



Merkblatt

# Entsorgung von belasteten Bauabfällen in Anlagen (ex situ)

Beschreibung der Behandlungsverfahren  
und ihrer Verwertungseffizienz

Ausgabe März 2024

# Inhalt

---

Inhalt.....	2
Einleitung .....	3
Betonwerk/Asphaltwerk .....	6
Bodenluftabsaugung.....	7
Bodenwäsche .....	9
Nassaufbereitung von Kugelfängen.....	11
Deponierung .....	14
Immobilisierung.....	15
Metallhütte.....	16
Sonderabfallverbrennung (SAVA) .....	19
Trockensiebung .....	21
Untertagedeponie .....	23
Zementwerk .....	24

# 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 Abfallverordnung (**VVEA**) wird die Verwertungspflicht nach USG in **Art. 12** dahingehend konkretisiert, dass Abfälle stofflich und energetisch zu verwerten sind, wenn eine Verwertung die Umwelt weniger belastet als eine andere Entsorgung und die Herstellung neuer Produkte oder die Beschaffung anderer Brennstoffe. Zudem muss die Verwertung nach dem Stand der Technik erfolgen. In **Art. 16** der VVEA werden von der Bauherrschaft bei Einreichen einer Baubewilligung Angaben zur Entsorgung von Bauabfällen verlangt. Diese sind in einem Entsorgungskonzept einzureichen. Die Behörde kann nach Abschluss der Bauarbeiten von der Bauherrschaft Nachweise für die Entsorgung der Abfälle nach den Vorgaben der Behörde verlangen. In **Art. 17** VVEA werden Vorgaben zur Trennung von Bauabfällen und deren sortenreinen Verwertung gemacht. **Art. 19** VVEA regelt die Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial. Die Umsetzung wird in der 2021 publizierte Vollzugshilfe «Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial» konkretisiert. Schliesslich regelt **Art. 20** VVEA den Umgang mit Mineralische Abfälle aus dem Abbruch von Bauwerken. Auch hierzu wurde 2023 eine Vollzugshilfe «Verwertung mineralischer Rückbaumaterialien» publiziert.

### 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. 3 Abs. m VVEA** ist der Stand der Technik der aktuelle Entwicklungsstand von Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der bei vergleichbaren Anlagen oder Tätigkeiten im In- oder Ausland erfolgreich erprobt ist oder bei Versuchen erfolgreich eingesetzt wurde und nach den Regeln der Technik auf andere Anlagen oder Tätigkeiten übertragen werden kann, und für einen mittleren und wirtschaftlich gesunden Betrieb der betreffenden Branche wirtschaftlich tragbar ist.

Bauabfälle sind möglichst vollständig als Rohstoff für die Herstellung von Baustoffen oder als Baustoff auf Deponien zu verwerten, sofern ihr Schadstoffgehalt dies zulässt. Sie dürfen nur auf Deponien des Typ B abgelagert werden, sofern sie mindestens zu 95 Gewichtsprozent aus Steinen oder gesteinsähnlichen Bestandteilen bestehen und **stofflich verwertbare Anteile vorgängig entfernt wurden**; ausgenommen ist Ausbauasphalt.

## Ziel und Zweck

Damit mit verschmutzten Bauabfällen umweltgerecht umgegangen wird, hat der Kanton Zürich bereits 2005 eine Verwertungsregel aufgestellt. Er hat die allgemeine Verwertungspflicht gemäss Art. 12 VVEA, die sortenreine Trennung gemäss Art. 17 VVEA und die möglichst vollständige Verwertung gemäss Art. 19 VVEA konkretisiert. Die Verwertungsregel definiert Verwertungsquoten in Abhängigkeit von der Abfallqualität, sie ist etabliert und von allen Betroffenen akzeptiert. 2017 wurde die Verwertungsregel als Folge der Ablösung der TVA durch die VVEA überarbeitet, seither heisst sie Behandlungsregel.

Die Behandlungsregel trägt dazu bei, Deponieraum zu schonen und Planungssicherheit sowie Rechtsgleichheit zu gewährleisten. Sie richtet sich an alle Akteure bei Bauvorhaben auf belasteten Standorten (Bauherren, Planer, Altlastenberater). Dank Behandlungsprozessen können viele belastete Abfälle der Verwertung zugeführt werden.

Die aktuelle «Behandlungsregel für verschmutzte Bauabfälle und Aushub- und Ausbruchmaterial im Hinblick auf die Verwertung» wurde im Juli 2020 eingeführt. Diese schreibt, sowie frühere Ausgaben schon, in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung Verwertungsquoten, respektive Verwertungseffizienzen, für ein bestimmtes belastetes Material vor. Die Verwertungseffizienz (in %) legt denjenigen Anteil eines Massenstromes belasteter Bauabfälle fest, welcher nach einer Behandlung stofflich verwertet werden muss. Dieses Vorgehen hat sich bewährt. Seit seiner Einführung konnten bereits mehr als eine Deponie Typ B und eine halbe Deponie Typ E eingespart werden.

