



# Entsorgung von belasteten Bauabfällen in Anlagen (ex situ)

Beschreibung der Behandlungsverfahren  
und ihrer Verwertungseffizienz

Ausgabe April 2015

# Inhalt

---

## Einleitung

Gesetzliche Grundlagen	3
Ziel und Zweck	4
Prinzipflussdiagramm für die Behandlungsverfahren	5

## Betonwerk/Asphaltwerk

Beschreibung des Verfahrens	6
Schadstoffe	6
Verwertungseffizienz	6
Checkliste	6

## Bodenluftabsaugung

Beschreibung des Verfahrens	7
Schadstoffe	7
Verwertungseffizienz	7
Checkliste	8
Beispiele	8

## Bodenwäsche

Beschreibung des Verfahrens	9
Schadstoffe	9
Verwertungseffizienz	9
Checkliste	10
Beispiele	10

## Nassaufbereitung von Kugelfängen

Stand der Technik	11
Sortierung der Sandfraktion	11
Sortierung der Kiesfraktion	12
Bleirückgewinnungsrate/Bleientfrachtung	12
Ermittlung des Bleigehaltes/Materialklassierung	12

## Deponierung

Beschreibung des Verfahrens	13
Schadstoffe	13
Verwertungseffizienz	13

## Immobilisierung

Beschreibung des Verfahrens	14
Schadstoffe	14
Verwertungseffizienz	14

## Metallhütte

Beschreibung des Verfahrens	15
Schadstoffe	15
Verwertungseffizienz	15
Checkliste	15

## Mikrobiologischer Abbau

Beschreibung des Verfahrens	16
Schadstoffe	16
Verwertungseffizienz	16
Checkliste	17
Beispiele	17

## Sonderabfallverbrennung (SAVA)

Beschreibung des Verfahrens	18
Organische SAVA	18
Schadstoffe	18
Verwertungseffizienz	18
Mineralische SAVA (thermische Bodenreinigung)	18
Schadstoffe	18
Verwertungseffizienz	19
Checkliste	19
Beispiele	19

## Trockensiebung

Beschreibung des Verfahrens	20
Schadstoffe	20
Verwertungseffizienz	20
Checkliste	21
Beispiele	21

## Untertagedeponie

Beschreibung des Verfahrens	22
Schadstoffe	22
Verwertungseffizienz	22

## Zementwerk

Beschreibung des Verfahrens	22
Schadstoffe	22
Verwertungseffizienz	22
Checkliste	23
Beispiele	23

# Einleitung

---

## Gesetzliche Grundlagen

### Definition Entsorgung

Nach **Art. 7 Abs. 6<sup>bis</sup>** des Umweltschutzgesetzes (USG) umfasst die Entsorgung von Abfällen, ihre Verwertung oder Ablagerung sowie die Vorstufen Sammlung, Beförderung, Zwischenlagerung und Behandlung. Als Behandlung gilt jede physikalische, chemische oder biologische Veränderung der Abfälle.

Die Verwertung, die Ablagerung wie auch die Behandlung von Abfällen sind also nach USG integraler Bestandteil der Entsorgung von Abfällen.

### Definition Verwertungspflicht

Nach USG **Art. 30 Abs. 2** gilt, dass Abfälle so weit wie möglich verwertet werden müssen. Zusätzlich wird in **Art. 30d Bst. a** des USG präzisiert, dass der Bundesrat vorschreiben kann, bestimmte Abfälle zu verwerten, wenn dies wirtschaftlich tragbar ist und die Umwelt dadurch weniger belastet wird als durch eine andere Entsorgung oder durch die Herstellung neuer Produkte.

In der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) wird die Verwertungspflicht in **Art. 12 Abs.1 Bst. a** dahingehend konkretisiert, dass die Behörden von Inhabern von Industrie-, Gewerbe- oder Dienstleistungsbetrieben verlangen können, dass sie abklären, ob für ihre Abfälle Möglichkeiten zur Verwertung bestehen oder geschaffen werden können. Gemäss **Art. 12 Abs. 3 Bst. a** und **b** können die Behörden ausserdem fordern, dass die Inhaber von Abfällen für die Verwertung bestimmter Abfälle sorgen, wenn diese technisch möglich und wirtschaftlich tragbar ist und die Umwelt dadurch weniger belastet wird als durch die Beseitigung oder Neuproduktion.

### Definition Stand der Technik

**Art. 32e Abs. 4 USG** (4. Abschnitt: Sanierung belasteter Standorte): Die Abgeltungen für die Sanierung von belasteten Standorten werden nur geleistet, wenn die getroffenen Massnahmen umweltverträglich und wirtschaftlich sind und dem Stand der Technik entsprechen.

Nach **Art. 19** (5. Abschnitt: Beurteilungsgrundlagen und Koordination der Bewilligungsverfahren) **Abs. 3 TVA** ist für die Beurteilung von Abfallanlagen, für welche die TVA keine Anforderungen enthält, der Stand der Technik massgebend. Dies betrifft einige Anlagen der hier beschriebenen Verfahren.

Gemäss **Anhang 1 Art. 12** (Bauabfälle) **Abs. 1 Bst. c TVA** wird erläutert, dass auf Inertstoffdeponien Bauabfälle abgelagert werden dürfen, wenn Metalle, Kunststoffe, Papier, Holz und Textilien vorgängig nach dem Stand der Technik entfernt worden sind.

## Ziel und Zweck

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. Diese Verwertungsregel hat sich bewährt. Sie wurde deshalb nach einer umfangreichen Anhörung und einer Auswertung der Erfahrungen im Jahre 2014 durch eine revidierte Fassung ersetzt.

Für die Entsorgung von belasteten Bauabfällen steht eine Vielzahl von Verfahren mit unterschiedlichen Verwertungseffizienzen zur Verfügung. Um den Vollzug der Verwertungsregel zu vereinfachen, hat das AWEL dem ARV im Jahre 2005 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.

