

Mischabbruchverwertung in der Schweiz

Schlussbericht

Februar 2020



22 KIP-TP III
Kippstelle
Mischabbruch
170107

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Kontaktperson	Dr. David Hiltbrunner
Bearbeitung	Energie- und Ressourcen-Management GmbH Wolleraustrasse 15g 8807 Freienbach Tel. +41 44 371 40 90 Fax +41 44 371 40 04 info@energie-ressourcen.ch www.energie-ressourcen.ch
Projektleitung	Dr. Stefan Rubli
Zeitraum	August 2019 bis Februar 2020

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich

INHALTSVERZEICHNIS

1	Ausgangslage und Zielsetzung	7
1.1	<i>Ausgangslage</i>	10
1.2	<i>Fragestellungen und Ziele</i>	10
2	Vorgehen	11
2.1	<i>Methodisches Vorgehen</i>	11
2.2	<i>Thematischer Überblick</i>	11
3	Überblick und Grundlagen zur Mischabbruchentsorgung/-verwertung	12
3.1	<i>Herkunft von Mischabbruch</i>	12
3.2	<i>Charakterisierung des Mischabbruchs</i>	15
3.3	<i>Entwicklung des Mischabbrucharfalls und -verwertung</i>	17
4	Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen von Mischabbruch	22
4.1	<i>Übersicht zu den Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen</i>	22
4.2	<i>Entwicklung der Absatzpotenziale der Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung</i>	24
4.3	<i>Zusammenfassung der Verwertungswege und Absatzpotenziale</i>	26
5	Ökonomische Aspekte der Mischabbruchentsorgung	28
5.1	<i>Analyse der Preislisten von Deponien und Verwertern</i>	28
5.2	<i>Zusammenfassung der Erkenntnisse</i>	32
6	Schadstoffbetrachtung	34
6.1	<i>Schadstoffgehalte im Mischabbruch und in Mischabbruchgranulaten (MAG)</i>	34
6.2	<i>Zusammenfassende Erkenntnisse</i>	37
7	Risikobewertung der verschiedenen Verwertungsoptionen	38
7.1	<i>Eluate von lose und gebunden eingesetzten Mischabbruchgranulaten</i>	38
7.2	<i>Risikobeurteilung der verschiedenen Verwertungsoptionen</i>	41
8	Gesamtbeurteilung und Empfehlungen	46
8.1	<i>Gesamtbeurteilung</i>	46
8.2	<i>Empfehlungen</i>	49
9	Literaturverzeichnis	52
10	Anhang	53

Wichtige Abkürzungen

ARV	Aushub-, Rückbau und Recyclingverband
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BSAA	Bauschuttzubereitungsanlage
FSKB	Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie
GSchV	Gewässerschutzverordnung
MAG	Mischabbruchgranulate
NA	Nassaufbereitung
RCM-Beton	Recyclingbeton mit Mischabbruchgranulaten
SCC-Beton	self-compacting concrete / selbstverdichtender Beton
TA	Trockenaufbereitung
VASA	Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen

ZUSAMMENFASSUNG

Das Recycling von Rückbaustoffen ist in der schweizerischen Bauindustrie bereits relativ gut verankert. Allerdings bestehen bei einigen mineralischen Bauabfällen, wie beispielsweise beim Ausbauasphalt oder Mischabbruch, aus verschiedenen Gründen Probleme, die anfallenden Mengen im vollen Umfang wieder in den Baustoffkreislauf zurückzuführen.

In der vorliegenden Studie wird der Schwerpunkt auf die Mischabbruchverwertung in der Schweiz gelegt. Noch immer werden mehr als 30%, das heisst mindestens 700'000 Tonnen des jährlich anfallenden Mischabbruchs in Deponien abgelagert. Es besteht deshalb noch erhebliches Potenzial, die Verwertungsquote beim Mischabbruch zu erhöhen. Hierzu sind jedoch Kenntnisse zum Mischabbruchanfall, zur Qualität des Mischabbruchs, zur künftigen Mengenentwicklung, zu den Verwertungsoptionen und zu den potenziellen Risiken, welche beim Einsatz der Produkte in verschiedenen Anwendungen ausgehen können, notwendig. Ergänzend dazu sind die wirtschaftlichen Aspekte zu berücksichtigen. Das Ziel des Projekts ist deshalb, all diese Aspekte systematisch zu untersuchen und zu beschreiben. Auf Basis der Erkenntnisse werden verschiedene Empfehlungen abgeleitet, die als Hilfestellung für die Ausarbeitung des oben erwähnten Moduls dienen sollen. Was ist nun überhaupt Mischabbruch? Dieser kann wie folgt charakterisiert werden:

Mischabbruch ist ein buntes Materialgemisch. Es besteht aus 15 - 25% Back- und Ziegelsteinen, aus 55 – 80% Beton, aus 0 - 25% natürlicher Gesteinskörnung, enthält geringe Anteile an Ausbauasphalt sowie Fremd- und Störstoffen. Der Anteil der Fraktion <8mm bewegt sich im Bereich von 25 – 40%. Die Herkunft und das Rückbaukonzept bestimmen die Qualität des Mischabbruchs.

Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung haben unterschiedliche Absatzpotenziale. Das verwendete Modell zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Absatzpotenziale von verschiedenen Verwertungsoptionen zeigt, dass vor allem die **gebundenen Anwendungen** vielversprechend sind. Zudem ist die **Verwertungsoption in der Zementindustrie** aufgrund des relativ hohen Absatzpotenzials vor allem auch für die schwierig zu verwertende Fraktion <8mm eine vielversprechende Alternative. Der lose Einsatz von Mischabbruchgranulaten ist hingegen aufgrund der Bedenken seitens der Abnehmer schwierig. Die Risikobeurteilung zeigt dann auch, dass nur Mischabbruchgranulate aus der Nassaufbereitung geringe Risiken, welche im Bereich des Risikoakzeptanzniveaus liegen, aufweisen und nur diese das Image der Mischabbruchgranulate in loser Anwendung zu verbessern vermögen. Grundsätzlich hätte auch der Magerbeton aus der Trockenaufbereitung sowohl grosses Absatzpotenzial als auch eine hohe Marge. Allerdings müsste die Fraktion <8mm vorabgesiebt werden, womit die Marge deutlich tiefer liegen würde. Der Rabatt gegenüber dem Magerbeton mit primärer Gesteinskörnung müsste somit deutlich reduziert werden, was wiederum Einfluss auf den Absatz haben könnte.

Nicht nur das Absatzpotenzial, sondern auch die regionalen Verhältnisse spielen eine wesentliche Rolle, weshalb noch immer eine grosse Menge an Mischabbruch deponiert wird. In ländlichen Regionen ist der Deponiepreis zur Ablagerung in Deponien des Typs B oftmals sehr tief, so dass die Anreize für eine Verwertung fehlen. Aus diesem Grund müssen die Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass sich die Verwertung von Mischabbruch

wirtschaftlich lohnt und Absatzmärkte für die Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung entstehen können. Neben der Erhöhung der Deponiepreise brauchte es Konzepte zur Förderung der Mischabbruchverwertung. So sollte beispielsweise in Rückbau- und Entsorgungskonzepten angegeben werden, welche Anteile an Mischabbruch einer Verwertung zugeführt werden. Allenfalls sind diesbezüglich Zielvorgaben in den Ausschreibungsunterlagen zu formulieren. Ergänzend dazu sollte ein Know-How-Aufbau und Wissenstransfer bei bzw. zwischen den regionalen Bauschutttaufbereitungsanlagen, Betonproduzenten, Bauingenieuren und Endkunden stattfinden. Oftmals fehlt das Wissen zu den verfügbaren Aufbereitungstechnologien, bzw. zur Produktion von hochwertigen Mischabbruchgranulaten, z.B. für den Einsatz im Konstruktionsbeton. Mögliche Kernelemente zur Entwicklung von regionalen Förderkonzepten sind in diesem Bericht aufgeführt und können durch spezifische regionale Bedürfnisse ergänzt werden.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Auswertungen, Analysen und der Risikobeurteilung leiten sich die folgenden Empfehlungen ab:

Vorschlag zur Nichtzulassung von Anwendungen für Mischabbruchgranulate:

- **Mischabbruchgranulate aus der Trockenaufbereitung** für den losen Einsatz **unter** einer Deckschicht sollten **nicht mehr zugelassen** werden.
- **Mischabbruchgranulate aus der Trocken – und Nassaufbereitung** für den losen **Einsatz ohne** Deckschicht sollten **nicht zugelassen** werden.
- **RCM-Magerbeton, welcher Mischabbruchgranulate aus der Trockenaufbereitung enthält, die nicht vorabgesiebt wurden, sollte bis auf Weiteres nicht zugelassen werden.**

Weitere allgemeine Empfehlungen:

- Erhöhung der Deponiepreise bzw. Steuerung/Lenkung der Entsorgungswege.
- Ersetzen des Begriffs «Inertstoffe» in Preislisten durch Mischabbruch.
- Berücksichtigung der Zementwerke als Verwertungsoption für Mischabbruchfraktionen.
- Förderung der Mischabbruchverwertung vor allem in ländlichen Regionen.

Die Begründungen für die aufgeführten Empfehlungen sind im Bericht in detaillierter Form beschrieben. Grundsätzlich handelt es sich bei den Empfehlungen um Vorschläge. Sie sollen vor allem dazu dienen, Fehlentwicklungen weitestgehend zu verhindern, sowie anregen, den neuen, innovativen Verwertungsstrategien ausreichend Platz zu geben, damit diese nicht eingeschränkt, sondern künftig weiterentwickelt werden können.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

In der Schweiz fallen jährlich mindestens 2.4 Millionen Tonnen Mischabbruch an. Davon gelangen rund 1.7 Mio. Tonnen in Bauschutttaufbereitungsanlagen (Abbildung 7). Während die Verwertung und der Absatz der aufbereiteten Betongranulate heute kein Problem darstellt, beklagt die Branche Schwierigkeiten, die aufbereiteten Mischabbruchgranulate in den Baustoffmarkt zurückzuführen. Der gängigste Verwertungsweg für diese Granulate ist derzeit jener als Zuschlagstoff im Magerbeton, wobei die Feinfraktion zuvor oftmals nicht abgetrennt wird, sondern in den Magerbeton gelangt. Nur wenige Unternehmen sind heute in der Lage, Mischabbruchgranulate zu produzieren, welche als Zuschlagstoffe im Konstruktionsbeton eingesetzt werden können. Zusätzlich zum Einsatz als Zuschlagstoff im Recyclingbeton verfügen einzelne Unternehmen über spezifische Absatzkanäle in die Zementindustrie (als Rohmehl- bzw. Klinkerersatz) oder in die Steinwolleproduktion (als Rohstoffersatz).

In der vorliegenden Studie sollen die Grundlagen der heutigen und künftigen Mischabbruchverwertung zusammengetragen und die Verwertungs-potenziale inklusive einer ökologischen Risikobeurteilung der verschiedenen Verwertungsoptionen abgeschätzt und zusammengefasst werden. Auch die ökonomischen Aspekte sind dabei zu berücksichtigen.

1.2 Fragestellungen und Ziele

Das Ziel dieses Projekts ist, eine übersichtliche Zusammenfassung der verschiedenen Datengrundlagen aus bestehenden Studien sowie aus zusätzlichen Abklärungen und Datenerhebungen zu erhalten. Folgende Fragestellungen wurden bearbeitet:

- Welche Mengen an Mischabbruch fallen heute und in Zukunft in der Schweiz an?
- Welche Anteile werden verwertet bzw. deponiert?
- Welche Qualität weisen der Mischabbruch bzw. die Produkte aus der Mischabbruchverwertung in Abhängigkeit der Aufbereitungsverfahren (Korngrößenverteilung, stoffliche Zusammensetzung, Schadstoffgehalte, evtl. Eluatkonzentrationen usw.) auf?
- Welche Verwertungswege gibt es heute bzw. wird es künftig geben?
- Welche Risiken bezüglich Schadstoffgehalt/Schadstoffaustrag/Umweltbelastungen weisen die verschiedenen Verwertungswege auf?
- Welche Verwertungswege sind aus ökologischer und ökonomischer Sicht die vielversprechendsten und haben in Bezug auf den Absatz genügend grosse Potenziale, den anfallenden Mischabbruch in den Baustoffkreislauf zurückzuführen?
- Welche Hindernisse bestehen bei der Verwertung von Mischabbruch (Preise, technische Herausforderungen, regulative Hindernisse usw.)?

Auf Grundlagen der oben aufgeführten und zu bearbeitenden Fragestellungen wird eine Beurteilung/Einschätzung der verschiedenen Verwertungsoptionen von Mischabbruch vorgenommen. Es werden Vorschläge formuliert und Handlungsoptionen aufgezeigt.

2 Vorgehen

2.1 Methodisches Vorgehen

Es wurde vorwiegend mit bestehenden Daten (ARVIS, Angaben der Kantone, KAR-Modelle, Studien usw.) gearbeitet. Diese wurden zusammengetragen und so aufbereitet, dass eine möglichst repräsentative Übersicht zur Mischabbruchverwertung in der Schweiz resultiert. Bei Bedarf wurden weitere Daten teilweise auf regionaler Basis erhoben. Datenlücken wurden mittels Abschätzungen und Annahmen geschlossen, um aussagekräftige Informationen zu erhalten. Die ergänzenden Interviews mit Akteuren dienen dazu, die Annahmen zu verifizieren und die Abschätzungen zu stützen.

2.2 Thematischer Überblick

Die nachfolgenden Kapitel sind thematisch folgendermassen gegliedert:

- Überblick und Grundlagen zur Mischabbruchentsorgung/-verwertung
- Beschreibung der bestehenden und künftigen Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen von Mischabbruch unter Einbezug der modellierten Entwicklungen
- Ökonomische Betrachtung der heutigen Situation bei der Entsorgung/Verwertung des Mischabbruchs differenziert nach Regionen
- Schadstoffbetrachtung: Schadstoffgehalte im Mischabbruch bzw. in den Produkten der Mischabbruchverwertung (Auswertung bestehender Analysen)
- Qualitative, beschreibende Risikobeurteilung des Schadstoffaustrags- bzw. Schadstoffausbreitungspotenzials für die verschiedenen Verwertungsoptionen

Auf Basis der Resultate aus den Auswertungen und der Risikobeurteilung erfolgt eine Gesamtbeurteilung der heutigen Situation bei der Mischabbruchentsorgung. Daraus leiten sich Empfehlungen und Handlungsoptionen zur Optimierung der Mischabbruchverwertung und vor allem auch zur Erhöhung der Recyclingquote ab.

3 Überblick und Grundlagen zur Mischabbruchentsorgung/-verwertung

3.1 Herkunft von Mischabbruch

Die mineralische Bausubstanz von Gebäuden besteht hauptsächlich aus Beton, Mauerwerk und im geringeren Ausmass aus Natursteinen. Das Mauerwerk wiederum besteht vorwiegend aus Back- und Kalksandsteinen und aus rund 10-15% Mörtel. Als Wandbaustoff hinzu kommen insbesondere die Gipskartonplatten, deren Einsatz in den vergangenen Jahren stark zugenommen hat. Die Wand- und Deckenoberflächen bestehen meistens aus mineralischen Putzen. Das Verhältnis der oben erwähnten Baustoffe hat sich über die Zeit stark verändert. Gebäude, welche bis ca. 1945 gebaut wurden, weisen einen deutlich höheren Mauerwerksanteil auf als die heute gebauten Gebäude (Abbildung 1). Dies hat Auswirkungen auf die Entwicklung der Zusammensetzung des Mischabbruchs. Die heute zurückgebauten Gebäude stammen aus Zeiten mit hohen Mauerwerksanteilen (rot gefärbte Fläche). Bauen wir Gebäude zurück, welche nach 1970 erstellt wurden, dann ist der Mauerwerkanteil deutlich geringer (blau gefärbte Fläche). Da der Betonanteil im Neubau weiterhin zunimmt, dürfte künftig mehr Betonabbruch und weniger Mischabbruch aus dem Rückbau anfallen.

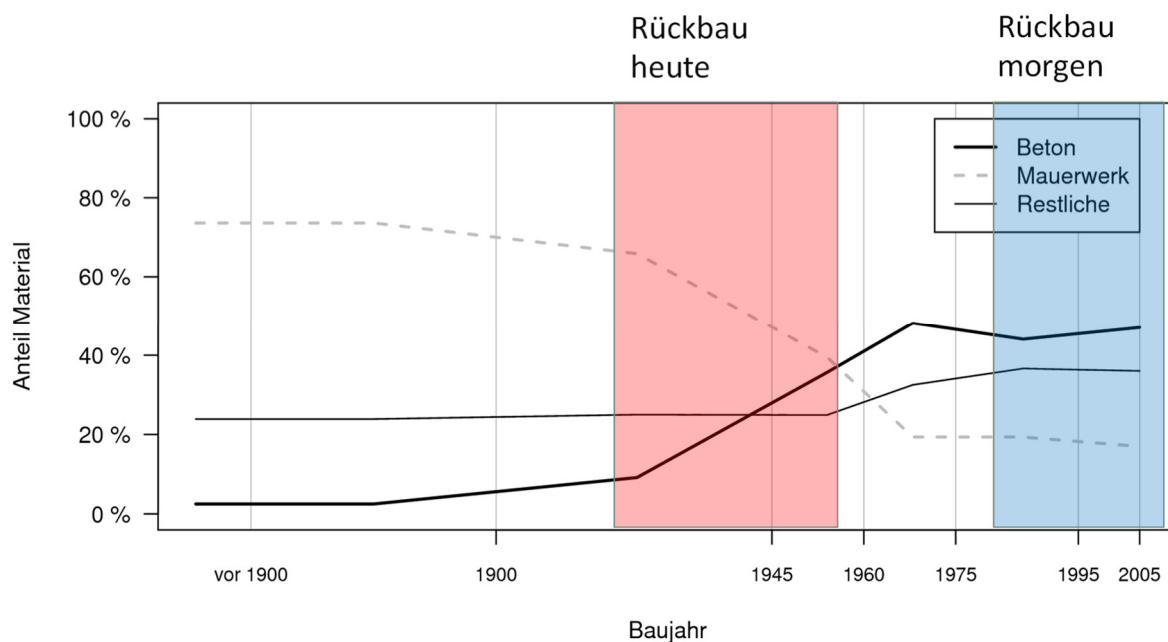


Abbildung 1: Entwicklung der Materialisierung am Beispiel der Mehrfamilienhäuser in der Stadt Zürich im Zeitraum von 1900 bis 2005. Quelle: (Rubli S. Schneider M., 2007)

Mischabbruch fällt nicht nur während eines Rückbaus an, sondern auch während der Sanierung von Gebäuden. Die Qualität der Mischabbruchfraktionen aus diesen Prozessen unterscheiden sich erheblich. Aus diesem Grund werden diese getrennt thematisiert.

3.1.1 Mischabbruch aus dem Rückbau

Der Rückbau von Gebäuden erfolgt meistens in zwei Etappen (Abbildung 2): Nach der Schadstoffsanierung und der Entkernung werden zunächst die Obergeschosse und das Erdgeschoss zurückgebaut. Dabei werden die mineralischen Baustoffe nicht getrennt ausgebaut (Bild links). Nur in wenigen Fällen erfolgt der Rückbau von Betondecken/-wänden

und Mauerwerk getrennt. Die Kellergeschosse, welche meistens aus Beton bestehen, werden in einer zweiten Etappe in Koordination mit den Aushubarbeiten zurückgebaut (Bild rechts). Hierbei entsteht der Betonabbruch.



