Rohmehlersatz verwertet werden.

Die Schwermetalle aus den Abfallstoffen werden im Zementofen in den Klinker eingebunden. Damit keine Schwermetallanreicherung im Klinker stattfindet, müssen die Schwermetallrichtwerte der Positivliste B der BUWAL-Richtlinie „Entsorgung von Abfällen in Zementwerken“ (1998) eingehalten werden. Die Schwermetallgehalte müssen hierbei auf den Feinkornanteil des Materials umgerechnet werden.

### **Verwertungseffizienz**

Die erzielbare Verwertungseffizienz beträgt bei zugelassenem Material 100 %.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Leitparameter	Schwermetallgehalte bezogen auf Feinkornmenge	Verwertung im Zementwerk zugelassen?
T-Material PAK = 10 ppm Feinkorn = 30%	PAK		Ja  ⇒ Verwertungseffizienz 100%
T-Material KW = 200 ppm Chrom = 200 ppm Feinkorn = 50%	KW	massgeblicher Chromgehalt: $200 / 0.5 = 400$ ppm Richtwert BUWAL-Richtlinie: 500 ppm Cr	Ja  ⇒ Verwertungseffizienz 100%
Inertstoff PCB = 0.8 ppm Blei = 200 ppm Feinkorn = 40%	PCB	massgeblicher Bleigehalt: $200 / 0.4 = 500$ ppm Richtwert BUWAL-Richtlinie: 500 ppm Pb	Ja  ⇒ Verwertungseffizienz 100%
T-Material Blei = 200 ppm Feinkorn = 40%	Blei	massgeblicher Bleigehalt: $200 / 0.4 = 500$ ppm Richtwert BUWAL-Richtlinie: 500 ppm Pb	Nein da Leitparameter nicht organisch ist

## ■ Ziegelei

### Beschreibung des Verfahrens

Aushubmaterial kann als Rohstoffersatz für die Ziegel- und Backsteinherstellung verwendet werden. Das Brennen von Ziegelmaterialien erfolgt überwiegend in Tunnelöfen bei einem Temperaturniveau zwischen 900 und 1'150°C. Bei diesen Temperaturen werden organische Schadstoffe zerstört und Schwermetalle werden unlöslich in die sich bildenden Glas- und Sinterphasen eingebunden.

### Schadstoffe

Die Schadstoffgehalte dürfen in der Regel die Richtwerte für tolerierbares Aushubmaterial nicht überschreiten.

### Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 100%.