Für die Entsorgung von belasteten Bauabfällen steht eine Vielzahl von Verfahren mit unterschiedlichen Verwertungseffizienzen zur Verfügung. Um den Vollzug der Behandlungsregel zu vereinfachen, hat das AWEL dem arv Baustoffrecycling Schweiz 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. Die aktuelle Ausgabe berücksichtigt die Vorgaben der 2016 neu in Kraft getretenen Abfallverordnung VVEA.

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.

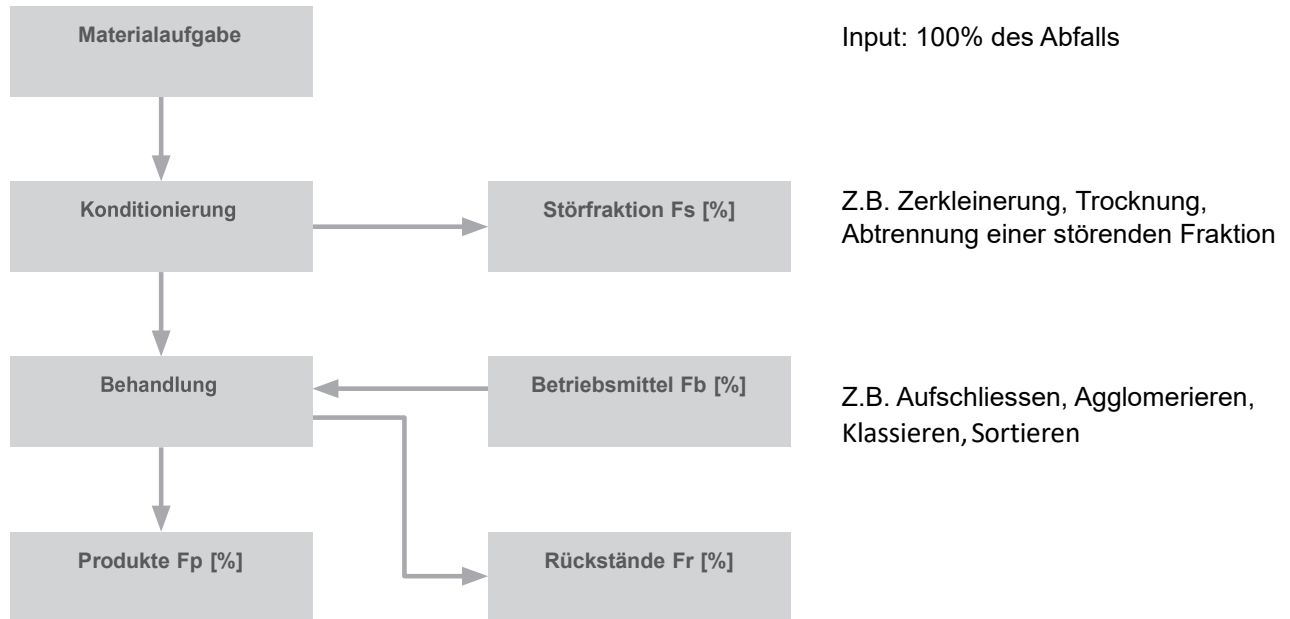
Der Katalog wird durch den arv Baustoffrecycling Schweiz regelmässig aktualisiert und dem Stand der Technik angepasst. Der «Stand der Technik» ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren. Bei seiner Bestimmung sind insbesondere vergleichbare Verfahren heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis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

### Definition Verwertung

Eine stoffliche Verwertung von Bauabfällen liegt vor, wenn Rohstoffe aus der Behandlung von Bauabfällen durch Erreichung der gesetzlichen und normativen Qualitätsziele zurück in den Baustoffkreislauf geführt werden.

## Prinzip-Flussdiagramm 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 Asphaltherstellung eingesetzt werden. Die Zuschlagstoffe müssen alle Anforderungen nach den gültigen Normen SN EN für Gesteinskörnungen erfüllen (zB. SN EN 13285, SN EN 13242 / SN 670119-NA) entsprechen. Insbesondere müssen sie genormte Kornzusammensetzungen innerhalb der festgelegten Grenzwertabweichungen aufweisen. Weiterhin sind die in der Norm für Recyclingbeton (SN 670 071-NA, SN EN 12620) angegebenen Fremdstoffanteile einzuhalten. Die genannten Normen regeln sowohl die Zusammensetzung von Beton mit definierten Eigenschaften bezgl. Druckfestigkeit und Expositionsklasse als auch von Magerbeton ohne besondere Eigenschaften.