Abbildung 2: Rückbau der Wohnsiedlung Werdwies in Zürich-Altstetten. Zunächst werden die oberirdischen Gebäudeteile ohne Materialtrennung zurückgebaut (Bild links), wobei der Mischabbruch entsteht. Danach erfolgt der Rückbau der Kellergeschosse (Bild rechts), wobei der Betonabbruch entsteht.

Warum wird nun in der Regel keine Materialtrennung beim Rückbau der oberirdischen Geschosse vorgenommen?

Dies hat zwei Gründe. Einerseits können auf diese Weise Zeit und Kosten gespart werden. Offensichtlich sind die Mehrkosten für die Entsorgung geringer als der Mehraufwand für die Materialtrennung vor Ort. Andererseits erhöht der hohe Betonanteil die Qualität des Mischabbruchs deutlich. Erst so wird es überhaupt möglich in höherwertige Anwendungen, wie beispielsweise RCM-Konstruktionsbeton zu gehen. Würde das Mauerwerk separat zurückgebaut, könnte diese Fraktion aus qualitativen Gründen vermutlich kaum einem Verwertungsprozess zugeführt werden, da zum heutigen Zeitpunkt alternative Verwertungsoptionen für diese Fraktion weitgehend fehlen.

3.1.2 Mischabbruch aus Sanierungen

Im Gegensatz zu einem Rückbau eines Gebäudes wird bei einer Sanierung in Abhängigkeit von der Eingriffstiefe nicht oder nur im geringen Umfang in den Gebäudekern eingegriffen. Dies bedeutet, dass der Mischabbruch aus Sanierungsprojekten viel geringere Betonanteile aufweist als bei einem kompletten Rückbau. Zu erkennen ist dies in der Abbildung 3. Der Anteil an Backsteinen in den Mulden scheint zu überwiegen. Damit ist die Qualität der Mischabbruchfraktion stark beeinträchtigt. Vielfach werden bei Sanierungsprojekten zudem die Estrichböden ausgetauscht. Dabei fällt sehr viel minderwertiges und feinkörniges Material an, welches nach dem Brechen in die Feinfraktion transferiert wird.



Abbildung 3: Fotos von Mischabbruchmulden aus Sanierungsprojekten in der Stadt Zürich, welche im Rahmen von Controllingprojekten von Rückbau- und Entsorgung bei Grossprojekten durchgeführt werden.

Die Mischabbruchfraktionen aus dem Rückbau und den Sanierungen werden auf den Recyclingplätzen ohne weitere Trennung gemeinsam gelagert und aufbereitet. Oftmals wird dem Mischabbruchhaufen zusätzlich Strassenaufbruch inklusive der Zementrohre und Kabelkanäle beigemischt. Aus diesem Grund enthalten Mischabbruchfraktionen teilweise natürliche Gesteinskörnungen (Abbildung 6).



Abbildung 4: Typischer Mischabbruchhaufen (Beispiel: Aufbereitungsplatz im Kanton Graubünden).

Die Betreiber von Bauschutttaufbereitungsanlagen (BSAA) stehen nun vor der Herausforderung, Mischabbruch von unterschiedlicher Herkunft und Qualitäten anzunehmen. Damit wird es schwierig eine konstante Qualität der Produkte zu gewährleisten. Der Variabilität der stofflichen Zusammensetzung und der Korngrößenverteilung muss Rechnung getragen werden. Aus diesem Grund versuchen die Betreiber von BSAA erst einmal Mischabbruchgranulate für

minderwertige Anwendungen mit hohem Absatzpotenzial zu produzieren. Die naheliegendste Anwendung ist somit der Magerbeton. Hier gibt es keine technischen Qualitätsvorgaben, was dazu geführt hat, dass grösstenteils auf die Vorabsiebung verzichtet wird und die schad- und fremdstoffstoffreichere Feinfraktion ebenfalls in den Magerbeton gelangt. Dieses Vorgehen widerspricht jedoch den Vorgaben der Richtlinie über die Verwertung von mineralischen Bauabfällen.

3.1.3 Ergänzende Bemerkungen und Folgerungen

Die Ausgangslage bei der Verwertung von Mischabbruch ist somit nicht einfach. Einerseits würde es Sinn machen, schon beim Rückbau das Mauerwerk und die Betonkonstruktionen getrennt abzubauen. Damit würde deutlich mehr Betonabbruch anfallen, welcher aufgrund seiner materialtechnischen Eigenschaften einfacher in den Baustoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Gleichzeitig leidet jedoch die Qualität der restlichen Mischabbruchfraktion massiv darunter, so dass diese vermutlich grösstenteils deponiert werden müsste.

3.2 Charakterisierung des Mischabbruchs

Auf Basis der in Kapitel 3.1 beschriebenen Herkunft des Mischabbruchs kann eine erste qualitative Charakterisierung des Mischabbruchs vorgenommen werden:

Charakterisierung von Mischabbruch:

- **Mischabbruch ist ein buntes Materialgemisch.**
- **Die stoffliche Zusammensetzung ist heterogen.**
- **Die Zusammensetzung variiert stark**
- **Der Feinanteil im Mischabbruch ist hoch.**
- **Herkunft und Rückbaukonzept bestimmen die Qualität des Mischabbruchs**

Diese Charakterisierung wird gestützt durch Resultate einer Studie zur trockenen und nassen Aufbereitung von Mischabbruch, welche das AWEL durchführen liess (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017). Dabei wurden unter anderem die Sieblinien und die stoffliche Zusammensetzung von Proben aus den Mischabbruchhaufen von verschiedenen Betreibern von BSAA untersucht.

3.2.1 Sieblinien und stoffliche Zusammensetzung von Mischabbruch

In der Abbildung 5 sind die Sieblinien von Mischabbruchproben von fünf verschiedenen Aufbereitungsanlagen aufgeführt (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017). Auf drei Aufbereitungsplätzen wurden jeweils möglichst repräsentative Proben von den Mischabbruchhaufen entnommen. Auf zwei weiteren Plätzen wurden Proben von vorgebrochenem Mischabbruch entnommen, um zu sehen, welchen Einfluss der Brechprozess auf den Anteil der Fraktion <8mm hat.

Die braun gefärbten Linien zeigen, dass der Anteil der Fraktion <8mm (siehe schwarz gestrichelte vertikale Linie bei 8mm) im Mittel bei rund 35% liegt. Die Bandbreite (braun gestrichelte Linien) liegt zwischen 25% und 40%. Diese Anteile müssen gemäss der Richtlinie

für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (BAFU, 2006) vorabgesiebt und entweder einer Behandlung und eventuellen Verwertung zugeführt werden oder VVEA-konform abgelagert werden. Wird der Mischabbruch auf <32mm vorgebrochen, liegt der Anteil der Fraktion < 8 mm mit rund 60 % etwa doppelt so hoch wie beim ungebrochenen Mischabbruch. Beim Vorbrechen entstehen somit weitere rund 30% der Fraktion <8 mm.

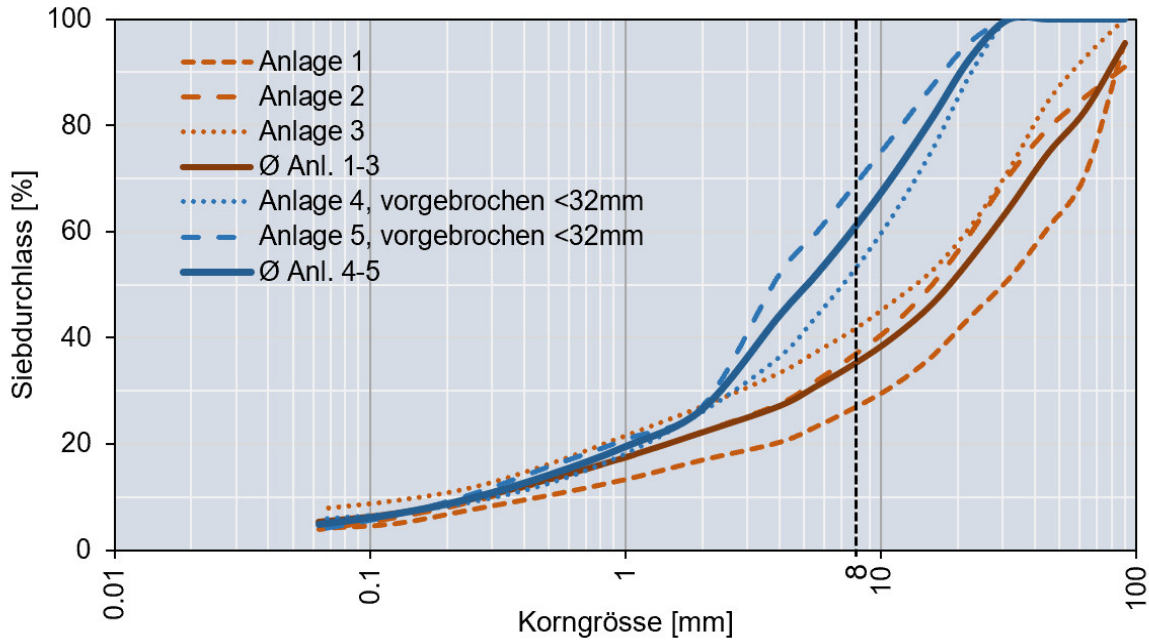


Abbildung 5: Vergleich der Sieblinien von Mischabbruch von fünf BSAA. Die Sieblinien basieren jeweils auf Mittelwerten von drei Proben. Die dicken Linien zeigen die Mittelwerte von vorgebrochenem Mischabbruch (blau) und ungebrochenem Mischabbruch (braun).

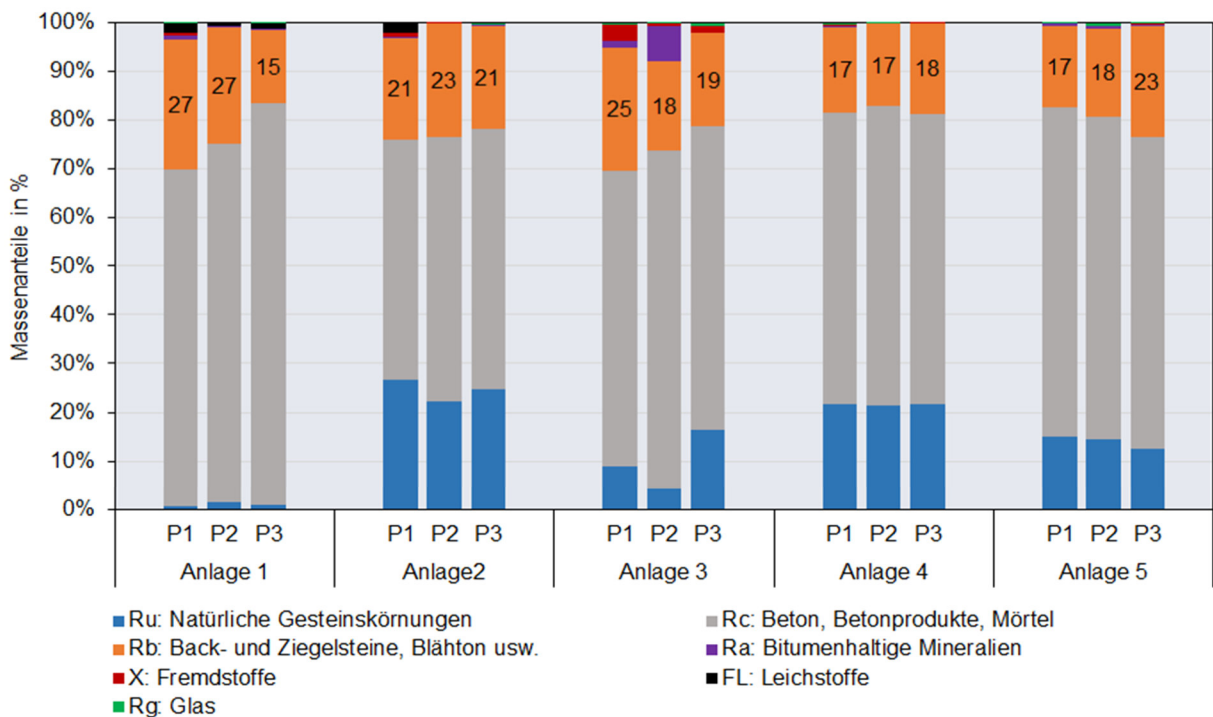


Abbildung 6: Stoffliche Zusammensetzung in Massenprozenten von Mischabbruchproben von fünf BSAA.

In den bereits oben beschriebenen Mischabbruchproben aus verschiedenen Anlagen wurde jeweils die stoffliche Zusammensetzung bestimmt. Der Anteil der Fraktionen «R_u: Natürliche Gesteinskörnungen», «R_c: Beton, Betonprodukte, Mörtel» liegt über alle Proben betrachtet im Bereich von 70 – 80%. Bei diesen Gesteinskörnungsfractionen handelt es sich um hochwertige, «harte» Gesteinskörnungen, welche sich sehr gut als Zuschlagstoffe im Konstruktionsbeton eignen. Der R_u-Anteil liegt bei vier Proben zwischen 5% und 25%. Wie erwähnt, wird teilweise Strassenaufbruch dem Mischabbruch beigemischt. Aus diesem Grund kann der Mischabbruch auch geringe Anteile an R_a enthalten (z.B. Anlage 3, Probe P2). Der Anteil an «R_b: Mischabbruch, mineralische Deckenputze und Blähton» bewegt sich im Bereich 17 – 27%. Oftmals wird dieser Anteil in der Branche überschätzt, weil die roten Gesteinskörner einerseits gut erkennbar sind, aber vor allem eine deutlich geringere Dichte aufweisen. Auch andere Studien, im Rahmen derer die stoffliche Zusammensetzung in Mischabbruchgranulaten bestimmt wurden, kamen zu ähnlichen Ergebnissen (Hoffmann C., Leemann A., 2004) (Rubli S., 2011).

3.2.2 Ergänzende Bemerkungen und Folgerungen

Die Sieblinienanalysen zeigen, dass der Anteil der Fraktion <8mm mit rund 25 - 40% doch relativ hoch ist. Die AWEL-Studie (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017) hat zudem gezeigt, dass dieser Anteil bei der Trockenaufbereitung von der Witterung abhängig ist. Bei regnerischem Wetter bzw. bei nassem Mischabbruch verklumpen die feinen Partikel, so dass die Siebe teilweise verstopfen. Der Siebdurchlass wird somit geringer, was zu einem geringeren Anteil der Fraktion <8mm führt. Aus diesem Grund ist die Bandbreite relativ gross. Die vorabgesiebte Fraktion <8mm muss entweder einer Behandlung zugeführt oder VVEA-konform abgelagert werden. Wird der Mischabbruch nass aufbereitet, entspricht dies einer Behandlung, die zu einer Verwertung der Sandfraktion führt. Der verbleibende Filterkuchen wird entweder deponiert oder in einem Zementwerk stofflich verwertet. Bei der Trockenaufbereitung müsste die vorabgesiebte Fraktion deponiert oder ebenfalls weiter behandelt werden. Dies ist oftmals nicht der Fall. Die BSAA-Betreiber führen Vorabsiebungen meistens nur bei dem Mischabbruchanteil durch, der später in loser Form eingesetzt wird. Werden Mischabbruchgranulate als Zuschlagstoff im Magerbeton eingesetzt, wird grösstenteils keine Vorabsiebung durchgeführt. Da der Einsatz im Magerbeton keiner verfahrenstechnischen Behandlung entspricht, ist dies gemäss der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle eigentlich nicht zulässig.

Die Resultate aus der Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung zeigen, dass die R_b-Anteile (Backstein) relativ klein sind. Dies hat den Vorteil, dass die Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung durchaus hochwertig in Bezug auf deren Eigenschaften sind und sich damit zum Einsatz in hochwertige Anwendungen wie Konstruktionsbeton eignen. Die Voraussetzung für diese Anwendung ist jedoch eine Nassaufbereitung des Mischabbruchs oder zumindest eine Vorabsiebung der Fraktion <8mm, so dass nur die Fraktion >8mm in die Weiterverarbeitung gelangt. Dabei geht jedoch die wertvolle Sandfraktion verloren, falls die Fraktion nicht einer Behandlung zugeführt wird.

3.3 Entwicklung des Mischabbruchanfalls und -verwertung

Zurzeit sind keine detaillierten statistischen Daten zum Mischabbruchanfall, zur Mischabbruchverwertung und zur Deponierung von Mischabbruch auf der Ebene Schweiz

verfügbar. Verfügbar sind Daten aus den Studien des BAFU, in denen die Bauabfallmengen aus dem Materialbestand im Hochbau (BAFU, 2015) und im Tiefbau (BAFU, 2016) abgeleitet werden. Insgesamt fallen gemäss diesen Studien 1.5 Millionen Tonnen Mischabbruch an. Werden die weiteren mineralischen Fraktionen mitberücksichtigt, ergibt dies insgesamt 2.7 Millionen Tonnen. In den besagten Studien gibt es keine Angaben, wieviel davon verwertet oder deponiert wird.

Die beiden Verbände ARV (arv Baustoffrecycling Schweiz) und FSKB (Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie) erfassen im Rahmen von Inspektionen bzw. mittels Materialerfassungsprogrammen (z.B. ARVIS) die Materialflüsse der Mitgliederbetriebe. Allerdings werden auch hier nicht alle Materialflüsse erfasst, da nicht alle in der Branche tätigen Betriebe diesen Verbänden angeschlossen sind. Daten zur Deponierung von Mischabbruch sind nur in beschränktem Umfang verfügbar und unvollständig. Aus diesem Grund müssen diese Materialflüsse auf Basis von bestehenden Daten und Modellen abgeschätzt werden.

3.3.1 Abschätzungen zum Mischabbruchanfall im Zeitraum 2007 - 2018

Im Rahmen der Studie wurden Daten zur Mischabbruchentsorgung von insgesamt acht Kantonen¹ für den Zeitraum 2007 – 2018 zusammengetragen und ausgewertet. Die Daten stammen aus Abfallstatistiken der Kantone, aus ARVIS-Auswertungen und aus weiteren Angaben der Kantone, welche im Zusammenhang mit dem KAR-Modell² (Rubli S., 2010, 2013-2016) Daten zur Verfügung gestellt haben. Datenlücken wurden jeweils mittels Abschätzungen geschlossen. Die auf dieser Basis ausgewerteten Daten sind im Anhang in der Tabelle A. 1 zu finden. Ebenfalls abgeschätzt wurden die Mischabbruchflüsse in die Deponie. Hierbei wurde die Entwicklung der Verwertungsquoten in den einzelnen Kantonen auf Basis der in den KAR-Modellen verwendeten Verwertungsquoten von Mischabbruch abgeschätzt (Tabelle A. 2). Mittels Interviews von Deponiebetreibern in verschiedenen Kantonen wurden die Annahmen verifiziert.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die nachfolgend präsentierten Zahlen mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet sind und die fehlende Datengrundlage die Festlegung genauerer Zahlen verunmöglicht. Zudem ist festzuhalten, dass neben dem Mischabbruch noch weitere mineralischem Bauabfälle deponiert werden, wie beispielsweise Gipsabfälle, Porenbetone, Verbundstoffe mit hohen mineralischen Anteilen, asbesthaltige Bauabfälle, mit Aushubmaterial vermischter Bauschutt usw., welche nicht dem Mischabbruch zugeordnet werden können und oftmals unter den Begriffen «Bauschutt» oder «Inertstoffe» abgelagert werden. Würden diese Fraktionen dem Mischabbruch zugeordnet, läge der Mischabbruchanfall und vor allem die deponierte Mischabbruchmenge deutlich höher.

