

# SENKATO

Machbarkeitsstudie

«Deponieraum als limitierte Ressource»



Zürich, 27.02.2024

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)  
und des Verbands der Betreiber schweizerischer Abfallverwertungsanlagen  
(VBSA)

## Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abfall und Rohstoffe, CH-3003 Bern und Verband der Betreiber schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA), CH-3014 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: OST-Ostschweizerfachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik, CH-8640 Rapperswil, Prof. Dr. Rainer Bunge

Autor/Autorin: Roland Kälin, Andreas Gauer, Tabea Nydegger

Begleitung BAFU: André Laube

Hinweis: Diese Studie wurde u.a. im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht das Potenzial zweier Ansätze zur Erhöhung der Vorhaltekapazität durch Schonung des in der Schweiz vorhandenen Deponievolumens:

1. Durch eine Erhöhung der Verwertungsquote wird die Menge an neu anfallendem Deponiegut reduziert und somit das verbleibende Deponievolumen geschont.
2. Bereits verfülltes Deponievolumen wird nach dem Stand der Technik recycelt und verwertet, um «neues» Deponievolumen zu gewinnen.

Um die Verwertbarkeit der derzeit anfallenden Abfälle abzuschätzen, wurden die wichtigsten Abfallströme auf Deponien der Typen B und D erfasst und den projektspezifisch eingeführten Kategorien «Verwertung», «Deponiez Zwischenlagerung» oder «Deponieendlagerung» zugeordnet. Unsere Analysen haben gezeigt, dass insbesondere für die derzeit auf Deponien des Typs B abgelagerten Bauabfälle eine baustoffliche Verwertung attraktiv wird, wenn einer der folgenden Mechanismen die Kostenstruktur verändert:

- aufgrund der Deponieraumverknappung ansteigende Deponiegebühr
- kostengünstigere Aufbereitungsverfahren infolge technischer Innovation
- Deponiegebührrhöhung durch regulatorische Eingriffe, z.B. in Form einer Lenkungsabgabe.

Die Analyse des Verwertungspotenzials von auf Deponien des Typs D abgelagertem Material hat gezeigt, dass eine baustoffliche Verwertung der mineralischen Schlackenbestandteile die grösste Einsparung an Deponieraum bewirkt. Allerdings erfordert diese Variante eine Lockerung der bestehenden Grenzwerte für die baustoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen.

Hinsichtlich der Rückgewinnung von Deponievolumen durch die weitere Verwertung von bereits verfülltem Deponiegut, dem so genanntem «Deponierecycling», hat eine systematische Analyse an verschiedenen Ablagerungsstandorten gezeigt, dass die grössten Potenziale bei den aktuellen Deponien des Typs B (respektive den ehemaligen Inertstoffdeponien) und den ehemaligen Siedlungsabfallkompartimenten der Reaktordeponien (heute zumeist am Standort von Deponien E) liegen.

Sowohl beim «Umlenken» von aktuell anfallendem Bauschutt in die Verwertung als auch das Deponierecycling des Typs B stellt der fehlende Markt für die Sekundärrohstoffe eine wesentliche Einschränkung dar. Solange die fehlende Marktakzeptanz auf die Sekundärbaustoffpreise drückt, ist ein Deponierecycling nur mit weiter steigender Deponiegebühr realisierbar. Deponiegebühren und Rohstoffpreise sind regional sehr unterschiedlich. In einigen Regionen ist ein marktgetriebenes Deponierecycling des Typs B durchaus denkbar, sofern die Sekundärrohstoffe am Markt mit vergleichbaren Preisen wie Primärrohstoffe vergütet werden.

Die Analyse des Recyclingpotenzials des Inhalts von Deponiestandorten des Typs E hat gezeigt, dass insbesondere alte Reaktorkompartimente noch erhebliche Mengen an organischem Material enthalten. In diesen Kompartimenten ist ein signifikantes Potenzial zur Volumenreduktion durch die Verbrennung in KVAs vorhanden. Bei einer Befragung der Betreiber von Deponien war die Idee des Recyclings von Reaktorkompartimenten jedoch nicht unumstritten. Als häufigste Hinderungsgründe wurden Zugänglichkeit, Schadstoffbelastung, Platzmangel oder «politische Gründe» genannt.

Einzelne Deponiebetreiber prüfen derzeit ein Deponierecycling für einzelne Kompartimente oder führen es bereits durch. Auf der Deponie Tambrig wird aktuell eine ehemalige Hausmülldeponie rezykliert, die Deponie Alznach beginnt 2024 mit dem Recycling ihres Reaktorkompartiments und die

Deponie SEOD schliesst ein Deponierecycling in 10 bis 15 Jahren nicht aus. Das durch Deponierecycling rückgewinnbare Deponievolumen dieser drei Deponien wird auf ca. 350'000 m<sup>3</sup> geschätzt. Zum Vergleich: Um die in der Schweiz anfallende KVA-Schlacke abzulagern werden jährlich ca. 365'000 m<sup>3</sup> Deponievolumen des Typs D benötigt. Die durch das Recycling der drei oben genannten Deponien E freiwerdende Kapazität könnte somit die in der Schweiz anfallende Jahresproduktion von KVA-Schlacken aufnehmen.

## Inhaltsverzeichnis

1	Grundlage Deponieraumverknappung .....	1
2	Optimale Materialbewirtschaftung der Abfälle.....	2
2.1	Hintergrund .....	2
2.2	Methodik.....	3
2.3	Abgrenzung des Projekts.....	9
2.4	Deponie Typ B.....	10
2.5	Deponie Typ D .....	18
2.6	Diskussion.....	26
3	Recycling von Ablagerungsstandorten zwecks Schaffung von neuem Deponieraum .....	28
3.1	Hintergrund .....	28
3.2	Methodik .....	28
3.3	Ablagerungsstandorte .....	29
3.4	Inertstoffdeponien / Deponie Typ B.....	36
3.5	Reststoffdeponien / Deponie Typ C.....	38
3.6	Schlackenkompartiment / DeponieTyp C.....	38
3.7	Reaktordeponie / Deponie Typ E.....	39
4	Diskussion .....	43
5	Literaturverzeichnis .....	44
6	Abbildungsverzeichnis .....	46

## Glossar

Behandlungsregel	Eine Behandlungsregel für Abfälle schreibt eine bestimmte Verwertungsquote vor und geht damit über die Verwertungspflicht der VVEA hinaus. Gemäss Abschnitt 3, Art. 12 VVEA sind Abfälle nach dem Stand der Technik zu behandeln, wobei die Behandlung "wirtschaftlich zumutbar" sein muss. Bei der Frage, welche Kosten für eine Behandlung zumutbar sind, besteht ein gewisser Spielraum. Die fixe, prozentualen Behandlungsregel schliesst diesen Spielraum mittels messbarer Vorgaben.
Deponieendlager	In dieser Studie wird eine weitere Unterteilung der Abfallströme innerhalb eines Deponietyps in zwei Arten von Deponiekompartimenten vorgeschlagen. Es handelt sich um das Deponieendlager und das Deponiezwischenlager. Im Deponieendlager werden nur solche Abfallströme abgelagert, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft kein Recyclingpotenzial aufweisen.
Deponiegebühr	Die von den Deponiebetreibern erhobene Gebühr zur Deponierung einer Tonne Abfall.
Deponiekosten	Die für die Deponierung eines Abfalls anfallenden Kosten. Dies beinhaltet die Deponiegebühren sowie die Transportkosten auf die Deponie.
Deponierecycling	Die Auskofferung eines bereits verfüllten Deponiekörpers mit dem Ziel der Rückgewinnung von Ressourcen. Der Begriff Ressourcen umfasst dabei nicht nur die eingelagerten Materialien wie z.B. Metalle, sondern auch den Deponieraum selbst.
Deponiezwischenlager	In dieser Studie wird eine weitere Unterteilung der Abfallströme innerhalb eines Deponietyps in zwei Arten von Deponiekompartimenten vorgeschlagen. Es handelt sich um das Deponieendlager und das Deponiezwischenlager. Im Deponiezwischenlager werden Abfälle abgelagert, die derzeit technisch oder wirtschaftlich nicht verwertbar sind, aber Potential haben um zukünftig verwertet zu werden.
Direktdeponierung	Die direkte Deponierung beschreibt die Ablagerung von Abfällen auf einer Deponie ohne vorherige Behandlung.
Endlagerfähig	Ein Stoff gilt als endlagerfähig, wenn er unter Berücksichtigung seiner chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften an einem Ort sicher gelagert werden kann, ohne dass es zu einer unkontrollierten Freisetzung von Schadstoffen oder zu einer langfristigen Belastung der Umwelt kommt.
NIMBY	"not in my backyard"-Mentalität
Ressourcenpotenzial	Das Ressourcenpotenzial ist eine Bewertung von Materialien hinsichtlich ihrer zukünftigen wirtschaftlichen Verwertbarkeit.

## 1 Grundlage Deponieraumverknappung

Hintergrund dieses Projekts ist die zunehmende Deponieraumknappheit in der Schweiz. Um dieser entgegenzuwirken, stehen folgende Strategien zur Auswahl:

- neuer Deponieraum schaffen («auf der grünen Wiese»)
- Erhöhung der Verwertungsquote; die Menge an neu anfallendem Deponiegut wird reduziert, das verbleibende Deponievolumen wird geschont
- bereits abgelagertes Material wird ausgekoffert und nach dem Stand der Technik aufbereitet («Deponierecycling»)

Das Errichten von neuen Deponien wird zumeist nicht durch einen Mangel an geologisch oder ökologisch geeigneten Standorten erschwert, sondern durch gesellschaftliche Vorbehalte. Durch die sogenannte "not in my backyard"-Mentalität (NIMBY) wird die Genehmigung einer Deponie an einem neuen Standort massiv erschwert oder unmöglich gemacht. Aufgrund diverser bürokratischer Hürden und Einspruchsverfahren wird von Branchenkennern davon ausgegangen, dass das Genehmigungsverfahren vom Projektstart bis zur Eröffnung einer neuen Deponie - sofern diese überhaupt genehmigt wird - ca. 10 Jahre in Anspruch nehmen wird. Dies ist vor dem Hintergrund der rapide abnehmenden Deponiekapazitäten ein sehr langer Zeitraum.

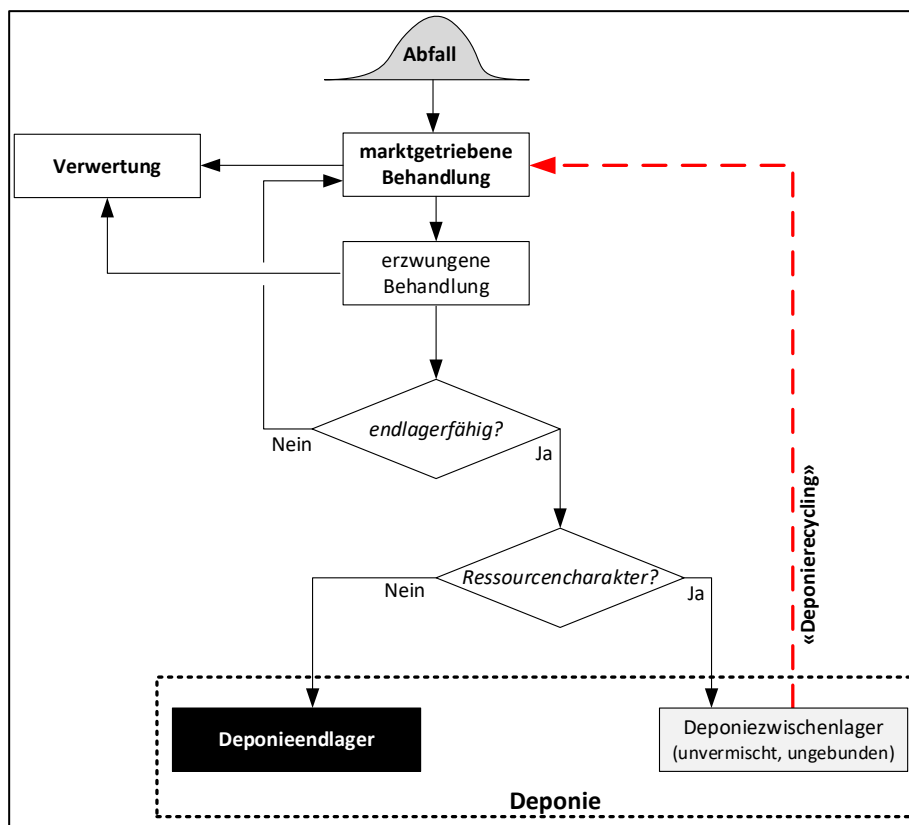


Abb. 1: Aus der Behandlung resultieren Produkte die entweder verwertbar oder endlagerfähig sind. Die endlagerfähigen Abfälle werden in Deponien abgelagert. Von diesen endlagerfähigen Abfällen werden solche mit Ressourcenpotenzial zwecks "Rückholbarkeit" ungebunden und möglichst separat im Deponiezwischenlager abgelagert.



Durch die zunehmende Verknappung steigen die Marktpreise für die Ablagerung in einigen Deponietypen stark an, wodurch sich neue Möglichkeiten für die Behandlung neu anfallender Abfallströme und die Verwertung von bereits abgelagerten Abfällen ergeben. Durch die Verteuerung der Deponiegebühren werden aufwändige Behandlungsverfahren zur Einsparung von Deponieraum wirtschaftlich attraktiver und die Kreislaufwirtschaft wird marktgetrieben gefördert.

Dies gibt Anlass, die Deponieabfälle hinsichtlich ihres Verwertungspotenzials und unter Berücksichtigung von steigenden Deponiegebühren neu zu betrachten. Aufgrund der dynamischen Deponiegebühren und Ressourcenpreise sowie der technischen Entwicklung erscheint es sinnvoll die Deponien nicht nur nach Typen (A-E) zu gliedern, sondern innerhalb dieser Deponietypen zwei Arten von Deponiekompartimenten zu bilden, die wir als "Deponiezwischenlager" bzw. "Deponieendlager" bezeichnen (siehe Abb. 1). In den Deponiezwischenlagern werden Abfallströme mit Ressourcenpotenzial im Sinne einer guten "Rückholbarkeit" ungebunden und möglichst ungemischt in "Monokompartimenten" abgelagert. Im Deponieendlager werden nur solche Abfallströme eingelagert, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft kein Ressourcenpotenzial mehr aufweisen.

Wurden auf Deponien grössere Mengen von Materialien, die nach dem Stand der Technik ein Ressourcenpotenzial aufweisen, abgelagert, muss eine erneute Aufbereitung des bereits abgelagerten Materials mittels Deponierecycling zur Schaffung von neuem Deponieraum in Betracht gezogen werden. Der Blick zurück zeigt, dass der Begriff "nicht verwertbar" relativ ist und insbesondere von der Kostenstruktur abhängt. Abfallfraktionen, die früher als "nicht verwertbar" deponiert wurden, weil die Deponiepreise tiefer lagen als die Kosten für die Aufbereitung, können bereits nach einem moderaten Anstieg der Deponiegebühren plötzlich marktgetrieben ausgehoben und einer Verwertung zugeführt werden. Wirtschaftlicher Treiber dieses Deponierecyclings ist in erster Linie ein zusätzlicher Erlös durch die Schaffung von neuem Deponievolumen und weniger der durch Aufbereitung des Deponiematerials zu erzielende Erlös und dessen anschliessende Verwertung als Sekundärbaustoff.

Angesichts der zunehmenden Verknappung durch gesellschaftliche Veränderungen rückt der Deponieraum selbst als Ressource in den Fokus. Deponieraum ist in der Schweiz eine "endliche Ressource", mit der sinnvoll umgegangen werden muss. Um diese zu schonen, optimal zu nutzen oder sogar wiederherzustellen, werden in diesem Bericht die folgenden zwei Handlungsfelder untersucht und diskutiert:

1. Optimale Materialbewirtschaftung der heute anfallenden Abfälle
2. Recycling von alten Deponien zwecks Schaffung von neuem Deponieraum

## **2 Optimale Bewirtschaftung der heute anfallenden Abfälle**

### **2.1 Hintergrund**

Ziel dieses Abschnitts ist es, einen Triage-Mechanismus zu entwickeln, der eine optimale stoffliche Bewirtschaftung der heute anfallenden Abfälle ermöglicht. Dabei sollen die Abfallströme innerhalb eines Deponietyps hinsichtlich ihrer Behandelbarkeit und hinsichtlich ihres Ressourcenpotenzials bewertet und den Kategorien «Behandlung», «Deponieendlagerung» und «Deponiezwischenlagerung» zugeschlagen werden.

Abfälle, die bereits heute verwertbar sind, können der Kategorie «marktgetriebene Behandlung» zugeordnet werden (Abb. 1). Materialien, bei denen das nicht der Fall ist, werden gemäss Abb. 1



beurteilt, ob eine «erzwungene» Behandlung stattfinden soll oder nicht. Hierunter fallen z.B. Materialien, die heute technisch verwertbar wären, deren Verwertung aber derzeit wirtschaftlich teurer ist als die Deponierung. Mit zunehmender Verknappung des Deponieraumes und dem damit verbundenen Anstieg der Deponiegebühren wird sich dies jedoch ändern. Eventuell könnten regulatorische Massnahmen oder Anreize die Verwertungsquote dieser Fraktion erhöhen («erzwungene Behandlung»). So könnte eine Lenkungsabgabe die Deponiegebühren «künstlich» erhöhen und damit den Markt von der Deponierung fort in Richtung Aufbereitung verschieben.

Materialien, die nicht der Verwertung zugewiesen werden, werden, sofern überhaupt «endlagerfähig», entweder im Kompartiment «Deponiez Zwischenlager» oder im Kompartiment «Deponieendlager» deponiert. Im Deponiez Zwischenlager werden Abfälle gelagert, die zwar derzeit (technisch oder wirtschaftlich) nicht verwertbar sind, es aber in Zukunft sein könnten. Das hier vorgeschlagene Deponiez Zwischenlager ist deutlich von dem in der VVEA in Abschnitt 2 beschriebenen Zwischenlager zu unterscheiden. Das Zwischenlager nach VVEA kann für maximal 5 Jahre genehmigt werden und muss getrennt von den deponierten Abfällen gelagert werden. Das von uns vorgeschlagene Deponiez Zwischenlager ist Teil des Deponiekörpers. Die Materialien im Deponiez Zwischenlager sollen jedoch leicht zugänglich und unvermischt mit anderen Abfällen gelagert werden, damit sie in Zukunft wieder ausgebaut und verwertet werden können (Monokompartimente). Dieser Ansatz erfordert eine Ergänzung der herkömmlichen Interpretation einer Deponie als «letzte Senke» zu einem binären System. Hierbei werden einige Kompartimente als Deponieendlager und andere als Deponiez Zwischenlager angelegt.

Es hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass der Begriff "nicht wiederverwertbar" relativ ist. Abfallfraktionen, die nach dem Stand der Technik als "nicht wiederverwertbar" deponiert wurden, wurden Jahre später zwecks Verwertung einzelner Inhaltsstoffe doch wieder ausgegraben. Ein Beispiel ist die Aufbereitung des alten Schlackenkompartiments Elbisgraben im Jahr 2006, wobei mit neuer Technologie (Wirbelstromscheider) rund 4'000 Tonnen Nichteisenmetalle zurückgewonnen wurden.

Im Deponieendlager werden nur Abfälle abgelagert, für die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft kein Verwertungspotenzial besteht. Dazu gehören Materialien, bei denen der Aufwand für die Gewinnung von Rohstoffen aus dem Deponieendlagermaterial wesentlich höher ist als die Gewinnung aus der Primärressource (z. B. aus Erzen).

Aus dieser Aufteilung in Deponieendlager und Deponiez Zwischenlager ergeben sich folgende Vorteile:

- Eine Deponie kann nicht von Beginn an so betrieben werden, dass alle dort abgelagerten Abfälle, auch in der fernen Zukunft jederzeit gut zugänglich und damit leicht zurückholbar sind. Wenn die in Abb. 1 vorgeschlagene Zuweisung stattfindet, brauchen nur die Deponiez Zwischenlagerkompartimente so eingerichtet werden, dass ihr Inhalt für ein späteres Deponierecycling zugänglich bleibt. Die Deponieendlagerkompartimente könnten hingegen an später praktisch unzugänglichen Stellen eingerichtet werden, z.B. unterhalb der Deponiez Zwischenlager.
- Synergieeffekte können durch die Vermischung verschiedener Abfälle ausgenutzt werden. Ein Beispiel ist die mögliche elektrochemische Reduktion von Chromat durch Eisen(II) in Folge einer gemeinsamen Ablagerung von Holzasche (Chromatträger) und KVA-Schlacke (Fe(II)-Lieferant). Ein Projekt, welches sich mit der Konditionierung der Materialströme befasst, die für die Endlagerung freigegeben werden, läuft aktuell an der Uni Bern. Die dort im Labormassstab erarbeiteten Ergebnisse sollen in einem gemeinsamen Nachfolgeprojekt auf

verschiedenen Deponiestandorten im Rahmen von Feldversuchen umgesetzt werden. Die all-fälligen Mischungen von Materialströmen müssen nicht nur chemisch stabil sein, sondern auch deponiebautechnisch. In den «Deponieendlagerungskompartimenten» kann es sich als sinnvoll erweisen, auch Stoffe über verschiedene Deponieklassen hinaus zu vermischen (z.B. Beigabe von strukturgebendem größerem Material zu deponiebautechnisch kaum handhabbaren «Schlämmen»).