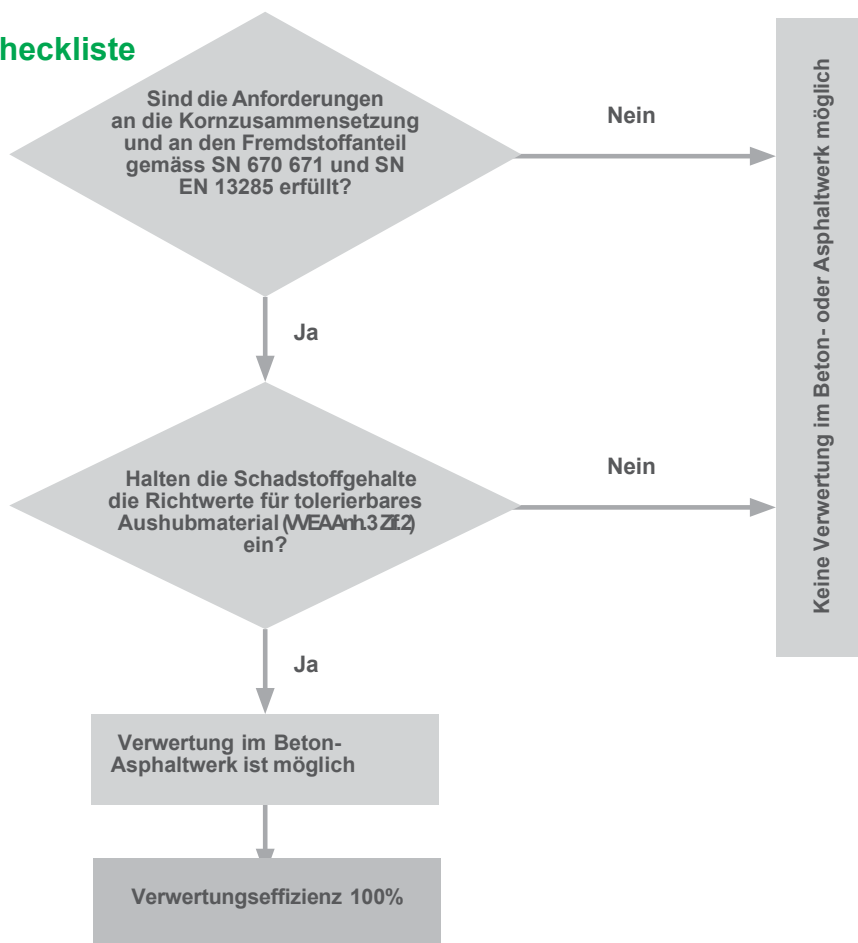
## Schadstoffe

Die Schadstoffgehalte müssen die Richtwerte für tolerierbares Aushubmaterial gemäss VVEA Anhang 3, Ziffer 2 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.

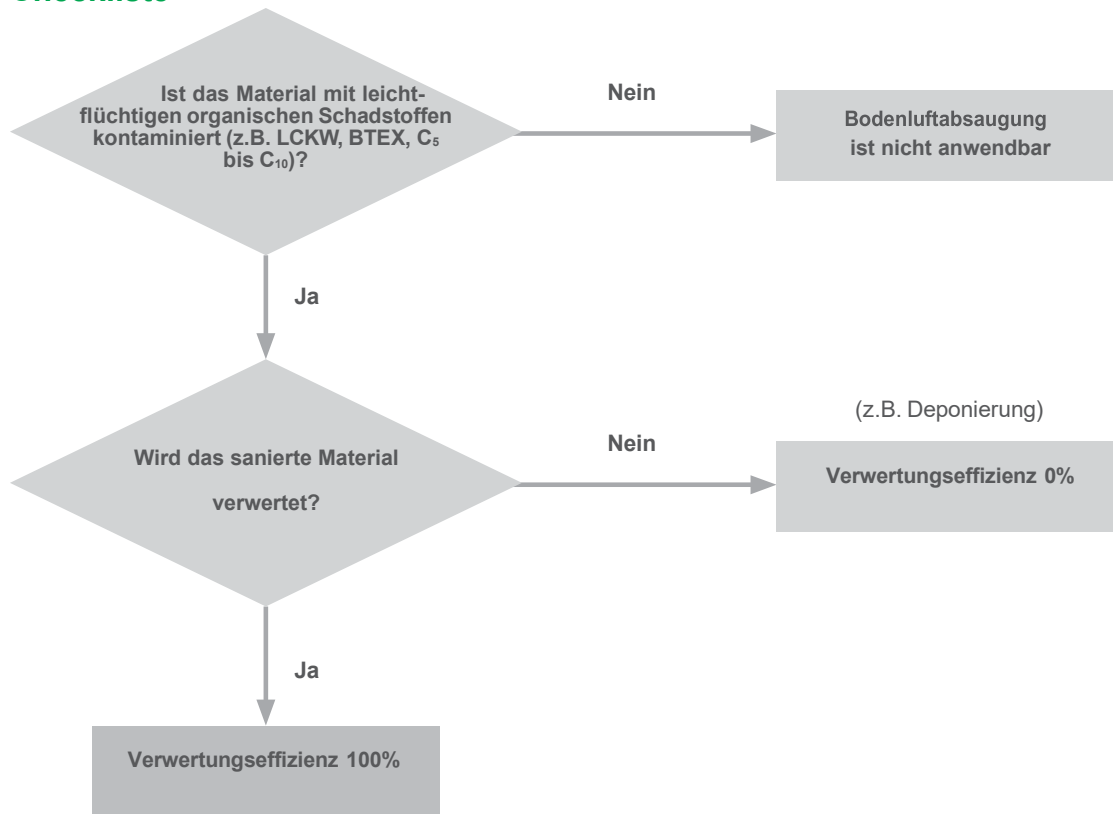
## Schadstoffe

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 Deponie Typ B 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, Turbowäscher, Attirtionszellen usw.) 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 Flotatschlammes 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 Behandlungsverfahren.