Ergänzend dazu wurden weitere Datenanalysen durchgeführt: Einerseits wurden die pro-Kopf-Werte der Kantone von verwertetem Mischabbruch und Betonabbruch miteinander verglichen. Andererseits wurde das Mengenverhältnis «verwerteter Mischabbruch (MA)» zu «Summe verwertetem Mischabbruch (MA) + Betonabbruch (BA)» bestimmt (Tabelle A. 3). Diese

¹ Kantone Aargau, Bern, Luzern, Solothurn, St.Gallen, Thurgau, Zug und Zürich

² Kies-, Aushub- und Rückbaumaterialfluss-Modell

Auswertungen zeigen beispielsweise, dass der pro-Kopf-Wert im Kanton Bern mit 0.08 Tonnen verwerteter Mischabbruch pro Einwohner rund 50 – 75% tiefer liegt als in den anderen sieben Kantonen. Auch das Massenverhältnis MA/(MA+BA) liegt mit 9.5% deutlich tiefer als in den anderen Kantonen 16.5% – 31.3%. Daraus lässt sich ableiten, dass im Kanton Bern vermutlich deutlich mehr Mischabbruch deponiert wird als in anderen Kantonen. In abgeschwächter Form gilt dies auch für den Kanton Luzern. Für die Hochrechnung auf die Gesamtschweiz wurde angenommen, dass in weiteren 18 Kantonen in etwa die gleichen Verhältnisse wie im Kanton Bern herrschen.

Die Hochrechnung der Mischabbruchmengen auf die gesamte Schweiz erfolgte jeweils auf Basis der Bevölkerungsdaten.

In der Abbildung 7 ist die abgeschätzte Entwicklung des Mischabbruchanfalls, der Mischabbruchmengen in die Verwertung in der Schweiz sowie in acht Kantonen für den Zeitraum 2007 – 2018 dargestellt. Es ist Folgendes festzustellen:

- Der Mischabbruchanfall ist im Zeitraum 2007 - 2018 von 2 Mio. Tonnen auf 2.4 Mio. Tonnen angestiegen. Dies entspricht einer Zunahme von 20%.
- Aufgrund der positiven Entwicklung bei den Verwertungsquoten hat sich die Mischabbruchmenge, welche den BSAA zugeführt wurde, mehr als verdoppelt (auf 1.7 Mio. Tonnen).
- Gleichzeitig nahm der Mischabbruchfluss in die Deponien (Differenz zwischen den Linien) von 1.22 Mio. Tonnen (2007) auf knapp 0.7 Mio. Tonnen (2018) ab.

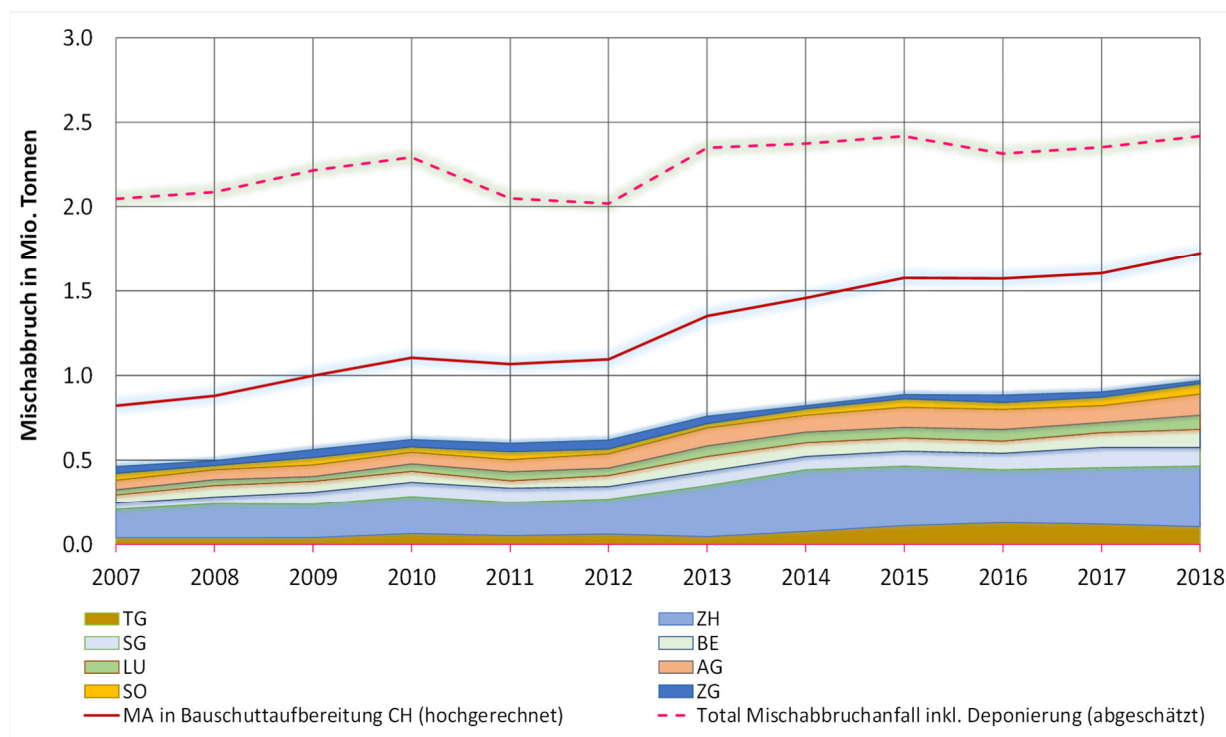


Abbildung 7: Abgeschätzte Entwicklung des Mischabbruchanfalls (rot gestrichelte Linie), der Mischabbruchmengen in die Verwertung (rot ausgezogene Linie) in der Schweiz sowie in acht Kantonen (Flächen). Die Differenz der Linien entspricht dem abgeschätzten Mischabbruchfluss in die Deponien.

Somit gelangen heute vermutlich mindestens 0.7 Mio. Tonnen verwertbarer Mischabbruch in die Deponien. Hier besteht somit noch deutliches Optimierungspotenzial. Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Verwertungsquote in vielen Kantonen verbessert werden kann.

3.3.2 Befragung von Deponiebetreibern, Rückbauunternehmen und BSAA-Betreibern

Die stichprobenartige Befragung von Deponiebetreibern, Rückbauunternehmen und BSAA-Betreibern sollten Informationen zur Entsorgung und Verwertung von Mischabbruch liefern. Nachfolgend sind zusammenfassend einige Aussagen aufgeführt:

Frage: Werden nur nicht verwertbare Mischabbruchfraktionen angeliefert oder auch verwertbare Fraktionen?

AG, ZH, NW: Ja fast alles, was angenommen wird, ist nicht mehr verwertbar. Vor 2 – 3 Jahren gab es zu grosse Mischabbruchhaufen bei gewissen BSAA-Betreibern, deshalb wurde ein Teil davon in Deponien geführt.

BE, LU: Sowohl verwertbarer als auch nicht verwertbarer Mischabbruch wird angenommen.

Frage: Warum wird verwertbarer Mischabbruch deponiert?

BE, LU: Die Qualität ist zu schlecht (BE). Mangelnde Absatz- bzw. Einsatzmöglichkeiten. Nicht einmal Magerbeton kann geliefert werden (Aussage: Es sei nicht zugelassen im Kanton Luzern).

Frage: Wird die Feinfraktion <8mm aus der Mischabbruchaufbereitung angeliefert?

Alle: Es wird keine Feinfraktion aus der Mischabbruchaufbereitung geliefert. Es findet keine Vorabsiebung statt.

Obwohl es sich nur um stichprobenartige Befragungen handelt, bestätigen die Antworten der Befragten die oben erwähnten Ergebnisse bezüglich den Verwertungsquoten in den verschiedenen Kantonen. Einerseits scheint es in gewissen Regionen Usanz zu sein, Mischabbruch zu deponieren. Teilweise, so die Vermutung, weil beim Rückbau eine ungenügende Materialtrennung durchgeführt wird, womit eine schlechte Materialqualität resultiert. Zudem dürfte vor allem in ländlichen Regionen genügend Deponievolumen zur Verfügung stehen, da die Deponiepreise in diesen Regionen verhältnismässig tief sind (Abbildung 12). Im Kanton Luzern scheinen zudem die Absatzmöglichkeiten von Mischabbruchgranulaten nur im beschränkten Umfang zur Verfügung zu stehen. Hier müssten vermutlich entsprechende Fördermassnahmen ergriffen werden. In Kantonen mit genügend Absatzpotenzialen und fortgeschrittenen Aufbereitungs- und Absatzstrukturen wird deutlich weniger Mischabbruch deponiert.

3.3.3 Ergänzende Bemerkungen und Folgerungen

In der Schweiz gibt es in Bezug auf die Verwertungsquote von Mischabbruch ein breites Spektrum. Die Bandbreite liegt im Bereich von unter 50% bis ca. 85% und ist regional sehr unterschiedlich. In vielen Regionen in der Schweiz werden die Verwertungspotenziale nur

bedingt genutzt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass entsprechende Rahmenbedingungen fehlen oder unzureichend sind. So müssten beispielsweise die Rückbau- und Sanierungskonzepte eine effizientere Materialtrennung während der Ausführung solcher Projekte vorsehen. Gelangen die Stör- bzw. Fremdstoffe einmal in die Mischabbruchfraktion, können diese nur mit aufwändiger Verfahrenstechnik mit ausreichender Effizienz wieder ausgeschieden werden, was Nassverfahren bedingt. Wird jedoch eine effiziente Entkernung vor dem Rückbau und gleichzeitig eine gute Materialtrennung durchgeführt, sind bei der späteren Aufbereitung die Trockenverfahren (Brecher mit Metallabscheidung und Windsichtung) ausreichend, um marktfähige Produkte herzustellen.

Auch die Bandbreite der Aufbereitungstechnologien ist heute sehr gross und regional sehr unterschiedlich. An einem Ende findet, wie beschrieben, keine Aufbereitung von Mischabbruchfraktionen statt. Am anderen Ende gibt es beispielsweise Nassaufbereitungsanlagen, welche in der Lage sind, mit optisch-pneumatischen Systemen die Backsteingranulate von den Betongranulaten zu trennen und damit hochwertiges Backstein-/Ziegelgranulat und Betongranulat zu erzeugen (Abbildung 8), welche sich wiederum einfacher in den Baustoffkreislauf zurückführen lassen.



Abbildung 8: Beton- und Backsteingranulate aus einer Nassaufbereitungsanlage mit optisch-pneumatischer Trennung von Betongranulaten und Backstein-/Ziegelgranulaten. Die Trennschärfe ist beeindruckend: Betongranulate enthalten <math><5\%</math> Backsteinanteile und Backstein-/Ziegelgranulate enthalten <math><5\%</math> Betongranulate.

Es zeigt sich somit, dass die Rahmenbedingungen bezüglich des Rückbaus, der Aufbereitung und des Einsatzes der Produkte regional sehr unterschiedlich sind. Zudem entscheiden die preislichen Rahmenbedingungen, ob Mischabbruch verwertet oder deponiert wird. Um die Verwertungsquote zu erhöhen, müssen demnach die Rahmenbedingungen in verschiedenen Bereichen so gesetzt und miteinander verknüpft werden, dass sämtliche Akteure einen Mehrwert in der Verwertung von Mischabbruch erkennen.

4 Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen von Mischabbruch

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits auf gängige Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen von Mischabbruch eingegangen. In den vergangenen Jahren haben verschiedene Unternehmen erhebliche Anstrengungen unternommen, um weitere Verwertungswege von Mischabbruch oder Teilfraktionen von Mischabbruch zu erschliessen. Nachfolgend werden die heute bestehenden und künftig verfügbaren Verwertungsverfahren/-optionen beschrieben. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Verwertungsoptionen werden kurz aufgezeigt und einander gegenübergestellt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist jedoch der Einbezug des künftigen Absatzpotenzials der Produkte aus den verschiedenen Verwertungswegen. Um dieses darzustellen und zu beurteilen, wurden bereits bestehende Modelle aktualisiert (Brunner F., Montalvo D., Ott.D, 2006). Das Ziel dieser Modellierungen ist, aufzuzeigen, welche Verwertungsoptionen in Bezug auf die Absatzmengen relevantes Potenzial aufweisen und welche Anwendungen nur geringe Absatzpotenziale aufweisen.

4.1 Übersicht zu den Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen

Der aus Rückbau und Sanierung anfallende Mischabbruch muss verschiedene Aufbereitungsprozesse durchlaufen, damit dessen Produkte in den Baustoffkreislauf zurückgeführt werden können. Folgende Ziele sollen durch einen Aufbereitungsprozess erreicht werden:

- Ausscheidung von Eisen und Stahl und wenn möglich, von Buntmetallen.
- Ausscheiden von Fremd- und Störstoffen (Holz, organische Leichtstoffe, Verbundstoffe, wenn möglich Gips, Porenbeton usw.).
- Herstellen von Granulaten mit definierter Sieblinie.
- Möglichst hoher Anteil an verwertbaren und hochwertigen Produkten.

In den vergangenen Jahren wurden die Aufbereitungstechnologien weiterentwickelt und neue Verwertungswege erschlossen. In der Tabelle 1 werden diese kurz beschrieben und die Vor- und Nachteile aufgeführt.

Neben den häufigsten eingesetzten Verfahren der Trockenaufbereitung kommt vermehrt das Nassverfahren zum Einsatz. Dieses ermöglicht eine höhere Ausbeute an verwertbaren Anteilen des Mischabbruchs, weil die Sandfraktion durch den Waschprozess zurückgewonnen werden kann. Störstoffe wie Gips oder gipshaltige Fraktionen können abgeschieden und in den Filterkuchen transferiert werden. Zudem können sowohl Fremdstoffe wie Holz, organisches und anorganisches Leichtgut sowie vor allem auch organische Schadstoffe abgeschieden bzw. in den Filterkuchen transferiert werden (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017). Insgesamt kann die Qualität der Mischabbruchgranulate (MAG) im Vergleich zur Trockenaufbereitung deutlich verbessert werden, was den Einsatz als Zuschlagstoff im Konstruktionsbeton möglich macht. Damit eröffnet sich ein grosses zusätzliches Absatzpotenzial.

Eine zusätzliche Möglichkeit bietet die Weiterverarbeitung des Mischabbruchs zu Brechsand. Brechsand kann sowohl mittels Trocken- als auch bei den Nassverfahren produziert werden. Beim Trockenverfahren eignet sich jedoch nur die Fraktion >8mm zur Produktion von Brechsand. Würde die Fraktion <8mm mitverwendet, hätten dessen Eigenschaften negative Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

Tabelle 1: Übersicht zu den möglichen Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen von Mischabbruch inklusive der Vor- und Nachteile der Verfahren. Die fettmarkierten Texte sollen besonders wichtige Eigenschaften hervorheben (MAG: Mischabbruchgranulate).

Aufbereitungsprozess	Produkte	Anwendungen Produkte	Vorteile	Nachteile
Trocken-Aufbereitung (TA)	- MAG diverse Korngrössen - Fraktion <8mm	- MAG - Magerbeton - Wenn <8mm abgetrennt, auch Konstruktionsbeton möglich	Kostengünstig Kann mobil betrieben werden	- Fraktion <8mm muss deponiert oder behandelt werden - Holzteile und Leichtstoffe im Beton erkennbar
Nass-Aufbereitung (NA)	- MAG diverse Korngrössen - Mischabbruchsand - Filterkuchen	- MAG - MA-Sand - Magerbeton - Konstruktionsbeton	- Sandfraktion kann zurückgewonnen werden - Holzteile und Leichtstoffe im Beton kaum erkennbar	- Höhere Investitionskosten im Vergleich zur Trockenaufbereitung
Herstellung Brechsand nach TA oder NA (Bei TA nur mit Fraktion >8 mm)	- Brechsand	- MA-Sand - Magerbeton - Konstruktionsbeton	- Kostengünstig - Ausscheidung Fremd- und Störstoffe - Leichtstoffe sind im Beton nicht erkennbar	- Fraktion <8mm muss bei TA deponiert oder behandelt werden, bei NA nicht
Brechen und Mahlen	- Fein- und Mehlkorn	- Filler in Zementproduktion - Filler und Feinkorn für selbstverdichtenden Beton - RC-Baustein	- Fraktion <8mm kann verwertet werden - Alternative Verwertungswege	- Realisierung abhängig von Entscheiden der externen Produzenten
Brechen/ Mahlen und interne/externe thermische Behandlung	- MAG diverse - Fein- und Mehlkorn	- Blähton - Steinwolleproduktion	- Fraktion <8mm kann verwertet werden - Alternative Verwertungswege	- Realisierung abhängig von Entscheiden der externen Produzenten

Seit Kurzem nehmen einige Zementwerke Mischabbruch bzw. definierte Mischabbruchfraktionen an, mahlen diese und verwenden das Mahlgut als Klinkerersatz. Das Mischabbruchmehl wirkt als Filler und weist zudem noch gewisse hydraulische Eigenschaften auf. Durch den Einsatz dieses Mahlguts kann der Klinkeranteil reduziert und somit der CO₂-Ausstoss in der Zementproduktion gesenkt werden. Eine weitere interessante Möglichkeit bietet

der selbstverdichtende Beton (SCC-Beton; self-compacting concrete). Dieser enthält höhere Mehlkorn- und Feinkornanteile und wird heute vermehrt eingesetzt, weil beim Einbringen des Betons Zeit und damit Kosten gespart werden können. Weitere Verwertungsmöglichkeiten sind die Produktion von RC-Bausteinen, z.B. als Ersatz von Kalksandsteinen oder der Einsatz als Rohstoffersatz bei der Produktion von Blähton oder Steinwolle.

Nicht alle erwähnten Anwendungen gewährleisten einen ausreichenden Absatz der Produkte. Es ist deshalb wichtig, die Absatzpotentiale der verschiedenen Anwendungen zu kennen.

4.2 Entwicklung der Absatzpotenziale der Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung

Um die Entwicklung der Absatzpotenziale der in der Tabelle 1 aufgeführten Anwendungen zu kennen, braucht es Marktstudien. Bereits im Jahr 2006 wurde eine solche Studie im Rahmen eines Vertiefungsblocks für Studierende der Umweltingenieurwissenschaften an der ETH Zürich durchgeführt (Brunner F., Montalvo D., Ott.D, 2006). Ein Resultat aus dieser Studie ist in der Abbildung 9 zusammengefasst. Diese zeigt die modellierte Entwicklung des Mischabbruchanfalls für den Zeitraum 2005 – 2050 (ausgezogene Linie) sowie die Entwicklung der Absatzpotenziale für verschiedene Anwendungen (Flächen). Gemäss dem Modell übersteigen im Jahr 2019 die möglichen Anwendungen (Summe Flächen) den Mischabbruchanfall (Linie). Damit könnte ab diesem Zeitpunkt der gesamte anfallende Mischabbruch in diesen Anwendungen verwertet werden.