## 2.2 Methodik

Um den Triage-Mechanismus in Abb. 1 zur Bewertung des Ressourcenpotenzials zu entwickeln, wurden zunächst die relevanten Stoffströme identifiziert und mengenmässig abgeschätzt. Die als relevant identifizierten Stoffströme werden im Folgenden hinsichtlich ihres Ressourcenpotenzials bewertet und in die drei Unterkategorien «Behandlung», «Deponiezwischenlagerung» und «Deponieendlagerung» eingeteilt. Die Bewertung erfolgt nach marktwirtschaftlichen Prinzipien, die eine Vergleichbarkeit der verschiedenen bewertungsrelevanten Faktoren ermöglichen.

### Schwerpunktthema 1: vorgängige Behandlung mit anschliessender Verwertung und evtl. Deponierung oder Direktdeponierung?

Um diese Fragestellung zu klären, wird das Referenzszenario mit dem Alternativszenario verglichen und die sich ergebende Differenz («Delta») als Steuerungsgrösse verwendet. Die der Bewertung zugrunde liegende Formel {1} ist in Abb. 2 dargestellt. Das hier dargestellte Referenzszenario umfasst die Ablagerung des Abfalls auf der Deponie, wobei sich die anfallenden Kosten aus den Transportkosten zur Deponie und der Deponiegebühr zusammensetzen. Das Alternativszenario gliedert sich in die Behandlungskosten und den Produkterlös, der durch den Verkauf des verwerteten Materials erzielt wird.

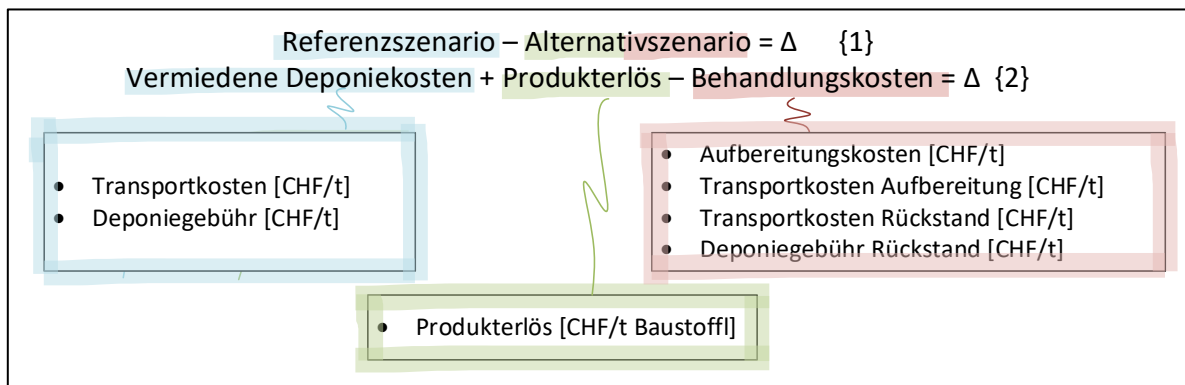


Abb. 2: Formel zur marktwirtschaftlichen Bewertung des Ressourcenpotenzials der verschiedenen Abfallströmen. Wenn  $\Delta$  positiv ist, wird das Material marktgetrieben verwertet, andernfalls deponiert.

Die vermiedenen Deponiekosten, also das Referenzszenario, werden mit dem Produkterlös und den Behandlungskosten verrechnet. Der Produkterlös ist der Anteil des Abfalls, der nach der Behandlung verwertet werden kann, multipliziert mit dem Produkterlös, der durch den Verkauf des verwerteten Materials erzielt werden kann. Die Behandlungskosten setzen sich aus den Aufbereitungskosten, den Transportkosten zu der Aufbereitungsanlage und der sachgemässen Entsorgung des während

der Aufbereitung entstandenen Rückstands zusammen.

*Beispiel - Verwertung von Mischabbruch unter folgenden Annahmen:*

Transportkosten zur Deponie	12.-/t
Deponiegebühr	50.-/t
Anteil Mischabbruchgranulat >0.2 mm	60 %
Produkterlös Mischabbruchgranulat >0.2 mm	10.-/t
Aufbereitungskosten	35.-/t
Transportkosten zur Aufbereitung	12.-/t
Transportkosten Rückstand=>Dep.	12.-/t

Wird eine Tonne Mischabbruch deponiert, entstehen Kosten durch den Transport zur Deponie und durch die anfallenden Deponiegebühren in Höhe  $12 + 50 = 62$  CHF/t Mischabbruch. Im Alternativszenario hingegen wird der Mischabbruch trockenmechanisch auf 2 mm abgesiebt und die Fraktion  $> 2$  mm einer Verwertung zugeführt, während die Fraktion  $< 2$  mm deponiert wird. Die Behandlungskosten sind also:  $35 + 12 + 0.4 \times 12 + 0.4 \times 50 = 72$  CHF/t Mischabbruch. Der Produkterlös ist  $0.6 \times 10 = 6$ .-/t. Gemäss der Formel {2} in Abb. 2 berechnet sich das Delta zwischen Referenzszenario und Alternativszenario wie folgt:  $\Delta = 62 + 6 - 72 = -4$  CHF/t Mischabbruch. Das Alternativszenario mit Behandlung ist also rund 4.-/t, respektive 7 % teurer als das Basisszenario, die Deponierung. Marktgetrieben wird das Material somit deponiert. Wird nun die Deponiegebühr von 50 CHF/t auf 60 CHF/t angehoben ergibt sich ein positives Delta:

$$\Delta = (12 + 60) + 6 - (35 + 12 + 0.4 \times 12 + 0.4 \times 60) = 6 \text{ CHF/t Mischabbruch.}$$

Das Rechenbeispiel zeigt, dass durch ein Anheben der Deponiegebühren um 10 CHF/t das Material marktgetrieben behandelt würde. Womit rund 60 % des behandelten Mischabbruchs dem Recycling zugeführt werden. Ist das Delta negativ, wird die Deponierung bevorzugt, ist es positiv wird die Verwertung favorisiert. Folgende zwei Entwicklungen wirken sich direkt auf die Deponiegebühr aus und begünstigen dadurch eine Materialrecycling:

1. Marktgetriebene Behandlung: Man überlässt den Entscheid «Behandlung oder Deponierung» der Marktwirtschaft. Wenn die Deponiepreise aufgrund der Verknappung des Deponieraums ansteigen, wird die Behandlung gegenüber dem Deponieren favorisiert.
2. Erzwungene Behandlung: Hier greift die Behörde in den Markt ein, z.B. um einen drohenden Deponieraumnotstand abzuwenden oder zumindest zu verzögern. Instrumente hierzu können z.B. «Behandlungsgebote» oder zusätzliche Deponieabgaben sein.

### **Schwerpunktthema 2: Ressourcenpotenzial: Deponiez Zwischenlager oder Deponieendlager?**

Unsere Bewertung des Ressourcenpotenzials, also der «zukünftigen Verwertbarkeit», geschieht ebenfalls durch einen wirtschaftlichen Ansatz. Material, welches sogar unter «best-case» Annahmen betreffend Deponiepreisentwicklung, Behandlungskosten und Produkterlösentwicklung voraussichtlich mittelfristig nicht kostendeckend behandelbar sein wird, wird dem Deponieendlager zugewiesen. Damit stellt sich die Frage, wie wir die zukünftige Entwicklung der wichtigsten Grössen in Gleichung {2} einschätzen sind vgl. Abb. 2. Mittelfristig ist von folgenden Entwicklungen auszugehen:

- Die Deponiegebühren werden um den Faktor 2 ansteigen (getrieben durch die

#### Deponieraumverknappung)

- Die Aufbereitungskosten werden sich halbieren (vor allem durch innovative Verfahren)
- Die Produktelöse werden um den Faktor 2 ansteigen (Verteuerung durch Ressourcenverknappung)

Die Zuweisung von Material zu den Kategorien «erzwungene Behandlung», «Deponiezwischenlager» und «Deponieendlager» erfolgt unter Verwendung der Annahmen, welche in Abb. 3 aufgeführt sind.

	marktgetriebene Behandlung → $\Delta > 0$
erzwungene Behandlung →	$\text{Vermiedene Deponiegebühr} \times 2 + \text{Produkterlös} - \text{Aufbereitungskosten} > 0$
Deponiezwischenlager →	$\text{Vermiedene Deponiegebühr} \times 2 + \text{Produkterlös} \times 2 - \text{Aufbereitungskosten} \times 0.5 > 0$
Deponieendlager →	$\text{Vermiedene Deponiegebühr} \times 2 + \text{Produkterlös} \times 2 - \text{Aufbereitungskosten} \times 0.5 < 0$

Abb. 3: Kriterien zur Kategorisierung der Abfallströme in die vier Kategorien «marktgetriebene Behandlung», «erzwungene Behandlung», «Deponiezwischenlager» und «Deponieendlager».

Die Kategorie «Behandlung» zerfällt dabei in zwei Unterkategorien. Die «marktgetriebene Behandlung» geschieht ohne regulatorische Eingriffe während bei der «erzwungenen Behandlung» die Deponiepreise durch regulatorische Eingriffe (z.B. Lenkungsabgabe) «künstlich» angehoben werden. Dies erscheint angesichts des in einigen Kantonen drohenden Deponieraumnotstandes als eine akzeptable Massnahme. Die Massnahme bewirkt, dass die Verwertung stark gefördert wird und der noch verfügbare Deponieraum signifikant gestreckt wird. Eine künstliche Erhöhung der Deponiekosten von bis zu 100 % wird als machbar und sinnvoll eingeschätzt. Ein aktuelles Beispiel ist die vom Kanton Basel-Landschaft im November 2023 beschlossene Sonderabgabe von 10-50 CHF/t auf deponierte Bauabfälle.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass für eine wirksame Lenkung der Materialströme kantonsübergreifende Massnahmen bzw. einheitliche (Mindest-)Preise notwendig sind. Werden kantonale Massnahmen umgesetzt, führt dies aufgrund der heute sehr tiefen Transportkosten vor allem zum Export von Abfällen in einen anderen Kanton.

Zu deponierendes Material wird den Klassen «Deponiezwischenlager» oder «Deponieendlager» zugewiesen, vgl. Abb. 3. Der bei diesen Annahmen zu berücksichtigende Zeithorizont beträgt 10-30 Jahre. Abschätzungen über längere Zeiträume sind bei der Zuweisung nicht sinnvoll, da die abgelagerten Materialien nach mehreren Jahrzehnten ohnehin praktisch nicht mehr rückholbar sind. Die Deponien werden nach mehr als 30 Jahren in der Regel geschlossen und renaturiert sein.

Es steht Dritten völlig frei andere Annahmen über die zukünftigen Preisentwicklungen zu treffen, die ihnen angemessener erscheinen (insbesondere unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten betreffend die Deponieraumverknappung). Der hier gewählte Ansatz ist methodischer Natur und die oben genannten konkreten Zahlen sind als «Platzhalter» zu bewerten. Diese sollen als quantitative Orientierungshilfe dienen und sind keine allgemeingültigen Vorschläge zur Beurteilung aller Schweizer Deponien.

Die Veränderung der Preisstruktur kann durch verschiedene Faktoren der Marktentwicklung

beeinflusst oder aktiv forciert werden. Die verschiedenen möglichen Treiber sind in Abb. 4 dargestellt.

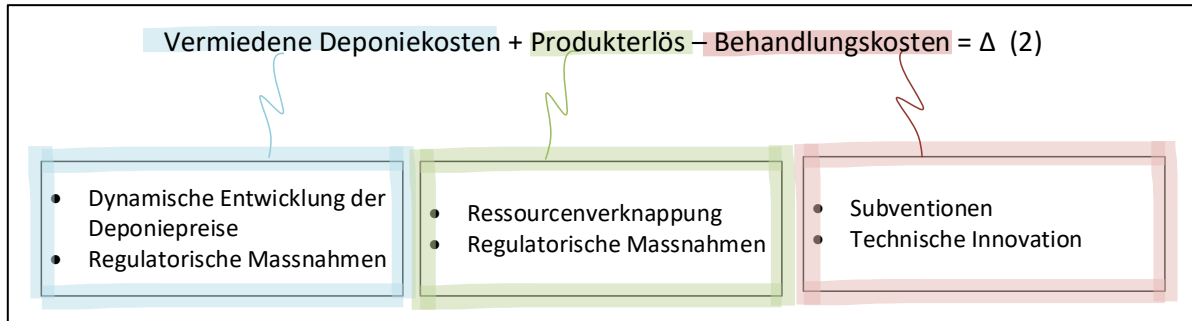


Abb. 4: Treiber, welche die Preisentwicklung der verschiedenen Preisfaktoren beeinflussen.

In den letzten Jahren wurde aufgrund der zunehmenden Deponieraumverknappung ein massiver Anstieg der Deponiepreise beobachtet. Auch in naher Zukunft wird mit keinem Abreissen dieses Trends gerechnet. Die Deponiepreise entwickeln sich somit dynamisch gemässe Angebot und Nachfrage. Alternativ können die Deponiepreise mit regulatorischen Eingriffen wie im Beispiel des Kantons Basel-Landschaft angehoben werden.

Auch bei einem in der Verwertung erzielten Produkterlös, gibt es mehrere mögliche Treiber. So wird in dieser Variable auch die Ressourcenknappheit abgebildet. Wird die Primärressource knapper und somit teurer, steigt automatisch auch der Preis, welcher die Abnehmer für die Sekundärressource zu bezahlen bereit sind, also der Produkterlös. Kann die Sekundärressource kostengünstiger als die Primärressource angeboten werden, so steigt die Nachfrage für die Sekundärressource sowie deren Preis. Der Absatz der Sekundärressource kann auch durch regulatorische Massnahmen beeinflusst werden. Beispielsweise könnte die öffentliche Hand bei ihren Bauvorhaben die Verwendung von Recyclingprodukten vorschreiben ("Vorbildfunktion der öffentlichen Hand"). Dadurch wird die Nachfrage nach den Recyclingbaustoffen erhöht. Auch die Behandlung von Mischabfällen kann durch Subventionen gezielt unterstützt oder durch das Forcieren von technischen Innovationen kostengünstiger gemacht werden.

### 2.2.1 Excel-Tool

Um die oben beschriebene Bewertung für die verschiedenen Abfallströme durchführen zu können, wurde ein Excel-Berechnungstool entwickelt, siehe Abbildung 5. Durch Auswahl der Abfallart und der gewünschte Aufbereitungsmethode werden auf Basis von hinterlegten Daten mögliche Kosten und Erlöse berechnet und gegenübergestellt. Die in Abbildung 5 dargestellte Berechnung bezieht sich auf das in Kapitel 2.2 «Schwerpunktthema 1: vorgängige Behandlung mit anschliessender Verwertung und evtl. Deponierung oder Direktdeponierung?» beschriebene Beispiel.

Abfallart: <b>Mischabbruch</b>		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Mischabbruchgranulat	Aufbereitungsart:	Trockenmechanische Aufbereitung >2mm
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	10	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	35
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	6.0	Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	12
<b>Summe Kosten Deponierung</b>		<b>Summe Produkterlös</b>		<b>Summe Kosten Behandlung</b>	
62		6		72	
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]		Produkterlös [CHF]		Aufbereitungskosten [CHF]	
62		6		72	
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
-4					

Abb. 2: Auszug aus unserem Excel Tool zur Bewertung der verschiedenen Ressourcen. Die gelben Kästchen können ausgefüllt werden, die restlichen werden aufgrund der Eingaben berechnet.

Bei dem in Abb. 5 berechneten Beispiel wurde links im gelb hinterlegten Feld aus einem Dropdown-Menü die zu untersuchende Abfallart «Mischabbruch» ausgewählt. In einem weiteren Schritt muss für die ausgewählte Abfallart eine der möglichen Aufbereitungsmethoden, rechts, ausgewählt werden. Die restlichen Felder füllen sich aufgrund der gesammelten und in einer Tabelle hinterlegten Daten von selbst aus.

Ganz links, im blauen Kasten, werden die vermiedenen Deponiekosten berechnet, in der Mitte der Produkterlös und rechts die Behandlungskosten. Der Produkterlös ist abhängig von der im Feld Behandlungskosten hinterlegten Verwertungsquote.

Alle farbig hinterlegten Felder bilden zusammen die Summe der jeweiligen Kategorie, während die grau hinterlegten Felder Zwischenergebnisse darstellen, die nicht direkt in das Ergebnis einfließen. Die berechnete Differenz zwischen Referenz- und Alternativszenario wird jeweils in der untersten Zeile angegeben. Das Beispiel in Abb. 5 zeigt, dass die trockenmechanische Aufbereitung einer Tonne Mischabbruch Mehrkosten von 4 CHF gegenüber der direkten Deponierung verursacht. Die als Berechnungsgrundlage erhobenen Daten sind im Excel-Tool in einer separaten Tabelle erfasst und einsehbar. Die verschiedenen Werte können je nach Fragestellung und Datengrundlage beliebig angepasst werden.



Mit Hilfe der im Excel-Tool integrierten Treiberfunktionen (in Abb. 6, farblich hervorgehobene Zeilen) werden die Auswirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren getestet und erprobt.

Abfallart:	Mischabbruch	1. Wählen Sie eine Abfallart	2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart
Vermiedene Deponiekosten		Produkterlös	Behandlungskosten
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Mischabbruchgranulat
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	10
Deponiegebühr [CHF/t]:	75	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	6.0
			Aufbereitungsart:
			Trockenmechanische Aufbereitung >2mm
			Aufbereitungskosten [CHF/t]:
			35
			Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:
			12
			Deponierung Aufbereitungsrückstand:
			Verwertung [%]:
			60%
			Deponierung [%]:
			40%
			Deponie Typ:
			Typ B
			Transportkosten auf Deponie [CHF]:
			4.8
			Deponiegebühr [CHF]:
			30
Summe Kosten Deponierung	87	Summe Produkterlös	6
			Summe Kosten Behandlung
			82
Treiber vermiedene Deponiekosten		Treiber Produkterlös	Treiber Behandlungskosten
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial[CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1.5	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1
			Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]
			1
3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.			
Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]			
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	87	Produkterlös [CHF]	6
			Aufbereitungskosten [CHF]
			82
Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]			
11			

Abb. 6: Auszug aus unserem Excel-Tool zur Bewertung. Im Vergleich zu Abb. 5 wurde hier durch Erhöhung der Deponiegebühr um 50 % (siehe Feld Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor Anstieg der Deponiegebühr]) anstatt eines Verlusts ein kleiner Gewinn von 11 Franken bei einer Verwertung im Vergleich zu einer Deponierung prognostiziert.

In dem in Abb. 6 dargestellten Beispiel wurde eine Erhöhung der Deponiegebühr um 50 % bei ansonsten unveränderter Kostenstruktur simuliert. Die Veränderung dieses Treibers führt zu einer Erhöhung der vermiedenen Deponiekosten sowie zu einer Erhöhung der Behandlungskosten aufgrund der erhöhten Deponiegebühren für den Rückstand. Im Beispiel führt eine Erhöhung der Deponiegebühr um 50 % dazu, dass der Verlust, der bei der Behandlung im Szenario nach Abb. 5 entsteht, entfällt und eine Behandlung ohne Mehrkosten möglich wird. Analog zu dem in Abb. 5 und Abb. 6 dargestellten Beispiel können beliebig viele Treiber getestet und miteinander verglichen werden.



### 2.3 Abgrenzung des Projekts

Die angewandte Methode bietet die Möglichkeit, die verschiedenen Einflussfaktoren zu integrieren und die Auswirkungen verschiedener Treiber aufzuzeigen. So bietet das entwickelte Excel-Tool z.B. die Möglichkeit, den Anstieg der Ressourcenpreise durch die Veränderung der Produkterlöse zu simulieren, während die anderen Faktoren unverändert bleiben oder den gewünschten dynamischen Veränderungen unterliegen. Die im Excel-Tool **hinterlegten Daten und Zahlen «Platzhalter», die je nach Fragestellung oder aktueller oder lokaler Datenlage durch andere Werte ersetzt werden müssen. Im Rahmen dieses Projektes wurde auf die Entwicklung der Methodik fokussiert. Die verwendeten Zahlen wurden auf Basis von Literaturrecherchen, Expertengesprächen und Branchenkenntnissen ermittelt und haben lediglich einen orientierenden Charakter.** Ziel des Projektes war ein Berechnungsmodell welches dynamisch auf Marktentwicklung eingestellt und welches die Simulation von verschiedenen Szenarien ermöglicht. Ressourcenpreise, Entfernungen und Kosten von Aufbereitungsanlagen etc. variieren national stark; um im Einzelfall sinnvolle Berechnungen zu erhalten, muss die Datenbank an die vorliegenden Gegebenheiten angepasst werden.