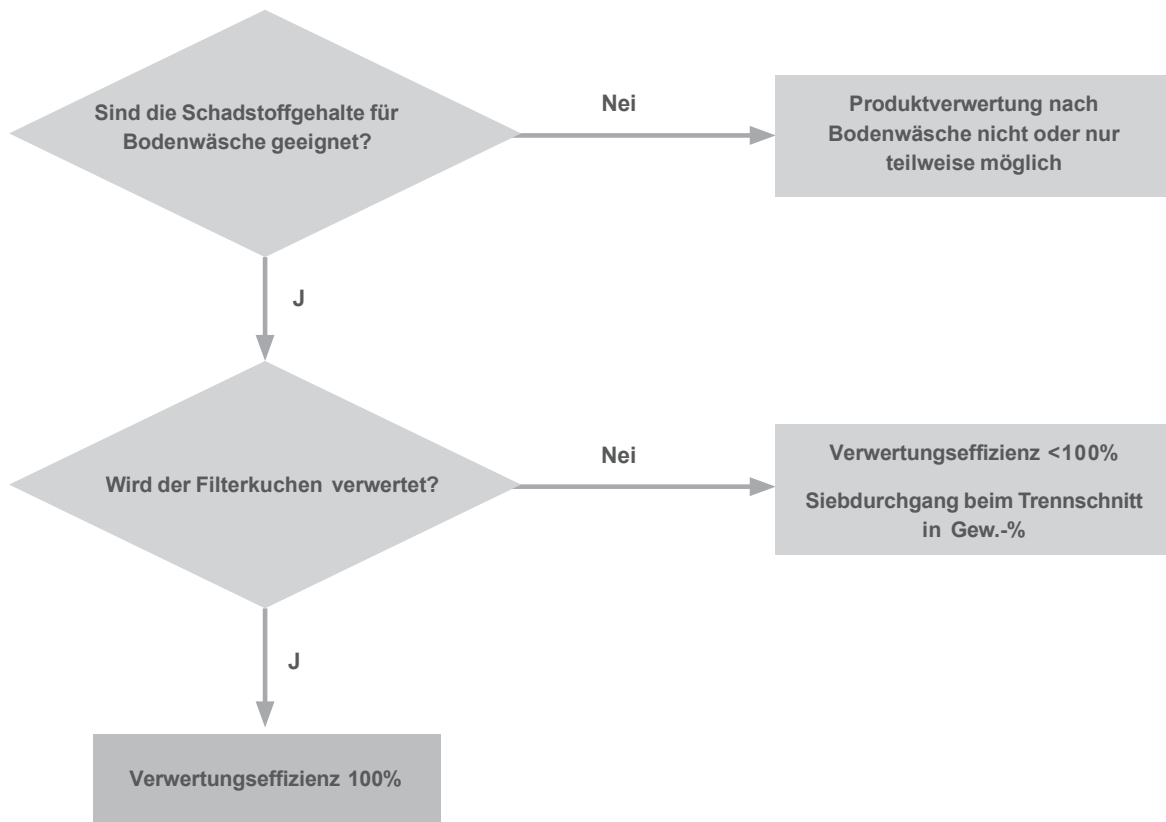
## Schadstoffe

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 aufgrund der Porosität 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 Silt Teilchen aus dem Waschwasser entfernt und den Produkten zugeführt werden können. Bodenwaschanlagen haben in der Regel einen Anlagentrennschnitt von 63  $\mu\text{m}$ , d.h. Silt- und Tonbestandteile, die kleiner als 63  $\mu\text{m}$  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 (Deponiert), reduziert sich die Verwertungseffizienz entsprechend.

## Checkliste



## Beispiele

Material	Input Bodenwäsche	Output Bodenwäsche	Verwertung
B-Material 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%
B-Material Feinkornanteil 12% Blei = 280 ppm	100 t	88 t Kies/Sand Blei = 48 ppm  12 t Filterkuchen Blei = 1980 ppm	Kies/Sand für Betonherstellung  Filterkuchen auf Deponie E  Verwertungseffizienz 88%

# 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.

Die zum grössten Teil partikulär vorliegenden Schadstoffe (mit Antimon gehärtete Blei-Legierung) werden durch geeignete Sortierverfahren abgetrennt und zwecks Rückführung in den Materialkreislauf ausgetragen. Die belasteten Feinanteile werden auf eine geeignete Deponie verbracht. Die Bodenwäsche ist für kiesiges und sandiges Aushubmaterial ein sehr gutes und wirksames Reinigungsverfahren. Bei der Kugelfangwäsche geht es um die Schadstoffentfrachtung zwecks Erzeugung eines in der Schweiz deponierbaren Rückstandes.