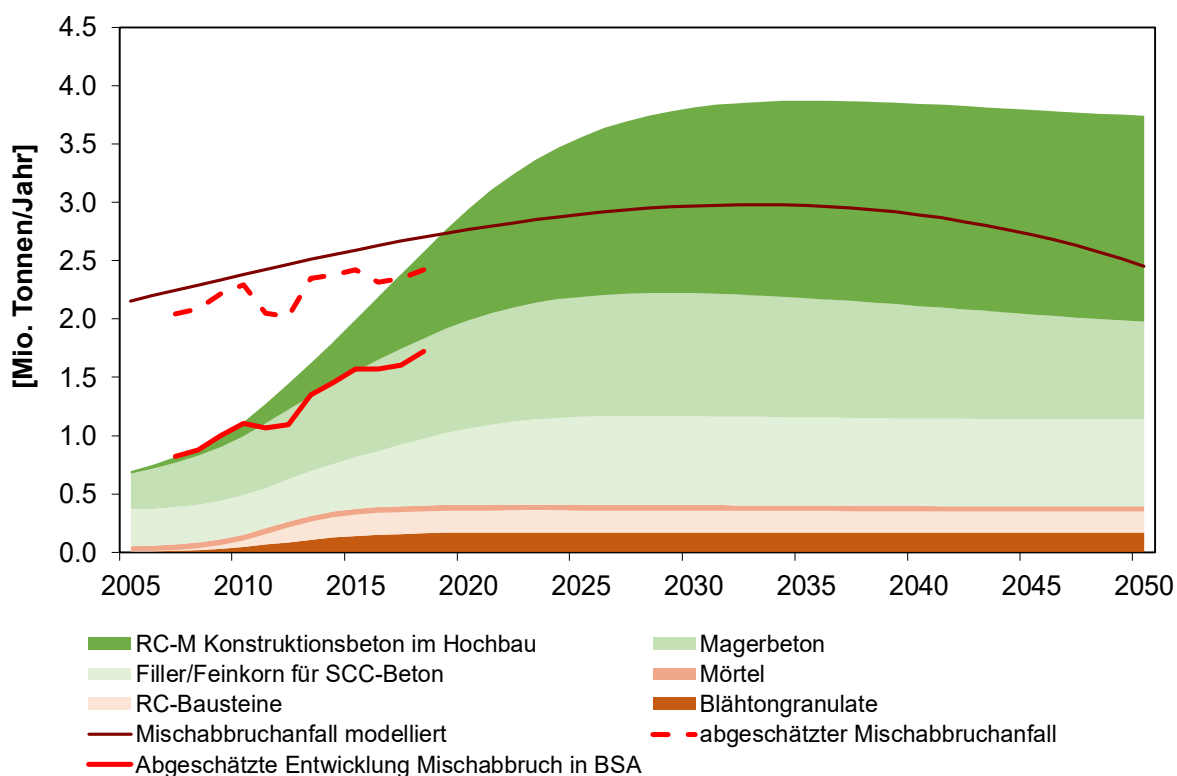


Abbildung 9: Abgeschätzte Entwicklung von verschiedenen gebundenen Anwendungen, in denen Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung eingesetzt werden können. Quelle: (Brunner F., Montalvo D., Ott.D, 2006).

Zum Vergleich sind zusätzlich die abgeschätzten Entwicklungen des Mischabbruchanfalls und des Mischabbruchflusses in die Verwertung aus der Abbildung 7 eingezeichnet (rote Linien). Der modellierte Mischabbruchanfall liegt etwas höher als der abgeschätzte Anfall. Die Entwicklung verläuft jedoch bei beiden Linien ähnlich ansteigend. Auch die Entwicklungen des Mischabbruchflusses in die Verwertung stimmen in der Tendenz recht gut überein. Der Anstieg ist aber weniger stark ausgeprägt als die modellierte Entwicklung.

Dies hat zwei Gründe: Einerseits ist der lose Einsatz nicht berücksichtigt. Andererseits bleibt der tatsächliche Einsatz, vor allem beim Konstruktionsbeton, deutlich hinter der modellierten Mengenentwicklung zurück. Hier besteht somit noch sehr viel Potenzial, d.h. es könnten noch viel mehr Mischabbruchgranulate in den Konstruktionsbeton geführt werden. Für den Magerbeton gilt dies nicht. Hier wird schon in vielen Kantonen das Potenzial ausgeschöpft.

Die Grafik zeigt hingegen auch, dass das Absatzpotenzial in der Produktion von RC-Bausteinen, Mörtel oder Blähgranulaten sehr beschränkt ist. Es handelt sich somit um Nischenanwendungen, die im Einzelfall, d.h. auf Unternehmensebene oder auf regionaler Sicht sinnvoll sein können, aber nicht aus gesamtschweizerischer Sicht.

Wie erwähnt, ist die Entwicklung des losen Einsatzes in der Abbildung 9 nicht berücksichtigt. Es wurde bereits damals davon ausgegangen, dass das Absatzpotenzial von lose eingesetzten Mischabbruchgranulaten unter einer Deckschicht nur gering ist, was sich grundsätzlich auch bestätigt hat. Nur relativ geringe Mengen werden heute in loser Form korrekt, d.h. unter einer Deckschicht eingesetzt. Der eigentlich nicht erlaubte lose Einsatz ohne Deckschicht auf Feldwegen usw. findet dennoch statt, wie im Beispiel in der Abbildung 10 zu sehen ist. Dies zeigt, dass der Vollzug der Abfallgesetzgebung eine erhebliche Herausforderung darstellt und eine lückenlose Überwachung aller Baustellen nicht möglich ist.



Abbildung 10: Beispiel von lose eingesetzten Mischabbruchgranulaten (vermutlich ohne Abscheidung der Fraktion <8mm) nach dem Rückbau eines alten Stalls auf einem Bauernhof.

Gründe, warum die Tiefbauämter den Einsatz von Mischabbruchgranulaten scheuen, sind folgende:

- Heterogenität des Materials macht Einsatz schwierig.
- Uneinheitliche Qualität der verschiedenen Lieferanten.
- Skepsis, ob die technischen Vorgaben wie Sieblinie, Frostsicherheit, Festigkeiten (ME-Werte) eingehalten werden können.

- Es handelt sich um ein Downcycling.
- Befürchtung, dass später hohe Entsorgungskosten entstehen, weil Material dann oft deponiert werden muss.
- Tiefbauämter scheuen die damit verbundenen Risiken.

Soll dieser Verwertungswege künftig gestärkt werden, müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, welche die nachvollziehbaren Bedenken der Tiefbauämter ausräumen können. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise, dass nur Mischabbruchgranulate lose eingesetzt werden dürfen, welche aus einer Nassaufbereitung stammen. Damit wird gewährleistet, dass die Stör-/Fremdstoffe und die organischen Schadstoffe in ausreichendem Mass entfernt werden und die Qualität der Mischabbruchgranulate relativ einheitlich ist.

4.3 Zusammenfassung der Verwertungswege und Absatzpotenziale

In der Abbildung 11 sind die oben thematisierten Verwertungswege in grafischer Form zusammengefasst. Verwertungswege, welche mit roten Kreuzen durchgestrichen sind, weisen nur geringe Absatzpotenziale auf. Die grössten Absatzpotenziale von Mischabbruchgranulaten sind in Anwendungen wie Magerbeton im Hoch- und Tiefbau sowie im Konstruktionsbeton im Hochbau zu sehen. Auch die Produktion von Filler und/oder Feinkorn ist aufgrund der potenziell hohen Absatzmengen ein Verwertungswege, welcher vielversprechend ist.



Abbildung 11: Zusammenfassung der verschiedenen Verwertungswege/-potenziale von Mischabbruch. Die rot durchgestrichenen Pfeile stellen jene Verwertungswege dar, welche nur geringe Verwertungspotenziale aufweisen.

Die Brechsandaufbereitung ist vor allem bei der Trockenaufbereitung interessant. Da der Sandanteil im Beton hoch ist (bis 50%), eröffnet sich hier ein grosses Absatzpotenzial. Der Vorteil von Brechsand ist, dass die Fremdstoffe wie Holz, Kunststoff und organische Leichtstoffe relativ effizient ausgeschieden werden können. Zudem sind die verbleibenden Fremdstoffe aufgrund ihrer Korngrösse im Beton nicht mehr erkennbar. Aufbereitungsunternehmen, welche künftig Mischabbruchgranulate im Konstruktionsbeton einsetzen möchten, sollten diese Verwertungsoption prüfen, da der Investitionsbedarf deutlich geringer ist als bei einer Nassaufbereitungsanlage.

5 Ökonomische Aspekte der Mischabbruchentsorgung

Die Mischabbruchverwertung steht in Konkurrenz zur Deponierung. Obwohl in der VVEA grundsätzlich eine Verwertung verlangt wird, gelangt noch immer ein erheblicher Teil des Mischabbruchs in die Deponien (Kapitel 3.3). Neben der Qualität des Mischabbruchs (z.B. hohe Fremdstoff- oder Gipsanteile, feinkörniges Material oder hohe Anteile an porösem Material usw.) dürften auch die Deponiepreise einen lenkenden Einfluss auf die Wahl des Entsorgungsweges haben. Die Deponiepreise für Mischabbruch dürften sich stark nach Regionen unterscheiden. Die Kosten für die Aufbereitung variieren regional hingegen weniger stark, weil der Arbeitsaufwand und die Rahmenbedingungen (Verfahrenstechnik, wie Brecher, Siebe, Windsichtung, Schlammbehandlung usw.) überall in der Schweiz in etwa gleich sein dürften. Es ist deshalb sinnvoll, die Deponiepreise in allen Regionen der Schweiz zu erheben und zusammenzufassen, um zu sehen, in welchen Regionen eine Deponierung von Mischabbruch eine starke Konkurrenz zur Verwertung darstellt. Zudem müssen für eine gesamtheitliche Analyse die Produktpreise für Magerbeton, Konstruktionsbeton und Kies (mit und ohne Mischabbruchgranulate) für verschiedene Regionen miteinbezogen werden.

5.1 Analyse der Preislisten von Deponien und Verwertern

5.1.1 Listenpreise Deponien

In der Abbildung 12 sind die Listenpreise³ von Deponien in verschiedenen Kantonen für die Entsorgung von sauberem und verschmutztem Mischabbruch aufgeführt. Es sind erhebliche Unterschiede festzustellen.

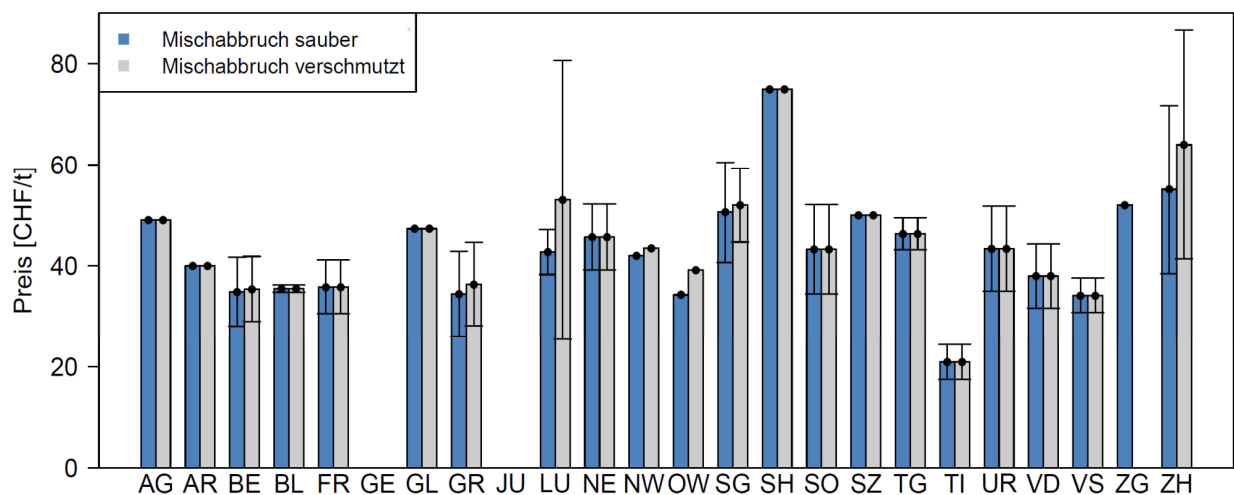


Abbildung 12: Deponiepreise in verschiedenen Kantonen gemäss Preislisten (inkl. VASA-Gebühr). Teilweise wurden keine Preisangaben gefunden (GE, JU). Angaben im CHF/m³ wurden umgerechnet auf CHF/t.

³ Die Listenpreise der Deponiebetreiber, Bauschutttaufbereitungsanlagen und Betonproduzenten entsprechen nicht immer den tatsächlich bezahlten Preisen, da oftmals Rabatte gewährt werden. Diese können in Abhängigkeit der Marktsituation stark variieren. Der Vergleich der Preise aus den Preislisten zeigt jedoch auf, ob und in welchem Umfang regionale Unterschiede bestehen.

Die tiefsten Preise werden im Kanton Tessin verlangt (Mittelwert bei ca. 26 CHF/t). Der höchste Deponiepreis wird im Kanton Schaffhausen erreicht (75 CHF/t). In Kantonen mit eher tiefen Verwertungsquoten (BE, FR, BL, VD, VS) liegt der Deponiepreis im Bereich von 35 – 40 CHF/t. Demgegenüber bewegen sich die mittleren Preise in Kantonen mit eher hohen Verwertungsquoten (AG, SZ, ZG, ZH) im Bereich von 44 – 60 CHF/t.

Auffallend ist, dass die Deponiebetreiber in den meisten Kantonen keinen Aufpreis für verschmutzten Mischabbruch verlangen (ausser LU und ZH). Damit fehlt hier der Anreiz, eine bessere Trennung beim Rückbau und bei der Sanierung durchzuführen. Interessant ist zudem, dass Deponiebetreiber und teilweise auch BSAA-Betreiber dem Mischabbruch gar nicht als solchen in der Preisliste führen (z.B. Kanton BE). Vielmehr wird dieser als Inertstoff deklariert. Dieser Begriff ist nicht mehr zeitgemäss und führt subjektiv zu einer negativen Bewertung des Mischabbruchs.

5.1.2 Listenpreise Bauschuttzubereitungsanlagen (BSAA)

Die Annahmepreise der BSAA-Betreiber für Mischabbruch richten sich grundsätzlich nach den Deponiepreisen in den entsprechenden Regionen. Deshalb sind, wie bei den Deponiepreisen, auch hier die regionalen Unterschiede doch recht gross (Abbildung 13). Während der durchschnittliche Listenpreis in der Region Mittelland bei etwas mehr als 40 CHF/m³ liegt, müssen in der Region Zürich im Mittel über 60 CHF/m³ bezahlt werden. In den anderen Regionen liegen die Preise dazwischen. Im Kanton Tessin konnten keine Preisangaben von BSAA-Betreibern gefunden werden.

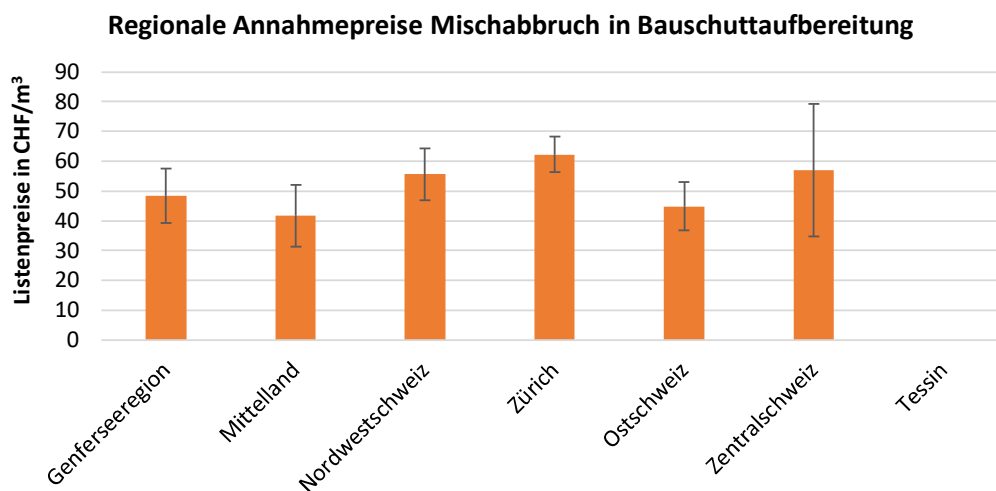


Abbildung 13: Annahmepreise für Mischabbruch von BSAA-Betreibern in verschiedenen Regionen der Schweiz.

Alle Preisangaben basieren auf Listenpreisen. In der Praxis können die Preise jedoch in Abhängigkeit von den jeweiligen Marktverhältnissen relativ stark variieren. Hat ein Anlagebetreiber bereits ein grosses Mischabbruchlager, wird er den Annahmepreis erhöhen, um die Anlieferung entsprechend zu steuern. Ähnliches gilt auch für die Deponiebetreiber.

Die BSAA-Betreiber stellen aus dem Mischabbruch verschiedene Produkte her. Neben Mischabbruchgranulaten (MG) für den losen Einsatz werden die Granulate auch zur Produktion

von Mager- und Konstruktionsbeton (RC-M) eingesetzt. Um diese Produkte absetzen zu können, müssen diese oftmals günstiger sein als jene mit ausschliesslich primärer Gesteinskörnung. Zudem stehen die Produkte aus Mischabbruch auch in Konkurrenz zu jenen aus Betonabbruch. Um die Preisunterschiede aufzuzeigen sind in der Abbildung 14 die Listenpreise für die häufigsten angebotenen Produkte mit primären Gesteinskörnungen (blaue Säulen), mit Mischabbruchgranulaten (rote Säulen) und Betongranulaten (graue Säulen) aufgeführt. Bei der Analyse der vier Grafiken ist zu erkennen, dass in den untersuchten Preislisten der verschiedenen Regionen teilweise keine Produkte mit Mischabbruchgranulaten aufgeführt sind. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Betreiber hier nur ein beschränktes Absatzpotenzial sehen oder sich auf eine bestimmte Anwendung wie beispielsweise Magerbeton konzentrieren.