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

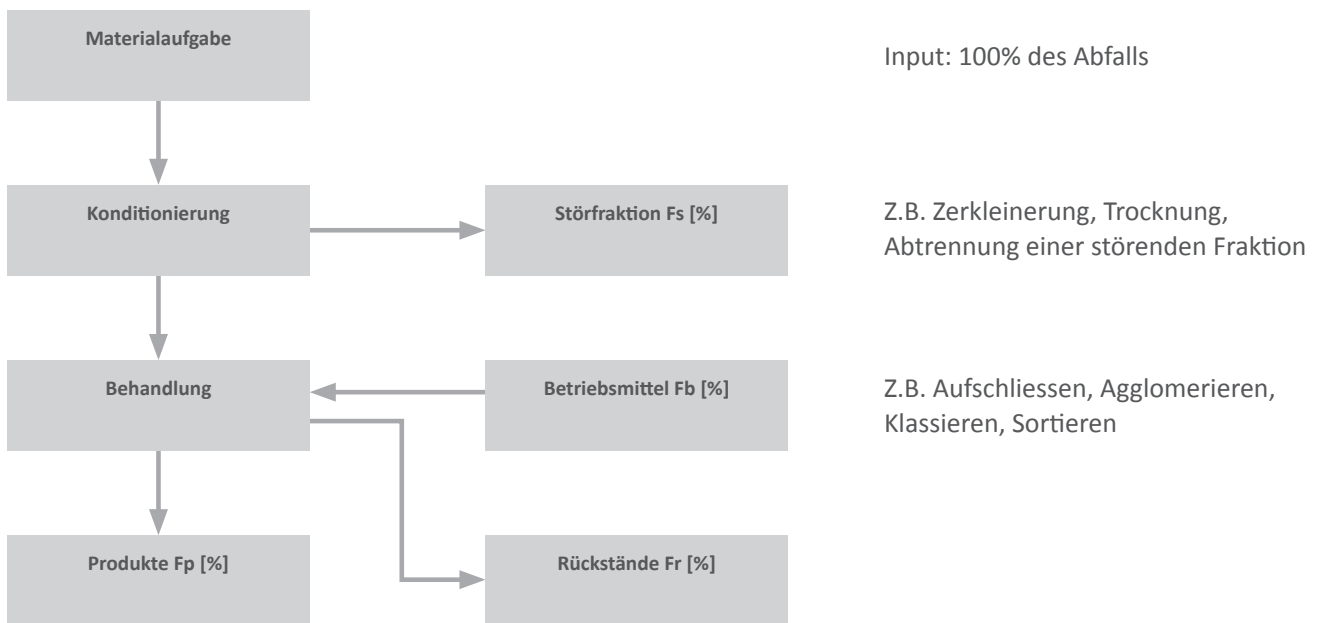
Der Katalog wird durch den ARV regelmässig aktualisiert und dem Stand der Technik angepasst. Der «Stand der Technik» ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren. Bei seiner Bestimmung sind insbesondere vergleichbare Verfahren heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind.

## Definition Verwertung

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

## Prinzipflussdiagramm für die Behandlungsverfahren

Grundsätzlich können Behandlungsverfahren in folgende Schritte aufgeteilt werden:



Durch den Vergleich der ausgetragenen Menge zur Aufgabemenge (inkl. Betriebsmittel) wird die Massenbilanz der Anlage erstellt. Zur Beurteilung des Verwertungsgrades werden die verwerteten Rückstände und Produkte zusammengezählt und in ein Verhältnis zur Aufgabemenge gesetzt. Dies setzt eine Wägung aller Fraktionen voraus, sowohl im Input wie auch im Output. Dadurch lässt sich der Schwund oder die Wiederfindungsrate bestimmen.

Um eine Schadstoffbilanzierung vorzunehmen, muss bei jeder Fraktion der Schadstoffgehalt ermittelt werden, und die einzelnen Frachten müssen berechnet werden. Die Bilanzierung der Frachten gibt Aufschluss über die Schadstoffentfrachtung des Verfahrens bzw. der erzielten Aufkonzentration der Schadstoffe in den Rückständen.

# Betonwerk/Asphaltwerk

## Beschreibung des Verfahrens

Grobkörnige schadstoffhaltige Materialien können nach Aufbereitung als Zuschlagstoffe bei der Beton- und Asphalt-herstellung eingesetzt werden. Die Zuschlagstoffe müssen der Norm für Gesteinskörnungen (**SN 670 102b-NA**) entsprechen. Insbesondere müssen sie genormte Kornzusammensetzungen innerhalb der festgelegten Grenzwert-abweichungen aufweisen. Weiterhin sind die in der Norm für Recyclingbeton (**SN 670 119-NA**) angegebenen Fremd-stoffanteile einzuhalten. Die genannten Normen regeln sowohl die Zusammensetzung von Beton mit definierten Eigenschaften bezgl. Druckfestigkeit und Expositionsklasse als auch von Magerbeton ohne besondere Eigenschaften.

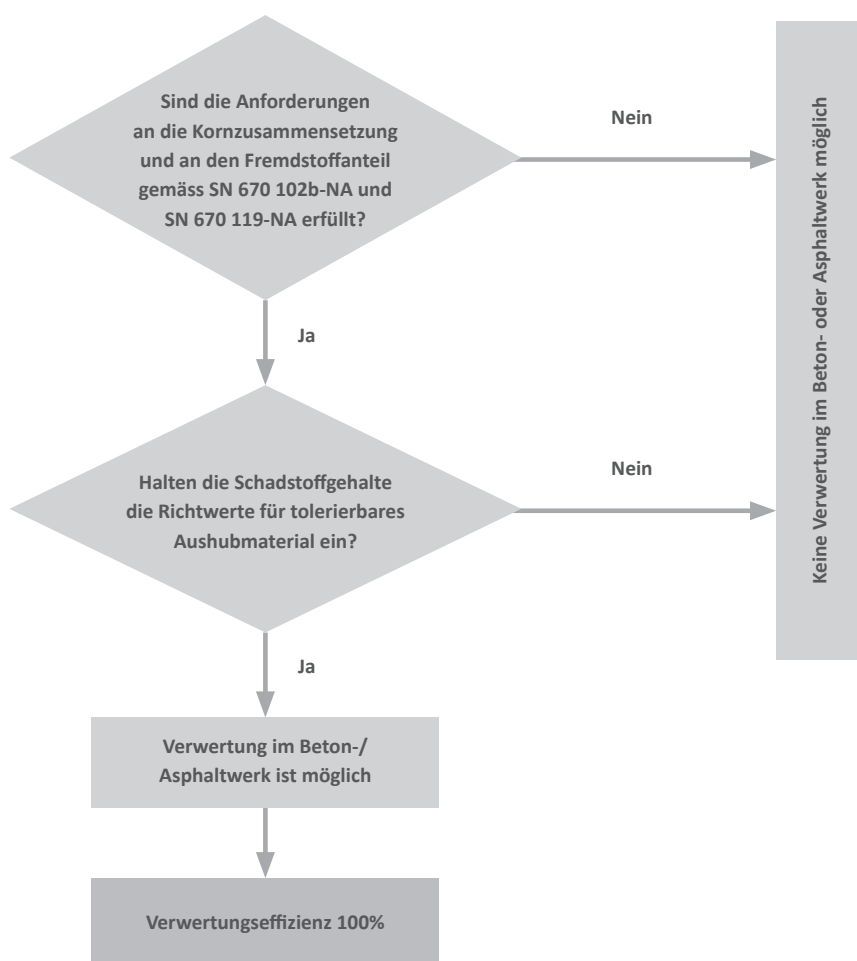
## Schadstoffe

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

Üblicherweise wird die Bodenluftabsaugung als In-situ-Verfahren betrieben, wobei die Durchlässigkeit des Materials und der Wassersättigung massgebend für den Erfolg der Sanierung ist. Ausgekoffertes Material oder kontaminierte Bauabfälle können analog im Ex-situ-Verfahren behandelt werden.