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 (Sortierung) mit einer hohen Trennschärfe durchgeführt werden kann:

- Aufschluss, Aufschlännen
- Siebmaschinen zur Klassierung der Kies- und Sandfraktionen
- Hydrozyklone zur Klassierung der Feinfraktionen
- Wendelscheider zur Dichtesortierung der Sandfraktionen
- Setzmaschinen zur Dichtesortierung der Kiesfraktionen
- Trommelmagnetscheider
- Wirbelstromscheider zur Sortierung der Kiesfraktionen

Die erste Verfahrensstufe der Aufbereitung ist ein Nassaufschluss des Kugelfangmaterials, wobei durch Aufschlännen 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 unter Einhaltung der Vorgaben von Anhang 5 der VVEA deponiert. Eine Kreislaufführung des zum Aufschlännen notwendigen Prozesswassers ist ein wesentlicher Bestandteil einer nach dem Stand der Technik arbeitenden Bodenwaschanlage. Dazu wird das Prozesswasser kontinuierlich durch eine Abwasserreinigungsanlage geführt. Schwermetall Anreicherungen im Kreislaufwasser sind mittels Ionentauscher zu entfrachten.

## 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 oder über einer zweiten, für die Schwerstoffabtrennung konzipierte, Setzmaschine. 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, Geschosssplintern und Bleifragmenten 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 Abfallverordnung (VVEA) sind fünf Deponietypen definiert:

Typ A für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 1 – Deponie für sauberen Aushub

Typ B für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 2 – Ehemals Inertstoffdeponie

Typ C für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 3 – Ehemals Restoffdeponie

Typ D für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 4 – Ehemals Schlackenkompartiment auf Reaktordeponie

Typ E für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 5 – Ehemals Reaktordeponie

Direkt ab Baustelle kann nur auf Deponien Typ A, B und E Material angeliefert werden. Deponien Typ D sind ausschliesslich für Schlacken aus Kehrichtverwertungsanlagen vorgesehen. Auf Deponien Typ C dürfen nur Rückstände aus einer Behandlungsanlage abgelagert werden.

## Schadstoffe

### Deponie Typ A

Auf Deponien Typ A dürfen nur gesteinsähnliche Materialien abgelagert werden, die die Kriterien nach Anhang 5 Ziffer 1 der VVEA erfüllen.

### Deponie Typ B

Auf Deponien Typ B dürfen nur gesteinsähnliche Materialien abgelagert werden, die die Kriterien nach Anhang 5 Ziffer 2 der VVEA erfüllen.

### Deponie Typ E

Auf Deponien Typ E dürfen nur Materialien abgelagert werden, die die Kriterien nach Anhang 5 Ziffer 5 der VVEA erfüllen.

## Verwertungseffizienz

Die Verwertungseffizienz beträgt 0%.