Im hier dokumentierten Projekt wurden die wichtigsten Abfallströme für Deponien des Typs B und D bewertet. Die Abfallströme für Deponien des Typs A wurden nicht berücksichtigt. Abfallarten, die auf einer Deponie des Typs C abgelagert werden, wurden aufgrund der überwiegend mineralischen und feinkörnigen Materialeigenschaften nicht näher bewertet. Es ist davon auszugehen, dass für Deponien Typ C ein eher geringes Verwertungspotenzial besteht. Bei den Deponien des Typs E besteht das grösste Potenzial für weitere Behandlung und anschliessenden Ablagerung auf einer anderen Deponie (1). Dies ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Studie.

## 2.4 Deponie Typ B

Eine umfassende Abklärung im Kanton Zürich hat ergeben, dass 57 % des zwischen 2010 und 2020 abgelagerten Materials in Deponiekompartimenten des Typs B entsorgt wurden (2). Die Deponiepreise für den Deponietyp B sind zwar im Vergleich zu den anderen Deponietypen (C, D, E) am tiefsten, weisen aber zurzeit eine stark ansteigende Tendenz auf. Konnten vor 10 Jahren noch Abfälle für ca. 15 CHF/t auf einer Deponie Typ B abgelagert werden, wird heute mit Preisen zwischen 30- 60 CHF/t gerechnet.

Für die Unterscheidung zwischen Behandlung, Deponieendlagerung und Deponiezwischenlagerung wurde in dieser Studie die 5 wichtigsten Abfallströme für Deponien des Typs B untersucht. Diese Abfallströme werden nachfolgend eingehend beschrieben.

### 2.4.1 Aushubmaterial

Die Kategorie Aushubmaterial umfasst, gemäss VVEA, Material, das bei Bauarbeiten ausgehoben oder ausgebrochen wird. Ausgenommen sind abgetragener Ober- und Unterboden. Rund zwei Drittel des gesamtschweizerischen Abfallaufkommens von ca. 54 Millionen Tonnen pro Jahr sind Aushub- und Ausbruchmaterial (3). Grundsätzlich wird beim Aushubmaterial eine möglichst vollständige Verwertung angestrebt. Unverschmutztes Aushub- und Ausbruchmaterial ist gemäss VVEA Art. 19 möglichst vollständig zu verwerten. Einzelne Kantone schreiben Verwertungspflichten vor, so wird z.B. im Kanton Zürich eine Verwertungsquote für verschmutztes Aushubmaterial von mindestens 50 % (2) vorgeschrieben. Wird Aushubmaterial nicht verwertet, muss es je nach Belastungsgrad auf Deponien des Typs A oder B abgelagert (3) werden. In den Jahren 2015-2020 wurden jeweils 1.2-2.2 Mio. t von schwach und wenig verschmutztem Aushub- und Ausbruchmaterial deponiert (3). Eine wesentlich kleinere Fraktion von 120'000-160'000 t pro Jahr wurde in Bodenwaschanlagen behandelt. Weiter wurden 16'000-120'000 t pro Jahr in Zementwerken als Ersatzrohstoff eingesetzt (3).

Generell hängt die Art der Aufbereitung und die Verwertungsquote des Aushubmaterials vom Verschmutzungsgrad und vom Feinkornanteil ( $< 0,063$  mm) ab (4, 2). Je feinkörniger und verschmutzter das Material ist, desto aufwendiger ist die Aufbereitung und desto geringer ist der als Kiessandersatz verwertbare Anteil und damit die Verwertungsquote. Als Aufbereitungsverfahren kommen die nass-mechanische Reinigung (Bodenwäsche) oder die thermische Behandlung in Zementwerken und Ziegeleien in Frage (4). Alternativ zur Aufbereitung wird Aushub- und Ausbruchmaterial teilweise auch direkt als Ersatzrohstoff in einem Zementwerk eingesetzt (3). Bei der Bodenwäsche wird das Material mit Wasser aufgeschlämmt und in einem Waschvorgang massiv mechanisch beansprucht, wodurch die schadstoffbelasteten Partikeloberflächen abgerieben werden. Das gewaschene Material wird in Korngrössen fraktioniert. Die Schadstoffe werden durch die Bodenwäsche in der Feinfraktion (Filterkuchen) aufkonzentriert (5). Der Filterkuchen wird anschliessend in einem Betonwerk oder einer Ziegelei thermisch behandelt oder muss deponiert werden (5). Bei der thermischen Behandlung wird das Aushub- und Ausbruchmaterial mit Prozesswärme erhitzt, wodurch die Schadstoffe in die Gasphase übergehen, und mangels Rauchgasreinigung in die Umwelt abgegeben werden (5).

Als Faustregel gilt, dass Kornfraktionen  $> 0.063$  mm baustofflich verwertbar sind (Kiessandersatz z.B. für die Betonherstellung) und die darunter nicht. Liegt der Feinanteil von schwach und gering belastetem Aushubmaterial bei  $< 30$  %, wird das Aushubmaterial in einer Bodenwaschanlage in die

verwertbaren Grobanteile und die nicht verwertbaren Feinanteile («Filterkuchen») fraktioniert. Aushubmaterial mit einem zu hohen Feinanteil (> 30 %) wird von Bodenwaschanlagen wegen des geringen verwertbaren Anteils an Grobkorn in der Regel zurückgewiesen (2). Bei der nassmechanischen Aufbereitung wird je nach Feinanteil mit einer Verwertungsquote von 50 - 85 % gerechnet. Die Kosten für die nassmechanische Aufbereitung des Materials liegen aktuell je nach Feinanteil und Verschmutzungsgrad zwischen 30 und 70 CHF/t.

Aufgrund der grossen Unterschiede wird das Ressourcenpotenzial für die Aufbereitung mittels Bodenwäsche für Aushubmaterial mit < 30 % Feinanteil und Aushubmaterial > 30 % Feinanteil separat berechnet, siehe Abb. 7 und Abb. 8.

Abfallart:	Aushub Feinanteil < 30 %	1. Wählen Sie eine Abfallart	2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>	<b>Behandlungskosten</b>
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Kies / Sand
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	20
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	14.0
<b>Summe Kosten Deponierung</b>	<b>62</b>	<b>Summe Produkterlös</b>	<b>14</b>
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>	<b>Treiber Behandlungskosten</b>
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial[CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>		<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>	
<b>Vermiedene Deponiekosten [CHF]</b>		<b>Produkterlös [CHF]</b>	<b>Aufbereitungskosten [CHF]</b>
62		14	95
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>		<b>-19</b>	

Abb. 7: Berechnung des Ressourcenpotenzials des Aushubs mit Feinanteil < 30 % bei einer nassmechanischen Aufbereitung.

Wie in Abb. 7 ersichtlich, wurde bei der nassmechanischen Aufbereitung von Aushub mit einem Feinanteil < 30 % mit einer Verwertungsquote von 70 % bei Aufbereitungskosten von 40 CHF/t gerechnet (4, 2). Im vorliegenden Szenario wurde der Filterkuchen auf die Deponie Typ E gebracht und das Produkt mit einem Preis von 20 CHF/t verkauft. Gesamthaft entsteht durch eine Behandlung somit ein Verlust von 19 CHF/t. Die Anpassung der Treiber gemäss Abb. 3 zeigen auf, dass die Abfallfraktion Aushub Feinanteil < 30 % der Kategorie «erzwungene Behandlung» zugeordnet werden kann. Dies ermöglicht eine Erhöhung der Deponiekosten von 50 CHF/t auf 75 CHF/t und somit eine marktgetriebene Behandlung der Abfallfraktion.

In Abb. 8 wird das Ressourcenpotenzial für den schwach und wenig verschmutzten Aushub mit Feinanteil > 30 % dargestellt. Mit dem erhöhten Feinanteil erhöhen sich die Kosten der nassmechanischen Aufbereitung bei gleichzeitiger Abnahme der Verwertungsquote, im Vergleich zu der Fraktion mit dem kleineren Feinanteil. Hierbei wurde eine Verwertungsquote von 50 % und Aufbereitungskosten von 70 CHF/t bei gleichbleibendem Produkterlös angenommen (4, 2).

Abfallart: Aushub Feinanteil > 30 %		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Kies / Sand	Aufbereitungsart:	Nassmechanische Aufbereitung (Bodenwäsche)
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	20	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	70
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t]:		Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	12
		Baustoff:	10.0		
				<b>Deponierung Aufbereitungsrückstand:</b>	
				Verwertung [%]:	50%
				Deponierung [%]:	50%
				Deponie Typ:	Typ E
				Transportkosten auf Deponie [CHF]:	6
				Deponiegebühr [CHF]:	65
<b>Summe Kosten Deponierung</b>	<b>62</b>	<b>Summe Produkterlös</b>	<b>10</b>	<b>Summe Kosten Behandlung</b>	<b>153</b>
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	62	Produkterlös [CHF]	10	Aufbereitungskosten [CHF]	153
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>-81</b>					

Abb. 8: Berechnung des Ressourcenpotenzials des Aushubs mit Feinanteil > 30 % bei einer nassmechanischen Aufbereitung.

Die in Abb. 8 dargestellte Simulation zeigt auf, dass bei der Behandlung der Fraktion mit einem Feinanteil > 30 % der Verlust bei einer Verwertung bis auf 81 CHF/t zunimmt. Die Anpassung der Treiber gemäss Abb. 3, zeigt auf, dass die Fraktion dem Deponiezwischenlager zugeteilt werden kann. Unter Annahme des «best-case» Szenario betreffend Deponiegebührenentwicklung, Aufbereitungskosten und Produkterlösentwicklung wird wenig und leicht verschmutzter Aushub mit einem Feinanteil > 30 % kostendeckend behandelbar sein.

Die Berechnungen mit dem in den Abb. 7&8 dargestellten Tool zeigen, dass unabhängig vom Feinanteil des Aushubmaterials bei der Aufbereitung mittels Bodenwäsche ein Verlust gegenüber der Deponierung entsteht. Während bei einem Feinanteil von < 30 % ein Verlust von ca. 19 CHF /t entsteht, beträgt dieser bei einer Bodenwäsche bei einem hohen Feinanteil (> 30 %) 81 CHF /t. Diese Berechnung wird auch durch die Analyse des AWEL gestützt, wonach die Behandlung des Materials in einer Bodenwaschanlage derzeit höhere Kosten verursacht als die Deponierung (2). Für die Fraktion mit

einem hohen Feinanteil ( $> 30\%$ ) sind die Bedingungen für eine Ablagerung im Deponiez Zwischenlager, siehe Kapitel Methodik, erfüllt. Bei einem Feinanteil  $< 30\%$  ist eine marktgetriebene nassmechanische Aufbereitung bereits bei einer Erhöhung der Deponiekosten von 50.-/t auf 75.-/t möglich, diese Abfallfraktion wird somit in die Kategorie erzwungene Behandlung eingeteilt.

Würde der Aushub thermisch behandelt werden, kann sogar mit einer Verwertungsquote von 100 % gerechnet werden, sofern die geltenden Grenzwerte des Ausgangsmaterials für die thermische Anlage (z.B. Zementwerk) eingehalten werden (4, 5). Aufgrund der hohen Kosten, der stringenten Auflagen an die Schadstoffgehalte und der begrenzten Annahmekapazitäten wird dieses Szenario hier nicht näher betrachtet. Interessant wird dieser Ansatz bei vorgegebenen Verwertungsquoten, wie sie beispielsweise im Kanton Zürich vorgeschrieben sind.

Für eine direkte Verwertung des Materials in einem Zementwerk, einer Ziegelei oder auch in einem Beton- oder Asphaltwerk muss das Material die Anforderungen an die Korngrössenzusammensetzung, den Fremdstoffanteil und den Schadstoffgehalt erfüllen (5). Daher kann nicht alles Material direkt verwertet werden. Wo dies jedoch möglich ist, lohnt sich die Verwertung allein durch die vermiedenen Deponiekosten in jedem berechneten Szenario. Limitierend sind hier die Anforderungen an das Material sowie die Annahmefähigkeit und -kapazitäten.

#### 2.4.2 Unter- und Oberboden

Im Kanton Zürich machen schwach und wenig belastete Unter- und Oberböden einen Stoffstrom von ca. 20 % in Deponien des Typs B aus (2). Die Verwertbarkeit von schwach und gering belasteten Böden hängt von der Zusammensetzung sowie der chemischen Belastung des Bodens ab. Ein hoher Tongehalt sowie eine hohe Schadstoffbelastung erschweren die Verwertung (6). Schwach belasteter Unter- und Oberboden werden heute in ungebundener Form als Auf- oder Hinterfüllung, zur Geländegestaltung oder als Schicht mit Trag-, Sicker- oder Gründungsfunktion wiederverwendet, sofern diese Verwertung am Ort des Anfalls (also in der Regel auf der Baustelle, wo dieser ausgehoben wurde, geschieht (7). Ist der Ober- und Unterboden wenig belastet oder besteht am Abfallort kein Bedarf für das Material, wird der Ober- und Unterboden als Rohstoff für die Herstellung von Baustoffen wiederverwendet. Abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung und den geotechnischen Eigenschaften wird die Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton und Asphalt oder als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung verwendet. Bedingung dafür ist jedoch, dass ein Abnehmer gefunden wird (6). Dies trifft jedoch nur für einen kleinen Anteil des Unter- und Oberbodens zu, da meistens die Anforderungen an die Gesteinskörnungen nicht erfüllt werden. Dies erfordert in der Regel eine teure, nassmechanische Aufbereitung.

Analog zu den Simulationen beim Aushubmaterial wird auch bei dieser Abfallfraktion zwischen Ober- und Unterboden mit einem hohen Feinanteil  $> 30\%$  und einer Fraktion mit einem kleinen ( $< 30\%$ ) Feinanteil unterschieden. Hierbei muss jedoch festgehalten werden, dass die Feinanteilfraktion im Ober- und Unterboden oft  $> 30\%$  ist. In Abb. 9 ist die Simulation für Ober- und Unterboden mit Feinanteil  $> 30\%$  dargestellt.

Abfallart: <b>Ober-/ Unterboden Feinanteil &gt; 30 %</b>		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Unter-/ Oberboden	Aufbereitungsart:	Nassmechanische Aufbereitung (Bodenwäsche)
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	40	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	70
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	16.0	Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	12
<b>Summe Kosten Deponierung</b>		<b>Summe Produkterlös</b>		<b>Summe Kosten Behandlung</b>	
62		16		167	
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]		Produkterlös [CHF]		Aufbereitungskosten [CHF]	
62		16		167	
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>-89</b>					

Abb. 9: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Ober- und Unterboden mit Feinanteil > 30 % bei einer nassmechanischen Aufbereitung.

Auch bei dieser Abfallart sind die Aufbereitungskosten und die Verwertungsquote bei der nassmechanischen Aufbereitung abhängig von dem Feinanteil. Bei dem in Abb. 9 gezeigten Beispiel wird mit Aufbereitungskosten von 70 CHF/t und einer Verwertungsquote von 40 % gerechnet. Mit einem Produkterlös von 40 CHF/t ergeben sich daraus Mehrkosten von 89 CHF/t bei einer Verwertung. Die Fraktion wird dem Deponiez Zwischenlager zugeteilt.

Da Ober- und Unterboden häufig einen hohen Feinanteil aufweisen, wird das Szenario mit einem Feinanteil < 30 % nicht im Bericht dargestellt.

Ist eine direkte Verwertung in einem Zementwerk, Ziegelwerk, Beton- oder Asphaltwerk möglich, so ist diese in allen betrachteten Szenarien wirtschaftlich. Da jedoch nur ein kleiner Anteil des Ober- und Unterbodens die Anforderungen an die Gesteinskörnungen erfüllt, wird auf dieses Szenario hier nicht weiter eingegangen.

Die Grenzen für eine Verwertung sind bei dieser Materialkategorie nicht von technischer, sondern von rechtlicher Natur (2). Eine Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Wiedereinbau von wenig belastetem Ober- und Unterboden würde eine erhebliche Entlastung von der Deponierung bewirken. Auch deswegen ist die Deponierung von schwach und wenig belastetem Ober- und Unterboden in einem «Deponiez Zwischenlager» sinnvoll, da aus technischer Sicht das Ressourcenpotential nicht ausgeschöpft ist.



### 2.4.3 Rückbaumaterialien

Rückbaumaterialien sind Abbruchabfälle aus der Bausubstanz (8). In der Schweiz fallen davon jährlich ca. 16-18 Mio. t an, wovon ca. 12 Mio. t rezykliert und ca. 6 Mio. t deponiert werden (3). Gemäss VVEA Art. 17.b. ist eine möglichst sortenreine Trennung der verschiedenen Bauabfälle eine wichtige Voraussetzung für die spätere Verwertung. Im Folgenden wird auf das Ressourcenpotenzial der verschiedenen Rückbaumaterialien näher eingegangen, da zwischen den einzelnen Materialklassen grosse Unterschiede bestehen. Deponierte Rückbaumaterialien landen, bis auf wenige Fraktionen, auf Deponien des Typs A oder B (3).

**Betonabbruch** ist Material, das durch Abbrechen oder Fräsen von Stahlbeton- oder Stahlbetonkonstruktionen gewonnen wird (8). Aufgrund seiner guten technischen Eigenschaften wird Betonabbruch bereits heute zu einem grossen Teil als Kiesersatz im Hochbau wiederverwertet. Der höhere Betonanteil in neueren Gebäuden sowie die bessere Materialtrennung beim Rückbau führen dazu, dass die Deponierung von Betonabbruch in Zukunft eine noch geringere Rolle spielen wird (3).

Abfallart: <b>Betonabbruch</b>		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Betongranulat	Aufbereitungsart:	Trockenmechanische Aufbereitung >2mm
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	20	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	35
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	13.0	Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	12
				<b>Deponierung Aufbereitungsrückstand:</b>	
				Verwertung [%]:	65%
				Deponierung [%]:	35%
				Deponie Typ:	Typ B
				Transportkosten auf Deponie [CHF]:	4.2
				Deponiegebühr [CHF]:	17.5
<b>Summe Kosten Deponierung</b>	<b>62</b>	<b>Summe Produkterlös</b>	<b>13</b>	<b>Summe Kosten Behandlung</b>	<b>69</b>
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	62	+	Produkterlös [CHF]	13	-
					Aufbereitungskosten [CHF]
					69
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>6</b>					

Abb. 10: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Betonabbruch bei einer trockenmechanischen Aufbereitung > 2 mm.

Auch die im Rahmen dieser Studie ermittelten Verwertungspreise decken sich mit der Beobachtung, dass eine Behandlung bereits heute marktwirtschaftlich sinnvoll ist, sofern eine saubere Materialtrennung auf der Baustelle erfolgt. Ein Beispiel ist hier in Abb. 10 dargestellt, wobei der Betonabbruch auf > 2 mm abgesiebt wird. Mit der Verwertung wird in diesem Szenario einen Gewinn von 6 CHF/t



erwirtschaftet. Bei dieser Abfallart wurden 5 verschiedene Aufbereitungsszenarien hinterlegt. Dabei wurden 4 verschiedene trockenmechanische Aufbereitungsverfahren (Absieben bei 16, 8, 4 und 2 mm) und die nassmechanische Aufbereitung berücksichtigt. Die Simulationen zeigen auf, dass trockenmechanisches Absieben bei einer kleineren Korngrösse Sinn macht. Der durch die erhöhte Verwertungsquote zusätzliche gewonnene Deponieraum überwiegt die höheren Verfahrenskosten. Mit den Berechnungen wird aufgezeigt, dass das Absieben bei höchstens 4 mm ökonomisch sinnvoll ist und auch eine nassmechanische Aufbereitung gewinnbringend betrieben werden kann. Diese Abfallfraktion ist somit der Verwertung zuzuführen.

**Mischabbruch** besteht aus einem Gemisch mineralischer Fraktionen von Massivbauteilen wie Beton- Ziegel-, Kalksandstein- und Natursteinmauerwerk (8). Von den jährlich anfallenden 2.4 Mio. t Mischabbruch werden heute bereits 70 % als Zuschlagstoff für Magerbeton verwertet. Die Verwertungsquote ist jedoch regional sehr unterschiedlich.