Beim Ex-situ-Verfahren wird das kontaminierte Material zu Halden aufgeschichtet, in denen ein Bodenbelüftungssystem installiert ist. Es muss allenfalls mit einer mechanisch-physikalischen Vorbehandlung sichergestellt werden, dass der Boden homogen geschichtet und luftdurchlässig ist und dass keine Bereiche mit zu hoher Verdichtung entstehen. An die Entlüftungsrohre wird mit einer Pumpe ein Unterdruck angelegt. Die schadstoffhaltige Bodenluft wird über die Entlüftungsrohre abgesaugt. Durch den Absaugvorgang erfolgt eine Störung des Phasengleichgewichtes, die zu einer laufenden Neubildung der Gasphase führt, bis die adsorbierte Phase erschöpft ist. Die Luft wird anschliessend über entsprechende Anlagen gereinigt (z.B. Aktivkohlefilter, thermische Nachverbrennung, katalytische Oxidation, Biofilter).

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

## Wichtig

Beim Aufschichten der Halden muss durch geeignete Massnahmen (z.B. Aufbau in einer geschlossenen Halle mit entsprechender Lüftung und mit Filter) verhindert werden, dass die flüchtigen organischen Substanzen in die Atmosphäre entweichen.

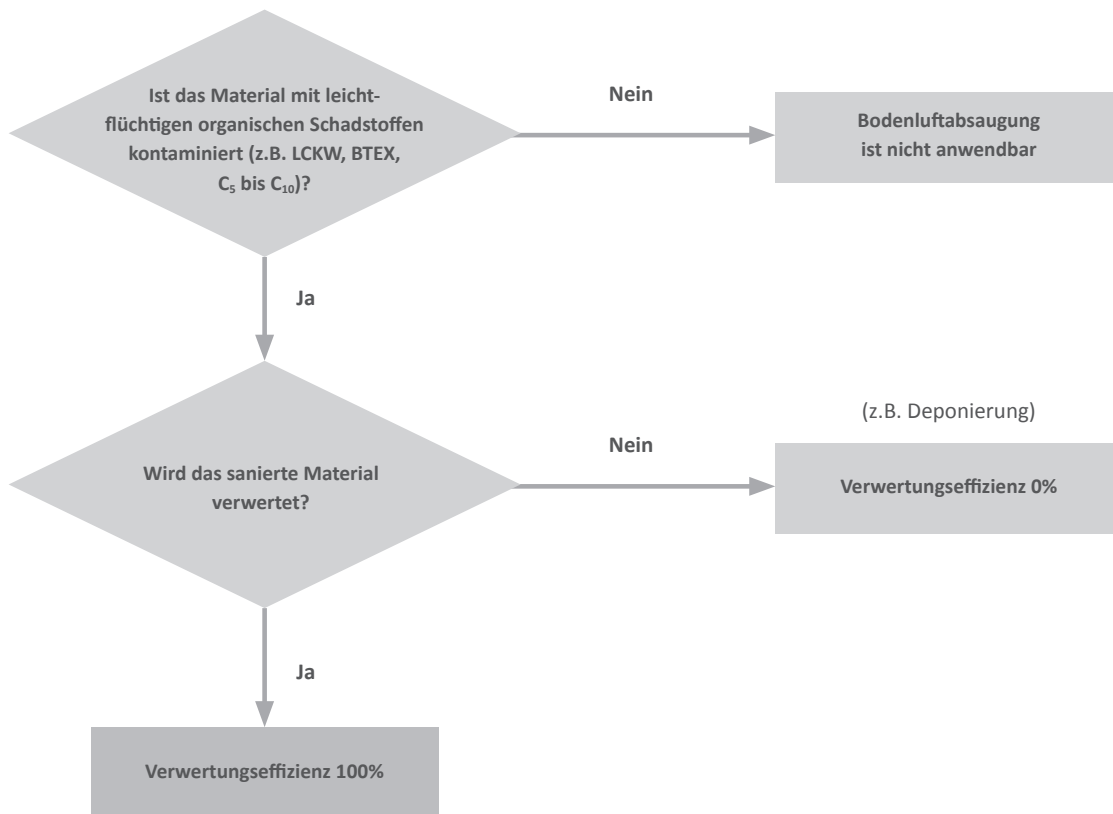
## Schadstoffe

Das Verfahren eignet sich für alle leichtflüchtigen organischen Verbindungen wie LCKW, kurzkettige aliphatische Kohlenwasserstoffe und aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX).

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz kann bis 100% betragen, falls das sanierte Material die entsprechenden Grenzwerte einhält. 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%



# Bodenwäsche

---

## Beschreibung des Verfahrens

Bodenwaschverfahren sind chemisch-physikalische Separationsverfahren. Neben Wasser ohne Zusätze kann Wasser mit Zusätzen, z.B. Tensiden, Säuren oder Laugen, als Waschflüssigkeit eingesetzt werden. In einer Bodenwaschanlage wird das Material mit Wasser aufgeschlämmt, und unter Eintrag von mechanischer Energie (Waschtrommel, Schwertwäscher etc.) werden die Schadstoffe von den Oberflächen der Bodenpartikel abgelöst und im Waschwasser dispergiert. Anschliessend wird in mechanischen Klassier- und Sortiereinrichtungen das Material nach Korngrössen fraktioniert, und die Schadstoffe werden vom Kies und Sand abgetrennt. Beim Waschen werden auch nicht schadstoffhaltige, aber die nachfolgende Verwertung störende Bestandteile wie Metalle, Holz, Kunststoffe, teilweise auch Schlacken und Belagsstücke aufgrund unterschiedlicher Dichten abgetrennt. Eine dem Stand der Technik entsprechende Bodenwaschanlage verfügt in der Regel über Dichtesortiereinrichtungen in der Kies- und Sandfraktion sowie über eine Attritions- 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 Feinstkornfraktion in Form eines Flotatschlamms oder Filterkuchens konzentriert und ausgetragen. Der belastete Filterkuchen wird in thermischen Anlagen (z.B. 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.