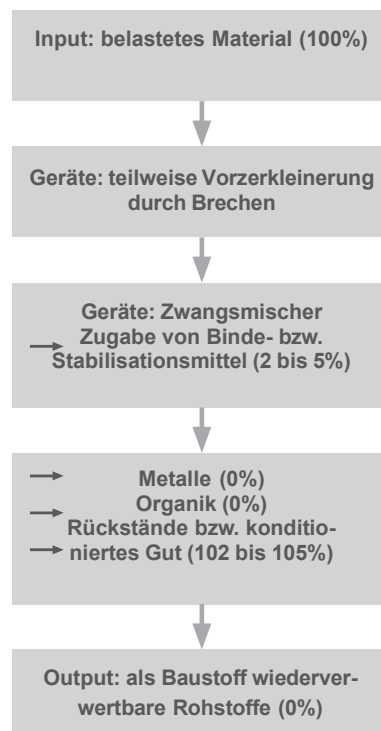
# Immobilisierung

## 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.

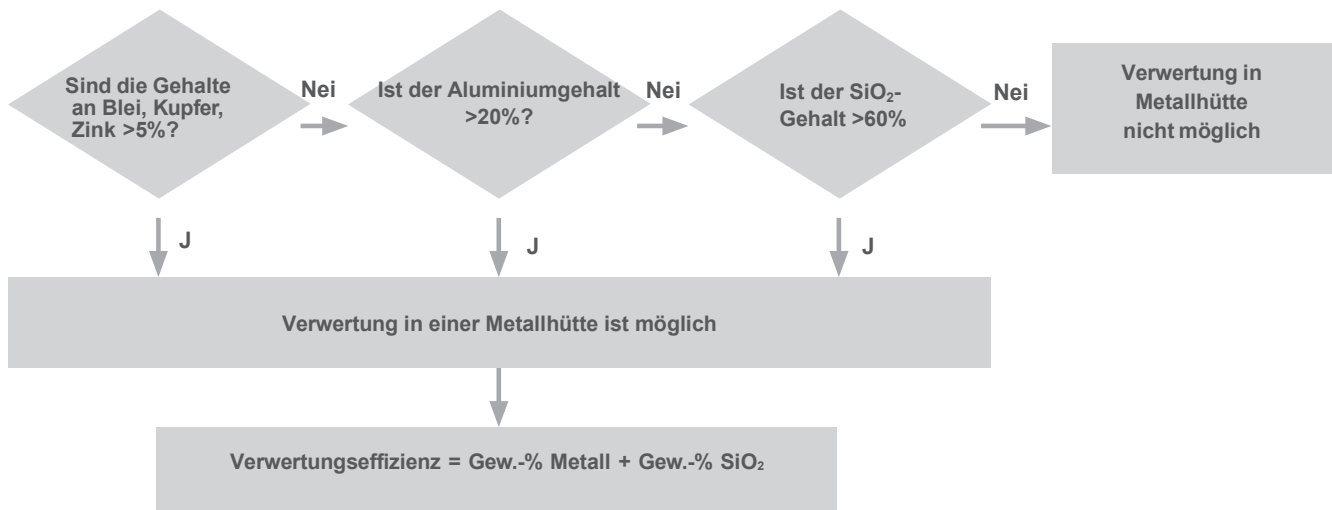
## Schadstoffe

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

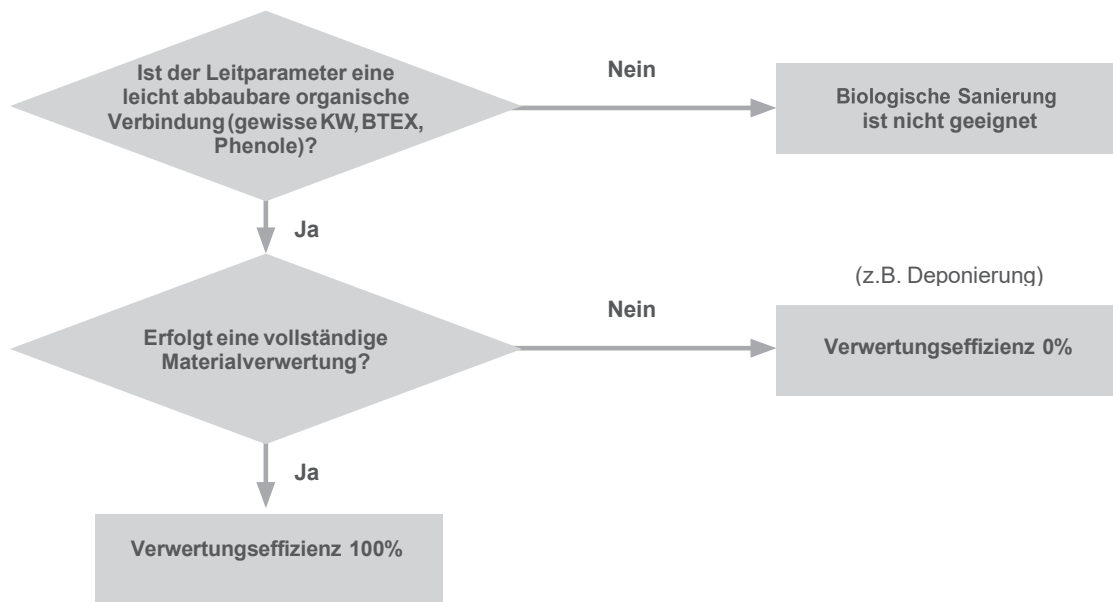
Biologische Verfahren sind für biologisch leicht abbaubare organische Schadstoffe (z.B. kurz- und mittelkettige Kohlenwasserstoffe, BTEX, Phenole und leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)) geeignet.

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
E-Material (bindiger Aushub) BTEX = 100 ppm	100 t	100 t BTEX = 3 ppm	Ablagerung auf Deponie Typ B Verwertungseffizienz 0%
E-Material (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 Abhitzeessel 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

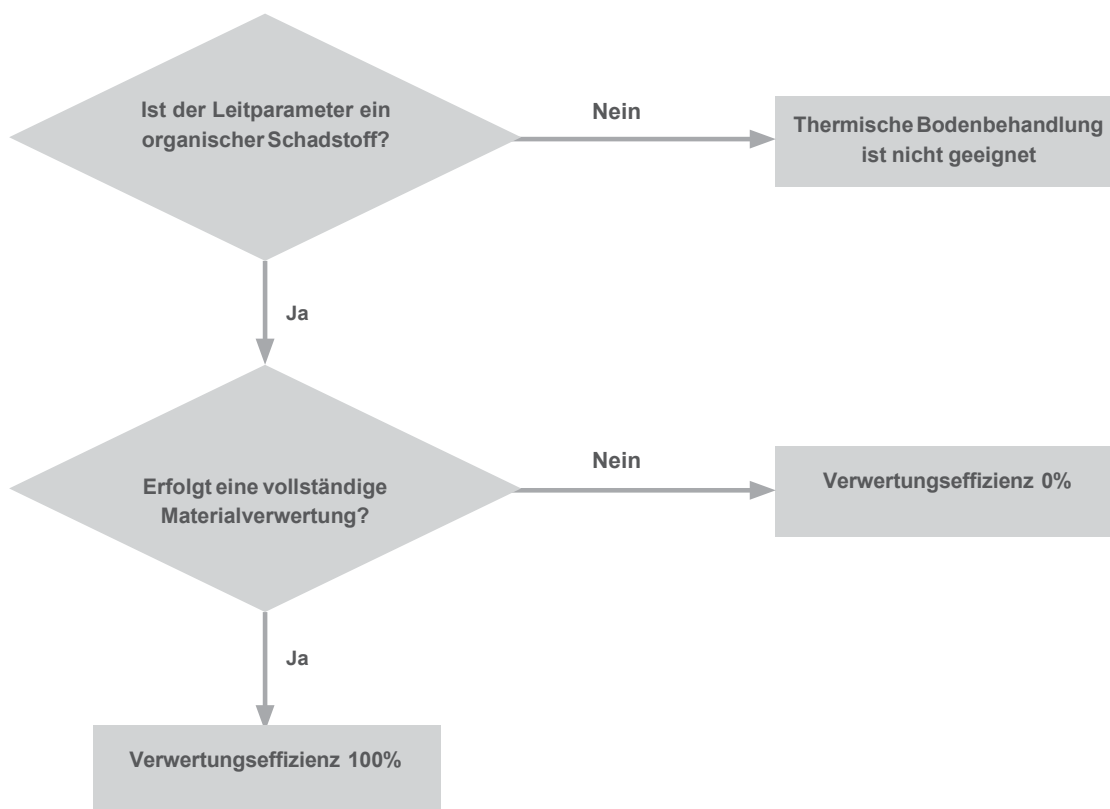
Mit der thermischen Bodenreinigung ist in der Regel eine nahezu vollständige Abtrennung und Zerstörung von organischen Schadstoffen möglich. Sowohl flüchtige organische Substanzen, z.B. Lösungsmittel, Benzin und BTEX, als auch schwerflüchtige organische Verbindungen, wie z.B. Mineralöle, PAK, PCB, PFAS, 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
Sonderabfall KW = 30 000 ppm Kupfer = 100 ppm	100 t	100 t KW = 10 ppm Kupfer = 100 ppm	Fundationsschicht im Strassenbau Verwertungseffizienz 100%
Sonderabfall 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 Trockenklassierung wird das Material einer Siebmaschine aufgegeben und in zwei oder mehrere Fraktionen aufgetrennt. Nach der Siebklassierung kann das Grobgut, das in der Regel weniger Schadstoffe enthält als feinkörnige Bestandteile, dem Baustoffrecycling zugeführt werden. Die schadstoffhaltigen Feinfraktionen werden im Zementwerk verwertet, einer weiteren Behandlung zugeführt oder auf eine geeignete Deponie verbracht.