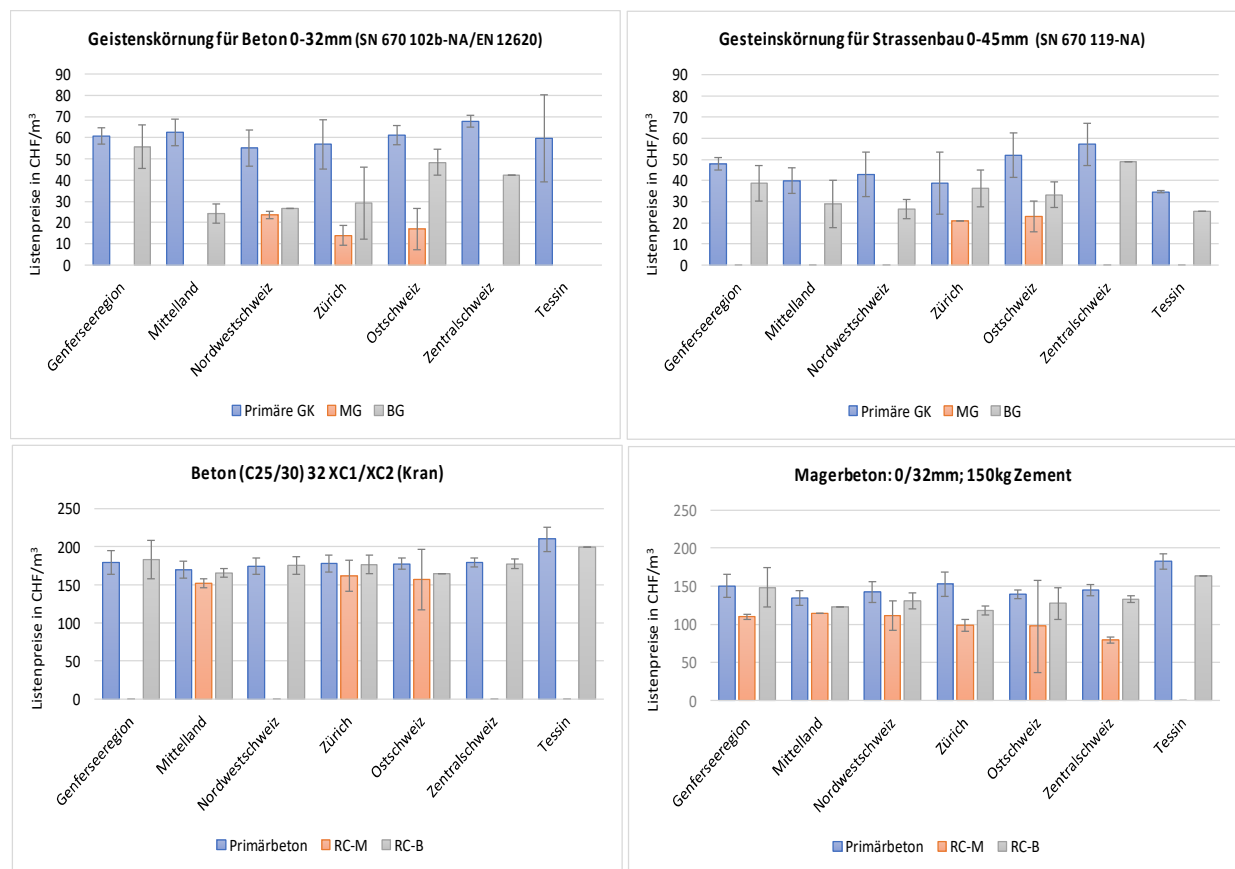


Abbildung 14: Vergleich Listenpreise für Gesteinskörnungen (GK) für Beton (links oben), für den Strassenbau (rechts oben), sowie für Konstruktionsbeton (links unten) und Magerbeton (rechts unten) in den verschiedenen Regionen der Schweiz. Blaue Säulen: Produkte ausschliesslich mit primärer Gesteinskörnung. Rote Säulen: Produkte die Mischabbruchgranulate enthalten. Graue Säulen: Produkte die Betongranulate enthalten. MG: Mischabbruchgranulate, BG: Betongranulate.

Die Analyse der vier Grafiken ergibt die folgenden Erkenntnisse:

- Mischabbruchgranulate für die Betonproduktion und für den Strassenbau (Grafiken oben) werden nur in wenigen Regionen angeboten. Obwohl die Preise teilweise mehr als 50% tiefer liegen als jene der primären Gesteinskörnungen scheint das Absatzpotenzial für diese Produkte gering zu sein.

- Demgegenüber werden die Betongranulate für die Betonproduktion beinahe in allen Regionen angeboten (blaue Säule Abbildung 14 links oben). Die Konkurrenz durch die Betongranulate dürfte dazu führen, dass Mischabbruchgranulate in diesen Anwendungen trotz tieferem Preis nur geringe Absatzchancen haben. Der Grund hierfür dürften vor allem die Bedenken der Kunden in Bezug auf die Qualität der Granulate sein (siehe Kapitel 3.3).
- In den Regionen Mittelland, Zürich und Ostschweiz wird auch RCM-Konstruktionsbeton angeboten. Der preisliche Unterschied zum Primärbeton oder RC-C-Beton ist relativ klein, weil einerseits ein höherer Aufwand zur Herstellung von hochwertigen Mischabbruchgranulaten betrieben werden muss. Andererseits ist vor allem der Zementpreis die entscheidende Komponente für den Betonpreis.
- Magerbeton aus Mischabbruch wird beinahe in allen Regionen angeboten. Der Preis liegt deutlich unter jenem mit primärer Gesteinskörnung. Offensichtlich ist RCM-Magerbeton die verbreitetste Anwendung. Ein Grund hierfür ist, dass es keine kostenintensive Aufbereitungstechnologie zur Herstellung der Mischabbruchgranulate braucht. Zudem wird die Feinfraktion oftmals nicht abgetrennt. Somit ist diese Anwendung ein billiger Entsorgungsweg für den gesamten Mischabbruch inklusive der Fraktion <8mm.

Es stellt sich die Frage, warum in einigen Regionen nicht nur Magerbeton, sondern auch andere Produkte wie RCM-Konstruktionsbeton angeboten werden. In diesen Regionen sind die Verwertungsquoten meistens schon recht hoch. Der anfallende Mischabbruch übersteigt hier teilweise schon das Absatzpotenzial des Magerbetons (siehe dazu Abbildung 9). Aus diesem Grund müssen ergänzende Absatzpotenziale erschlossen werden. Der Konstruktionsbeton bietet sich deshalb an, weil hier ein enormes Absatzpotenzial vorliegt.

Erhöhen nun Kantone mit tiefen Verwertungsquoten die Verwertungsquoten von Mischabbruch, dürfte auch hier das maximale Absatzpotenzial für Magerbeton bald einmal erreicht werden. Die BSAA-Betreiber müssen spätestens dann die Absatzpotenziale der weiteren Anwendungen erschliessen. Oftmals bedingt dies zusätzliche Investitionen, weil hochwertigere Produkte hergestellt werden müssen. Zudem ist Überzeugungsarbeit zu leisten, um beispielsweise RCM-Konstruktionsbeton absetzen zu können.

5.1.3 Kostenanalyse der verschiedenen Verwertungsoptionen

Die Kostenanalyse von verschiedenen Verwertungsoptionen von Mischabbruch soll aufzeigen, mit welchen Kosten die Aufbereitung von Mischabbruch verbunden ist und mit welchen Anwendungen die höchsten Margen erzielt werden können. In der Tabelle 2 ist diese Kostenanalyse zur Produktion von Mischabbruchgranulaten für verschiedene Anwendungen zusammengefasst. Diese basiert auf den Auswertungen der Preislisten, aus Annahmen zum Zementmehrverbrauch, zum Anteil der Fraktion <8mm, zu den Aufbereitungskosten und zum Zementpreis. Die Annahmen wie beispielsweise die Aufbereitungskosten wurden Unternehmen aus der Branche zur Validierung vorgelegt und mit diesen besprochen und bei Bedarf angepasst.

Die unterschiedlichen Kosten können wie folgt begründet werden:

- Zementmehrverbrauch: Dieser beträgt bei der Trockenaufbereitung und in der Anwendung «Konstruktionsbeton» 10% (mit Brechsand) bzw. 25% für RC-M-Anteile >8mm, um die technischen Anforderungen zu erfüllen. Teilweise werden Zusatzmittel benötigt (nicht berücksichtigt).
- Anteil Feinfraktion: Die abgetrennte Feinfraktion liegt zwischen 0 – 30%. Bei der Trockenaufbereitung sind es 30% und bei der Nassaufbereitung 12% (Filterkuchen).
- Annahmepreis: Zur Vergleichbarkeit wurde bei allen Anwendungen der gleiche Annahmepreis eingesetzt.
- Deponiekosten: Bei nassen Verfahren wurde ein etwas höherer Entsorgungspreis angenommen. Grund: Verwertung im Zementwerk, anderer Deponietyp, Restfeuchte. Hinweis: Nicht berücksichtigt wurde die Möglichkeit, dass die bei der Herstellung der Mischgranulate 0/45mm anfallende Fraktion <8mm dem Magerbeton beigemischt wird.
- Aufbereitungskosten: Diese wurden mit Unternehmen aus der Branche diskutiert.

Produkt aus Mischabbruch-aufbereitung	Verfahren	Einsatz	Mehrverbr. Zement in kg/m ³ Beton	Anteil abgetrennte Feinfraktion in %	Mischabbruch Annahmepreis CHF/t	FF MA Deponiepreis CHF/t	Kosten Aufbereitung CHF/t	Kosten Mehrverbrauch Zement	theoretische Wertschöpfung (ohne Preisnachlass für RC-Produkte)	durchschnittl. Preisnachlass RCM-Produkte	theoretischer Ertrag/Marge
								Annahme: 135 CHF/t Zement	CHF/t	CHF/t	CHF/t
Mischgran. Gem. 0/45	trocken	lose	0	30	45	-50	-7	0	23	16	7
Mischgran. Gem. 0/45	nass	lose	0	12	45	-60	-15	0	23	16	7
Magerbeton inkl. Fraktion <8mm	trocken	gebunden	0	0	45	-50	-7	0	38	25	13
Magerbeton exkl. Fraktion <8mm	trocken	gebunden	0	30	45	-50	-7	0	23	15	8
Magerbeton	nass	gebunden	0	12	45	-60	-15	0	23	15	8
Konstruktionsbeton	trocken	gebunden	25	30	45	-50	-8	-3.375	19	11	8
Konstruktionsbeton	nass	gebunden	0	12	45	-60	-15	0	23	11	12
Konstruktionsbeton (Brechsand)	trocken	gebunden	10	30	45	-50	-15	-1.35	15	1	14

Tabelle 2: Kostenanalyse zur Produktion von Mischabbruchgranulaten für verschiedene Anwendungen. Die grün markierten Zeilen zeigen jene Anwendungen, welche die grössten Margen bzw. theoretischen Erträge aufweisen. Kursive Schrift: Der Preisnachlass beim Magerbeton wurde auf ein tieferes Niveau heruntergesetzt, um für diese Anwendungen eine «mittelmässige» Marge zu erzielen.

Die Kalkulation zeigt, dass die Bruttoerträge je nach Anwendung zwischen 15 bis 38 Franken pro Tonne liegen. Allerdings geben die Hersteller einen erheblichen Teil davon als Rabatt weiter, um die Produkte überhaupt im Markt absetzen zu können. Diese Preisnachlässe wurden ebenfalls aus der Analyse der Preislisten ermittelt. Nach Abzug der Preisnachlässe resultiert der theoretische Ertrag oder die Nettomarge.

Es ist gut zu erkennen, dass die theoretischen Margen beim losen Einsatz von RC-Mischgranulaten 0/45mm mit 7 Fr./t im Vergleich zu den anderen Anwendungen am tiefsten sind. Auch beim Konstruktionsbeton mit RCM-Granulaten aus der Trockenaufbereitung ist die Marge mit 8 Fr./t aufgrund des Mehrverbrauchs von Zement und der Deponierung der Fraktion <8mm vergleichsweise gering. Anders sieht es bei den mit grüner Farbe gekennzeichneten Anwendungen aus: Hier liegen die Margen mit 12 - 14 Fr./t deutlich höher. Obwohl beim Magerbeton ein sehr grosser Preisnachlass von 25 Fr./t gewährleistet wird, liegt die theoretische Marge noch immer bei 13 Fr./t. Der Grund hierfür ist, dass die Fraktion <8mm nicht deponiert, sondern ins Produkt transferiert wird. Würde die Fraktion <8mm deponiert, läge die Marge nur noch bei 8 Fr./t, auch wenn ein Preisnachlass von 15 Fr./t eingepreist würde.

Wird Konstruktionsbeton mit RCM-Granulaten aus der nassen Aufbereitung hergestellt, dann liegt die Marge in einem ähnlichen Bereich wie beim Magerbeton. Gleiches gilt auch für den Konstruktionsbeton, welcher RCM-Brechsand enthält (Trockenaufbereitung). Hier wird mit 14 Fr./t die höchste Marge erzielt, obwohl die Fraktion <8mm deponiert wird.

5.2 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Analyse der Preislisten zeigt, dass nicht in allen Regionen alle RCM-Produkte bzw. Anwendungen für RCM-Granulate angeboten werden. Fast in allen Regionen wird RCM-Magerbeton angeboten. Die weiteren Anwendungen wie RCM-Granulate 0/32mm und 0/45mm oder RCM-Konstruktionsbeton werden vor allem in den Regionen Ostschweiz und Zürich und teilweise auch im Mittelland und in der Westschweiz angeboten.

Der breite Einsatz von Magerbeton ist sicherlich auf die relativ hohe Marge (Tabelle 2) und die geringen Investitionskosten für die Aufbereitungsanlage zurückzuführen. Ferner wird bei dieser Verwertung die Fraktion <8mm in das Produkt transferiert.

Die Nassaufbereitung von Mischabbruch ist in Bezug auf die Marge durchaus konkurrenzfähig, allerdings sind für diesen Verwertungsweg erhebliche Investitionen zu tätigen, welche die Unternehmen zum heutigen Zeitpunkt in einigen Regionen noch scheuen. Zudem benötigen diese Anlagen aus Rentabilitätsgründen einen grösseren Materialumsatz. Wird das maximale Absatzpotenzial von Magerbeton in diesen Regionen jedoch erreicht, dann ändern sich die Rahmenbedingungen. Dann müssen die Mischabbruchgranulate in den Konstruktionsbeton geführt werden, da die Margen beim losen Einsatz zu tief sind und kaum Absatzmöglichkeiten für RCM-Granulate bestehen. Neben der nassen Aufbereitung von Mischabbruch ist die Herstellung von Brechsand mittels trockener Aufbereitung eine relativ kostengünstige Alternative, welche ebenfalls hohe Margen verspricht.

6 Schadstoffbetrachtung

Für die Beurteilung des potenziellen Risikos eines Schadstoffaustrages in die Umwelt durch den Einsatz von Mischabbruchgranulaten sind Kenntnisse zu den Schadstoffgehalten im Mischabbruch, in der vorabgesiebten Feinfraktion und in den aufbereiteten Mischabbruchgranulaten (MAG) notwendig. Leider konnten die kantonalen Umweltämter keine Analysedaten zur Verfügung stellen. Es musste auf Daten aus bestehenden Studien zurückgegriffen werden. Die wohl aktuellste und umfangreichste Studie führte das AWEL im Jahr 2016/2017 in Zusammenarbeit mit zwei Unternehmen durch, welche an vier verschiedenen Standorten (in den Kantonen Zürich und Graubünden) Mischabbruch sowohl trocken als auch nass aufbereiteten (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017). Diese Daten wurden mit weiteren Daten aus früheren Studien (siehe Legenden unterhalb Tabellen 3 und 4) ergänzt.

6.1 Schadstoffgehalte im Mischabbruch und in Mischabbruchgranulaten (MAG)

In der Tabelle 3 sind die Resultate der untersuchten organischen und anorganischen Schadstoffe im Mischabbruch aufgeführt und den verschiedenen Anforderungen der VVEA gegenübergestellt. Die Anforderungen für die Ablagerung in einer Deponie des Typs B (VVEA Anh. 5 Ziff.2) werden für alle Proben und für alle untersuchten Schadstoffe meistens deutlich unterschritten. Auch die Anforderungen zur Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial gemäss VVEA Anhang 3 Ziffer 2 werden im Mittel meistens unterschritten. Bei einzelnen Proben liegen jedoch der KW-Index, die PAK, die PCB- und Benzo(a)pyrengelhalte über den entsprechenden Grenzwerten. Weiter ist zu erkennen, dass die vorabgesiebten Fraktionen tendenziell höhere Schadstoffbelastungen aufweisen. Dies gilt insbesondere für die organischen Schadstoffe.

Tabelle 3: Analyseresultate aus der Untersuchung von vorabgesiebten Feinfraktionen und von vorgebrochenem Mischabbruch und Vergleich mit den verschiedenen Anforderungen der VVEA.

Studie					bfa, 2000 ⁽¹⁾	ANU, 2016 ⁽²⁾	AWEL, 2017 ⁽³⁾	AWEL, 2017 ⁽³⁾	AWEL, 2017 ⁽³⁾
VVEA		Anh. 5 Ziffer 2	Anh. 3 Ziffer 1	Anh. 3 Ziffer 2	aus Vorab- siebung <30mm	Vorabsiebung <8mm	Vorabsiebung <8mm	Mischabbruch <32mm in Trockenaufbereitung	Mischabbruch <32mm in Nassaufbereitung
Schadstoffe	Einheit	Deponie Typ B	Aushub- Ausbruchmaterial		1 Probe		3 Proben	3 Proben	2 Proben
TOC	mg/kg	20'000		10'000	n.b.	n.b.	7'700±750	4'100±1'700	6'000±1'800
PAK	mg/kg	25	3	12.5	n.b.	5.1±3.8	9.0±6.8	3.5±4.0	6.3±0.7
PCB	mg/kg	1	0.1	0.5	n.b.	0.28±0.28	n.b.	n.b.	n.b.
KW-Index	mg/kg	500	50	250	n.b.	139±103	117±35	66±29	68±23
Benzo(a)pyren	mg/kg	3	0.3	1.5	n.b.	0.46±0.32	0.9±0.7	0.3±0.3	0.6±0.7
Blei	mg/kg	500	50	250	147	43±19	50±41	29±14	43±11
Zink	mg/kg	1000	150	500	261	112±52	123±10	84±31	120±4
Chrom	mg/kg	500	50	250	25	53±47	28±6	33±6	32±4
Cadmium	mg/kg	10	1	5	0.38	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Kupfer	mg/kg	500	40	250	18	23±9	35±27	18±3	19±4

grün: MAG halten Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 1+2 ein

n.b.: nicht bestimmt

gelb: MAG: Einzelwerte überschreiten Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 1

rot: MAG: Mittelwerte überschreiben Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 1

dunkelgelb: MAG: Einzelwerte überschreiten auch Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 2

Quellen: (1): büro für abfall (bfa), 2000: Aufarbeitung von Mischabbruch: Qualität der Mischabbruchgranulate. Im Auftrag des Amtes für Umweltschutz und Energie d. Kt. Basel-Landschaft.

(2): Amt für Natur und Umwelt (ANU) 2016: Untersuchung von Mischgranulaten von neun Aufbereitungsplätzen im Kanton. Untersuchte Proben: RC-Mischgranulatgemisch 0/8. Bei den Angaben in der Tabelle handelte es sich um Mittelwerte.

(3): AWEL 2017: Umweltleistungen von Bauschutttaufbereitungsanlagen. ERM GmbH, im Auftrag des AWEL, Zürich.

Wie erwähnt, ist die Datenlage in Bezug auf die Schadstoffbelastungen im Mischabbruch beschränkt. Etwas besser ist die Situation bei den Mischabbruchgranulaten. Hier stehen umfangreichere Daten zur Verfügung.

In der Tabelle 4 sind die Analyseresultate aus Untersuchungen von diversen Mischabbruchgranulaten aus verschiedenen Aufbereitungsanlagen, differenziert nach Korngrössenklassen zusammengefasst. Wie bereits beim Mischabbruch werden auch bei den untersuchten Mischabbruchgranulaten die Anforderungen für die Ablagerung in einer Deponie des Typs B meistens deutlich unterschritten. Allerdings werden sowohl die Kohlenwasserstoffe (KW-Index) als auch das Blei in die Mischabbruchgranulate transferiert (v.a. bei der Studie des AWEL 2017). Die Schadstoffgehalte bewegen sich in etwa im gleichen Bereich wie beim Mischabbruch. Es findet somit bei diesen Schadstoffen kaum eine Schadstoffentfrachtung der MAG statt. Beim TOC, bei den PAK und beim Benzo(a)pyren liegen die Gehalte in den Mischabbruchgranulaten jedoch deutlich tiefer als im Mischabbruch. Zudem scheint die nasse Aufbereitung diese Schadstoffe noch effizienter entfrachten zu können als die Trockenaufbereitung.