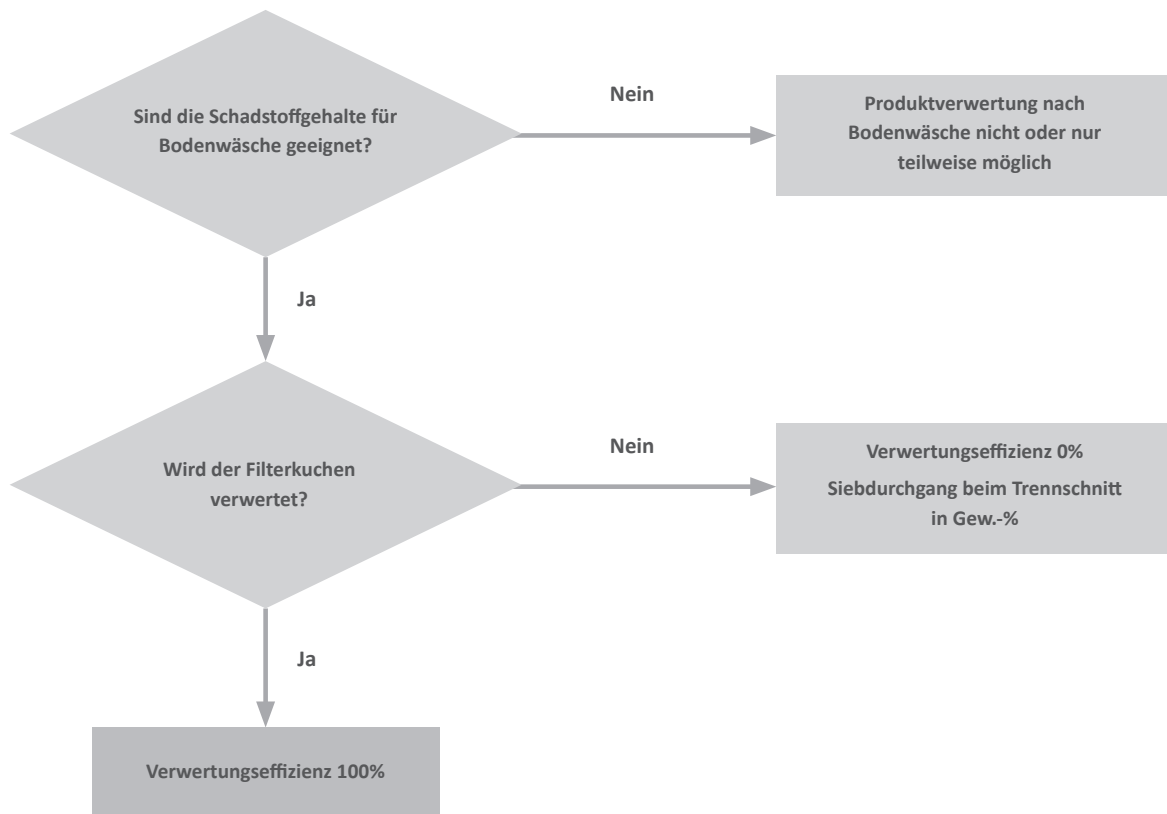
## Schadstoffe

Die Bodenwäsche ist für eine Vielzahl von Schadstoffen geeignet, z.B. Schwermetalle, aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe (Mineralöle, BTEX), PAK, PCB, Cyanide und Pestizide. Die Schadstoffe können in einer dem Stand der Technik entsprechenden Anlage in der Regel bei Aushubmaterial mit einem Faktor 10 bis 40 (Abreicherungs-faktor 10 für Schwermetalle, 40 für organische Verbindungen) aus den Produkten (Kies und Sand) ausgewaschen werden. Bei Beton und Mischabbruch ist mit deutlich geringeren Abreicherungs-faktoren zu rechnen.

## Verwertungseffizienz

Die erzielbare Verwertungseffizienz ist abhängig vom Anlagentrennschnitt und vom Entsorgungsweg des Filterkuchens. Der Anlagentrennschnitt gibt an, bis zu welcher Korngrösse Sand- und Silteilchen aus dem Waschwasser entfernt und den Produkten zugeführt werden können. Bodenwaschanlagen haben in der Regel einen Anlagentrennschnitt von 63 µm, d.h. Silt- und Tonbestandteile, die kleiner als 63 µm sind, verbleiben im Filterkuchen. Dieser wird in Abhängigkeit des Schadstoffgehaltes entweder verwertet (z.B. in einem zugelassenen Zementwerk) oder auf einer Deponie abgelagert. Bei Verwertung des Filterkuchens beträgt die Gesamtverwertungsquote der Bodenwäsche gegen 100%. Wird der Filterkuchen oder gegebenenfalls eine weitere Fraktion nicht verwertet (z.B. Deponierung), reduziert sich die Verwertungseffizienz entsprechend.

## 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 = 4600 ppm (0,9 mg/l im TVA-Eluat)	Kies/Sand für Betonherstellung  Filterkuchen zur Ablagerung auf Reststoffdeponie  → Verwertungseffizienz 90%

# Nassaufbereitung von Kugelfängen

---

## Stand der Technik

Der Stand der Technik zur Abtrennung der Geschosse aus Kugelfangmaterialien ist die Aufbereitung mittels eines Nassaufbereitungsverfahrens in einer Bodenwaschanlage mit nachfolgender Wirbelstrom- und/oder Dichtesortierung der gewaschenen Kiesfraktionen. Wichtig ist auch 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 nach magnetischer Suszeptibilität mit einer hohen Trennschärfe durchgeführt werden kann:

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

Die erste Verfahrensstufe der Aufbereitung ist ein Nassaufschluss des Kugelfangmaterials, wobei durch Aufschlänmen mit Wasser und Einbringen mechanischer Rührenergie eine weitestgehende Auflösung aller Bodenaggregate angestrebt wird. In den nachfolgenden Klassierapparaten wird das Kugelfangmaterial nach Korngrössen fraktioniert. Die dabei gewonnenen Kies- und Sandfraktionen werden zur Abtrennung von schadstoffhaltigen Partikeln den genannten Sortierapparaten zugeführt. Die kontaminierte Feinkornfraktion (<0,063 mm) wird nach einer Entwässerung in einer Kammerfilterpresse mit anschliessender Immobilisierung auf eine TVA-konforme Deponie verbracht. Eine Kreislaufführung des zum Aufschlänmen notwendigen Prozesswassers ist ein wesentlicher Bestandteil einer nach dem Stand der Technik arbeitenden Bodenwaschanlage. Dazu wird das Prozesswasser kontinuierlich durch eine Abwasserreinigungsanlage geführt.