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 Siebbeläge 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 Abreicherungs-faktoren 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 Trockenklassierung behandelt werden können.

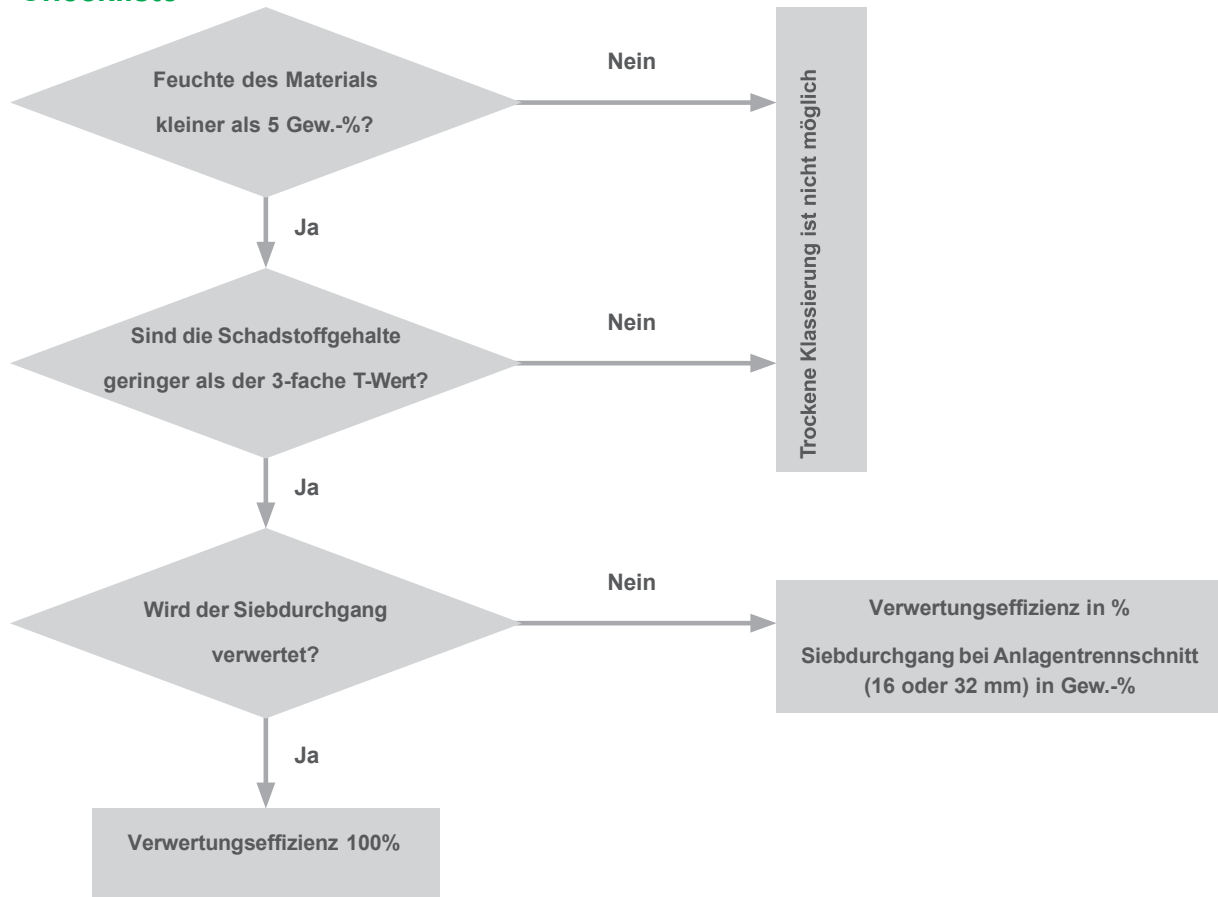
Parameter	T-Wert [mg/kg]	Maximale Kontaminationen bei Abreicherungs-faktor 3 [mg/kg]
Blei, Chrom, Kupfer, Nickel	250	750
Zink	500	1500
Kohlenwasserstoffe	250	750
PAK	12,5	37,5
PCB	0,1	0,3