Abfallart:	Mischabbruch	1. Wählen Sie eine Abfallart	2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>	<b>Behandlungskosten</b>
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Mischabbruchgranulat
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	12	Produkterlös [CHF/t]:	10
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	3.0
<b>Summe Kosten Deponierung</b>		<b>Summe Produkterlös</b>	<b>Summe Kosten Behandlung</b>
62		3	
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>	<b>Treiber Behandlungskosten</b>
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial[CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>		<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>	
<b>Vermiedene Deponiekosten [CHF]</b>		<b>Produkterlös [CHF]</b>	<b>Aufbereitungskosten [CHF]</b>
62		3	
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>		75	
		<b>-10</b>	

Abb. 11: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Mischabbruch bei einer trockenmechanischen Aufbereitung von 8 mm.

Magerbeton kann im Tiefbau, z.B. zum Vergiessen von Rohren, eingesetzt werden. Mischabbruchgranulat wird im Vergleich zu Betongranulat zu einem tieferen Preis gehandelt. Dies bewirkt, dass für alle 5 simulierten Aufbereitungsarten ein leichtes Defizit bei der Behandlung im Vergleich zur Deponierung besteht. Dies bewegt sich im Bereich zwischen 15 und 1 CHF/t. Ein Beispiel wurde anekdotisch im Bericht in Abb. 11 abgebildet. Gemäss den Berechnungen entstehen bei einer Behandlung

von Mischabbruch Mehrkosten von wenigen Franken pro Tonne. Eine überkantonale Erhöhung der Deponiegebühr von 10 CHF/t, wie in Basel-Landschaft bereits umgesetzt, ermöglicht bereits eine marktwirtschaftliche Verwertung. Diese Abfallfraktion ist der Kategorie erzwungenen Behandlung zuzuordnen.

Weitere zukünftige Verwertungsmöglichkeiten, die heute noch nicht vollständig ausgenutzt werden, sind die Verwertung von Mischabbruch als Sand- oder Kiesersatz in Recyclingbeton oder als Zuschlagstoff in der Zementproduktion (3).

**Ausbauasphalt** mit Konzentrationen von < 250 mg PAK pro kg Asphalt darf bis auf weiteres auf Deponien des Typs B abgelagert werden, ab 2028 ist die Ablagerung jedoch nur noch auf einer Deponie Typ E möglich (9, 10). Diese jährlich anfallenden 2.1 Mio. Tonnen Ausbauasphalt werden heute fast vollständig verwertet (10). Da das schweizerische Strassennetz jedoch nahezu vollständig ausgebaut ist, sinkt der Bedarf an Asphalt und damit auch die Nachfrage an rezyklierbarem Ausbauasphalt (10). Studien zeigen, dass eine Erhöhung des zulässigen RC-Asphalts angestrebt werden muss, um eine Kreislaufwirtschaft zu erreichen (10). Anstelle einer Verwertung kommen nur die thermische oder die chemisch-physikalische Behandlung in Frage. Das Bindemittel wird dabei thermisch, chemisch oder physikalisch vom Asphalt abgetrennt (10). Die verbleibende Gesteinskörnung wird in der Mischgutproduktion oder als Kies-/Sandersatz wiederverwendet (10). Teilweise wird bereits heute Asphalt, meist mit einer höheren PAK-Belastung, zur thermischen Verwertung z.B. in die Niederlande transportiert, siehe Fallbeispiel Abb. 12. Die PAK-abgereicherte Fraktion wird als Recyclingkies mit einem Materialwert von 10 Euro/t weiterverkauft, die Betreiber der Aufbereitungsanlage in den Niederlanden verlangen zwischen 30-40 Euro/t für die Behandlung (11, 32). Aufgrund der langen Transportwege in die Niederlande ist die thermische Aufbereitung von Ausbauasphalt teuer. Entsprechend wurde dieser Abfallstrom nach den oben definierten Kriterien der Kategorie «Deponieendlagerung» zugeordnet. Würde jedoch mit gleichen Behandlungskosten und kurzem Transportweg (Behandlungsanlage in der Schweiz) gerechnet, hätte die Abfallart Ressourcenpotenzial und würde der Kategorie erzwungene Behandlung zugeordnet. Da für Ausbauasphalt mit Konzentrationen von > 250 mg PAK pro kg Asphalt, welcher heute auf Deponien des Typs E abgelagert wird, ab 2027 ein Deponierungsverbot gilt (9) und Deutschland ähnliche regulatorische Schritte erwägt (11), wird aktuell das Errichten einer Aufbereitungsanlage Ausbauasphalt, welche eine kostendeckende Behandlung des Stoffstroms ermöglicht, in räumlicher Nähe in Betracht gezogen (32). Der Abfallstrom Ausbauasphalt wurde daher der Kategorie «Deponiezwischenlager» zugeordnet.

<b>Abfallart:</b> Ausbausphalt PAK < 250 mg/kg		<b>1. Wählen Sie eine Abfallart</b>		<b>2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart</b>	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ B	Produkt:	Recyclingkies	Aufbereitungsart:	Thermische Aufbereitung
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]	12	Produkterlös [CHF/t]:	10	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	35
Deponiegebühr [CHF/t]:	50	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	9.5	Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	44
<b>Summe Kosten Deponierung</b>		<b>Summe Produkterlös</b>	<b>10</b>	<b>Summe Kosten Behandlung</b>	
<b>62</b>				<b>86</b>	
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	62	Produkterlös [CHF]	10	Aufbereitungskosten [CHF]	86
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>-15</b>					

Abb. 12: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Ausbausphalt PAK < 250 mg/kg bei einer thermischen Aufbereitung.

## 2.5 Deponie Typ D

Auf der Deponie Typ D werden hauptsächlich Verbrennungsrückstände abgelagert. Die vier grössten Massenströme auf der Deponie Typ D waren im Jahr 2022 KVA-Schlacken mit 709'000 t/a, Holzaschen mit 68'000 t/a, KVA-Filteraschen mit 51'000 t/a und Klärschlamm mit 45'000 t/a (12). Im Rahmen dieser Studie werden nur die oben aufgeführten grössten Abfallströme zur Deponie betrachtet, kleinere Abfallströme wie Bildschirmglas, verglaste Rückstände und mineralisches Kugelfangmaterial werden nicht berücksichtigt. Die Deponiepreise für die Ablagerung des Materials variieren je nach Art des abzulagernden Abfalls und nach Region. Die Ablagerung auf einer Deponie des Typs D ist in den letzten Jahren aufgrund der zunehmenden Deponieknappheit deutlich teurer geworden, und dieser Trend wird sich voraussichtlich fortsetzen. Für die meisten Abfälle wird mit einer Deponiegebühr von 100-200 CHF/t gerechnet.

### 2.5.1 KVA-Schlacke

Seit dem Jahr 2000 ist ein Anstieg des Siedlungsabfallaufkommens um 27 % zu verzeichnen (3). Dies spiegelt sich auch im jährlichen Schlacke aufkommen wider. Das Schlackenvolumen nimmt kontinuierlich zu, womit die Problematik des knappen Deponievolumens weiter verschärft wird (13). Um die Menge der anfallenden KVA-Schlacke zu reduzieren, werden verschiedene Handlungsansätze diskutiert. Zum einen kann die Menge des unverbrannten Kehrichts, der in die KVA gelangt, reduziert und

damit die anfallende Menge an KVA-Schlacke verringert werden. Alternativ wird eine End-of-Pipe-Lösung in Betracht gezogen, d.h. eine Reduktion der zu deponierenden Schlackenmengen durch deren Verwertung. KVA-Schlacke besteht hauptsächlich aus mineralischen und metallischen Bestandteilen. In diesem Bericht werden 3 alternative Szenarien mit dem aktuell gesetzlich vorgegebenen Referenzszenario, Metallrückgewinnung auf < 1 % Nichteisenmetalle und Deponierung des Behandlungsrückstandes, verglichen. Zum einen wurde eine verbesserte Abfalltrennung und -verwertung vor der KVA-Verbrennung bewertet, zum anderen verschiedene Szenarien zur verbesserten Aufbereitung der KVA-Schlacke nach der Verbrennung.

### **Szenario 1: Verbesserte Verwertung des KVA-Kehrichts**

Eine Studie über das Verwertungspotenzial von KVA-Abfällen in Zürich zeigt, dass die zu verbrennende Abfallmenge durch eine bessere Aussortierung vor der Verbrennung deutlich reduziert werden kann (14). Insbesondere beim sogenannten Marktkehricht, der Bau-, Gewerbe- und Industriekehricht umfasst, wären noch rund 34 % des an die KVA gelieferten Materials stofflich verwertbar (14). Würde die betriebliche Separatsammlung verbessert und/oder eine Sortierung vor der Verbrennung in der KVA zwischengeschaltet, würden im Kanton Zürich je nach Szenario zwischen 4 und 9 % der KVA-Fraktion vor der Verbrennung einer stofflichen Verwertung zugeführt und damit die anfallende Schlackenmenge entsprechend reduziert (14). Die Studie befasste sich mit Stoffströmen, die direkt und mehr oder weniger sortenrein aus dem Gewerbe, der Industrie oder der Bauwirtschaft stammen und beinhaltete keine detaillierte Analyse des Verwertungspotenzials von Hauskehricht. Eine schweizweite Analyse der Kehrichtsäcke aus dem Jahr 2022 zeigt weiter, dass sogar noch 21,1 % des anfallenden Hauskehrichts ein Verwertungspotenzial aufweisen (15). Da die weitere Sortierung und Verwertung von Hauskehricht jedoch aufwändiger und technisch schwieriger ist, basieren die Szenarien in diesem Bericht auf den im Kanton Zürich erhobenen Zahlen zum Verwertungspotenzial von Marktkehricht.

Im Durchschnitt führt die Verbrennung von 1 t Kehricht zu rund 200 kg mineralischen Rückständen (also rund 20 % Schlacke und Asche). Allerdings schlägt die Verringerung des Abfall-Inputs nicht unbedingt proportional auf die entstandene Schlackenmenge durch. So produziert Kunststoff bei der Verbrennung praktisch keine Schlacke. Eine aggressive Kunststoffsammlung würde die Schlackenmenge also nicht signifikant reduzieren und bliebe punkto Deponiekapazität D praktisch wirkungsneutral. Umgekehrt sind viele zur Verbrennung angelieferte Bauabfälle (Marktkehricht) sehr reich an mineralischen Anteilen (bis zu 50 %). Eine Erhöhung dieser Abfälle führt zu einem deutlich überproportionalen Anstieg der Schlackenmenge. Marktkehrichtsörtieranlagen nach dem Stand der Technik umfassen eine Zerkleinerung und / oder mehrere Sensorsortierungen. Die Sortierung ist in der Regel umso einfacher und kostengünstiger, je sortenreiner der Abfall angeliefert wird (14).

Die partielle stoffliche Verwertung von Marktabfällen ist durch die Herstellung von sortenreinen Fraktionen durch Sortierung möglich. Die Annahmepreise von Sortieranlagen sind stark von den angelieferten Materialien abhängig. Insbesondere der Aufwand zur Behandlung und der zu erzielende Erlös für die Recyclingfraktion bestimmen den Annahmepreis. Der Kanton Zürich schätzt aufgrund einer Umfrage die Kosten für die Sortierung und Verbrennung der nicht verwertbaren Fraktion aus Gewerbe und Industrie auf ca. 119 CHF/t pro Tonne Abfall und für Bauabfälle auf ca. 150 CHF/t. In dieser Studie wurde mit einem Mittelwert von 134.5 CHF/t gerechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass ca. 20 % des in der Sortieranlage angelieferten Materials einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Der Preis für die Verbrennung einer Tonne Kehricht in der KVA wird (angeliefert) auf 187 CHF/t geschätzt. Für die Sortierung des Abfalls vor der Verbrennung würden in diesem Szenario Mehrkosten von ca. 100 CHF entstehen. Je nach Material und Sortieranlage kann der Preis jedoch

stark variieren. Bei gut sortiertem und gut rezyklierbarem Material mit schlechtem Heizwert (also hohen mineralischen Anteilen) ist eine Vorsortierung wahrscheinlich schon heute wirtschaftlich sinnvoll.

Durch die in letzter Zeit vom Preisüberwacher angestossenen Senkungen der KVA-Annahmegebühren wird der Anreiz zur Vorsortierung des Materials weiter verringert. Diese Entwicklung hat zur Folge, dass mehr mineralisches Material zu den KVAs angeliefert wird, was sich direkt auf die Schlackenmengen auswirkt.

### **Szenario 2: Rückgewinnung verwertbaren Schlackenanteile**

Die Rückgewinnung von Metallen aus KVA-Schlacken bis  $< 1\%$  Nichteisenmetalle (auf 2 mm zerkleinert) ist gemäss VVEA Pflicht und Stand der Technik (9, 3). Die Metallrückgewinnung ist aufgrund der aktuellen Rohstoffpreise und der hohen Metallkonzentrationen in der Schlacke sogar bis weit unter das gesetzlich vorgegebene Maximum von 1% NE-Restmetallgehalt in der abgelagerten Schlacke lukrativ. In Schweizer KVA fallen jährlich rund 700'000 Tonnen Schlacken an, wovon im Jahr 2020 rund 92 % deponiert und 8 % in Form von zurückgewonnenen Nichteisenmetallen dem Recycling zugeführt wurden (13). Eine Untersuchung der verschiedenen Metallaufbereitungsanlagen hat gezeigt, dass viele den Grenzwert für die Metallrückgewinnung von  $< 1\%$  unterschreiten und Werte zwischen 0.5-0.1 % Nichteisenmetalle erreichen. Eine weitere Aufbereitung auf beispielsweise 0,1 % Nichteisenmetalle, was dem heutigen Stand der Technik entspricht, würde nur eine marginale Reduktion des Deponievolumens bedeuten und ist daher für die im Rahmen dieses Projektes behandelte Fragestellung nicht relevant.

Da eine weitere Abreicherung des Metallgehalts der Schlacke hinsichtlich der Deponiekapazität keinen Nutzen bringt, wird im Folgenden die Teilverwertung der mineralischen Fraktion diskutiert. Mögliche Ansätze zur Verringerung des zu deponierenden Volumens sind die Abtrennung und Verwertung von Eisen- und/oder Siliziumschlacken (16). Die Eisenschlacke wird bereits nach dem heutigen Stand der Technik abgetrennt, da die magnetischen Eigenschaften von eisenhaltigen Schlacken eine Separierung der Nichteisenmetalle mit dem Wirbelstromscheider verhindern. Untersuchungen der Universität Bern, Fachstelle Sekundärrohstoffe, haben gezeigt, dass ca. 30 % der anfallenden Schlacken aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften als Eisenschlacke abgetrennt werden können (13). Die Eisenschlacke enthält ca. 40 % FeO in Form von Magnetit, Wüstit und amorphen Eisen Phasen (13). Nach dem derzeitigen Stand der Technik wird der grösste Teil der gesammelten Eisenschlacke nach der NE-Abscheidung wieder mit der Schlacke vermischt und deponiert. Alternativ könnte die Eisenschlacke als Eisenkorrekturstoff in Zementwerken eingesetzt werden. Dies wird heute zum Teil bereits praktiziert. Allerdings werden dadurch am Eisen anhaftende Schwermetalle, insbesondere Kupfer, in den Beton eingeschleppt. Wie gross die Akzeptanz der Zementwerke und damit der Markt für Eisenreiche Schlackenfraktionen als Eisenkorrekturstoff ist, konnte im Rahmen dieser Studie nicht abschliessend geklärt werden. Da die Aufbereitung der Schlacke häufig auf dem Deponiegelände erfolgt und durch die separate Entsorgung der mineralischen Eisenschlacke keine zusätzlichen Kosten entstehen, ist die Verwertung der Eisenschlacke auch ohne Produkterlös in jedem Fall wirtschaftlich, wenn der Abtransport der Eisenschlacke und die allfällige Annahmegebühr des Empfängers (Zementwerk) tiefer liegen als die Deponiegebühr, siehe Abb. 13.

Abfallart: <b>KVA - Schlacke</b>		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ D	Produkt:	Eisenkorrekturstoff im Zementwerk	Aufbereitungsart:	Rückgewinnung Magnetschlacke
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	20	Produkterlös [CHF/t]:	15	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	0
Deponiegebühr [CHF/t]:	120	Produkterlös [CHF/t]		Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	20
		Baustoff:	4.5		
				<b>Deponierung Aufbereitungsrückstand:</b>	
				Verwertung [%]:	30%
				Deponierung [%]:	70%
				Deponie Typ:	Typ D
				Transportkosten auf Deponie [CHF]:	0
				Deponiegebühr [CHF]:	84
<b>Summe Kosten Deponierung</b>	<b>140</b>	<b>Summe Produkterlös</b>	<b>5</b>	<b>Summe Kosten Behandlung</b>	<b>104</b>
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	140	Produkterlös [CHF]	5	Aufbereitungskosten [CHF]	104
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>41</b>					

Abb. 13: Berechnung des Ressourcenpotenzials von der Rückgewinnung von Magnetschlacke aus der KVA-Schlacke.

Si-Schlacken enthalten erhöhte Anteile an Glas und Keramik und sind in ihrer chemischen Zusammensetzung im weitesten Sinne vergleichbar mit Mischabbruchfraktionen. Si-Schlacken werden nach heutigem Stand der Technik nicht als separater Stoffstrom erfasst, sie werden aufgrund ihrer helleren Färbung in einem weiteren Aufbereitungsschritt durch Sensorsortierung optisch aussortiert. Si-Schlacke könnte aufgrund ihrer geringeren Schadstoffbelastung auf Deponien des Typs B abgelagert oder als Rohstoff in Zementwerken und als Zuschlagstoff im Beton eingesetzt werden (13). Die Kosten für die Sensorsortierung werden auf ca. 75 CHF/t geschätzt, der Transport auf 20 CHF/t und der Produkterlös pro Tonne Siliziumschlacke auf 5 CHF/t. Daraus ergeben sich zusätzliche Kosten für die Aufbereitung von 56 CHF/t. Somit ist die Aufbereitung der Siliziumschlacke Momentan nicht kostendeckend möglich, die Abfallfraktion wird dem Deponiez Zwischenlager zugeteilt.



Abfallart: <b>KVA - Schlacke</b>		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ D	Produkt:	Rohmehlersatz, Betonindustrie	Aufbereitungsart:	Rückgewinnung Si-Schlacke
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	20	Produkterlös [CHF/t]:	5	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	75
Deponiegebühr [CHF/t]:	120	Produkterlös [CHF/t]:		Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	20
		Baustoff:	0.8		
				<b>Deponierung Aufbereitungsrückstand:</b>	
				Verwertung [%]:	15%
				Deponierung [%]:	85%
				Deponie Typ:	Typ D
				Transportkosten auf Deponie [CHF]:	0
				Deponiegebühr [CHF]:	102
<b>Summe Kosten Deponierung</b>	<b>140</b>	<b>Summe Produkterlös</b>	<b>1</b>	<b>Summe Kosten Behandlung</b>	<b>197</b>
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	140	Produkterlös [CHF]	1	Aufbereitungskosten [CHF]	197
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>-56</b>					

Abb. 14: Berechnung des Ressourcenpotenzials von der Rückgewinnung von Si-Schlacke aus der KVA-Schlacke.

Voraussetzung für die Umsetzung dieser Verwertung ist allerdings die Einhaltung der geltenden Grenzwerte gemäss VVEA. Diese sind jedoch technisch kaum zu erreichen. Eine Änderung der VVEA bezüglich der Verwertung von KVA-Schlacken wäre erforderlich und überdies müssten robuste Absatzmärkte für die Sekundärrohstoffe (Eisenschlacke, Siliziumschlacke) gefunden und etabliert werden.

Als weitere Option zur Reduktion des Abfallstroms der KVA-Schlacke in die Deponie Typ D wird die Verwendung als Schlackensand, aufbereitet nach dem sogenannten Genfer Verfahren, vorgeschlagen. Dabei wird die Schlacke direkt nach der Verbrennung neutral gewaschen, um Salze, Feinstoffe und organische Stoffe zu entfernen (17). Als nächster Schritt wird eine Zerkleinerung auf 1 mm vorgeschlagen, gefolgt von der Entfernung von Metallen. Der so gewonnene Schlackensand (60 % der ursprünglichen Masse) kann gemäss den Untersuchungen des HEPIA in Genf für die meisten üblichen Zementanwendungen verwendet werden (18). Bei geschätzten Aufbereitungskosten von 100 CHF/t zuzüglich Transportkosten von 20 CHF/t und Kosten für die Deponierung des Rückstandes von 56 CHF/t ergeben sich Aufbereitungskosten von 176 CHF/t, siehe Abbildung 15. Durch die hohen vermiedenen Deponiekosten von 140 CHF/t und einem Produkterlös von 3 CHF/t liegen die Mehrkosten einer solchen Aufbereitung nur um 33 CHF/t über den Kosten einer Deponierung. Durch die hohe Verwertungsquote von 60 % reagiert das System sehr stark auf die dynamischen Deponiekosten. Eine wirtschaftliche Verwertung von Schlacke in Form von Schlackensand wäre nur denkbar, wenn die



Vorgaben der VVEA angepasst werden. Die aktuellen Grenzwerte für Abfälle zur Verwendung als Zuschlag- und Zumahlstoffe werden von Schlackensand nicht eingehalten.