## Sortierung der Sandfraktion

Die Dichtesortierung der Sandfraktion (0,063 bis 2 mm) geschieht in Wendelscheidern, wobei diese Sortierung dem Stand der Technik entsprechend zweistufig ausgeführt wird. Nur durch eine optimale Wahl von Rinnengeometrie, Windungszahl und Ganghöhe der Wendeln kann eine hohe Trennschärfe erreicht werden.

Die Wendelrinnen bzw. die **Leichtgutspirale** der ersten Stufe ist zur Abtrennung von spezifisch leichteren Partikeln ausgelegt. Was das **Rinnenprofil** anbelangt, so sind nach dem Stand der Technik elliptische Profile mit einem Achsenverhältnis von 2:1 am günstigsten. Die Abtrennung von spezifisch schwereren bleihaltigen Sandpartikeln erfolgt in der zweiten Stufe mittels der **Schwergutspirale**, welche 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 fünf bis sechs Schraubwindungen abwärtsfliessen, 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 bis 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 Setzsortieren in den Kiesfraktionen. Nach dem Stand der Technik werden daher nach entsprechender Vorklassierung die gewaschenen, geschosshaltigen Kiesfraktionen im Magnetfeld nachsortiert. Dabei erfolgt die Aussortierung von magnetischen Geschossen und Geschossteilen mit einem Trommelmagnetscheider. Und die Abtrennung der unmagnetischen reinen Bleipartikel gelingt mit einem Wirbelstromscheider. Ein optimales Trennergebnis auch bei Teilstückgrößen 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 Durchführung der Wirbelstromsortierung kann in den Kiesfraktionen der Bleigehalt bis auf Konzentrationen unter 500 ppm abgereichert werden, während die gewonnenen magnetischen und nicht magnetischen 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 rückgewinnbaren Bleifragmente >2 mm) von mehr als 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  $\frac{2}{3}$ \* der Masse der Fraktion Blei mit Stahlmantel ergibt, zurückgerechnet auf die ursprüngliche Probemenge, den Bleigehalt aus der Fraktion >8 mm (**Bleigehalt aus Bleischrott** >8 mm). 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 (evtl. 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 Bleis bestimmt (Gehalt aus Geschosssplitter 2 bis 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 grösstenteils aus Blei. Dessen Gewicht wird ebenfalls auf die Ursprungsprobe umgerechnet (Gehalt aus Bleifragmenten von 2 bis 0,5 mm). Am Anteil <0,5 mm wird eine Bleianalyse durchgeführt (Bleikonzentration im Feinkorn <0,5 mm). Durch Zusammenzählen des Bleigehaltes aus Bleischrott, Geschosssplittern und Bleifragmenten und der Bleikonzentration im Feinkorn erhält man den Bleigehalt der Originalprobe.

\* Ein übliches Stahlmantelgeschoss besteht aus etwa  $\frac{2}{3}$  Blei und  $\frac{1}{3}$  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 als auch in Form eines abgegrenzten Bereiches auf dem Gelände einer Reaktordeponie betrieben werden. In ähnlicher Weise wird in einer Reaktordeponie ein Schlackenkompartiment zur Ablagerung von Schlacken aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle realisiert, das quasi als vierter Deponietyp aufgefasst werden kann.

## Schadstoffe

### Inertstoffdeponie

Auf Inertstoffdeponien können nur gesteinsähnliche Materialien abgelagert werden, deren Schadstoffgehalte und Eluatwerte die Grenzwerte der TVA einhalten bzw. die Bedingungen gemäss Ziffern 1, 11, 12 und 13 von Anhang 1 der TVA erfüllen.

### Reststoffdeponie

Auf Reststoffdeponien dürfen Abfälle gemäss den Vorgaben der TVA, Anhang 1, Ziffern 2 und 21, abgelagert werden.

### Reaktordeponie

Auf Reaktordeponien dürfen Abfälle gemäss den Vorgaben der TVA, Anhang 1, Ziffern 3, 31 und 32, abgelagert werden.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

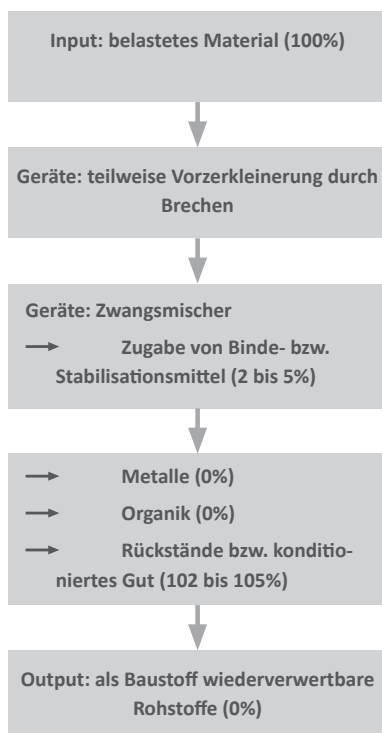
# Immobilisierung

## Beschreibung des Verfahrens

Mit Immobilisierungsverfahren werden Schadstoffe durch chemische Reaktion oder durch 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 ausschliesslich für Schwermetalle.



$$\text{Verwertungseffizienz} = \frac{\text{Komponenten} + \text{Metalle} + \text{Organik (falls in KVA)} + \text{zurückgeführte Rückstände}}{\text{Input}}$$

Obige Stoffflüsse sind in Tonnen in die Formel einzusetzen.

Als weiteres Kriterium ist die Schadstoffvernichtungsrate anhand der Massenströme zu bestimmen.

## 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. Bereits ab einem Metallgehalt über 5% ist die Verwertung in einer Metallhütte möglich. Zum Vergleich: 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% SiO<sub>2</sub> 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. SiO<sub>2</sub>-haltige, mineralische Bestandteile wirken als Schlackenbildner und werden in Form von Schlacke aus dem Ofen abgezogen.