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

## 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 Deponie Typ B 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 Deponie Typ B 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

Dieses Verfahren eignet sich für Abfälle, die die Anforderungen gemäss Ziffer 1 Anhang 4 VVEA erfüllen. Die Behörde kann im Einzelfall höhere Gehalte an organischen Stoffen zulassen, wenn nachgewiesen ist, dass mit geeigneten Massnahmen die Anforderungen der Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV) an die Emissionsbegrenzung der betroffenen Stoffe eingehalten werden.

Das Aushubmaterial wird nach entsprechender Vorbereitung (Brechen, Mahlen) in das Drehrohr der Zementanlage eingebracht und bei Temperaturen bis zu 1'500 °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.

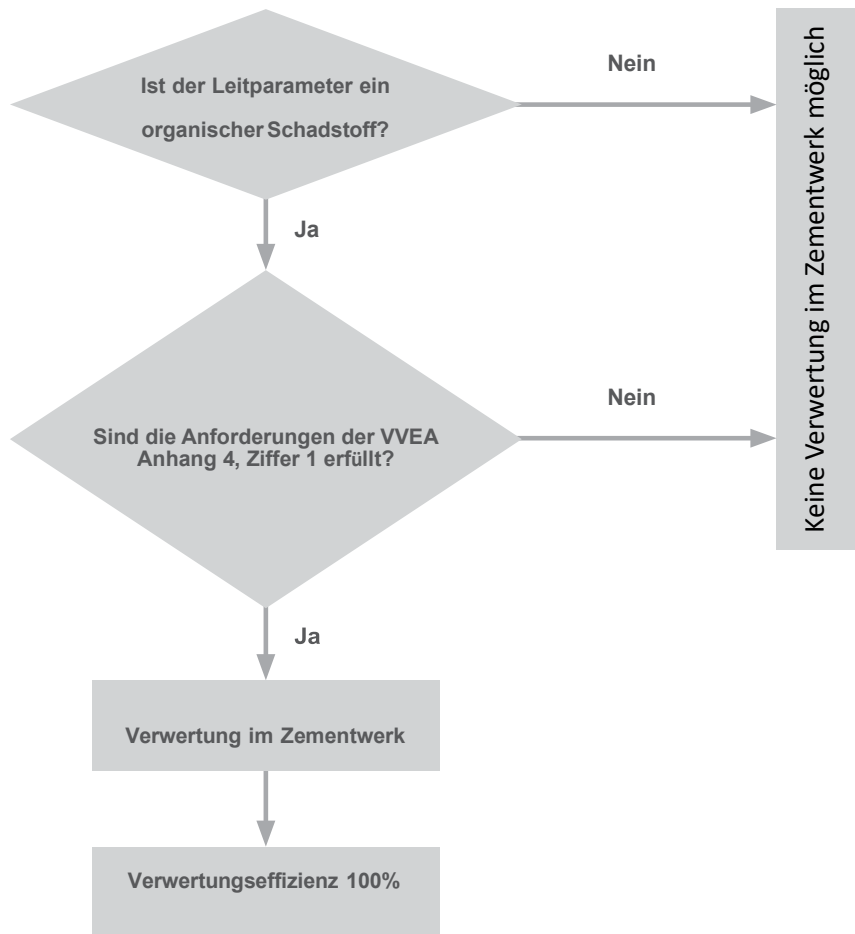
Die Schwermetalle aus den Abfallstoffen werden im Zementofen in den Klinker eingebunden. Damit keine Schwermetallanreicherung im Klinker stattfindet, müssen die Grenzwerte gemäss Anhang 4 Ziffer 1 der VVEA eingehalten werden.

## Verwertungseffizienz

Die erzielbare Verwertungseffizienz beträgt bei zugelassenem Material 100%.



## Checkliste



## Beispiele

Material	Leitparameter	Verwertung im Zementwerk?
T-Material PAK = 10 ppm Feinkorn = 30%	PAK	Ja Verwertungseffizienz 100%
B-Material PCB = 0,8 ppm Blei = 300 ppm Feinkorn = 40%	PCB	Ja Verwertungseffizienz 100%

<p>B-Material          Blei = 300 ppm          Feinkorn = 40%</p>	<p>Blei</p>		<p>Der Leitparameter ist nicht organisch. Die Entsorgung im Zementwerk führt nicht zu einer Behandlung des Schadstoffes.</p> <p>Verwertungseffizienz:          von der kantonalen Vollzugsbehörde festzulegen</p>
---	-------------	--	---