Tabelle 4: Analysedaten aus Untersuchungen von diversen Mischabbruchgranulaten (MAG), differenziert nach Korngrössenklassen und Vergleich mit den verschiedenen Anforderungen der VVEA.

Studien		bfa, 2000 ⁽¹⁾		BSAA Kt. ZH ⁽³⁾	AWEL, 2012 ⁽⁴⁾	AWEL, 2017 ⁽²⁾	AWEL, 2017 ⁽²⁾	AWEL, 2017 ⁽²⁾	AWEL, 2017 ⁽²⁾	AWEL, 2017 ⁽²⁾	AWEL, 2017 ⁽²⁾		
Jahr der Probenahmen		2000		2005	2012	2016	2016	2016	2016	2016	2016		
Anzahl Proben		1 Probe		1 Probe	3 Proben	3 Proben	3 Proben	3 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben		
VVEA		Anh. 5	Anhang 3		MAG	MAG	MAG	MAG, trocken	MAG, trocken	MAG, trocken	MAG, nass	MAG, nass	MAG, nass
Schadstoffe	Einheit	Dep. Typ B	Ziffer 1	Ziffer 2	0-30 mm	0-16mm	0-4mm	0-4mm	4-8mm	8-32mm	0-4mm	4-8mm	8-32mm
TOC	mg/kg	20'000		10'000	n.b.	n.b.	6'000±1000	3'900±360	3'550±1650	2'800±200	2'800±600	2'400±800	1'500±400
PAK	mg/kg	25	3	12.5	6.6	2.7	10±2	2.4±1.5	0.3±0.4	0.9±0.8	0.83±0.24	<0.5	<0.5
PCB	mg/kg	1	0.5	0.1	11	n.b.	0.25±0.15	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KW-Index	mg/kg	500	50	250	n.b.	n.b.	n.b.	95±40	150±125	48±22	98±38	73±22	57±3
Benzo(a)pyren	mg/kg	3	0.3	1.5	n.b.	n.b.	n.b.	0.2±0.1	0.03±0.04	0.09±0.07	0.08±0.03	0.10±0.01	0.05±0.01
Blei	mg/kg	500	50	250	59	37	62±13	42±7	19±16	44±35	58±46	136±165	67±29
Zink	mg/kg	1000	150	500	84	121	121±17	79±10	46±12	67±12	90±6	60±9	78±17
Chrom	mg/kg	500	50	250	29	25	32±3	28±5	24±2	28±5	24±5	29±3	35±7
Cadmium	mg/kg	10	1	5	0.19	n.b.	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.58±0.11
Kupfer	mg/kg	500	40	250	12	18	17±3	15±2	12±2	14±4	15±1	14±4	17±5

grün: MAG halten Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 1+2 ein

n.b.: nicht bestimmt

gelb: MAG: Einzelwerte überschreiten Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 1

rot: MAG: Mittelwerte überschreiben Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 1

dunkelgelb: MAG: Einzelwerte überschreiten Grenzwerte der VVEA Anh. 3 Ziff. 2

Quellen: (1): büro für abfall (bfa), 2000: Aufarbeitung von Mischabbruch: Qualität der Mischabbruchgranulate. Im Auftrag des Amtes für Umweltschutz und Energie d. Kt. Basel-Landschaft.

(2): AWEL 2017: Umweltleistungen von Bauschutttaufbereitungsanlagen. ERM GmbH, im Auftrag des AWEL, Zürich.

(3): anonymer Betreiber BSAA stellte Analysedaten zur Verfügung

(4): AWEL 2012: Grundlagen zur Beschreibung des Standes der Technik für die Bausperrgutsortierung sowie zur Erstellung eines entsprechenden Stand der Technik-Dokuments. ERM GmbH, im Auftrag des AWEL, Zürich.

Interessant ist zudem, dass das Blei mit beiden verfahrenstechnischen Ansätzen nicht in genügendem Ausmass ausgeschieden werden kann. Die Anlagen verfügen über keine Buntmetallabscheidung, womit nicht-magnetische Metalle nicht oder nur im geringen Ausmass abgeschieden werden können. Möglicherweise stammt ein Teil der Bleibelastung auch aus bleihaltigen Farbanstrichen.

In der Studie des AWEL wurde die Schadstoffentfrachtung durch die Vorabsiebung bzw. durch die Nassaufbereitung untersucht und grafisch dargestellt (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017). In der Abbildung 15, welche aus dieser Studie stammt, ist die relative Veränderung der Stoffgehalte in den Outputfraktionen im Vergleich zu jenen im Mischabbruchinput dargestellt. Liegen die Werte über 100% ist diese Fraktion schadstoffhaltiger als der Mischabbruch, liegen

die Werte tiefer als 100% weist die entsprechende Fraktion geringere Schadstoffgehalte auf als der Mischabbruch. Es ist gut zu erkennen, dass durch die Vorabsiebung bei der Trockenaufbereitung (T) als auch durch die Abscheidung der Feinfraktion bei der Nassaufbereitung (N) eine Schadstoffentfrachtung erfolgen kann. Die Werte bei den Mischabbruchgranulaten liegen bei den meisten Schadstoffen unterhalb von 100%. Bei der Nassaufbereitung ist dies sogar bei sämtlichen untersuchten Schadstoffen der Fall. Wie oben bereits erwähnt, scheinen die Nassverfahren insbesondere bei der Ausscheidung der organischen Schadstoffe (TOC, KW-Index, PAK) effizienter zu sein als die Trockenverfahren. Der Grund hierfür ist, dass die schwimmenden und löslichen Anteile beim Nassverfahren deutlich effizienter ausgeschieden und in die brennbare Fraktion oder in den Filterkuchen transferiert werden können.

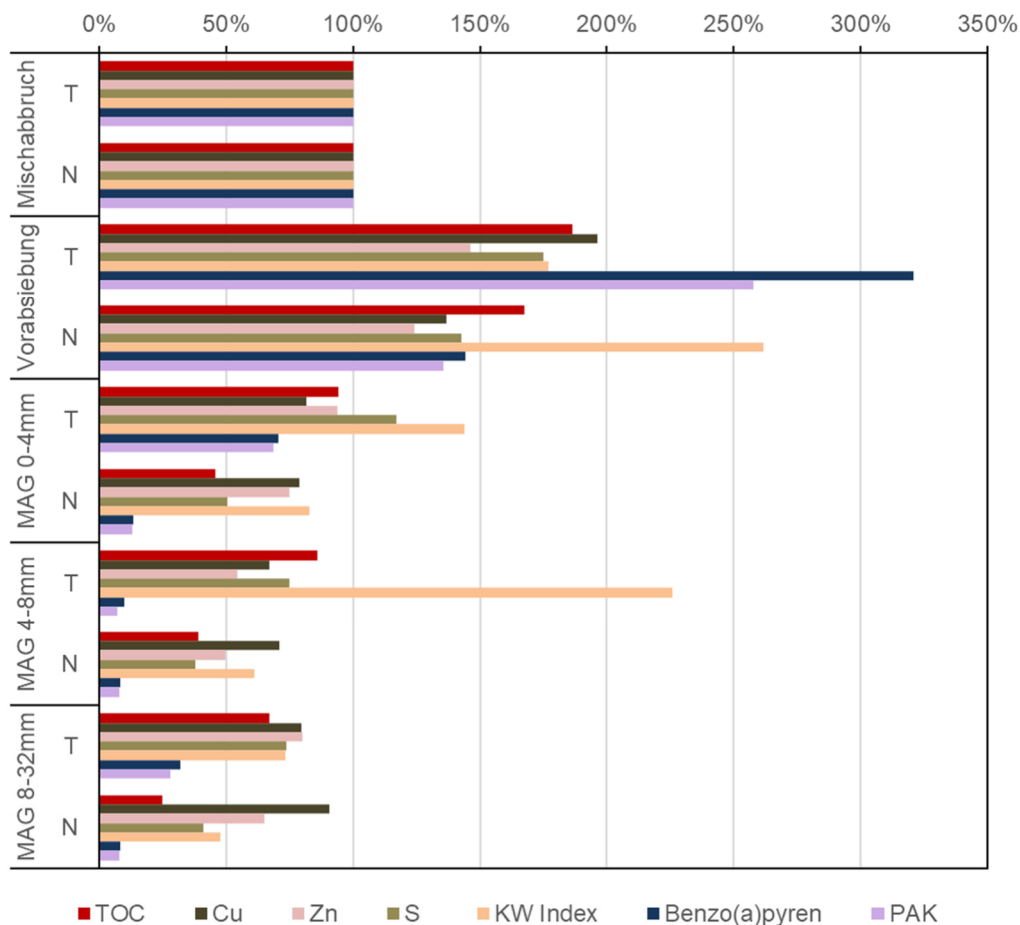


Abbildung 15: Relative Veränderung der Stoffgehalte in den Outputfraktionen im Vergleich zu jenen im Mischabbruchinput. T: Trockenaufbereitung; N: Nassaufbereitung. Hinweis: Die Grafik wurde aus der AWEL-Studie 2017 (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017) entnommen.

Im Rahmen der AWEL-Studie wurden zusätzlich Eluattests durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass die Grenzwerte für die Ablagerung in Deponien des Typs B deutlich unterschritten werden (Tabelle A. 4).

6.2 Zusammenfassende Erkenntnisse

Die Untersuchungen zu den Schadstoffbelastungen im Mischabbruch und in den Mischabbruchgranulaten haben gezeigt, dass die Schadstoffgehalte deutlich unter den Anforderungen zur Ablagerung in Deponien des Typs B liegen. Allerdings zeigte sich auch, dass in einigen beprobten Mischabbruchgranulatfraktionen der Gesamtgehalt an aliphatischen KW C10-40 (bzw. KW-Index), die Blei-, PAK- und Benzo(a)pyrengelhalte über den Anforderungen zur Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial gemäss VVEA Anhang 3 Ziffer 2 liegen. Diese Schadstoffe lassen sich über die Vorabsiebung oder über die Nassaufbereitung nicht ausreichend abscheiden. Trotzdem zeigt die Analyse bzw. der Vergleich der Schadstoffgehalte, dass diese Prozesse einen wichtigen Beitrag zur Ausschleusung der Schadstoffe aus dem Baustoffkreislauf leisten, wobei sich mit der Nassaufbereitung die organischen Schadstoffe noch etwas effizienter ausscheiden lassen.

7 Risikobewertung der verschiedenen Verwertungsoptionen

Beim Einsatz von Mischabbruchgranulaten in losen und gebundenen Anwendungen besteht ein gewisses Risiko, dass Schadstoffe in das darunterliegende Erdreich und allenfalls ins Grundwasser ausgetragen werden können. Die Kenntnisse der Schadstoffgehalte in den Outputfraktionen sind für eine diesbezügliche Risikobeurteilung nicht ausreichend. Falls die Schwermetalle beispielsweise in einer Zementmatrix eingebunden sind, so sind diese weitgehend immobilisiert (Rechenberg, 1993) (Rechenberg, W., Sprung, S., 1998). Zudem spielt die Löslichkeit eines Schwermetalls oder die chemischen Eigenschaften einer organischen Verbindung eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Mobilität dieser Schadstoffe. Die im Kapitel 4.3 aufgeführten Verwertungsoptionen für Mischabbruchgranulate werden nachfolgend hinsichtlich dieses Risikos qualitativ beurteilt, wobei auf Resultate aus bestehenden Studien zurückgegriffen wird.

7.1 Eluate von lose und gebunden eingesetzten Mischabbruchgranulaten

7.1.1 Eluate von lose eingesetzten Mischabbruchgranulaten

Im Rahmen der AWEL-Studie (Rubli S. Brupbacher A. Rubli D., 2017) wurden Eluattests gemäss der Vollzugshilfe «Messmethoden im Abfall und Altlastenbereich» von Mischabbruchgranulaten 8 – 32 mm aus der Trocken- und Nassaufbereitung durchgeführt (Tabelle 5). Die Resultate zeigen, dass die VVEA-Grenzwerte für die Deponien des Typs B und C für alle untersuchten Parameter deutlich unterschritten werden. Gleiches gilt für den Grenzwert der Gewässerschutzverordnung (GSchV Anh. 3.2, Ziff. 2) für die Einleitung von Industrieabwasser in die Gewässer. Die meisten Parameter liegen zudem im Bereich der Anforderungen an die Wasserqualität (GSchV Anh. 2, Ziff. 1). Die Grenzwerte für die Grundwassernutzung als Trinkwasser (GSchV Anh. 2, Ziff. 22) werden jedoch teilweise um einen Faktor 2 übertroffen (DOC, Sulfat). Beim Vergleich der Verfahren (trocken vs. nass) fällt auf, dass die DOC- und PAK-Konzentrationen im Eluat beim MAG aus der Nassaufbereitung deutlich tiefer liegen. Dies bestätigt die Erkenntnisse des Kapitels 6.2, dass sich die organischen Schadstoffe mit den Nassverfahren effizienter in den Filterkuchen transferieren lassen. Gleiches gilt auch für die Sulfate und Nitrate. Bei den Schwermetallen sind keine Unterschiede zwischen den beiden Verfahren erkennbar.

Obwohl die Bleigehalte im MAG 8 - 32 mm bei den Nassverfahren den Grenzwert gemäss Anhang 3 Ziffer 1 VVEA überschreiten (Tabelle 4), liegen die Eluatkonzentrationen von Blei mit Werten <0.001 mg/l sehr tief. Wie erwähnt, spielt die Löslichkeit bei den Schwermetallverbindungen eine entscheidende Rolle bezüglich des Auswaschverhaltens. Leider stehen keine Eluatkonzentrationen von den vorabgesiebten Fraktionen <8mm zur Verfügung. Da jedoch die Schadstoffgehalte der organischen Summenparameter deutlich höher liegen als in den Mischabbruchgranulaten >8mm (Tabelle 3+4), ist davon auszugehen, dass sich auch die entsprechenden Konzentrationen im Eluat auf eine höheren Niveau bewegen dürften. Zudem handelt es sich um feinkörniges Material, womit die gesamte Oberfläche (Austauschfläche mit Wasser) grösser ist als bei grobkörnigem Material, was dazu führen kann, dass neben den organischen Schadstoffen auch die Schwermetalle vermehrt ausgewaschen werden. Aus diesem Grund ist die Abtrennung und Entsorgung der Feinfraktion durchaus sinnvoll.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der VVEA-Eluatkonzentrationen von Mischabbruchgranulaten 8-32mm aus der Trocken- und Nassaufbereitung mit den Grenzwerten der Gewässerschutzverordnung und der VVEA.

	VVEA-Eluate Proben		GSchV Anh. 2 Ziff. 1	GSchV Anh. 2 Ziff. 22	GSchV Anh. 3.2 Ziff. 2	VVEA Anhang 5, Ziff. 2	VVEA Anhang 5, Ziff. 3	
	Einheit	Trocken 8-32mm	Nass 8-32mm	Anforderungen an die Wasserqualität	Grundwasser- nutzung als Trinkwasser	Einleitung Industrie- abwasser in Gewässer	Eluate Deponie Typ B	Eluate Deponie Typ C
DOC	mg/l	4.5±0.8	3.5±2.2	1 bis 4	2		20	20
KW ges.	mg/l	<0.01	<0.01			10		
PAK	µg/l	3.3±3.2	0.6±0.3					
Zink	mg/l	0.02±0.01	0.025±0.007	0.02		2		10
Blei	mg/l	<0.001	<0.001	0.01		0.5		1
Chrom, ges.	µg/l	5.7±2.5	11±12	5		2000		2000
Chrom-VI	µg/l	26±13	19±2			100		100
Kupfer	µg/l	2.5±0.7	<2	5		500		500
Vanadium	µg/l							
Cadmium	µg/l			0.2		100		100
Sulfat	mg/l	93±36	46±14		40			
Ammonium	mg/l	0.11±0.11	0.19±0.19	0.24	0.1 bis 0.5		0.6	6
Nitrat	mg/l	8.3±7.5	2.8±0.08	25	25			
Nitrit	mg/l	0.28±0.09	0.26±0.05				1	1

7.1.2 Eluate von gebunden eingesetzten Mischabbruchgranulaten

Die EMPA hat im Jahr 2006 im Auftrag des AWEL die Grundwasserverträglichkeit von Magerbeton aus RC-Material untersucht (Hoffmann C., Figi R. (1), 2006). Dabei wurden die Schadstoffe in den VVEA-Eluaten von Magerbeton mit 100% Recyclingmaterial (RC-Magerbeton) untersucht und mit Eluaten von Magerbeton mit 100% primärer Gesteinskörnung verglichen (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ausgewählte Resultate des Auswaschvorgangs aus den verschiedenen Betonarten mit Kohlensäure angereichertem Wasser (VVEA-Test 1) bzw. mit reinem Wasser nach (VVEA-Test 2) Geschätzte relative Messunsicherheit rund 10 Prozent (RC = Recycling). Daten in der Tabelle entnommen aus: Hoffmann C., Figi R. (1), 2006.

	VVEA-Eluate Proben			GSchV Anh. 2 Ziff. 1	GSchV Anh. 2 Ziff. 22	GSchV Anh. 3.2 Ziff. 2	
	Einheit	RC-Magerbeton aus Betongranulat	RC-Magerbeton aus Misch- abbruchgranulat	RC-Magerbeton aus Primärmaterial	Anforderungen an die Wasserqualität	Grundwasser- nutzung als Trinkwasser	Einleitung Industrie- abwasser in Gewässer
DOC	mg/l	1.0	2.0	0.9	1 bis 4	2	
KW ges.	mg/l	<0.5	<0.5	<0.5			10
Zink	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	0.02		2
Blei	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	0.01		0.5
Chrom, ges.	µg/l	4	11	3	5		2000
Kupfer	µg/l	<1	<1	<1	5		500
Cadmium	µg/l	<1	<1	<1	0.2		100
Sulfat	mg/l	2.1	11	1.8		40	
Ammonium	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	0.24	0.1 bis 0.5	
Nitrit	mg/l	<0.05	<0.05	<0.05			

Die Studienverfasser kommen zum folgenden Schluss: «Die beim RC-Magerbeton durch den Vorgang des Auswaschens freigesetzten Konzentrationen an umweltbedenklichen Stoffen sind

nahezu vergleichbar mit jenen der untersuchten Magerbetonprobe aus Primärmaterial. Einzig die Konzentrationen an Chrom (gesamt), Barium (nicht aufgeführt) und Sulfat sind beim RC-Magerbeton aus Mischabbruchgranulat höher, welche jedoch für die Wasserqualität als weitgehend unbedenklich angesehen werden».

Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Eluatwerte von Magerbeton aus Mischabbruchgranulaten, welche nicht vorabgesiebt wurden, durchaus höher liegen dürften. Dies müsste im Rahmen von weiteren Untersuchungen überprüft werden. Andernfalls sollte, wie in der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle aufgeführt, die Fraktion <8mm abgesiebt und separat entsorgt oder nach einer weiteren Behandlung verwertet werden. Die Studienautoren stellen zudem fest (Hoffmann C, Figi R. (2), 2006), dass die mit den Eluattests nachgewiesene geringe Freisetzung von umweltbedenklichen Stoffen aus Recyclingmagerbeton auch vollumfänglich für den qualitätsspezifisch höher eingestuftem Konstruktionsbeton aus Mischabbruchgranulaten gilt, da der Zementgehalt im Konstruktionsbeton deutlich höher ist als im Magerbeton und die Schadstoffe somit stärker in die Zementmatrix eingebunden und immobilisiert werden (siehe auch; (Rechenberg, 1993) (Rechenberg, W., Sprung, S., 1998)).

7.2 Risikobeurteilung der verschiedenen Verwertungsoptionen

Grundsätzlich entspricht das Risiko dem Produkt aus einem potenziell möglichen Schaden und der damit verbundenen Eintretenswahrscheinlichkeit:

$$\text{Risiko} = \text{Schaden} \times \text{Eintretenswahrscheinlichkeit}$$

Die Herausforderung im vorliegenden Fall besteht nun darin, den Schaden und die Eintretenswahrscheinlichkeit zu beziffern bzw. zu klassifizieren.

Auf Basis der im Kapitel 7.1 beschriebenen Ergebnisse zu den Eluaten, den Kenntnissen zu den Aufbereitungstechnologien sowie den potenziell möglichen Einsatzgebieten der Mischgranulate (Kapitel 4.1) lassen sich auf deskriptive Weise die Risiken des Einsatzes der Produkte aus der Aufbereitung in verschiedenen Anwendungen ableiten. Es handelt sich somit um eine qualitative Bewertung der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten, wobei diese auf einer relativen Basis miteinander verglichen werden. Die geltenden Einschränkungen der Richtlinie über die Verwertung mineralischer Bauabfälle werden in den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt. Es werden somit auch Einsatzmöglichkeiten evaluiert, welche nicht den gesetzlichen Vorgaben entsprechen.

Die Tabelle 7 ist in vier Schadenklassen unterteilt, wobei die einzelnen Schadenklassen beschrieben sind. Die aufgeführten Schäden beziehen sich auf das Schadstoffauswaschungspotenzial, die Qualität des Mischabbruchgranulat und dessen Auswirkung auf das Endprodukt sowie der daraus abgeleitete, mögliche Reputationsschaden. In der Tabelle 8 wurde dasselbe für die Eintretenswahrscheinlichkeiten durchgeführt. Die Einstufungen in den beiden Tabellen basieren auf den Erkenntnissen des Kapitels 7.1, verschiedenen Annahmen, den gesammelten Erfahrungen des Autors zum Einsatz MAG in der Praxis. Sie widerspiegeln teilweise dessen subjektiven Eindruck. Es sind somit auch andere Einstufungen möglich. Es geht hier jedoch vor allem darum, eine gewisse Methodik und Systematik zur Risikobewertung zu gewährleisten.

Tabelle 7: Definition und qualitative Beschreibung der Schadenklassen.

Schadenklasse	Potenzial Auswaschung org, und anorganische Schadstoffe in der Anwendung	Qualität von MAG kann Endprodukt beeinträchtigen	Möglicher Reputations-schaden
sehr gering	Sehr geringe Mobilität der Schadstoffe in der Anwendung	Minimale Beeinträchtigung des Endprodukts	vernachlässigbar
gering	Geringe Mobilität der Schadstoffe in der Anwendung	Kleine Beeinträchtigung des Endprodukts möglich	situationsbedingt möglich
mittel	Auswaschung von Schadstoffen möglich und abhängig von der Qualität der Aufbereitung	Beeinträchtigung des Endprodukts möglich	wahrscheinlich
hoch	Auswaschung von Schadstoffen in der Anwendung wahrscheinlich	Beeinträchtigung des Endprodukts wahrscheinlich	gross und deshalb kaum marktfähig

Tabelle 8: Definition und qualitative Beschreibung der Eintretenswahrscheinlichkeiten.

Eintretens-wahrscheinlichkeit	Schätzung für die Zukunft in der Anwendung	Schätzung für die Zukunft in der Anwendung	Möglicher Reputations-schaden
sehr gering	Sehr langfristig kaum Auswaschung von Schadstoffen	Es ist auf langfristiger Basis mit sehr wenigen Vorfällen mit negativen Konsequenzen zu rechnen	Kein Reputationsschaden zu erwarten
gering	Langfristig kaum Auswaschung von Schadstoffen	Es sind mittelfristig wenige Vorfällen mit negativen Konsequenzen möglich	Reputationsschäden sind geringfügig und auf Projektbasis möglich
mittel	Mittelfristig kaum Auswaschung von Schadstoffen	Kurz- bis mittelfristig sind Vorfälle mit negativen Konsequenzen möglich	Reputationsschäden sind auf Projektbasis möglich
hoch	kurzfristig Auswaschung von Schadstoffen möglich	Vorfälle mit negativen Konsequenzen sind wahrscheinlich	Reputationsschäden sind auf Projekt- und Branchenebene zu erwarten

Für jede der nachfolgend aufgeführten Einsatzmöglichkeiten von Mischabbruchgranulaten wurde eine Bewertung des Schadenpotenzials und der Eintrittswahrscheinlichkeit vorgenommen:

Tabelle 9: Zusammenfassung der Einsatzmöglichkeiten von Mischabbruchgranulaten als Grundlage für die Risikobewertung.

Verfahren/Anwendung MAG: Mischabbruchgranulat	mit oder ohne Vorabsiebung	lose oder gebundener Einsatz	mit oder ohne Deckschicht
MAG Trockenaufbereitung (TA)	mit Vorabsiebung	loser Einsatz	mit Deckschicht
MAG Trockenaufbereitung (TA)	ohne Vorabsiebung	loser Einsatz	ohne Deckschicht
MAG Nassaufbereitung (NA)	ohne Filterkuchen	loser Einsatz	mit Deckschicht
MAG Nassaufbereitung (NA)	ohne Filterkuchen	loser Einsatz	ohne Deckschicht
Magerbeton (TA)	mit Vorabsiebung	gebundener Einsatz	-
Magerbeton (TA)	ohne Vorabsiebung	gebundener Einsatz	-
Magerbeton (NA)	ohne Filterkuchen	gebundener Einsatz	-
Konstruktionsbeton (TA)	mit Vorabsiebung	gebundener Einsatz	-
Konstruktionsbeton (NA)	ohne Filterkuchen	gebundener Einsatz	-
Konstruktionsbeton mit Brechsand (TA)	mit Vorabsiebung	gebundener Einsatz	-
Konstruktionsbeton mit Brechsand (NA)	ohne Filterkuchen	gebundener Einsatz	-
Filler im Zement	vorbehandelt	gebundener Einsatz	-

Die Risikomatrix in der Tabelle 10 stellt das Ergebnis der Bewertung des Schadenpotenzials und der Eintrittswahrscheinlichkeit für jede Anwendung dar.

Die in den **hell- und dunkelgrünen Feldern** aufgeführten Einsatzgebiete für Mischabbruchgranulate sind gemäss dieser Bewertung Anwendungen, welche mit sehr geringen bzw. geringen Risiken verbunden sind. Es handelt sich hauptsächlich um gebundene Anwendungen, sowie Mischabbruchgranulate aus der Nassaufbereitung (NA) für den losen Einsatz unter einer Deckschicht. MAG-Anwendungen aus der Nassaufbereitung schneiden etwas besser ab als jene aus der Trockenaufbereitung. Der Grund hierfür ist die effizientere Abscheidung der organischen Schadstoffe beim Nassverfahren. RCM-Konstruktionsbetone und Filler im Zement schneiden am besten ab, da die Schadstoffe in die Zementmatrix eingebunden werden. Bei RCM-Konstruktionsbeton mit MAG aus der Trockenaufbereitung besteht ein etwas höheres Risiko, weil die Leichtanteile beim Einbringen des Frischbetons eventuell oben aufschwimmen können, womit kleine Beeinträchtigungen des Endprodukts und situationsbedingte Reputationsschäden möglich sind.

Als Gegenpol zu den Anwendungen in den grünen Feldern wurde ein Mischabbruchgranulat eingesetzt, welches während der Trockenaufbereitung nicht vorabgesiebt wurde und lose, ohne Deckschicht eingebaut wird. Diese Anwendung stellt das grösstmögliche Risiko dar und ist deshalb im **orangenen Feld** rechts oben eingetragen.

Im **hellgelben Feld** ist das Mischabbruchgranulat aus der Trockenaufbereitung aufgeführt, welches vorabgesiebt in loser Form unter einer Deckschicht eingebaut wird. Das Schadstoffauswaschungspotenzial ist aufgrund der Deckschicht gering. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist ebenfalls gering. Es können jedoch langfristig Schadstoffe ausgewaschen werden, wenn die Deckschicht undicht wird (Risse, Löcher usw.).

Zwei Anwendungen sind in den **gelben Feldern** eingetragen. Der RCM-Magerbeton, dessen MAG aus der Trockenaufbereitung auch die Fraktion <8mm enthält, weist ein mittleres Schadenpotenzial auf. Die Qualität des Endproduktes kann aufgrund der potenziell höheren Schad-, Fremd- und Störstoffanteile beeinträchtigt werden, so dass Reputationsschäden wahrscheinlich sind. Sollten allfällige Untersuchungen zeigen, dass sich die Schadstoffauswaschung aus diesem RCM-Magerbeton nicht von RCM-Magerbeton ohne die Fraktion <8mm unterscheidet, könnte sich dies positiv auf die Risikobewertung auswirken. Mischabbruchgranulate welche aus der Nassaufbereitung stammen und lose ohne Deckschicht eingesetzt werden, weisen zwar ein relativ geringes Schadenpotenzial auf, allerdings ist die Eintretenswahrscheinlichkeit einer mittelfristigen Auswaschung von Schadstoffen durchaus vorhanden, was möglicherweise zu Reputationsschäden auf der Projektebene führen kann.

Tabelle 10: Risikomatrix zum Einsatz von Mischabbruchgranulaten (MAG) in den verschiedenen Anwendungen. Das Risikoakzeptanzniveau liegt im Bereich der grün markierten Felder. TA: Trockenaufbereitung. NA: Nassaufbereitung

Eintrittswahrscheinlichkeit	hoch			<ul style="list-style-type: none"> • MAG aus TA, lose, ohne Vorabsiebung, ohne Deckschicht 	
	mittel		<ul style="list-style-type: none"> • MAG aus NA, lose, ohne Deckschicht 		
	gering	<ul style="list-style-type: none"> • MAG aus NA, lose, unter Deckschicht • Magerbeton aus TA, vorabgesiebt • Magerbeton aus NA 	<ul style="list-style-type: none"> • MAG aus TA, lose, vorabgesiebt, unter Deckschicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Magerbeton aus TA, ohne Vorabsiebung 	
	sehr gering	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktionsbeton aus NA • Konstruktionsbeton TA mit Brechsand, vorabgesiebt • Konstruktionsbeton NA mit Brechsand • Filler im Zement, vorabgesiebte Fraktion behandelt 	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktionsbeton aus TA 		
		sehr gering	gering	mittel	hoch
		Schaden			

Insgesamt liefert die auf Basis der Risikomatrix durchgeführte Risikobewertung nachvollziehbare Ergebnisse. Es zeigt sich, dass die in der bestehenden Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle definierten Rahmenbedingungen so gesetzt wurden, dass die Anwendungen mit Mischabbruchgranulaten bis auf eine Massnahme in den grünen Feldern

liegen. Das Mischabbruchgranulat aus der Trockenaufbereitung, welches vorabgesiebt in loser Form unter einer Deckschicht eingebaut wird liegt in einem hellgelben Feld. Wie erwähnt, basiert die Risikobewertung auch auf subjektiven Eindrücken des Autors. Zudem könnten Anwendungen mit geringem Schadenpotenzial und geringer Eintretenswahrscheinlichkeit auch hellgrün eingefärbt und damit als tolerierbares Risiko eingestuft werden. Dies müsste im Rahmen der Entwicklung der Vollzugshilfe sicherlich auf einer breiten Basis diskutiert werden.

8 Gesamtbeurteilung und Empfehlungen

Auf Basis der in der vorliegenden Studie gewonnenen Erkenntnisse aus den Auswertungen, Analysen und der Risikobewertung ist eine Gesamtbeurteilung der heutigen und künftigen Situation in der Mischabbruchentsorgung/-verwertung in der Schweiz möglich. Die Grundlagen zeigen, welche Verwertungsoptionen die grössten ökologischen und ökonomischen Potenziale aufweisen und welche Anwendungen allenfalls über lenkende Massnahmen, Vorgaben oder Regeln gefördert werden sollten. Dazu werden Empfehlungen zur inhaltlichen Gestaltung der zu erarbeitenden Vollzugshilfe abgegeben und begründet, warum diese als sinnvoll erachtet werden.

8.1 Gesamtbeurteilung

In der Schweiz besteht noch immer ein erhebliches Potenzial bei der Mischabbruchverwertung. In einigen Regionen bewegt sich die Verwertungsquote erst bei 50% (Tabelle A. 2). Damit kann keinesfalls von einem geschlossenen Kreislauf gesprochen werden. Eine grosse Menge des verwertbaren und hochwertigen Rückbaumaterials gelangt vor allem in ländlichen Regionen in die Deponien. Die Gründe dafür können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Materialtrennung auf der Baustelle ist oft ungenügend und vermutlich beim Mischabbruch, welcher in einigen Regionen noch immer als «Inertstoff» bezeichnet wird, teilweise kaum vorhanden.
- Die Deponiepreise sind vor allem in ländlichen Regionen mit tiefen Verwertungsquoten so tief, dass die wirtschaftlichen Anreize für die Verwertung von Mischabbruch fehlen.
- Die Deponiepreise für verschmutzte Mischabbruchfraktionen unterscheiden sich kaum von jenen für sauberen Mischabbruch. Somit fehlt der Anreiz, eine effiziente Materialtrennung auf der Baustelle durchzuführen.
- Vor allem die ländlichen Regionen im Mittelland, in der Zentral- und Westschweiz und im Tessin verfügen oftmals über ungenügende Infrastrukturen zur Verwertung von Mischabbruch. Zusätzliche Absatzmärkte für die Produkte müssten erst entwickelt werden.

Dass ländliche Regionen jedoch durchaus erfolgreich bei der Mischabbruchverwertung sein können, zeigt ein Beispiel aus dem Kanton Thurgau: In einer relativ ländlichen Region in diesem Kanton steht wohl die modernste Nassaufbereitungsanlage für Mischabbruch in der Schweiz, welche gar in der Lage ist, die Beton- und Backsteingranulate im Mischabbruchgranulat mit einer hohen Trennschärfe zu separieren (Abbildung 8). Damit sind die Voraussetzungen zur Produktion von sehr hochwertigen RC-Granulaten geschaffen, um diese anschliessend als Zuschlagstoff zur Herstellung von Konstruktionsbeton einzusetzen. Weitere Nassaufbereitungsanlagen gibt es auch in den eher ländlichen Kantonen St. Gallen und Graubünden. Das heutige und künftige Absatzpotenzial von Mischabbruchgranulaten im Konstruktionsbeton ist vielversprechend im Vergleich zu den anderen Anwendungen (Abbildung 9), es wird aber noch zu wenig genutzt. Es müssen deshalb einerseits bessere rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen geschaffen werden. Andererseits muss die Motivation und der Innovationswille seitens der Unternehmen vorhanden sein, um auf regionaler Ebene die Produkte aus der Mischabbruchaufbereitung erfolgreich anbieten und vermarkten zu können.

Welches sind nun mögliche Anreize und Rahmenbedingungen, um dieses Vorhaben zum Erfolg zu führen?

Eine erfolgreiche Verwertung beginnt bereits bei der Planung eines Rückbau- oder Sanierungsvorhabens. Ein allfälliges Konzept zur Förderung der Mischabbruchverwertung in einer Region könnte die folgenden Punkte beinhalten:

Rückbau- und Sanierungsvorhaben:

- Das für eine Baufreigabe notwendige **Rückbau- und Entsorgungskonzept** sollte die folgenden Vorgaben enthalten:
 - ⇒ Angabe der prozentualen Anteile von Mischabbruch (auch Beton-, Gipsabbruch), welche zur Verwertung bzw. Deponierung vorgesehen sind.
 - ⇒ Allenfalls sollten diesbezüglich Zielvorgaben in den Ausschreibungsunterlagen aufgeführt werden.
 - ⇒ Angabe der Verwertungsplätze, an die der Mischabbruch geliefert werden soll.
 - ⇒ Forderung nach einer effizient durchgeführten Entkernung des rückzubauenden Gebäudes und der Materialtrennung, so dass weitgehend nur noch mineralische Baustoffe für den maschinellen Rückbau im Rückbauobjekt verbleiben.
- Die Umsetzung betreffend den angegebenen Verwertungsanteilen sollte bei grösseren Projekten während der Projektausführung kontrolliert werden → z.B. durch Überprüfen der Liefer- und Deponiescheine. Dies müsste die Aufgabe der Bauleitung und bei Grossprojekten eines Fachbauleiters/Controllers sein.
- Dokumentation der Verwertung z.B. in Form einer Exceltabelle, in der die Verwertungsquote vom Mischabbruch aufgeführt ist.

Deponien/Deponiebetreiber:

- Die Deponiebetreiber dürfen den Begriff «Inertstoff» nicht mehr in den Annahmekriterien und Preislisten verwenden.
- Die durchschnittlichen Deponiepreise müssten im Bereich von 50 – 60 Fr./t liegen. Allenfalls könnte die VASA-Gebühr entsprechend angepasst werden.
- Die Deponierungspreise für «verschmutzten Mischabbruch» müssten mindestens 20% höher liegen als jener für «sauberen Mischabbruch» → Ziel: bessere Materialtrennung auf der Baustelle.

BSAA-Betreiber, Betonproduzenten, Bauingenieure, Endkunden:

- Es sollte ein Know-How-Aufbau bei den regionalen BSAA-Betreibern, Betonproduzenten, Bauingenieuren und Endkunden stattfinden. Oft fehlt das Wissen zu den verfügbaren Aufbereitungstechnologien, bzw. zur Produktion von hochwertigen Mischabbruchgranulaten z.B. für den Einsatz im Konstruktionsbeton.
- Die kantonalen Hoch- und Tiefbauämter sind wichtige Akteure mit Vorbildcharakter. Diese müssen die Ingenieure dazu bewegen, RCM-Baustoffe auszuschreiben. Zudem könnten diese Akteure Mustertextblöcke zur Ausschreibung von RCM-Produkten den Gemeinden und privaten Bauherren zur Verfügung stellen.

- Eine verstärkte Zusammenarbeit der Hoch- und Tiefbauämter mit den kantonalen Kiesverbänden und dem ARV sollte angestrebt werden, um die Unternehmen in diesen Prozess mit einbeziehen zu können. Die Initiative, Koordination und Moderation dieses Prozesses könnten die Umweltämter übernehmen.

Bei den aufgeführten Punkten handelt es sich um Vorschläge, welche durch weitere Punkte ergänzt oder den gegebenen Umständen angepasst werden können. Jeder Region hat eine andere Ausgangslage, dies muss bei einer Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts berücksichtigt werden.