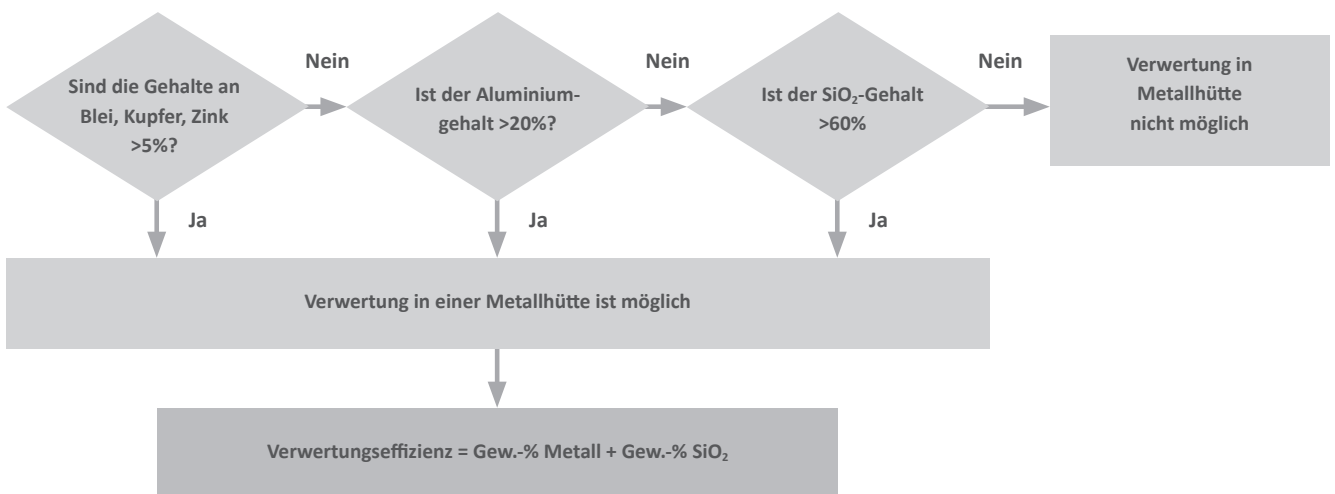
## Schadstoffe

Es sind die Anforderungen der Metallhütten einzuhalten.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz entspricht der Summe aus Metallgehalt und SiO<sub>2</sub>-Gehalt des Materials.

### Checkliste



# Mikrobiologischer Abbau

---

## Beschreibung des Verfahrens

Biologische Reinigungsverfahren profitieren von der Fähigkeit von Mikroorganismen (Bakterien, Pilze), organische Schadstoffe als Energiequellen und zum Aufbau der Zellen zu nutzen. Dieser Prozess kann sowohl aerob wie anaerob ablaufen und führt entweder zum vollständigen Abbau (Mineralisierung) oder zu einem Teilabbau, bei dem Stoffwechselprodukte (Metaboliten) entstehen. Bei einem vollständigen Abbau werden die Schadstoffe mineralisiert, als Endprodukte entstehen Kohlendioxid und Wasser.

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

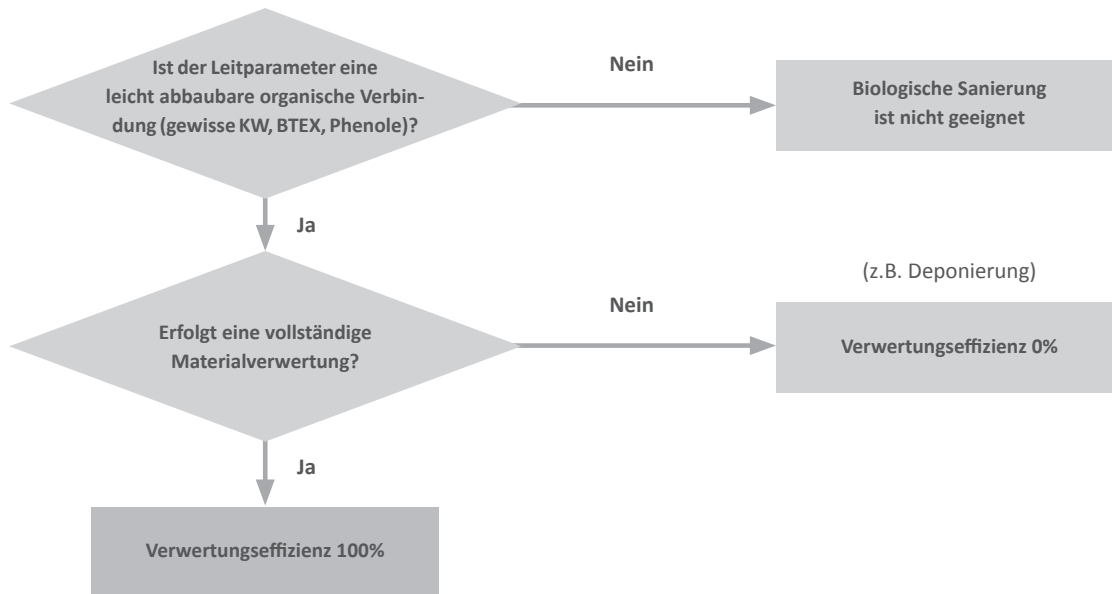
Biologische Verfahren sind für biologisch leicht abbaubare organische Schadstoffe (z.B. kurz- und mittelkettige Kohlenwasserstoffe, BTEX, Phenole und leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) geeignet. Nicht geeignet sind biologische Verfahren für schwer abbaubare Stoffe wie schwerflüchtige, organische Chlorverbindungen (PCB, Dioxine/Furane) oder PAK mit mehr als drei Benzolringen 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%

# Sonderabfallverbrennung (SAVA)

---

## Beschreibung des Verfahrens

Bevorzugt wird zwischen organischer SAVA und mineralischer SAVA unterschieden. Beiden Verfahren ist eigen, dass das Material bei erhöhten Temperaturen behandelt wird, wobei organische Stoffe verbrennen und flüchtige Metalle z.T. abgetrennt werden. Eine dem Stand der Technik entsprechende Anlage besteht in der Regel aus einem Drehrohr mit Brenner, einer Nachbrennkammer, einem Abhitzekegel zur Wärmenutzung und einer Abgasreinigung.

Die Behandlung 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 wird das Material langsam durch das Drehrohr bewegt und dabei entsprechend dem eingestellten Temperaturbereich behandelt.

## Organische SAVA

In organischen SAVA werden Materialien aus Industrie und Gewerbe behandelt, die überwiegend aus organischen Bestandteilen bestehen. Dabei werden die organischen Substanzen entsprechend ihrer Flüchtigkeit entweder in der Nachbrennkammer oder direkt im Drehrohr verbrannt. Die Metalle werden z.T. abgetrennt und im Filterstaub konzentriert.