Abfallart: KVA - Schlacke		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
<b>Vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Produkterlös</b>		<b>Behandlungskosten</b>	
Deponie Typ:	Typ D	Produkt:	Schlackensand für Bauindustrie	Aufbereitungsart:	Neutrale Wäsche, Zerkleinerung < 1mm, Metallentfernung
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	20	Produkterlös [CHF/t]:	5	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	100
Deponiegebühr [CHF/t]:	120	Produkterlös [CHF/t Baustoff]:	3.0	Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	20
<b>Summe Kosten Deponierung</b>	<b>140</b>	<b>Summe Produkterlös</b>	<b>3</b>	<b>Deponierung Aufbereitungsrückstand:</b>	
				Verwertung [%]:	60%
				Deponierung [%]:	40%
				Deponie Typ:	Typ D
				Transportkosten auf Deponie [CHF]:	8
				Deponiegebühr [CHF]:	48
				<b>Summe Kosten Behandlung</b>	<b>176</b>
<b>Treiber vermiedene Deponiekosten</b>		<b>Treiber Produkterlös</b>		<b>Treiber Behandlungskosten</b>	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial [CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
<b>3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.</b>					
<b>Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]	140	Produkterlös [CHF]	3	Aufbereitungskosten [CHF]	176
<b>Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]</b>					
<b>-33</b>					

Abb. 15: Berechnung des Ressourcenpotenzials von der Rückgewinnung von Schlackensand für die Bauindustrie aus KVA-Schlacke.

### 2.5.2 KVA-Filteraschen

In der Schweiz fallen jährlich zwischen 70'000 und 80'000 Tonnen Filterasche an (3). KVA-Filteraschen dürfen gemäss VVEA sauer gewaschen auf einer Deponie des Typs D abgelagert werden. Alternativ können Filteraschen gemäss VVEA auch hydraulisch gebunden (verfestigt) auf einer Deponie des Typs D sowie des Typs C oder ohne Behandlung im Ausland in eine Untertagedeponie abgelagert werden. Nur bei der sauren Wäsche (FLUWA) wird das in der Flugasche enthaltene Zink zurückgewonnen. Im Jahr 2022 wurden von den schweizweit anfallenden 72'000 t Flugaschen rund 51'000 t in einer FLUWA sauer gewaschen und auf einer Deponie des Typs D gebracht (13). Da die Verbrennungsrückstände grosse Mengen an Eisen, Kupfer, Zink und Cadmium enthalten (3), sollen gemäss VVEA ab 2026 alle Filteraschen sauer gewaschen und deponiert werden. Hochrechnungen gehen davon aus, dass mit der erhöhten Deponierungsquote ab 2026 ca. 71'000 t/a Filterasche gewaschen werden, womit ca. 79'000 t/a Filterkuchen (Feuchtgewicht) anfallen, die deponiert werden müssen. Aus Sicht der Deponievolumenverknappung ist die saure Wäsche von Filteraschen nicht zwingend, denn durch die saure Wäsche von Filteraschen erhöht sich das zu deponierende Gewicht durch den

zusätzlichen Wassergehalt des Filterkuchens um 10 % (wobei allerdings das Volumen etwa gleichbleibt). Ökobilanzen zeigen jedoch, dass die FLUWA durch die Metallrückgewinnung eine hervorragende Umweltbilanz aufweist (19). Eine forcierte FLUWA mit erhöhter Metallrückgewinnung durch den Einsatz von Wasserstoffperoxid bringt zwar zusätzlichen ökologischen Nutzen, jedoch keine Entlastung des Deponievolumens.

Wird in einer so genannten «No-Gips-FLUWA» der Gips separat ausgefällt und sedimentiert, wird das Deponieren von Gips verhindert. Damit sind eine Volumenreduktion und auch zusätzliche Aufbereitungskosten verbunden. Die nötigen Daten für eine marktwirtschaftliche Beurteilung einer No-Gips-FLUWA fehlen.

### 2.5.3 Klärschlammasche

Im Jahr 2022 wurden 45'000 t Klärschlammasche auf Schweizer Deponien abgelagert, gemäss VVEA muss Phosphor aus Klärschlammasche bis 2026 zurückgewonnen und stofflich verwertet werden (9). Zurzeit werden verschiedene Verfahren zur Phosphorrückgewinnung entwickelt, von denen jedoch noch keines in der Schweiz grosstechnisch angewendet wird. Eine Abschätzung der Verfahrenskosten ist mangels Datengrundlagen sehr schwierig. Zudem wurde in diesem Projekt nur ein Verfahren berücksichtigt, obwohl verschiedene Verfahren parallel entwickelt werden. Bei weiteren Erkenntnissen oder spezifischen Bedürfnissen muss das Excel-Tool gezielt erweitert werden.

Abfallart: Klärschlammasche		1. Wählen Sie eine Abfallart		2. Wählen Sie eine Aufbereitungsart	
Vermiedene Deponiekosten		Produkterlös		Behandlungskosten	
Deponie Typ:	Typ D	Produkt:	Phosphorsäure	Aufbereitungsart:	Saure Laugung
Transportkosten auf Deponie [CHF/t]:	20	Produkterlös [CHF/t]:	1000	Aufbereitungskosten [CHF/t]:	467
Deponiegebühr [CHF/t]:	120	Produkterlös [CHF/t]		Transportkosten zur Aufbereitungsanlage [CHF/t]:	20
		Baustoff:	60.0		
				Deponierung Aufbereitungsrückstand:	
				Verwertung [%]:	6%
				Deponierung [%]:	80%
				Deponie Typ:	Typ B
				Transportkosten auf Deponie [CHF]:	16
				Deponiegebühr [CHF]:	40
Summe Kosten Deponierung	140	Summe Produkterlös	60	Summe Kosten Behandlung	543
Treiber vermiedene Deponiekosten		Treiber Produkterlös		Treiber Behandlungskosten	
Regulatorische Massnahmen bsp. Sonderabgaben [CHF/t]	0	Subventionen auf Recyclingmaterial[CHF/t]	0	Subventionen auf Aufbereitung [CHF/t]	0
Dynamische Entwicklung der Deponiegebühr [Faktor anstieg Deponiegebühr]	1	Ressourcenverknappung [Faktor anstieg Produkterlös]	1	Technische Innovation [Faktor abnahme Aufbereitungskosten]	1
3. Stellen Sie die gewünschten Treiber ein.					
Berechnung Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]					
Vermiedene Deponiekosten [CHF]		Produkterlös [CHF]		Aufbereitungskosten [CHF]	
140		60		543	
Verlust / Gewinn bei Behandlung [CHF/t]					
-343					

Abb. 16: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Klärschlammasche.

Der Businessplan für das Projekt Phos4life, das Phosphorsäure aus Klärschlammasche durch saure

Laugung gewinnt, erreicht eine Phosphorrückgewinnung von > 80 % (21). Die voraussichtlichen Behandlungskosten für das Verfahren wurden im Jahr 2019 auf 467 CHF pro Tonne Klärschlammasche ermittelt (20).

Bei der Rückgewinnung von Phosphorsäure aus Klärschlammasche fallen mit den Verfahren Phos4life mineralische Laugungsrückstände und Gips an. Beide Behandlungsrückstände werden entweder im Zementwerk verwertet oder auf Deponien des Typs B abgelagert (31). Im Rahmen dieser Studie wurde angenommen, dass diese Rückstände (80 %) auf einer Deponie Typ B abgelagert werden. Durch das Verfahren entstehen geringe Mengen eines Schwermetallkonzentrats und Schwefelsäure. Diese beiden Abfallprodukte wurden in den Berechnungen vernachlässigt. Beim Schwermetallkonzentrat aufgrund des kleinen Volumens und bei der Schwefelsäure durch den Umstand, dass diese weiteren Verwendungen zugeführt werden kann.

Die Berechnungen auf Basis der oben beschriebenen Daten zeigen deutlich, dass die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm in der Schweiz nicht marktgetrieben funktioniert. Unsere Berechnungen zeigen Mehrkosten von -343 CHF/t. Grösster Kostentreiber ist die Aufbereitung, die jedoch durch weitere Innovationen stark reduziert werden könnte. Die Anpassungen der Treiber zeigen, dass die Abfallfraktion in die Kategorie Deponiezwischenlager eingeordnet werden kann. Eine marktgetriebene Verwertung ist für die Zukunft nicht auszuschliessen.

#### 2.5.4 Holzasche

Durch die Förderung der Holzverbrennung ist zukünftig mit einer Zunahme von Holzaschen auf Deponien des Typs D zu rechnen (12). Für Rost- und Flugaschen wurde aufgrund der hohen Gehalte an Schwermetallen und löslichen Salzen kein realistisches Ressourcenpotenzial gefunden. Die Nutzung der Aschen als basische Neutralisationsmittel ist aufgrund des hohen Gefährdungspotenzials laut Branchenkennern nicht realistisch.

## 2.6 Diskussion

Die Analysen der verschiedenen Stoffströme auf den Deponien des Typs B und D haben gezeigt, dass mehrere Abfallströme der Kategorie Deponiezwischenlager oder sogar der Behandlung (marktgetrieben oder erzwungen) zugeordnet werden. Die wichtigsten Erkenntnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

*Tabelle 1: Zuweisung der verschiedenen Abfallarten in die Kategorien marktgetriebene Behandlung, erzwungene Behandlung, Deponiezwischenlager und Deponieendlager.*

Abfallart	Aufbereitungsart	Verlust / Gewinn bei Verwertung [CHF/t]	Kategorie
Aushub Feinanteil < 30 %	Nassmechanische Aufbereitung	-19	erzwungene Behandlung
Aushub Feinanteil > 30 %	Nassmechanische Aufbereitung (Bodenwäsche)	-81	Deponiezwischenlager
Ober/ Unterboden Feinanteil > 30 %	Nassmechanische Aufbereitung (Bodenwäsche)	-89	Deponiezwischenlager
Mischabbruch	Trockenmechanische Aufbereitung >8mm	10	erzwungene Behandlung
Mischabbruch	Trockenmechanische Aufbereitung >2mm	-4	marktgetriebene Behandlung
Betonabbruch	Trockenmechanische Aufbereitung >8mm	-3	erzwungene Behandlung
Betonabbruch	Trockenmechanische Aufbereitung >2mm	6	marktgetriebene Behandlung
Ausbauasphalt PAK < 250 mg/kg	Thermische Aufbereitung	-89	Deponiezwischenlager*
KVA - Schlacke	Rückgewinnung Magnetschlacke	41	Erzwungene Behandlung / Deponiezwischenlager**
KVA – Schlacke	Rückgewinnung Si-Schlacke	-56	Deponiezwischenlager
KVA - Schlacke	Neutrale Wäsche, Zerkleinerung <1mm, Metallentfernung	-33	Erzwungene Behandlung / Deponiezwischenlager**
Klärschlammasche	Saure Laugung	-343	Deponiezwischenlager
KVA-Filterasche	No Gips FLUWA	k.A.	Deponieendlager
Holzasche	-	k.A.	Deponieendlager

*\*Die Zuweisung in die Kategorie Deponiezwischenlager basiert auf der Annahme, dass eine Aufbereitungsanlage in räumlicher Nähe der Schweiz gebaut wird.*

*\*\*Die Verwertung ist momentan rechtlich nicht möglich.*

Insbesondere bei den auf Deponien des Typs B abgelagerten Abfällen ist das finanzielle Defizit bei

einer Verwertung gegenüber einer Deponierung gering. Die Verwertung vieler Abfallarten wird bei steigenden Deponiepreisen von 50 CHF/t auf 75 CHF/t rentabel. Alle diese Abfallarten wurden der Kategorie «marktgetriebene Behandlung» zugeteilt. Es ist daher davon auszugehen, dass aufgrund von steigenden Deponiepreisen in Zukunft weniger deponiert und mehr wiederverwertet werden wird.

Durch zusätzliche regulatorische Eingriffe könnte eine deutliche Reduzierung der Abfallmengen, die auf Deponien des Typs B abgelagert werden, erreicht werden. Ein möglicher Ansatz wurde im Kanton Baselland im Herbst 2023 mit einer Deponieabgabe umgesetzt (Lenkungsabgabe). Die Bevölkerung hat einer Deponieabgabe zwischen 10 und 50 CHF/t zugestimmt (22). Aktuell liegt die Abgabe bei 10 CHF/t. Zur Förderung des Baustoffrecyclings und zur Entlastung der Deponien ist dies nach unseren Berechnungen eine sinnvolle Massnahme.

Gespräche mit Branchenkennern und eine Literaturrecherche haben gezeigt, dass beispielsweise beim Baustoffkreislauf das Nadelöhr ein fehlender Markt für Recyclingprodukte ist (2). Die fehlende Akzeptanz von Sekundärrohstoffen in der Bauwirtschaft ist ein Hemmnis für die Kreislaufwirtschaft. Dieser Aspekt wird im hier vorgeschlagenen Modell nicht abgebildet. Die Zurückhaltung bei der Nutzung von Sekundärrohstoffen lässt eine Nachbehandlung der in den Deponiezwischenlagern abgelagerten Materialien unrealistisch erscheinen, da derzeit nicht einmal die Rückführung der laufend anfallenden, neuen Sekundärrohstoffe umgesetzt wird. Um die bereits im Kreislauf befindlichen Ressourcen besser zu nutzen, muss ein grundsätzliches Umdenken stattfinden. Dieses Umdenken kann durch das Setzen von Anreizen beschleunigt werden. Selbst wenn alle Rückbaumaterialien durch Recycling im Kreislauf geführt werden, decken diese bei gleichbleibender Bautätigkeit nur ca. 25 % des Baustoffbedarfs ab (3). Für die Rückführung von bereits abgelagertem Rückbaumaterial in den Kreislauf ist somit ausreichend Kapazität im System vorhanden.

Das mit Abstand grösste Verwertungspotential bei den Deponien des Typs D liegt bei den KVA-Schlacken. Eine stoffliche Verwertung von KVA-Schlacken sollte in Betracht gezogen werden. Die Uni Bern forscht intensiv an der Verwendung von KVA-Schlacken in Zement und Beton. Aufgrund des grössten Volumenstroms zur D-Deponie und der grössten denkbaren Volumenreduktion durch Nachbehandlung ist hier die mit Abstand grösste Einsparung an Deponievolumen zu erwarten.

Das Recycling von Rückbaumaterialien stösst aktuell auf politischer Ebene auf grosses Interesse. So wurden im Jahr 2023 gleich zwei Postulate zum Thema Baustoffrecycling eingereicht und vom Bundesrat beantwortet. Einerseits das Postulat Munz (20.3090): *Mehr Recycling statt Deponierung von Bauabfällen* und das Postulat UREK-N (21.4332): *Förderung des sparsamen Umgangs mit Deponieraum und des Recyclings von Baustoffen*. Während das Postulat Munz eine Bestandesaufnahme der aktuellen Deponiesituation und das Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung des Recyclings von Bauabfällen verlangt, fordert das Postulat UREK-N die Prüfung von Lenkungsabgaben auf die Ablagerung von Bauabfällen, so wie dies im Kanton Baselland bereits umgesetzt (3) wurde.

Das in diesem Bericht vorgeschlagene Deponiekonzept mit Zwischenlager für Abfälle mit Ressourcenpotenzial ist nur eines von vielen Konzepten, die diskutiert werden, um Kreisläufe besser zu schliessen. Andere Ansätze wie Materialbörsen und Umschlagplätze werden in diesem Bericht nicht weiter behandelt, bieten aber ebenfalls interessante Lösungsansätze.

Die maximale Verwertung von Abfällen ist nicht immer ökologisch sinnvoll. Beispielsweise kann eine technisch maximal mögliche Verwertungsquote zu verunreinigten Recyclingfraktionen und zu Schadstoffemissionen führen. Dies führt zwar zu einer Entlastung der Deponien, wird aber unter dem Strich zu einer Schädigung der Umwelt führen. Die Beurteilung der ökologischen Sinnhaftigkeit der

verschiedenen Verwertungsszenarien war nicht Gegenstand dieses Projektes. Der ökonomische und ökologische Nutzen und die Kosten einer solchen Verwertung könnten durch den sogenannten SEBI (Ökonutzenindikator (Specific-Eco-Benefit-Indicator)) quantifiziert werden. Dies muss vor der Umsetzung von Massnahmen in separaten Studien betrachtet werden.

### 3 Deponierecycling zwecks Schaffung von neuem Deponieraum

#### 3.1 Hintergrund

Gegenstand der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist die Untersuchung, inwieweit ein Deponierecycling zur Schaffung von neuem Deponieraum geeignet ist. Unter Deponierecycling wird die Auskoffierung des Deponieinhalts und die (teilweise) Verwertung des Deponieinhalts an anderer Stelle verstanden. Landfill-Mining" oder "Antico" sind Synonyme für das hier beschriebene Deponierecycling.

Primäres Ziel des Deponierecyclings ist der wirtschaftliche Erfolg durch die Schaffung (und den Verkauf) von neuem Deponieraum. Dazu angrenzende Bereiche sind «Deponierückbau» und «Wertstoffrückgewinnung aus Deponien». Auch in diesen beiden Fällen wird der Deponieinhalt ausgehoben und ggf. behandelt. Die primären Ziele sind jedoch unterschiedlich. Bei der Sanierung von Deponien ist in der Regel der Schutz von Wasser, Boden und Luft vor Schadstoffimmissionen die treibende Kraft (Beispiel Kölliken). Bei der Wertstoffrückgewinnung aus Deponien steht der wirtschaftliche Erfolg durch die Wertstoffgewinnung aus dem Deponiekörper im Vordergrund. Ein Beispiel hierfür ist die Gewinnung von Metallen aus den Ablagerungen alter KVA-Schlacken. Primärer Treiber ist der Metallenergieerlös, während die Schaffung von Deponieraum (ca. 5 %) ein Nebeneffekt bleibt.

Im Rahmen dieser Studie wird daher primär die Schaffung von neuem Deponieraum bewertet. Die gleichzeitige, ökologisch positiv zu bewertende Rückgewinnung von Ressourcen durch Deponierecycling spielt eine untergeordnete Rolle. Neben der Schaffung von neuem Deponieraum gibt es noch weitere Vorteile, die das Deponierecycling mit sich bringt:

- Wertvolle Rohstoffe (Metalle, Phosphor...) werden nach dem aktuellen Stand der Technik zurückgewonnen und Recycelt (wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen).
- Baustofflich verwertbare Anteile werden dem Recycling zugeführt (vor allem Kiessand zur Betonproduktion).
- Beim Recycling von Hausmülldeponien werden die KVA in Wintermonaten «auf Abruf» mit zusätzlichem (kunststoffhaltigem) Brennstoff versorgt, um mehr Fernwärme zu produzieren.
- Das Deponierecycling fügt sich in den aktuellen Gesetzesrahmen ein: Es ist keine Anpassung von Grenzwerten oder Einführung von Positivlisten nötig.
- Das Deponierecycling wird von der Bevölkerung möglicherweise besser akzeptiert als die Einrichtung neuer Deponien «auf der grünen Wiese».

Aufgrund der immer grösser werdenden Knappheit an Deponieraum und der schwierigen Suche nach neuem Deponieraum wird hier das Potential des Deponierecyclings untersucht. Durch die gestiegenen Deponiepreise wird Material, das früher aus wirtschaftlichen Gründen abgelagert wurde, heute gewinnbringend ausgehoben, aufbereitet und verwertet. Das Deponierecycling kann durch die Erlöse aus dem Verkauf des wiedergewonnenen Deponieraumes und für die gewonnenen Recyclingprodukte betriebswirtschaftlich attraktiv werden.

#### 3.2 Methodik

Ziel der Studie ist eine Grobabschätzung des gesamtschweizerisch durch Deponierecycling potenziell rückgewinnbaren Deponievolumens. Schwerpunkt ist die Abschätzung des Recyclingpotenzials von Deponiestandorten zur Schaffung neuen Deponieraums in den nächsten 10 Jahren. Dazu wurden in



einem ersten Schritt die verschiedenen Ablagerungsstandorte identifiziert und der mögliche Volumengewinn aufgrund der abgelagerten Abfallarten, deren Zugänglichkeit und der rechtlichen Situation abgeschätzt. Für Ablagerungsstandorte, für die in der Grobabschätzung ein hohes Potenzial festgestellt wurde, erfolgten weitere Abklärungen. Die Abklärungen erfolgten je nach Deponietyp in unterschiedlichem Umfang durch Befragungen der Kantone und Deponiebetreiber, Expertengespräche, Literaturrecherchen und Begehungen. Die verschiedenen Ablagerungsstandorte wurden im Detail besprochen und die jeweils angewandte Methodik wurde dokumentiert. Darüber hinaus wurden Beispiele diskutiert, bei denen bereits heute ein Recycling auf der Deponie durchgeführt wird.