Verbrennungstemperaturen: >1000 °C/Temperaturen Nachbrennkammer: 1200 °C

## Schadstoffe

Mit der Sonderabfallverbrennung können alle Arten von organischen Schadstoffen, flüchtigen Metallen und Metallverbindungen behandelt werden.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

## Mineralische SAVA (thermische Bodenreinigung)

In mineralischen SAVA werden überwiegend mineralische Stoffe (z.B. Aushubmaterial/Boden) behandelt, welche mit organischen Stoffen belastet sind. Dabei wird das belastete Aushubmaterial in ein direkt oder indirekt beheiztes Drehrohr eingebracht. Die organischen Schadstoffe werden aufgrund der im Drehrohr herrschenden Temperaturen und reduzierenden Bedingungen verdampft. Die dazu benötigte Temperatur ist von den Siedepunkten der vorhandenen Schadstoffe abhängig. In einer Nachbrennkammer werden anschliessend organischen Substanzen bei Temperaturen von >950 °C zerstört. Die thermische Bodenreinigung ist mit einem hohen technischen Aufwand verbunden, da wegen der erhöhten Freisetzung von Schadstoffen eine leistungsfähige Rauchgasreinigung eingesetzt werden muss.

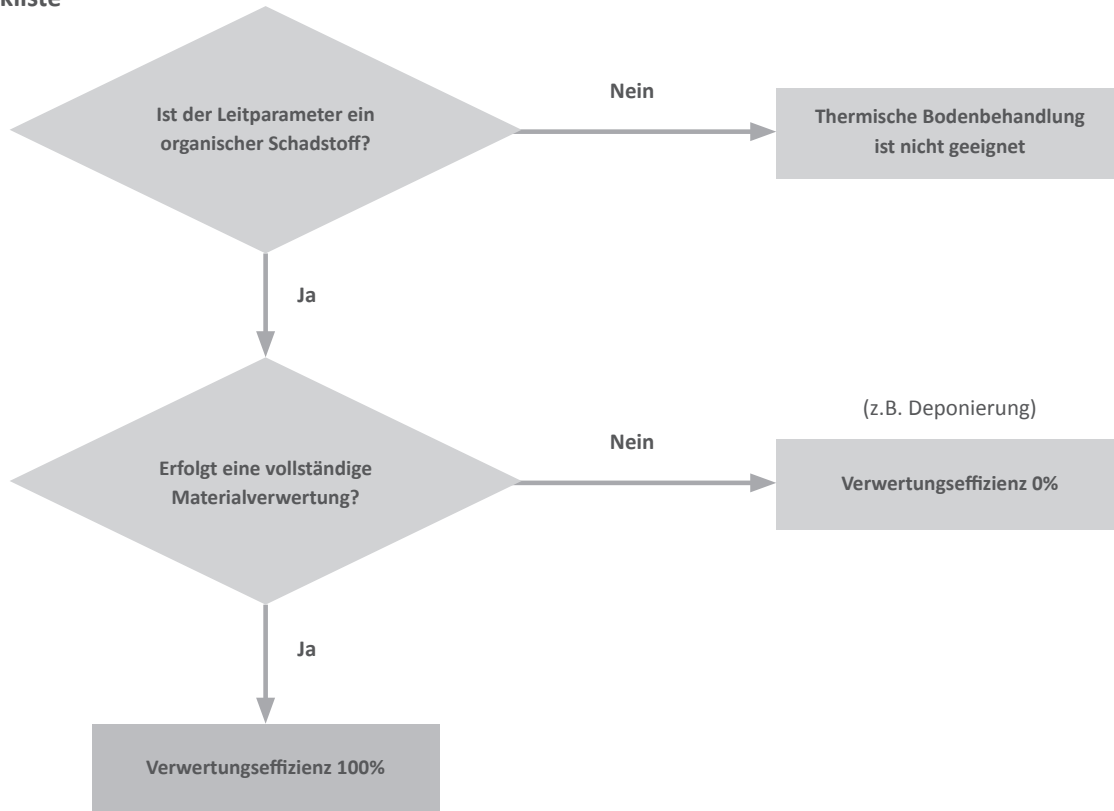
## Schadstoffe

Mit der thermischen Bodenreinigung ist in der Regel eine nahezu vollständige Abtrennung und Zerstörung von organischen Schadstoffen möglich. Sowohl flüchtige organische Substanzen, z.B. Lösungsmittel, Benzin und BTEX, als auch schwerflüchtige organische Verbindungen, wie z.B. Mineralöle, PAK, PCB, Dibenzodioxine und Dibenzofurane, sind für thermische Verfahren geeignet. Schwermetalle hingegen können mit einem thermischen Verfahren nicht zerstört werden. Je nach gewähltem Temperaturbereich können jedoch Metalle oder Metallverbindungen (z.B. Quecksilber) über die Rauchgasreinigung abgetrennt werden.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz ist abhängig von der nachfolgenden Verwendung des thermisch behandelten Materials. Bei geringen Schwermetallgehalten ist ein 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. Das Verfahren ist nur bei trockenen, grobkörnigen und rieselfähigen Materialien effizient. Ab einem Wassergehalt von über 5% ist aufgrund von Anbackungen und dem 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 wenig Verunreinigung geeignet. Nur Kontaminationen bis ca. zum 3-fachen T-Wert sind verarbeitbar, um Produkte mit T-Qualität zu erhalten.

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

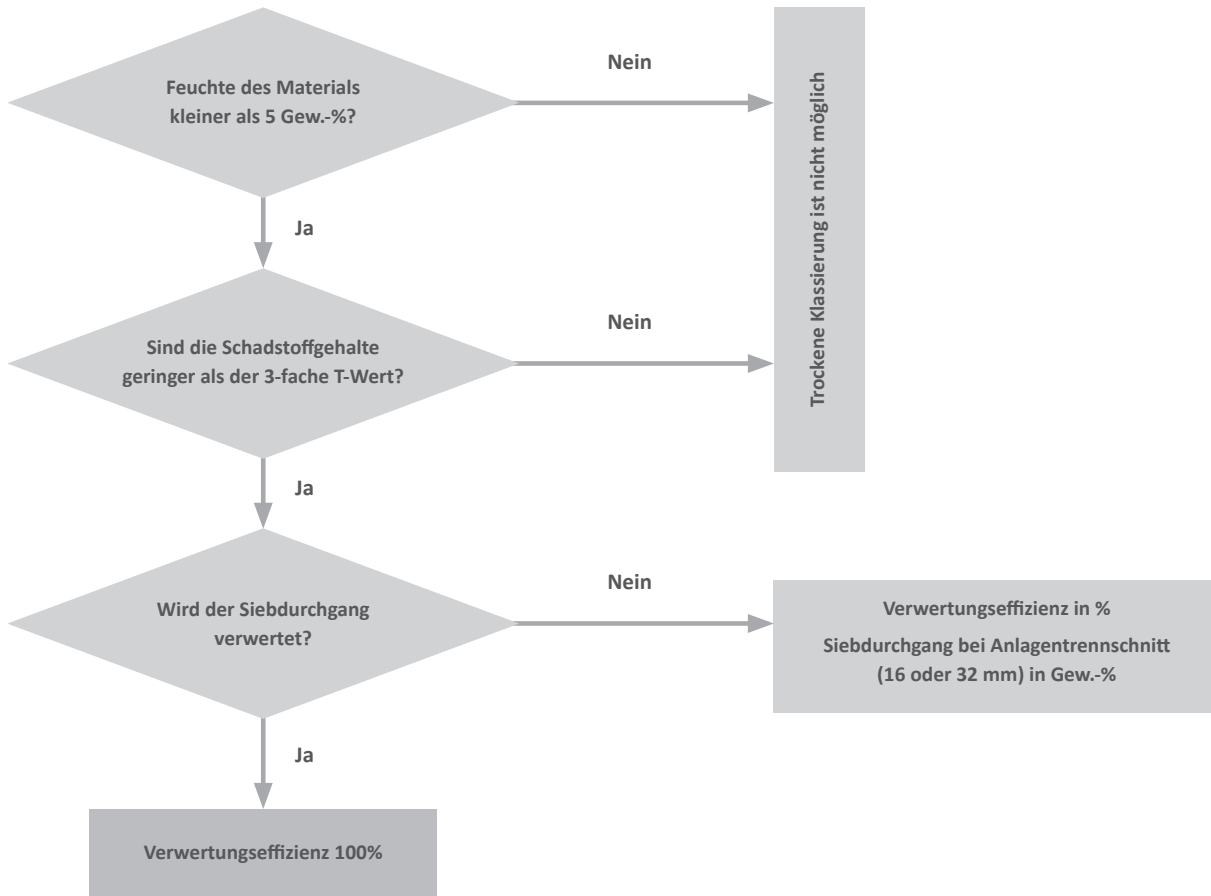
Parameter	T-Wert [mg/kg]	Maximale Kontaminationen bei Abreicherungsfaktor 3 [mg/kg]
Blei, Chrom, Kupfer, Nickel	250	750
Zink	500	1500
Kohlenwasserstoffe	250	750
PAK	15	45
PCB	0,1	0,3

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.

## Verwertungseffizienz

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

## Checkliste



## Beispiel

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 inklusive einer vollständigen Dokumentation des einzulagernden Abfallstoffs, der Abfallzusammensetzung und des genauen Ortes der Einlagerung, damit eine Rückholbarkeit des Abfalls möglich ist. Die Abfälle müssen zur Einlagerung in Container oder Big-Bags abgefüllt sein.

## Schadstoffe

Es sind die Anforderungen der jeweiligen abfallrechtlich genehmigten Untertagedeponie einzuhalten. Es dürfen keine Abfälle verwendet werden, die potenziell ausgasen können.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%. Es werden auch keine Schadstoffe aus den belasteten Bauabfällen entfrachtet oder vernichtet.

# 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. Schwerflüchtige anorganische Schadstoffe (Schwermetalle) werden unlöslich in den Klinker eingebunden.

## Schadstoffe

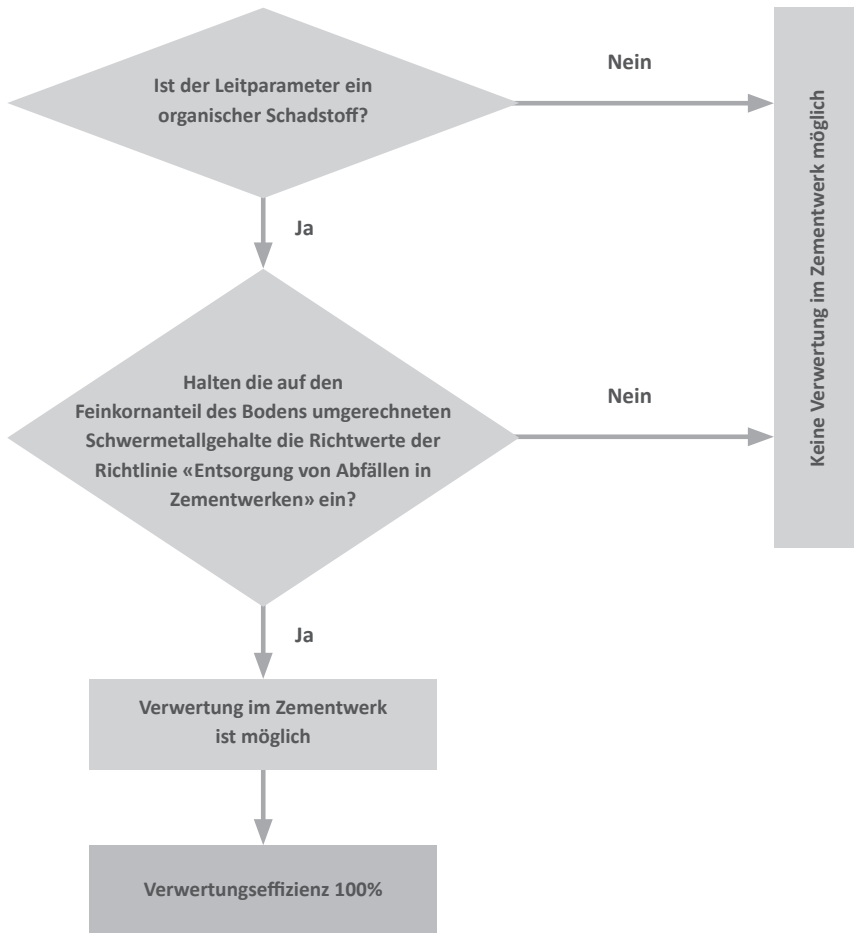
Nur organische Schadstoffe können im Drehrohr eines Zementwerkes zerstört werden. Daher dürfen nur Materialien mit einem organischen Schadstoff-Leitparameter im Zementwerk als Rohmehlersatz verwertet werden.

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



## Beispiel

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

### Entsorgung von belasteten Bauabfällen in Anlagen (ex situ)

Beschreibung der Behandlungsverfahren und ihrer Verwertungseffizienz  
Ausgabe April 2015