In den folgenden Kapiteln werden Deponiestandorte hinsichtlich ihres Potenzials zur Schaffung von neuem Deponieraum bewertet. Eine weitere Unterteilung der Ablagerungsstandorte nach Betriebsphasen ist sinnvoll. Dabei werden die folgenden drei Gruppen unterschieden:

- Aktive Deponien in der Betriebsphase. Abgelagertes Material kann umgelagert, recycelt und/oder wieder abgelagert werden.
- Aktive Deponie in der Endphase. Das Deponierecycling würde eine Streckung der Betriebsbewilligung voraussetzen.
- Rekultivierte Deponie in der Nachsorgephase. Der Deponiekörper ist für grössere Erdbewegungen praktisch unzugänglich.

Am einfachsten ist das Deponierecycling bei aktiven Deponien also während der Betriebsphase. Dadurch können die erzeugten Rückstände ohne Transportaufwand direkt vor Ort wieder abgelagert werden. Für Deponien, die kurz vor der Schliessung stehen, ist zwar eine Verlängerung der Betriebsgenehmigung erforderlich, sie haben aber aufgrund der grossen abgelagerten Mengen, das grösste Potenzial.

Hinsichtlich der Genehmigungsverfahren (Baugenehmigung, Betriebsgenehmigung etc.) macht es keinen Unterschied, ob eine Altdeponie recycelt oder eine Deponie an einem neuen Standort "auf der grünen Wiese" errichtet wird. Der einzige Vorteil des Deponierecyclings mag in einer besseren gesellschaftlichen Akzeptanz liegen.

### **3.3 Ablagerungsstandorte**

Um das Potenzial des Deponierecyclings für die Schaffung von neuem Deponieraum abzuklären, wurden die verschiedenen Ablagerungsstandorte in der Schweiz systematisch beurteilt. Das Schema in Abb. 17 zeigt die Vorgehensweise. Die Ablagerungsstandorte wurden nach dem Zeitpunkt der Ablagerung und der Art der abgelagerten Abfälle unterschieden.

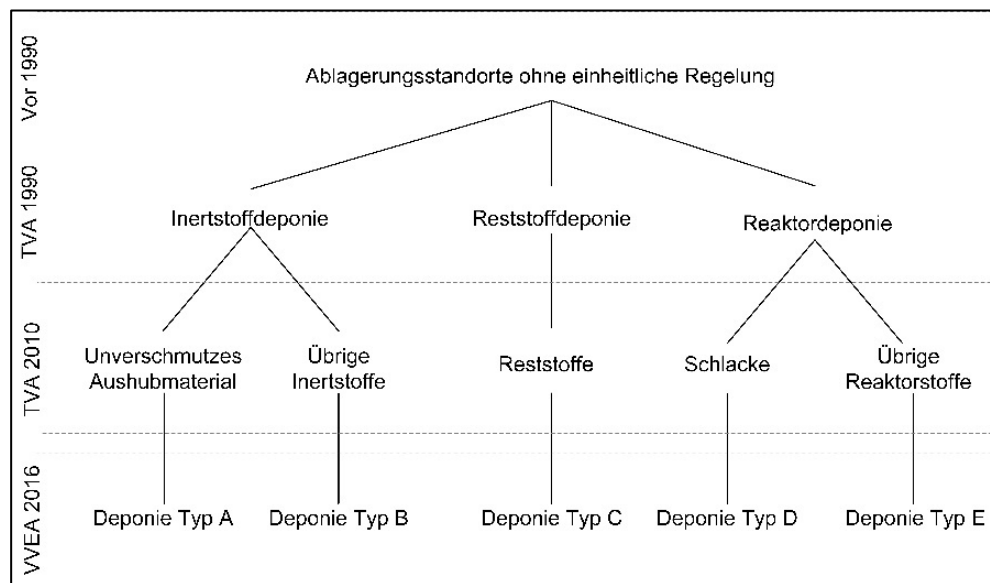


Abb. 17: Verschiedene Ablagerungsstandorte im Verlauf der Zeit.

Vor 1976 war eine Richtlinie über allgemeine Anforderungen an Standorte, Anlage, Betrieb sowie die Kontrolle von geordneten Deponien in Kraft. Die anfallenden Abfälle wurden oft in einer Grube in der Nähe der Gemeinde oder auf einem Betriebsgelände deponiert. In der Schweiz gibt es besonders viele Abfallgruben mit Siedlungsabfall. In solchen Gruben wurden die Abfälle aus den Haushalten einer Gemeinde abgelagert. Häufig handelt es sich um Ton- oder Kiesgruben, in denen zuvor das Baumaterial für das Dorf abgebaut wurde. Neben Siedlungsabfällen wurde auf diesen Deponien häufig auch Bauschutt abgelagert. Dabei handelt es sich überwiegend, aber nicht ausschliesslich, um unsortierte Bauabfälle. Diese Ablagerungsstandorte entsprechen in der Regel nicht den heutigen Anforderungen an eine Deponie. Sie werden daher als Ablagerungsstandort und nicht als Deponie bezeichnet. Wirkt sich ein Ablagerungsstandort negativ auf Mensch und Umwelt aus, wird dieser als Altlast eingestuft (23). Nur ein kleiner Teil der bekannten Ablagerungsstandorte sind auch Altlasten (23). Neben Ablagerungsstandorten kann auch ein Unfallstandort als Altlast eingestuft werden (23, 24). Im Rahmen des Projektes wurden nur Ablagerungsstandorte betrachtet.

Ab 1990 wurde mit der technischen Verordnung über Abfälle TVA eine gesamtschweizerische Strategie für die Ablagerung von Abfällen eingeführt. Dabei wurden die Deponietypen Inertstoffdeponie, Reststoffdeponie und Reaktordeponie geschaffen und damit erstmals die Ablagerung von Abfällen kategorisiert und Anforderungen an die Abfallablagerung gestellt. Mit den TVA-Teilrevisionen von 2009 und 2010 wurden die Inertstoffdeponie in die Kategorien "unverschmutztes Aushubmaterial" und "übrige Inertstoffe" und die Reaktordeponie in ein "Schlackenkompartiment" und "übrige Reaktorstoffe" unterteilt. Damit wurden faktisch 5 Deponietypen geschaffen. Mit dieser Revision wurden die rechtlichen Grundlagen weiterentwickelt und Anforderungen so wie Grenzwerte für die verschiedenen Abfallarten definiert. Im Jahr 2016 wurde schliesslich eine totalrevidierte TVA in Kraft gesetzt. Diese bildet heute unter dem neuen Namen VVEA die gesetzliche Grundlage für die Entsorgung von Abfällen. Die VVEA unterscheidet 5 verschiedene Deponietypen (A-E).

- Der **Deponietyp A** ist ausschliesslich unbelasteten Abfällen vorbehalten (unverschmutzter Aushub) und wird im Rahmen dieser Studie nicht weiter betrachtet (25).
- Auf der **Deponie Typ B** werden mineralische (und einzeln gekennzeichnete) Abfälle

abgelagert, die nachweislich die Anforderungen an die Grenz- und Eluatwerte einhalten (25). De facto handelt es sich ganz überwiegend um Bauabfälle.

- Der **Deponie Typ C** ist für metallhaltige, anorganische und schwer lösliche Abfälle vorgesehen. Diese Art von Abfällen sind häufig Behandlungsrückstände aus chemisch/physikalischen Anlagen.
- In **Deponien Typ D** dürfen nur Abfälle abgelagert werden, die in einer abschliessenden Liste aufgeführt sind (25). Dabei handelt es sich hauptsächlich um Verbrennungsrückstände, insbesondere aufbereitete KVA-Schlacke.
- Auf **Deponien des Typs E** wird ein breites Abfallspektrum abgelagert. Die einzige Anforderung ist, dass die geltenden Grenzwerte eingehalten werden und der Gesamtgehalt an organischer Substanz die folgenden Grenzwerte nicht überschreitet (25).

### 3.3.1 Ablagerungsstandorte vor 1990

Die Sanierung von Ablagerungsstandorten ist nur dann zwingend, wenn es sich um eine Altlast handelt. Es muss somit eine konkrete Gefahr für die Umwelt bestehen (23). Beweggrund für eine Altlastensanierung ist daher nicht die Schaffung von neuem Deponieraum, sondern ein Sanierungsbedarf gemäss Altlastenverordnung (AltIV, SR 814.680). Befinden sich solche Altlasten auf Flächen, die ggf. auch nach VVEA als Deponiestandorte D in Frage kommen, kann die nach der Sanierung verbleibende Grube ggf. als Deponie Typ D genutzt werden. Der Standort muss jedoch als Deponie neu bewilligt werden (26). Das Bewilligungsverfahren unterscheidet sich in diesem Fall nicht von einem normalen Deponiebewilligungsverfahren. Gemäss VVEA müssen dazu Baugenehmigung und Umweltverträglichkeitsprüfung eingeholt werden. Dies kann zu dem bekannten NIMBY-Effekt (Not In My Backyard) führen. Abklärungen haben gezeigt, dass nur die wenigsten früheren Ablagerungsstandorte die Anforderungen gemäss heutiger VVEA erfüllen. Daher wird es nur in seltenen Fällen möglich sein, einen sanierten Ablagerungsstandort als reguläre Deponie zu nutzen (26).

Die VVEA stellt in Kapitel 4, Abschnitt 5 verschiedene Anforderungen an mögliche Deponiestandorte. Einige wichtige Aspekte der Deponieplanung sind in Abb. 18 visualisiert. Eine Deponie des Typs D muss ein Mindestvolumen von 300'000 m<sup>3</sup> aufweisen. Eine Deponie mit kleinerem Volumen wird nur in Ausnahmefällen bewilligt (9). Diese Anforderung stellt eine erhebliche Einschränkung dar, da viele Ablagerungsstandorte, wie z.B. kommunale Hausmülldeponien, deutlich kleinere Volumina aufweisen. Um trotz dieser Anforderung die Anzahl möglicher Standorte für die Errichtung von Deponien des Typs D nicht zu stark einzuschränken, ist es sinnvoll, auch das Potenzial der Umgebung des Deponiestandes und nicht nur das Volumen der Deponie selbst zu berücksichtigen (27).

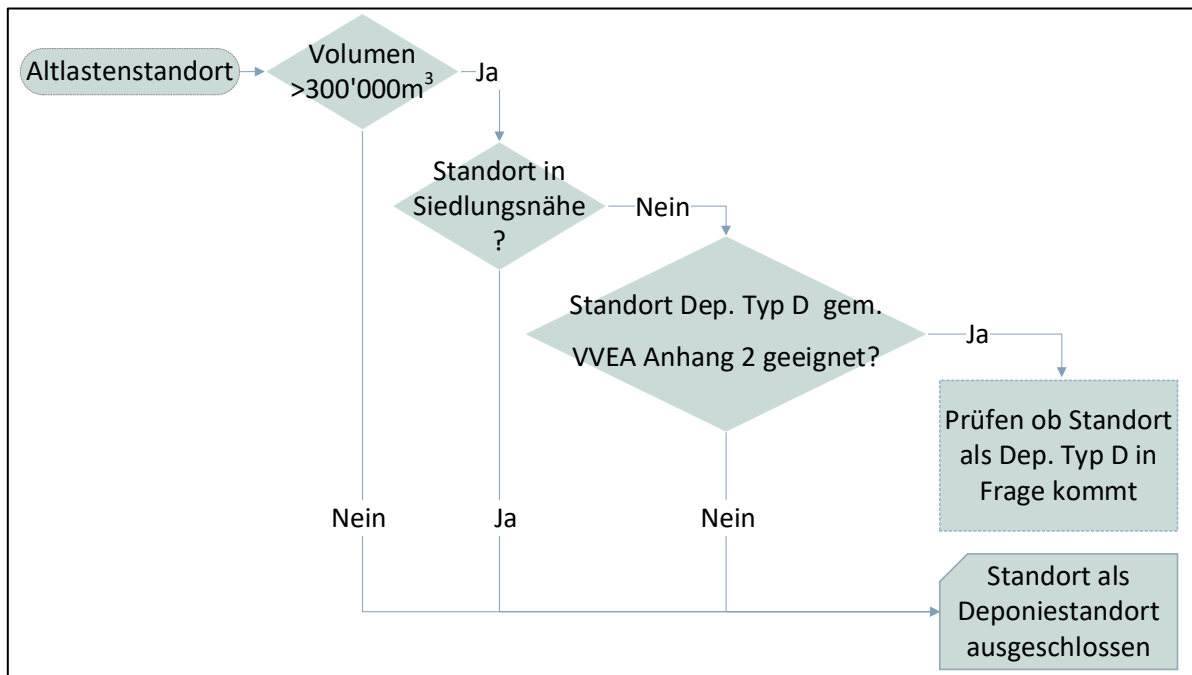


Abb. 18: Prüfung der Eignung eines Ablagerungsstandorts zur Schaffung einer Deponie nach VVEA.

Der Betrieb einer neuen Deponie in der Nähe von Wohngebieten ist gemäss VVEA, sofern die Anforderungen der Umweltverträglichkeitsprüfung an die Immissionen erfüllt werden, nicht verboten, aber erfahrungsgemäss schwierig durchsetzbar. Dieses Kriterium schliesst viele kommunale Hausmülldeponien als mögliche Kandidaten für das Recycling aus, da diese am Stadtrand errichtet wurden. Viele dieser Gebiete sind inzwischen von Wohngebieten umschlossen.

Altlasten befinden sich häufig an Standorten, die für die Errichtung einer Deponie nicht geeignet sind und eben deswegen sanierungsbedürftig wurden. So sind viele Ablagerungsstandorte vor 1990 in ehemaligen Kiesgruben errichtet worden. Dieser Untergrund ist wasserdurchlässig oder sogar wasserführend und daher für die Errichtung von Deponien nicht geeignet. Aus geologischer Sicht besser geeignet sind dagegen Altlastenstandorte, die durch Verfüllung ehemaliger Tongruben entstanden sind. Im Gespräch mit Kurt Morgan (Geschäftsführer NEROS) wurden einige Altlasten hinsichtlich ihrer zukünftigen Eignung als Deponiestandort diskutiert. Bei einer ad hoc Eignungsabschätzung gemäss des Schemas in Abb. 18 erfüllte jedoch keiner der von ihm in Betracht gezogenen Standorte alle Kriterien. Eine gesamtschweizerische Übersicht über die Standorte und Volumina dieser alten Hausmülldeponien existiert nicht. Die Daten werden von den Kantonen erhoben. Auswertungen der kantonalen Kataster weisen insgesamt 15'289 registrierte Ablagerungsstandorte mit einem Gesamtvolumen von ca. 500 Mio. m³ aus, wobei die jeweils eingelagerten Abfallarten und die einzelnen Depo-nievolumina nicht oder nur teilweise dokumentiert sind (26). Weitere Schätzungen des BAFU zeigen, dass zwischen 1930 und 2000 insgesamt ca. 50 Mio. Tonnen Siedlungsabfälle auf Deponien abgelagert wurden.

Die grosse Anzahl von Deponiestandorten könnte durch eine GIS-Suche nach den in Abb. 18 nach Kriterien gefiltert werden, um eine Vorauswahl zu treffen. Das AWEL hat die Ablagerungsstandorte im Kanton Zürich nach einem ähnlichen Verfahren untersucht (28). Dabei wurden ca. 3'200 Ablagerungsstandorte im Kanton Zürich durch ein speziell entwickeltes Ausschluss- und Bewertungsverfahren auf 187 Standorte reduziert (28). Die verbleibenden Standorte wurden einer Einzelfallprüfung

unterzogen und auf 40 Standorte reduziert, die potenziell als neue Deponiestandorte in Frage kommen (28). Auch diese Studie geht davon aus, dass die gesellschaftliche Akzeptanz steigt, wenn die bestehende Deponie (teil)saniert und durch Deponierecycling neuer Deponieraum geschaffen wird (28). Wird die Anzahl potenzieller Standorte für das Deponierecycling des Kantons Zürich bevölkerungsproportional extrapoliert, ergeben sich rund 240 potenzielle Standorte für die Schweiz.

### 3.3.2 Exkurs Tännlimoos



*Abb. 19: Deponiekörper des Muldengutkompartiments der Deponie Tännlimoos.*

Auf der Deponie Tännlimoos befindet sich ein Muldengutkompartiment, in dem ausschliesslich Baumischabfälle abgelagert wurden. Das Kompartiment umfasst ein Volumen von 500'000 t. Dieses Kompartiment wird aktuell zwecks Schaffung von neuem Deponieraum rezykliert; ca. 25 % des Kompartiments wurden bereits ausgebaut. Die Deponie und die Aufbereitungsanlage wurden im Rahmen dieses Projektes besichtigt und die Chancen und Risiken des Vorhabens mit den Betreibern diskutiert. Das aktuelle Verfahrensschema ist in Abb. 20 grob skizziert. Die abgelagerten Bauabfälle bestehen zu je einem Drittel aus brennbarem Material, Feingut und mineralischem Material. Das Feinmaterial (< 40 mm) ist stark belastet und wird auf der Deponie im Kompartiment Typ E abgelagert oder in ein Zementwerk gebracht werden. Das Grobgut > 40 mm soll zukünftig so aufbereitet werden, dass es baustofflich verwertet oder einem Zementwerk zugeführt werden kann. Die dritte Fraktion enthält viel Plastik und Holz sowie Mineralik, die nicht abgetrennt werden konnte. Dieses Material wird einer KVA zugeführt. Es hat einen niedrigen Heizwert und bildet aufgrund der enthaltenen Mineralien ca. 50 % Schlacke. Die Volumenreduktion ist daher gering und es muss viel Schlacke deponiert werden. Beim Deponierecycling werden durch Aufbereitung der Grobfraction und Verbrennung der "brennbaren Fraktion" insgesamt ca. 50 % des Volumens zurückgewonnen.

Die Besonderheit des Muldengutkompartiments der Deponie Tännlimoos besteht darin, dass es Teil einer aktiven betriebenen Deponie ist. Dadurch ist die Schaffung von neuem Deponieraum einfacher als bei einem bereits rekultivierten Ablagerungsstandort. Das Beispiel Tännlimoos zeigt, dass mit dem Deponierecycling von Muldengutkompartimenten viel neues Volumen geschaffen wird. Vergleichbare Kompartimente, die zugänglich sind und zu einem aktiven Deponiebetrieb gehören, gibt es in der Schweiz jedoch nur wenige.

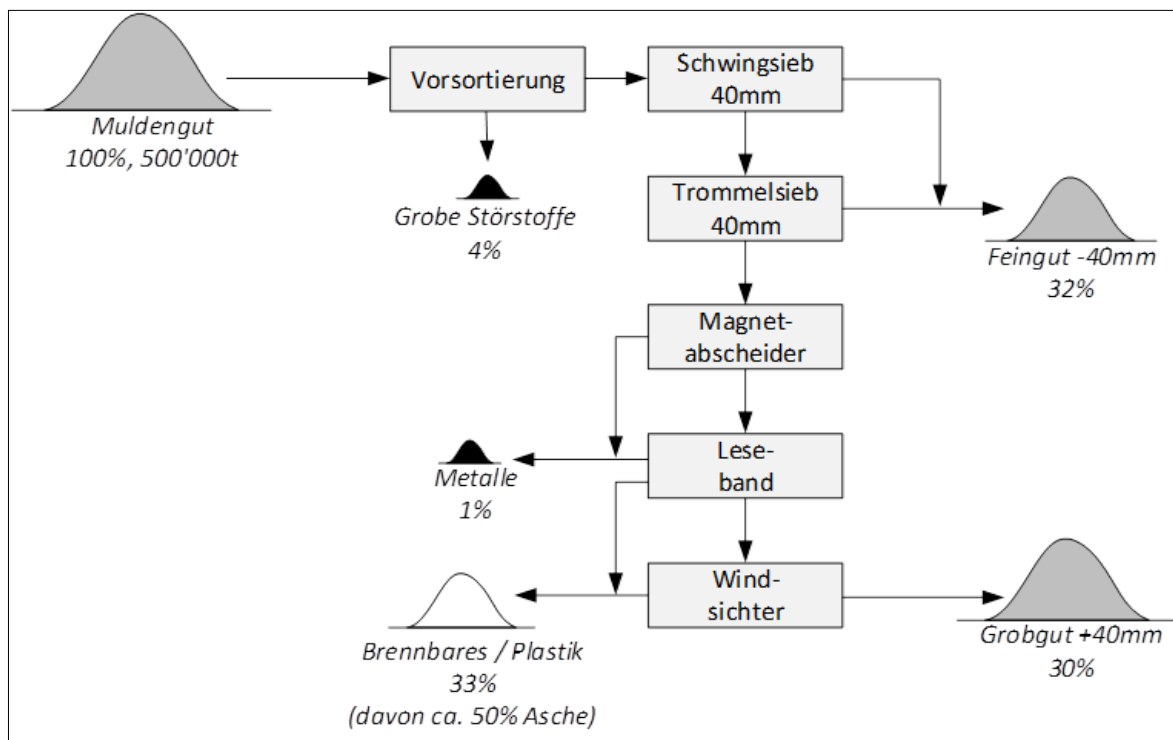


Abb. 20: Verfahrensschema Deponierecycling Tännlimoos.

### 3.3.3 Exkurs Stadtmist Solothurn

Die Altlast Stadtmist Solothurn besteht aus drei einzelnen Ablagerungsstandorten, die als solche im Altlastenkataster eingetragen sind. Die stillgelegten Ablagerungsstandorte wurden nacheinander (1925-1947 Standort Unterhof, 1947-1970 Standort Spitelfeld und 1970-1976 Standort oberer Einschlag) mit insgesamt 500'00 t Material aufgefüllt. Alle drei Standorte wurden aufgrund ihrer Gefährdung der Schutzgüter Wasser und Boden als sanierungsbedürftig eingestuft, siehe Abb. 21. Seit Einführung der AltIV (SR 814.680) (24) wurde der Ablagerungsstandort überwacht und beurteilt. Die Altlast wird totalausgehoben und saniert, die Kosten dafür wurden mit rund 120 Millionen CHF veranschlagt. Die Kosten werden vom Kanton und der Stadt Solothurn sowie auch von BAFU getragen (Altlastenfonds). Der Standort Stadtmist Solothurn kommt jedoch aufgrund der Nähe zum Siedlungsgebiet nicht als neuer Deponiestandort in Frage.

Aufgrund der abgelagerten Materialien ist die Sanierung der Altlast Stadtmist dennoch ein gutes Fallbeispiel für die Abschätzung des möglichen Volumengewinns durch Deponierecycling sowie der Chancen und Risiken eines solchen Unterfangens. Es zeigt eine mögliche Vorgehensweise für die



### Sanierung eines Deponiekörpers aus Siedlungsabfällen.

Der Deponiekörper hat eine Mächtigkeit zwischen 1.5 und 4.5 m, wobei diese gegen Westen zunimmt. Der Deponiekörper wurde mit einer 10-50 cm dicken Humusauflage übergedeckt. Wie in Abb. 21 dargestellt, sammelt sich das Sickerwasser aufgrund einer dichten Deponiesohle im Deponiekörper.



Abb. 21: Deponiekörper Altlast Stadtmist.

Das Deponiegut enthält im östlichen, älteren Teil neben einem hohen mineralischen Anteil auch Haus- und Gewerbemüll sowie Bauschutt. Das bereits ausgehobene Deponiegut ist im alten Teil der Deponie vor allem mit Radiumabfällen und im jüngeren Teil mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) belastet. Das Radium stammt aus Abfällen der Uhrenindustrie, insbesondere aus Zifferblattfarben. Der Gebrauch von Radium wurde in der Uhrenindustrie 1960 verboten, es ist jedoch davon auszugehen, dass auch in den Folgejahren noch geringe Mengen an radioaktiven Abfällen angefallen sind. Der Bund hat aufgrund fehlender Grenzwerte für PFAS auf Verordnungsebene für diese Sanierung standortspezifischen Grenzwerten zugestimmt. Aufgrund der entnommenen Stichproben ist davon auszugehen, dass vor allem im westlichen Teil des Deponiekörpers Spitzfeld und im Oberen Einschlag hohe PFAS-Belastungen auftreten. Da die PFAS-Problematik erst in jüngster Zeit in den Fokus gerückt ist, fehlen Erfahrungswerte und spezifische gesetzliche Ausführungsbestimmungen. Die Deponierung des anfallenden Materials gestaltet sich trotz Einhaltung des projektspezifischen Grenzwertes sehr schwierig, da Deponien des Typs B PFAS-belastetes Material aufgrund regulatorischer Unsicherheiten derzeit nicht annehmen.

Die Sanierung erfolgt durch den Aushub des Deponiekörpers und dessen Aufbereitung in einer eigens für das Projekt errichteten Aufbereitungsanlage. Auf der Anlage können zwei verschiedenen Aufbereitungsverfahren gewählt werden. Zum einen kann der Deponiekörper Trocken-, zum anderen Nassmechanisch aufbereitet werden. Welches Verfahren angewendet wird, hängt von der Materialzusammensetzung und der Materialfeuchte ab. Vor der Aufgabe des Materials auf die Aufbereitungsanlage wird es jedoch zuerst auf Radioaktivität geprüft. Im Anschluss wird vom Material, unabhängig von der Aufbereitungsart, das Grobeisen mittels eines Überbandmagneten abgetrennt. Nach der Separation der magnetischen Fraktion unterscheiden sich die Verfahrensschritte bei der Nass- und Trockenaufbereitung. Die Trockenaufbereitungsanlage verarbeitet hauptsächlich Material mit hohem



organischem Anteil und niedrigem Feuchtigkeitsgehalt. Das in der Trockenaufbereitungsanlage aufbereitete Material durchläuft eine Siebung, Windsichtung und Handsortierung. Material mit hohem Feuchtegehalt und hohem Mineralstoffanteil wird der Nassaufbereitung zugeführt. In einem ersten Schritt werden hier die organischen Bestandteile entfernt und anschliessend die verschiedenen mineralischen Fraktionen (Korngrössen) voneinander getrennt.

Die Anlage befindet sich noch bis im Frühling 2024 im Testbetrieb. Wie in Abb. 22 aufgezeigt wird, gehen die Betreiber momentan davon aus, dass 70-80 % der ausgehobenen Masse wieder deponiert werden muss. Es ist keine Bodenwäsche des mineralischen Aushubs vorgesehen, da dies ökonomisch als nicht sinnvoll eingeschätzt wird. Für die Erhöhung der Verwertungsquote wäre eine Bodenwäsche jedoch entgegen der ökonomischen Bewertung sinnvoll.

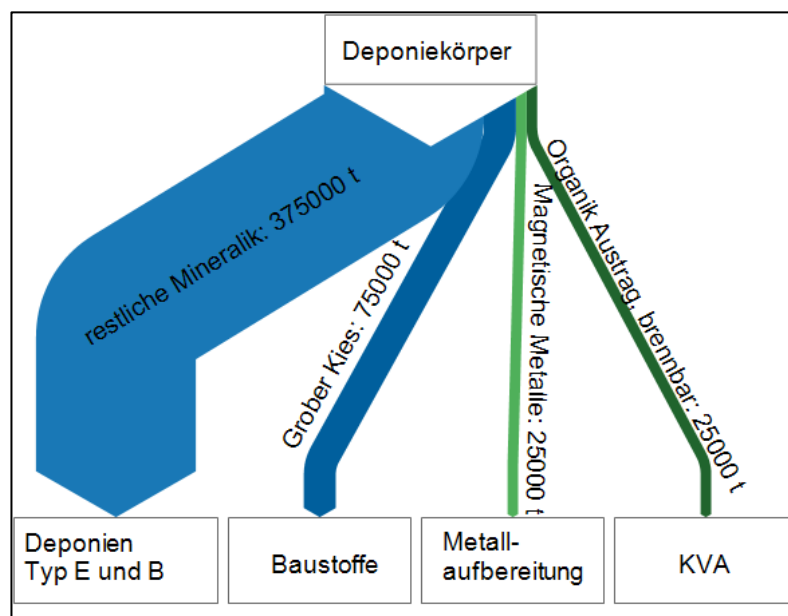


Abb. 22: Stoffströme nach der Aufbereitung der Deponie Stadtmist.

Treiber dieses Projekts ist nicht das Deponierecycling oder die Schaffung von neuem Deponieraum, sondern die Sanierung einer Altlast. Diese Case-Study zeigt jedoch gewisse Merkmale des Deponierecyclings sehr gut auf. Die Schadstoffbelastung des Deponiekörpers mit radioaktivem Material wie auch durch PFAS war in diesem Ausmass vor Sanierungsbeginn nicht bekannt und hat grosse Mehrkosten sowie auch Bauverzögerungen mit sich gebracht. Auch die vorangegangenen Sondierbohrungen haben das Ausmass der Schadstoffbelastung nicht hinreichend aufgezeigt. Der Volumengewinn ist mit 20-30 % auch bescheiden, wobei diesbezüglich technisch weitere Aufbereitungsschritte machbar wären.

### 3.4 Inertstoffdeponien / Deponie Typ B

Deponien des Typs B wurden erst mit der VVEA zum 01.01.2016 eingeführt. Vorgänger waren Bauschutt-, Aushub- und Inertstoffdeponien. Auf Deponien des Typs B sind einzeln bezeichnete Abfälle

zugelassen sowie andere mineralische Abfälle, sofern sie die Anforderungen an Grenz- und Eluatwerte nachweislich erfüllen (25). Aufgrund der mineralischen Beschaffenheit ist die Aufbereitung und Weiterverarbeitung für einen grossen Teil des Materials möglich. Das Verwertungspotenzial ist als hoch zu bewerten.

In der Schweiz gibt es 144 aktive Deponien des Typs B (29). Aufgrund der grossen Anzahl und des hohen Verwertungspotenzials besteht ein grosses Potenzial für das Deponierecycling. Das BAFU führt eine Liste der aktiven Deponien, Volumenangaben zur Ablagerungskapazität werden vom BAFU jedoch nicht erfasst. Die in der Nachsorge befindlichen Deponien sind nur bei den zuständigen Standortkantonen registriert. Im Rahmen des Projektes SENKATO wurde eine Umfrage bei 13 Kantonen bezüglich ihrer aktiven und stillgelegten Deponien des Typs B durchgeführt.

Die Umfrage wurde von den Kantonen Aargau, Graubünden, St. Gallen und Zürich mit Daten von total 30 Deponien umfassend beantwortet. Diese vier Kantone repräsentieren 1/3 des BIP und der Bevölkerung der Schweiz, so dass die Daten orientierend für die Schweiz insgesamt extrapoliert werden können. In den vier Kantonen befinden sich aktive Deponien des Typs B mit einem Gesamtvolumen von 15'400'000 m<sup>3</sup>, wovon 63% bereits verfüllt sind.

Die Umfrage bei den verantwortlichen Kantonen hat jedoch auch verschiedene Einschränkungen und Risiken aufgezeigt, die mit einem Deponierecycling verbunden sind.

- Sowohl von den Deponiebetreibern als auch von den Behörden wurde mehrfach angemerkt, dass ein eventueller Rückbau von bereits rekultivierten Deponien nur schwer durchführbar sei. Dies stösst in der Gesellschaft auf Unverständnis. Zudem werden für die Genehmigung und den Betrieb die gleichen Genehmigungen benötigt wie für die Errichtung neuer Deponiestandorte.
- Als weiteres Hindernis für ein Deponierecycling wurden im Deponiekörper dispersiv verteilte Schadstoffe wie Asbest und PFAS genannt. Unbekannte und schwer abschätzbare Risiken sind mit einem erneuten Aufgraben des Deponiekörpers verbunden. Die Befürchtung, dass diese Risiken würden zu einer «Kostenexplosion» nach Beginn des Recyclingprojektes führen (siehe «Stadtmist»), bestimmt die Entscheidung massgeblich.
- Ein wichtiger Hinderungsgrund für ein Deponierecycling bei den Deponien Typ B ist ein fehlender Absatzmarkt für das gewonnene Recyclingmaterial. Die Preise für Primärrohstoffe sind noch immer sehr niedrig, wodurch eine marktorientierte Nutzung eingeschränkt wird. Dieser Punkt ist rein betriebswirtschaftlicher Natur. Ansteigende Deponiepreise werden dieses Problem auf marktwirtschaftlicher Basis lösen. Theoretisch wäre bei stark steigenden Deponiepreisen sogar eine Abnahmeprämie vorstellbar, um den Absatz von Sekundärrohstoffen zusätzlich zu fördern.

In einigen Kantonen werden auch heute noch immer Materialien mit Verwertungspotenzial auf aktiven Deponien Typ B eingelagert. Dadurch scheint ein betriebswirtschaftlich erfolgreiches Deponierecycling derzeit schwer umsetzbar. Durch gesetzliche Anreize wie z.B. Behandlungspflicht, Lenkungsabgaben und Förderung der Akzeptanz von Recyclingbaustoffen kann der Materialfluss jedoch gelenkt werden. Solche Massnahmen werden am besten eingeführt, bevor die Deponieknappheit zu absurden Preissteigerungen führt.

In den Kantonen Aargau, Graubünden, St. Gallen und Zürich befinden sich zusätzlich zu den aktiven Deponien auch neun geschlossene Deponien. Diese haben einer Grösse zwischen 20'000 und 1'700'000 m<sup>3</sup>. Obwohl für die Errichtung einer neuen Deponie «auf der grünen Wiese» die gleichen

Genehmigungen eingeholt werden müssen wie für die Wiederauffüllung einer alten Deponie, könnte es sein, dass die gesellschaftliche Akzeptanz an einem bereits bestehenden Deponiestandort grösser ist, was zu weniger Einsprüchen in der Bewilligungsphase führen könnte. Eine Auswertung von Satellitenbildern geschlossener Deponien zeigt, dass rekultivierte Deponien des Typs B häufig in der Nähe von Siedlungen liegen. Diese rekultivierten Flächen wurden beispielsweise zu Naherholungsgebieten oder sogar Badeteichen umgestaltet. Es ist unwahrscheinlich, dass ein erneuter Aushub dieser Standorte von der Bevölkerung gutgeheissen wird.

#### 3.4.1 Case-Study Deponie Höli

Die Deponie Höli ist eine Deponie Typ B im Kanton Baselland. Diese Deponie wurde in kurzer Zeit mit grossen Mengen Bauschutt, darunter auch Material mit Ressourcenpotenzial, aufgefüllt. Insgesamt wurden rund 6.5 Mio. Tonnen Bauschutt und schwach bis wenig verschmutzter Aushub abgelagert. Durch die tiefe Deponiegebühr von 25.-/t wurde die Deponie nicht, wie ursprünglich geplant, in 45 Jahren, sondern in nur 13 Jahren gefüllt. Es wurde viel verwertbares Material unbehandelt deponiert.

Ein Recycling der Deponie Höli ist technisch machbar, wird aber derzeit nicht angestrebt. Die Deponie wurde lediglich als Fallbeispiel herangezogen, um die Möglichkeiten des Deponierecyclings auf einer B-Deponie aufzuzeigen. Die Kosten für die Ablagerung einer Tonne Material betragen gemäss aktuellen Angaben (Dezember 2023) auf der Website des Betreibers derzeit 50 CHF. Wird durch eine Aufbereitung mittels Grobsiebung eine Verwertbarkeit von 50 % erreicht, so ergibt sich pro aufbereitete Tonne die Hälfte des Volumens, die wieder freigelegt und verkauft werden kann. Dies ergibt einen Erlös von 25 CHF pro Tonne Aushubmaterial rein durch das gewonnene Deponievolumen. Wird mit Aufbereitungskosten von 15 CHF/t gerechnet, verbleibt ein Gewinn von 10 CHF/t. Folglich kann das zu mineralischen Baustoffen aufbereitete Material (Grobkorn) gratis oder sogar mit einer Abnahmegebühr abgegeben werden (z.B. «frei angeliefert» an eine Baustelle im Kt. BL). Das beim Deponierecycling anfallende grobkörnige Mischabbruchgranulat würde somit kostenneutral an die Baustelle geliefert. Das Material eignet sich Erfahrungsgemäss für die Produktion von Magerbeton. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur, wenn der Deponiepreis nicht 25 CHF/t sondern 50 CHF/t beträgt.

Viel von dem früher abgelagerten Material wäre mit heutiger Technologie recyclingfähig. Insbesondere die Grobkornfraktion ist baustofflich gut wiederverwertbar. Eine Aufbereitung lässt sich selbst mit mobilen "low-tech" Anlage vor Ort bewerkstelligen (Magnetabscheider, Trommelsieb etc. manuelle Nachsortierung der Grobgutfraktion ähnlich wie in dem Fließsdiagramm Tännlimoos in Abb. 20).

#### 3.5 Reststoffdeponie / Deponie Typ C

Auf Deponien des Typs C werden stark (schwermetall-) belastete mineralische Materialien abgelagert. Bei einer Aufbereitung werden nur geringe Mengen an wenig belasteten Materialien extrahiert. Das Potenzial für die stoffliche Verwertung ist bei diesem Deponietyp daher gering. Überdies sind die Inhalte von Deponien C häufig feinkörnig und für eine Aufbereitung zu Sekundärbaustoffen wenig geeignet. Auf Deponien C (respektive den früheren Reststoffdeponien) sind keine brennbaren Abfälle abgelagert. Das Potenzial für die Gewinnung von neuem Deponievolumen durch die Verbrennung der hier abgelagerten Abfälle ist praktisch null. Deponien C haben ein geringes Potenzial für das Deponierecycling. Daher wurden keine vertieften Untersuchungen durchgeführt.

#### 3.6 Schlackenkompartiment / Deponie Typ D

Auf den Deponien Typ D (früher «Schlackenkompartimente von Reaktordeponien») werden bzw. wurden vorwiegend Verbrennungsrückstände abgelagert. Die vier mit Abstand grössten Abfallströme auf Deponien Typ D sind:

- KVA-Schlacken,
- KVA-Filteraschen,
- Klärschlammaschen
- und Holzaschen.

Bei all diesen Abfallarten ist der Volumengewinn durch eine weitere Aufbereitung klein; das grösste Potenzial für ein Deponierecycling zwecks Schaffung von neuem Deponievolumen liegt bei alten Schlackenkompartimenten die ohne fortgeschrittene Metallrückgewinnung, also vor ca. 2010, abgelagert wurden. Nach Stand der Technik wird durch die Behandlung von KVA-Schlacke in einer Schlackenaufbereitungsanlage ein Volumengewinn von ca. 8 % erreicht (13). Wurde bereits vor der Deponierung ein Teil des Altmetalls aus der Schlacke entfernt, verringert sich das reduzierbare Volumen nochmals deutlich.

Hier wäre der hauptsächliche Treiber für ein Recycling nicht der Volumengewinn, sondern der Erlös durch den Verkauf der wertvollen Metalle (vor allem Nichteisenmetalle wie Al, Cu, Au). Ein solches Recycling ist in der Praxis wirtschaftlich, wie verschiedene Projekte gezeigt haben. Zum Beispiel das Recycling in der Deponie Elbisgraben im Jahr 2006, bei dem rund 100'000 Tonnen Schlacke verarbeitet wurden.

Im Jahr 2026 tritt die Phosphorverwertungspflicht in Kraft, welche das Deponieren von phosphathaltiger Klärschlammasche verbietet. Wird die Gesetzesänderung wie geplant umgesetzt, wird das bisher durch Klärschlammasche beanspruchte Deponievolumen Typ D für die Ablagerung anderer Rückstände, insbesondere KVA-Schlacke, frei. Durch die Phosphatextraktion wird das Volumen der Klärschlammasche nicht reduziert. Sofern die anfallenden Behandlungsrückstände nicht als Baustoff verwertet werden können, muss nach der Extraktion ein nahezu unverändertes Volumen abgelagert werden. Die Ablagerung dieser Rückstände erfolgt je nach Fraktion auf Deponie Typ B, Deponie Typ C oder Deponie Typ D.

Werden nach Eintreten der Phosphorverwertungspflicht nicht nur die laufend anfallenden Mengen Klärschlammasche, sondern auch die bereits früher deponierten Klärschlammaschen recycelt, wird durch das Recycling von Klärschlamm zusätzliches Deponievolumen Typ D freigesetzt.

### **3.7 Reaktordeponie / Deponie Typ E**

Die Ablagerung eines breiten Abfallspektrums ist unter Einhaltung der geltenden Vorschriften auf Deponien des Typs E (ehemalige Reaktordeponien) gemäss VVEA zulässig (25). Das Ablagern von brennbaren Abfällen ist seit 2000 verboten (3). Zuvor wurden in den Reaktorkompartimenten teilweise unbehandelte Siedlungsabfälle abgelagert, die einen hohen Anteil an brennbaren Stoffen enthielten. Ab 1973 wurde Siedlungsabfall in der KVA verbrannt, siehe Abb. 23. Durch die Verbrennung von Siedlungsabfällen wurde eine Volumenreduktion um etwa den Faktor 10 erreicht, wodurch viel Deponieraum eingespart werden konnte.

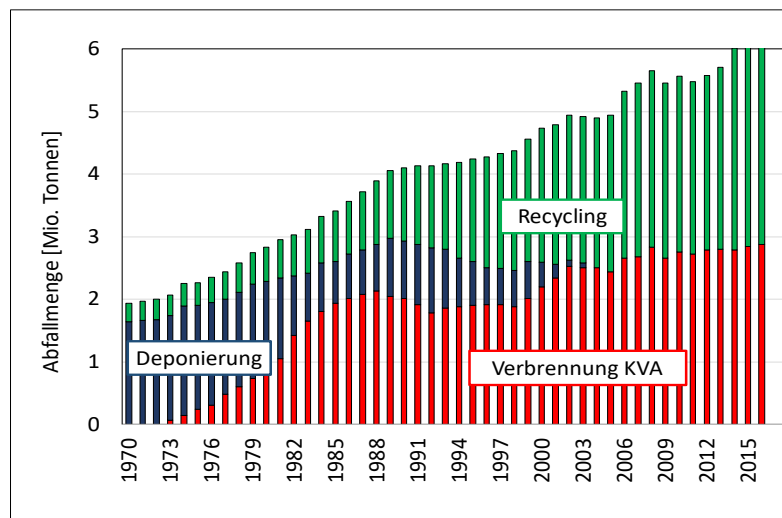


Abb. 23: Der Umgang mit Siedlungsabfällen zwischen 1970 und 2015. [Grafik BAFU, angepasst].

Im Rahmen der Studie wurden alle 24 Deponien des Typs E in der Schweiz befragt und 20 Deponiebetreiber haben geantwortet. Viele Deponiebetreiber lehnten die Idee des Deponierecyclings ab und begründeten dies mit folgenden Argumenten:

- Reaktormaterial liegt unter einer Endabdeckung / unzugänglich da bereits rekultiviert.
- Überschüttung mit grossen Mengen von anderem Material, welches umgelagert werden müsste.
- Schadstoffbelastung des Materials: Asbest, PAK, PFAS etc.
- Baustatik: das Material ist deponiebautechnisch nicht sehr stabil und eignet sich schlecht für die Anlage steiler Böschungen.
- Kein Platz für Umlagerungen und/oder Triage.
- Zu tiefer organischer Anteil um durch Verbrennung in einer KVA einen signifikanten Volumengewinn zu erzielen.
- Keine Motivation, da lokal keine Mangel an Deponieraum vorliegt.

Die Umfrage hat auch gezeigt, dass einige Deponien ein Deponierecycling des Reaktorkompartiments in Angriff nehmen. Sie befinden sich damit entweder in der Planung oder bereits in der Umsetzung. Das in den drei beschriebenen Deponien mittels Deponierecycling gewinnbare Deponievolumen E und D beträgt 346'333 m<sup>3</sup>. Zum Vergleich: Jährlich fallen in der Schweiz ca. 700'000 t Schlacken an. Auf der Basis des Umrechnungsfaktors der VBSA von 0.52 m<sup>3</sup>/t wird dafür ein Volumen von 364'000 m<sup>3</sup> benötigt. Die durch das Deponierecycling der drei Standorte frei werdende Kapazität würde somit die Lagerkapazität für KVA-Schlacke in der Schweiz um ca. 1 Jahr verlängern.

Die Projekte der drei Deponien werden nachfolgend beschrieben.

### 3.7.1 Deponie Tambrig/ZH

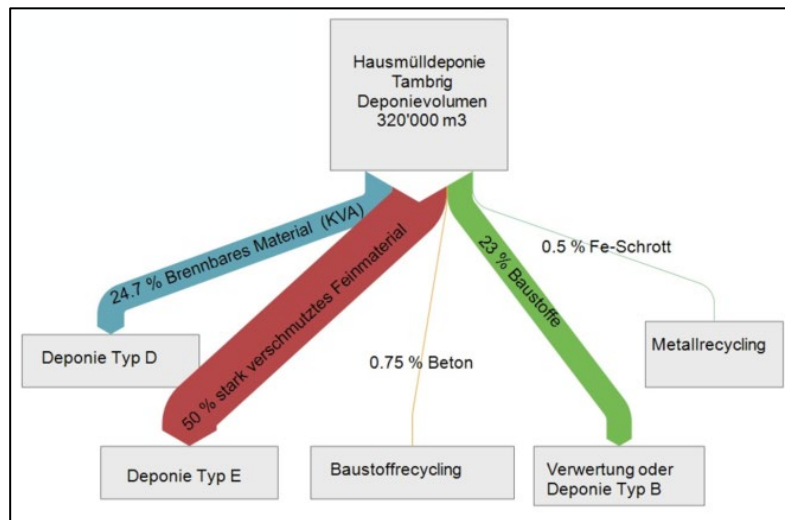


Abb. 24: Massenströme des Deponierecyclings des Hausmüllkompartiments der Deponie Tambrig.

Zur Deponie Tambrig gehört ein altes Siedlungsabfallkompartiment, welches seit 2015 ausgegraben wird und aktuell (Stand Juni 2023) zu 74 % aufbereitet ist. Das Kompartiment umfasste ursprünglich 320'000 m<sup>3</sup>. Die Aufbereitung erfolgt mittels Windsichtung und Siebung. Aufgrund der fortgeschrittenen Arbeiten liegen gute Daten zu den gewonnenen Fraktionen vor. Die Hälfte des ausgekofferten Materials besteht in Tambrig aus Feinmaterial, welches unmittelbar wieder im Kompartiment Typ E abgelagert wird. Ein Viertel der Auskoffung ist brennbares Material, welches in einer KVA verbrannt wird. Die entstehende Schlacke wird in Tambrig auf Deponiekompartiment Typ D abgelagert. Der Brennwert des Materials ist schlecht und die Volumenreduktion beträgt nur ca. 50 %. Die drittgrösste Fraktion (23 %) sind grobkörnige mineralische Baustofffraktionen, welche entweder für den Deponiebau verwendet oder auf einer Deponie Typ B abgelagert werden. Weiter werden kleine Mengen Beton für das Baustoffrecycling und auch geringe Mengen an Fe-Schrott zurückgewonnen. Die Betreiber geben an, dass die Verbrennung der des organischen Materials in der KVA teuer ist und das Deponierecycling bisher nicht kostendeckend war. Tambrig rechnet damit, dass die Kosten dank den steigenden Deponiepreisen gedeckt werden. Zusätzlich erhofft man sich Einsparungen durch einer einfachere Nachsorgephase ohne Gasüberwachung.

### 3.7.2 Deponie Alznach/ZG

Die Deponie Alznach plant ab 2024 einen Teil der Deponie zu sanieren. Das Abfallinventar der gesamten Deponie umfasst 1.3 Mio. Tonnen, die in 4 Etappen aufgefüllt wurden. Das zu rezyklierende Kompartiment wurde in den 1980er Jahren aufgefüllt und umfasst ein Volumen von 340'000 m<sup>3</sup>. Das Kompartiment ist überdeckt und rekultiviert, aber grundsätzlich zugänglich. Es enthält nach Angaben des Betreibers noch erhebliche Anteile an brennbaren Abfällen, Metallen und wenig belasteten gesteinsähnlichen Abfällen. Der Deponiebetreiber plant den schrittweisen Rückbau des Kompartiments.

Es ist vorgesehen, die Abfälle nach Eigenschaften und Belastung zu sortieren. Die brennbare Fraktion wird in einer KVA zugeführt, die Metalle werden dem Recycling zugeführt, die mineralischen Anteile werden als Baumaterial verwertet und der Rest wird deponiert. Erste Berechnungen wurden auf der Grundlage des Beispiels Tännlimoos gemacht. Die Betreiberin rechnet damit, dass sie auf ihrer

Deponie Typ E einen Volumengewinn von 2/3 erreicht. Nach dem Rückbau wird zusätzlich das Depo-  
nievolumen durch eine Vertiefung der Deponiesohle vergrößert werden. Die Hauptmotivation für  
das geplante Deponierecycling ist der erzielbare Volumengewinn. Die Betreiberin betont, dass dies  
nur aufgrund der hohen Deponiepreise und der Möglichkeit der Vertiefung des Kompartiments nach  
dem Rückbau wirtschaftlich möglich ist.

### 3.7.3 Deponie SEOD/JU

Die Betreiber der Deponie Bécourt (Jura) kann sich ein Recycling des Siedlungsabfallkompartimen-  
tes in 10 -15 Jahren gut vorstellen. Dort liegen 300'000 m<sup>3</sup> unverbrannter Siedlungsabfall. Mangels  
konkreter Daten wurden die Erfahrungen der Deponie Tambrig als Berechnungsgrundlage verwen-  
det. Gemäss diesen Berechnungen müssten von den 300'000 m<sup>3</sup> die Hälfte, d.h. 150'000 m<sup>3</sup> in das  
Kompartiment Typ E umgelagert werden. Zusätzlich werden 37'000 m<sup>3</sup> auf das Kompartiment Typ D  
verlagert. Daraus ergibt sich eine neu geschaffene Kapazität für die Deponien Typ E und D von rund.  
113'000 m<sup>3</sup>.



## 4 Diskussion

Die systematische Analyse der verschiedenen Ablagerungsstandorte hat gezeigt, dass insbesondere bei den Deponien Typ B und bei den ehemaligen Reaktorkompartimenten, die zumeist unterhalb der heutigen Deponien des Typs E liegen, ein Recyclingpotenzial zur Schaffung von neuem Deponieraum besteht. Auch bei ausgewählten Ablagerungsstandorten, die vor der Einführung der TVA 1986 verfüllt wurden, könnte ein Recycling zur Schaffung von neuem Deponieraum in Betracht gezogen werden. In diesem Fall wäre jedoch nach dem Recycling die Genehmigung eines neuen Deponiestandortes erforderlich, was mit vielen Hürden verbunden ist.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Markt für Sekundärrohstoffe auf Deponien des Typs B fehlt. Die Ursache hierfür ist schnell in den Preisen zu finden. Sekundärrohstoffe kosten am Markt etwa gleich viel wie Primärbaustoffe. In Regionen mit ausreichendem Deponieraum werden derzeit noch Abfälle mit Ressourcenpotenzial deponiert. Solange neu anfallende Abfälle nicht in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden, ist die Aufbereitung von Altdeponien nicht sinnvoll. Die Deponie- und Ressourcenpreise sind regional sehr unterschiedlich. Rein rechnerisch ist ein wirtschaftlich motiviertes Deponierecycling bereits heute bei Deponien des Typs B denkbar, wobei immer auch Abklärungen bezüglich der Schadstoffbelastung und der Verwertungsquote des Altmaterials gemacht werden müssten. Unsere Umfrage, die von den Kantonen Aargau, Graubünden, St. Gallen und Zürich beantwortet wurde, zeigt, dass deren Deponieraum derzeit zu ca. 63 % aufgefüllt ist. Wenn der Deponieraum knapper und damit teurer wird, ist ein betriebswirtschaftlich motiviertes Deponierecycling zu erwarten.

Die Analyse des Potenzials des Deponierecyclings vom Typ E zur Schaffung von neuem Deponieraum hat gezeigt, dass insbesondere bei den alten Reaktorkompartimenten, die noch erhebliche Mengen an brennbaren Siedlungsabfällen enthalten, ein Potenzial zur Schaffung von mehr Rückhaltekapazität besteht. In einer Befragung zeigten sich die Deponiebetreiber jedoch eher zurückhaltend, wobei Zugänglichkeit, Schadstoffbelastung, Platzmangel oder fehlende Motivation als häufigste Gründe für die Zurückhaltung genannt wurden. Einzelne Deponiebetreiber prüfen im Gegensatz zur Mehrheit dennoch ein Deponierecycling oder führen es bereits durch. Auf der Deponie Tambrig wird ein ehemaliges Hausmülldeponiekompartiment recycelt, die Deponie Alznach beginnt 2024 mit dem Recycling ihres Reaktorkompartiments und die Deponie SEOD schliesst ein Deponierecycling in 10 bis 15 Jahren nicht aus. Das rückgewinnbare Deponievolumen des Typs D und E dieser drei Deponien beträgt ca. 346'333 m<sup>3</sup>. Zum Vergleich: Für die Ablagerung der anfallenden KVA-Schlacke werden in der Schweiz jährlich ca. 364'000 m<sup>3</sup> Deponievolumen des Typs D benötigt.

Auch wenn derzeit noch grosse Zurückhaltung herrscht, könnten bei weiter steigenden Deponiepreisen und positiven Erfahrungen der Pioniere weitere Deponien ein solches Deponierecycling in Erwägung ziehen. Insbesondere das Argument der Zugänglichkeit ist relativ. Mit weiter steigenden Deponiepreisen wird auch der bezahlbare Aufwand zur Schaffung von neuem Deponieraum steigen. Bei einigen Deponien ist nach dem Rückbau eine Erweiterung des Deponievolumens durch eine Absenkung der Deponiesohle möglich. Dies führt zu einer weiteren Erhöhung des Deponievolumens und damit zu zusätzlichen Einnahmen. Diese Option muss bei der Prüfung eines Recyclingprojektes auf jeden Fall in Betracht gezogen werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- (1) Energie- und Ressourcen-Management GmbH. *Materiallisten für Verwertungs- und Entsorgungsoptionen von Deponietyp-E-Materialien. Kurzbericht: Zürich, 2023.*
- (2) AWEL. Analyse zum Verwertungspotential von deponierten Materialien, welche in Deponien des Typs B und E gelangen **2022.**
- (3) Bundesrat. *Abfallwirtschaft, Abfallvermeidung Abfallplanung, Messung. Bericht des Bundesrates in Erfüllung der Postulate 20.3062 Bourgeois vom 05.03.2020 20.3090 Munz vom 19.06.2020 20.3727 Clivaz vom 25.09.2020 20.4411 Gapany vom 07.12.2020 20.3110 Chevalley vom 12.03.2020 21.4332 UREK-N vom 11.10.2021: Bern, 2023.*
- (4) AWEL. Merkblatt Behandlungsregel für verschmutzte Bauabfälle und Aushub- und Ausbruchmaterial im Hinblick auf die Verwertung, AWEL, Juli 2020 **2020.**
- (5) EDV. *Zementwerk.*
- (6) Corsin Lang, Matias Laustela, Bruno Grünenfelder. *Beurteilung von Boden im Hinblick auf seine Verwertung. Verwertungseignung von Boden. Ein Modul der Vollzugshilfe «Bodenschutz beim Bauen».: Bern, 2021.*
- (7) Bundesamt für Umwelt BAFU. Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial **2021.**
- (8) BAFU, U. V. Modul Bauabfälle, Verwertung mineralischer Rückbaumaterialien: Ein Modul der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Ein Modul der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA). **2023.**
- (9) Bundeskanzlei, S. E. Verordnung vom 4. Dezember 2015 über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA), **2023, 1–50.**
- (10) Energie- und Ressourcen-Management GmbH. *Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz. Schlussbericht: Bern, 2020.*
- (11) Tobias Kisling. Klima: Warum Deutschland alte Strassen nach Holland karrt. *Hamburger Abendblatt*, Mar 21, 2022.
- (12) Gisela Weibel, Ed. *Den Überblick behalten! Welche Massenströme mit welchen Materialqualitäten gelangen auf unsere Deponien?, 2023.*
- (13) Weibel Gisela. *Projekt SENKATO, 2023.*
- (14) AWEL. *Stoffliches Verwertungspotential von KVA-Abfällen im Kanton Zürich, 2023.*
- (15) BAFU. *Bericht zur Erhebung der Kehricksackzusammensetzung 2022: Bern, 2023.*
- (16) Weibel, G., Ed. *KVA-Schlacke im Zementwerk - Ein Versuch, 2023.*
- (17) Daniel Chambaz, Ed. *KVA-Schlacke in Betonanwendungen, 2023.*
- (18) Elisa Chamot. *Valorisation des mâchefers et relargage des métaux dans le milieu aquatique, 2023.*
- (19) Boesch, Michael E. *Ökobilanzielle Untersuchung der sauren Wäsche von KVA-Flugasche in der Schweiz: Zürich, 2016.*
- (20) Schlumberger, Stefan. *Abschlussbericht: Phosphor-Mining aus Klärschlammasche, 2019.*
- (21) Stefan Schlumberger, Ed. *Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Phosphorrückgewinnung - geht es auch ohne Rückstände?, 2023.*
- (22) SRF. *Die Entsorgung von Bauschutt soll im Baselbiet mehr kosten. Die Entsorgung von Bauschutt soll im Baselbiet mehr kosten, 2023.* <https://www.srf.ch/news/schweiz/abstimmung-kanton->

baselland-die-entsorgung-von-bauschutt-soll-im-baselbiet-mehr-kosten.

- (23) BAV, Bundesamt für Verkehr. *Altlasten-Vollzug bei Unternehmen des öffentlichen Verkehrs*, 2014.
- (24) Schweizerische Bundeskanzlei (KAV). Verordnung vom 26. August 1998 über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV).
- (25) BAFU. Deponien. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/abfallentsorgung/deponien.html>.
- (26) Reto Tietz Sektionschef BAFU, Abteilung Boden und Biotechnologie, Sektion Altlasten. *Potenzial Deponierecycling* [E-Mail], 2023.
- (27) Klaus Morgan. *Potenzial Deponierecycling von Altlasten* [Online-Meeting], 2023.
- (28) Basler&Hofmann. Gesamtschau Deponien TP2: Evaluation Landfill-Mining Phase 1: Kurzdokumentation Standortauswahl 2022.
- (29) BAFU. eGovernment UVEK: Abfall und Rohstoffe. <https://www.uvek.egov.swiss/de/abfall-rohstoffe>.
- (30) Textor, S.; Philip Küttel; Claudia Bonetti. Koordination Abfall- und Deponieplanung Zentralschweiz: Modul 1: Deponien Typ B, C, D, E, 2018, 1–54.
- (31) Mehr, J; Hellweg S; Zürich, Eth. Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mittels Phos4life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat, 2018.
- (32) Alexander Flacher; Eric Säuberli (2021): Bewirtschaftung von bituminösen Abfällen in der Schweiz. Hg. v. CSD INGENIEURS SA. Carouge.

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Aus der Behandlung resultieren Produkte, die entweder verwertbar sind oder endlagerfähig. Die endlagerfähigen Fraktionen werden in Deponien abgelagert. Behandlungsprodukte mit Ressourcenpotenzial werden zwecks "Rückholbarkeit" unbunden und möglichst u.....	1
Abb.2: Formel zur marktwirtschaftlichen Bewertung der Ressourcenpotenzial der verschiedenen Abfallströmen. ....	4
Abb.3: Kriterien zur Kategorisierung der Abfallströme in die drei Kategorien «Verwertung», «Deponiez Zwischenlager» und «Deponieendlager». ....	5
Abb.4: Treiber, welche die Preisentwicklung der verschiedenen Preisfaktoren beeinflussen. ....	5
Abb.5: Auszug aus unserem Excel Tool zur Bewertung der verschiedenen Ressourcen. Die gelben Kästchen können ausgefüllt werden, die restlichen werden aufgrund der Eingabe berechnet. ....	7
Abb.6: Auszug aus unserem Excel-Tool zur Bewertung durch Treiber.....	8
Abb.7: Berechnung des Ressourcenpotenzials des Aushubs mit Feinanteil < 30 % bei einer Nassmechanischen Aufbereitung.....	11
Abb.8: Berechnung des Ressourcenpotenzials des Aushubs mit Feinanteil > 30 % bei einer Nassmechanischen Aufbereitung.....	12
Abb.9: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Ober- und Unterboden mit Feinanteil > 30 % bei einer Nassmechanischen Aufbereitung .....	14
Abb.10: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Betonabbruch bei einer trockenmechanischen Aufbereitung.....	15
Abb.11: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Mischabbruch bei einer trockenmechanischen Aufbereitung von 8 mm.....	16
Abb.12: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Ausbauasphalt PAK < 50 mg/kg bei einer thermischen Aufbereitung .....	18
Abb.13: Berechnung des Ressourcenpotenzials von der Rückgewinnung von Magnetschlacke aus der KVA-Schlacke. ....	21
Abb.14: Berechnung des Ressourcenpotenzials von der Rückgewinnung von Si-Schlacke aus der KVA-Schlacke. ....	22
Abb.15: Berechnung des Ressourcenpotenzials von der Rückgewinnung von Schlackensand für die Bauindustrie aus KVA-Schlacke.....	23
Abb.16: Berechnung des Ressourcenpotenzials von Klärschlammasche.....	25
Abb.17: Verschieden Ablagerungsstandorte im Verlauf der Zeit .....	30
Abb. 18: Prüfung der Eignung eines Ablagerungsstandorts .....	32
Abb. 19: Deponiekörper des Muldengutkompartiments der Deponie Tännlimoos.....	33
Abb. 20: Verfahrensschema Deponierecycling Tännlimoos.....	34
Abb. 21: Deponiekörper Altlast Stadtmist.....	35

Abb. 22: Stoffströme nach der Aufbereitung der Deponie Stadtmist.....	36
Abb. 23: Der Umgang mit Siedlungsabfällen zwischen 1970 und 2015. [Grafik BAFU, angepasst]..	40
Abb.24: Massenströme des Deponierecyclings des Hausmüllkompartiments der Deponie Tambrig..	41