Bei der Entwicklung eines regionalen Verwertungskonzepts für Mischabbruch spielt die Marktfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Produkten aus der Mischabbruchaufbereitung eine entscheidende Rolle. Die Analyse der Preislisten im Kapitel 5.1.2 der BSAA-Betreiber sowie die Kostenanalyse der Verwertungsoptionen von Mischabbruchgranulaten zeigt (Tabelle 2), dass die Produktion von MAG für den losen Einsatz nur kleine Margen verspricht. Zudem lassen sich diese Produkte aufgrund der Konkurrenz durch die anderen RC-Kiessande und wegen der Bedenken seitens der Tiefbauämter betreffend Qualität der MAG kaum absetzen. Diese Bedenken werden durch Resultate der Risikoanalyse eher gestützt.

Relativ einfach umzusetzen ist jedoch der Einsatz von MAG als Zuschlagstoff im Magerbeton und im Konstruktionsbeton. Hier können relativ hohe Margen erzielt werden. Die Investitionskosten zur Herstellung von RCM-Magerbeton sind tief. Deshalb scheint diese Anwendung erste Wahl bei der Entwicklung von neuen Absatzkanälen für MAG zu sein. Allerdings zeigt die Risikoanalyse, dass die Fraktion <8mm bis auf Weiteres vorabgesiebt werden sollte, was die Marge deutlich reduziert. Vielversprechend ist die Produktion von Brechsand aus der Trockenaufbereitung. Obwohl auch hier die Fraktion <8mm abgesiebt und entsorgt oder behandelt werden muss, bewegen sich die potenziellen Margen auf relativ hohem Niveau (Tabelle 2) und dies bei relativ tiefen Investitionskosten. Gleiches gilt grundsätzlich für den RCM-Konstruktionsbeton mit MAG aus der Nassaufbereitung. Allerdings ist hier von hohen Investitionskosten auszugehen, was eine entsprechend grosse Anlage mit hohem Materialumsatz bedingt.

Die Kombination der Informationen zum künftigen Anfall von Mischabbruch, zur Entwicklung der potenziellen Verwertungsoptionen, der wirtschaftlichen Analyse mit den Resultaten der Risikobewertung zeigen somit, dass die folgenden Anwendungen künftig zu favorisieren sind:

- **MAG sollten vor allem in gebundenen Anwendungen eingesetzt werden, weil hier die grössten Absatzpotenziale zu erwarten sind.**
- **Die Produktion von MAG aus der Trockenaufbereitung für den RCM-Magerbeton ist einfach zu realisieren und kostengünstig. Die Margen sind klein, wenn die Fraktion <8mm vorabgesiebt und entsorgt werden muss. Sollte eine kostengünstige Behandlung gefunden werden, kann eine höhere Marge erzielt werden. Zudem könnte der Preisnachlass gegenüber dem konventionellen Magerbeton reduziert werden, um eine höhere Marge zu erzielen.**
- **Mit MAG aus der Trockenaufbereitung für die Produktion von RCM-Konstruktionsbeton können ebenfalls positive Margen erzielt werden. Das Schadenrisiko ist etwas höher als bei der Nassaufbereitung.**

- **Mit der Produktion von MAG-Brechsand aus der Trockenaufbereitung für den RCM-Konstruktionsbeton kann eine relativ hohe Marge erzielt werden. Das Schadenrisiko ist sehr gering, weil unter anderem die Leichtstoffe beim Einbringen des Betons nicht sichtbar sind.**
- **Die Produktion von MAG aus der Nassaufbereitung für den RCM-Konstruktionsbeton ergibt hohe potenzielle Margen bei relativ hohen Investitionskosten. Das Schadenrisiko ist sehr gering.**

Ergänzend zu den aufgeführten Anwendungen kann der Mischabbruch bzw. die Fraktion <8mm auch in der Zementindustrie als Klinkerersatz bzw. Filler im Zement eingesetzt werden. Da damit gleichzeitig die CO₂-Emissionen in der Zementproduktion reduziert werden können, ist dies ein vielversprechendes Einsatzgebiet mit relativ hohem Absatzpotenzial (Abbildung 7). Insbesondere die Verwertung der Fraktion <8mm in dieser Anwendung ist diesbezüglich interessant, weil diese gemäss dem Resultat aus der Risikobewertung bei den Trockenverfahren ausgeschieden werden müsste. Mit einer Weiterbehandlung und stofflichen Verwertung dieser Fraktion liesse sich ein grosser Teil des anfallenden Mischabbruchs in den Baustoffkreislauf zurückführen.

8.2 Empfehlungen

Die Empfehlungen für den zukünftigen Umgang mit Mischabbruch zur inhaltlichen Gestaltung des zu erarbeitenden Moduls «Bauabfälle: Teil Verwertung mineralischer Rückbaumaterialien» der VVEA-Vollzugshilfe leiten sich aus den Erkenntnissen der Studie und der im vorangegangenen Kapitel thematisierten Aspekte zur Mischabbruchverwertung ab. Nachfolgend werden die einzelnen Empfehlungen aufgeführt. Es wird jeweils begründet, warum diese Empfehlungen abgegeben werden. In einem ersten Teil wird auf die Empfehlungen zum Einsatz von MAG in den verschiedenen Anwendungen eingegangen. Anschliessend werden weitere allgemeine Empfehlungen aufgeführt.

8.2.1 Empfehlungen zum Einsatz von MAG in den verschiedenen Anwendungen

Empfehlung: MAG aus der Trockenaufbereitung für den losen Einsatz unter Deckschicht sollte nicht mehr zugelassen werden.

Die deskriptive Risikobeurteilung der verschiedenen Verwertungsoptionen von Mischabbruch ergibt als Resultat, dass MAG aus der Trockenaufbereitung für den Einsatz in loser Form unter einer Deckschicht ein höheres Risiko aufweist als jene aus der Nassaufbereitung. Diese Anwendung liegt deshalb ausserhalb des vom Autor definierten Risikoakzeptanzniveaus in der Risikomatrix (grüne Fläche in der Tabelle 10). Die Festsetzung des Risikoakzeptanzniveaus basiert auf der subjektiven Sichtweise und kann von anderen Experten bei Bedarf verschoben werden. Allerdings ist zu bedenken, dass es für dieses Produkt kaum einen Absatzmarkt gibt (Kapitel 5.1.2), da die angebotenen MAG grosse Qualitätsunterschiede aufweisen können. Zudem ist die potenzielle Marge relativ klein (Kapitel 5.1.3). Im Gegensatz dazu ist bei Nassaufbereitung gewährleistet, dass vor allem die organischen Schadstoffe effizient in den Filterkuchen transferiert werden. Zudem spielt es keine wesentliche Rolle, ob der Mischabbruch

bei nassem oder trockenem Wetter aufbereitet wird. Bei der Trockenaufbereitung spielt die Witterung hingegen eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Effizienz der Vorabsiebung (siehe dazu Kapitel 3.2.2). Mit der Nassaufbereitung kann gewährleistet werden, dass hochwertige Mischabbruchgranulate angeboten werden. Damit können die Bedenken der Tiefbauämter weitgehend ausgeräumt werden. Die Konkurrenz zu den anderen RC-Kiessanden besteht jedoch weiterhin.

Empfehlung: MAG aus der Nassaufbereitung für den losen Einsatz **ohne** Deckschicht sollte nicht zugelassen werden.

Verschiedene Akteure möchten gerne MAG aus der Nassaufbereitung für den losen Einsatz ohne Deckschicht zulassen. Die Risikobeurteilung zeigt jedoch, dass das Schadenrisiko deutlich über dem Risikoakzeptanzniveau liegt. Die VVEA-Eluatkonzentrationen von MAG 8-32mm aus der Nassaufbereitung zeigen (Tabelle 5), dass die Grenzwerte für die Grundwassernutzung als Trinkwasser (GSchV Anh. 2, Ziff. 22) für DOC, Sulfat und Ammonium überschritten werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz in loser Form ohne Deckschicht nicht zu empfehlen. Zudem würde eine Zulassung dieser Anwendung den Vollzug erschweren, da auf der Baustelle visuell nicht erkennbar ist, wie das MAG aufbereitet wurde.

Empfehlung: RCM-Magerbeton, welcher MAG aus der Trockenaufbereitung enthalten, die nicht vorabgesiebt wurden, sollten nicht zugelassen werden.

In vielen Regionen wird RCM-Magerbeton eingesetzt, welcher MAG aus der Trockenaufbereitung enthalten, die nicht vorabgesiebt wurden. Die Fraktion <8mm enthält die grössten Anteile an Schadstoffen. Gelangen diese in den Magerbeton werden diese zwar hydraulisch gebunden. Es liegen aber keine Studien zum Schadstoffauswaschverhalten von Magerbeton vor, welche nicht vorabgesiebtes MAG enthalten. Es ist deshalb zu empfehlen, bis auf Weiteres nur RCM-Magerbeton mit vorabgesiebten MAG zuzulassen. Durch die Vorabsiebung wird auch gewährleistet, dass sich keine Schadstoffe im Beton anreichern, gerade auch im Hinblick auf ein späteres Rerecycling. Sollten Analysen jedoch zeigen, dass im Vergleich zum RCM-Magerbeton mit vorabgesiebten MAG weder ein vermehrter Schadstoffaustrag noch eine Anreicherung von Schadstoffen stattfindet, könnte auch diese Anwendung zugelassen werden. Es ist deshalb zu empfehlen, solche Untersuchungen durchzuführen.

8.2.2 Weitere allgemeine Empfehlungen

Erhöhung der Deponiepreise bzw. Steuerung/Lenkung der Entsorgungswege

Die Deponiepreise in einigen Regionen sind «zu tief», so dass die Anreize fehlen, Mischabbruch zu verwerten. Möglicherweise ist eine solche Steuerung durch Anpassungen bei der VASA-Gebühr oder aber durch Lenkungsabgaben (auf regionaler Ebene) sinnvoll. Das Preisniveau für die Deponierung von Mischabbruch sollte im Bereich von 50-60 Fr./t liegen, wobei der Preis für «verschmutzten Mischabbruch» nochmals rund 20% höher liegen müsste.

Ersetzen des Begriffs «Inertstoffe» in Preislisten durch Mischabbruch

Der Begriff «Inertstoffe» sollte in keinen Preislisten von Deponien und Verwertern verwendet werden.

Einbezug der Zementindustrie

Die Zementindustrie nimmt bei der Verwertung vom Mischabbruch künftig eine immer wichtigere Rolle ein. So könnte hier beispielsweise die Fraktion <8mm, welche sonst deponiert werden müsste, stofflich verwertet werden. Somit liessen sich über diese Verwertungsoption die «nicht verwertbaren» Mischabbruchfraktionen in den Baustoffkreislauf zurückführen. Zudem werden in der Zementindustrie grosse Materialmengen umgesetzt, womit grundsätzlich das entsprechende Abnahmepotenzial zur Verfügung stehen würde. Aus diesem Grund sollte hier ein verstärkter Austausch zwischen den verschiedenen Akteuren zum Thema Mischabbruchverwertung in der Zementindustrie angestrebt werden. Eventuell sind dazu weitere Abklärungen notwendig.

Förderung der Mischabbruchverwertung vor allem in ländlichen Regionen

Vor allem ländliche Regionen sollten bei der Förderung der Mischabbruchverwertung stärker unterstützt werden. Die kantonalen Umweltämter könnten beispielsweise Verwertungskonzepte in Zusammenarbeit mit den Gemeinden ausarbeiten oder entsprechende Hilfestellungen zur Verfügung stellen. Mögliche Inhalte und Schwerpunkte der Verwertungskonzepte sind im Kapitel 8.1 aufgeführt

Bei den aufgeführten Empfehlungen handelt es sich um Vorschläge. Sie sollen vor allem dazu dienen, die gängigen Meinungen zur Mischabbruchverwertung nochmals zu reflektieren und dazu anregen, den neuen innovativen Verwertungsstrategien ausreichend Platz zu geben, damit diese nicht eingeschränkt, sondern künftig weiterentwickelt werden können.

9 Literaturverzeichnis

- BAFU. (2006). Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle. *Umwelt-Vollzug Nr. 0631*. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- BAFU. (2015). Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau. *Studie 2015*. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern.
- BAFU. (2016). Bauabfälle in der Schweiz - Tiefbau. *Aktualisierung 2015*. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern.
- Brunner F., Montalvo D., Ott.D. (2006). Mineralische Sekundärressourcen - Potenziale von Recyclingprodukten aus Mischabbruchfraktionen. ETH Zürich. Zürich.
- Hoffmann C, Figi R. (2). (2006). Umweltrelevanz bei der Wiederverwendung von Bauabfällen - Aus Recyclingbeton werden kaum Schadstoffe ausgewaschen. *Zürcher Umweltpraxis*, Nr. 45. Zürich.
- Hoffmann C., Figi R. (1). (2006). Untersuchung der Grundwasserverträglichkeit von Magerbeton aus RC-Material. EMPA-Bericht Nr. 203600.1. Dübendorf.
- Hoffmann C., Leemann A. (2004). Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch. *EMPA-Bericht 203800*. EMPA. Dübendorf.
- Rechenberg, e. a. (1993). Einbindung von Schwermetallen in Sekundärstoffen. *beton* 43.
- Rechenberg, W., Sprung, S. (1998). Einbindung von Schwermetallen in Sekundärstoffendurch durch Verfestigung mit Zement. *beton* 34.
- Rubli S. (2010, 2013-2016). Modellierung der Kies-, Rückbau und Aushubmaterialflüsse. *Überregionale Betrachtung*. Umweltämter der Kantone Aargau, Bern, Luzern, Thurgau, Schwyz.
- Rubli S. (2011). Recyclingbeton: Analysen zur Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich. Zürich.
- Rubli S. Brupbacher A. Rubli D. (2017). Grundlagen zur «best practice» in Bauschutttaufbereitungsanlagen (BSAA). *Material- und Stoffanalysen in Bauschutttaufbereitungsanlagen mit trockener und nasser Aufbereitung von Mischabbruch*. AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. Zürich.
- Rubli S. Schneider M. (2007). *Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich. Zürich.

10 Anhang

Tabelle A. 1: Abgeschätzte Mischabbruchmengen in Bauschuttzubereitungsanlagen BSSA in den acht Kantonen und in den restlichen Kantonen.

	TG	ZH	SG	BE	LU	AG	SO	ZG	restl. Kantone (hoch- gerechnet)	CH (hoch- gerechnet)
2007	40'000	169'358	38'000	50'000	30'000	55'000	41'000	40'000	358'873	822'231
2008	40'200	201'656	40'200	68'823	36'194	57'772	25'099	26'800	384'730	881'474
2009	39'290	198'280	72'397	65'229	30'148	66'299	43'465	47'900	436'676	999'683
2010	65'500	220'310	82'933	67'914	41'313	70'255	30'797	43'298	483'487	1'105'807
2011	53'142	197'570	85'362	44'103	52'970	71'411	45'271	51'176	464'863	1'065'868
2012	62'770	208'712	72'925	65'574	43'974	85'751	28'273	50'251	478'289	1'096'519
2013	46'986	304'833	82'813	87'045	64'810	106'000	22'917	45'977	588'670	1'350'052
2014	78'000	365'625	80'158	81'634	60'898	101'000	37'541	16'258	636'568	1'457'682
2015	111'006	355'443	87'358	76'866	63'250	119'512	49'283	23'788	687'694	1'574'199
2016	131'112	314'087	95'511	72'692	67'905	117'893	42'243	44'105	686'358	1'571'906
2017	120'132	337'150	117'167	88'273	59'559	100'000	51'132	30'473	698'963	1'602'848
2018	106'001	360'213	111'202	103'854	86'419	124'531	50'860	18'831	745'291	1'707'202
<i>kursiv geschriebene Werte: abgeschätzt</i>										

Tabelle A. 2: Abgeschätzte Entwicklung der Verwertungsquoten von Mischabbruch in den acht Kantonen und in den restlichen Kantonen

	TG	ZH	SG	BE	LU	AG	SO	ZG	Mittelwert	restliche Kantone
2007	40	65	45	25	50	50	48	60	48	35
2008	46	69	50	27	54	54	48	61	50	35
2009	51	73	55	29	58	58	49	62	54	35
2010	57	78	60	31	62	62	49	63	58	35
2011	63	82	64	33	66	66	49	64	63	35
2012	68	86	68	35	70	70	50	65	65	35
2013	74	90	72	38	70	70	50	65	69	35
2014	79	90	76	40	73	74	53	67	72	35
2015	85	90	79	42	76	77	65	69	76	35
2016	85	90	85	45	77	81	65	90	79	45
2017	85	90	89	47	70	84	65	83	78	45
2018	85	90	90	50	85	88	65	75	80	50

Tabelle A. 3: Pro-Kopf-Werte bezüglich Misch- und Betonabbruch in die Verwertung und Massenverhältnis von Mischabbruch (MA) zu Mischabbruch+Betonabbruch BA in die Verwertung für die acht Kantone.

Tonnen verwerteter Mischabbruch pro Einwohner												MW
AG	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.17	0.16	0.19	0.18	0.15	0.20	0.17
TG	0.17	0.16	0.27	0.21	0.25	0.18	0.30	0.42	0.49	0.44	0.39	0.37
SO	0.10	0.17	0.12	0.18	0.11	0.09	0.14	0.19	0.16	0.17	0.19	0.16
LU	0.10	0.08	0.11	0.14	0.12	0.17	0.16	0.16	0.17	0.15	0.21	0.17
ZG	0.25	0.43	0.39	0.45	0.44	0.39	0.14	0.20	0.36	0.25	0.15	0.25
ZH	0.15	0.15	0.16	0.14	0.15	0.22	0.26	0.25	0.21	0.23	0.24	0.23
SG	0.09	0.15	0.17	0.18	0.15	0.17	0.16	0.18	0.19	0.23	0.22	0.19
BE	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07	0.09	0.10	0.08

Tonnen verwerteter Betonabbruch pro Einwohner												MW
AG	0.21	0.24	0.34	0.40	0.35	0.32	0.38	0.42	0.43	0.49	0.45	0.41
TG	0.49	0.36	0.62	0.60	0.65	0.46	0.66	0.61	0.94	0.82	0.77	0.71
SO	0.52	0.45	0.52	0.41	0.51	0.72	0.59	0.57	0.78	0.74	0.71	0.69
LU	0.39	0.68	0.45	0.85	1.00	0.99	0.98	0.57	0.61	0.79	0.91	0.81
ZG	1.26	1.43	1.19	1.07	1.18	0.91	1.18	0.97	0.83	0.80	0.69	0.90
ZH	0.40	0.41	0.46	0.48	0.46	0.48	0.60	0.56	0.57	0.59	0.61	0.57
SG	0.25	0.33	0.48	0.57	0.66	0.57	0.60	0.53	0.50	0.61	0.57	0.56
BE	0.55	0.68	0.70	1.01	0.81	0.61	0.76	0.71	0.64	0.75	0.86	0.72

Misch- und Betonabbruch in Bauschutttaufbereitung												MW
Massenverhältnis MA/(MA+BA) in %												
Kanton	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	MW
AG	31.8	31.6	25.8	22.6	28.6	34.6	29.6	30.7	29.6	23.5	31.0	29.0
TG	25.7	31.2	30.2	26.3	27.8	28.5	31.1	40.8	34.3	35.0	33.4	31.3
SO	16.2	27.8	19.0	30.1	17.7	10.9	19.6	24.6	16.9	18.9	20.9	20.2
LU	20.2	10.7	19.9	14.2	10.4	14.5	13.8	22.1	21.7	15.7	19.0	16.5
ZG	16.3	23.3	24.7	29.7	27.0	30.2	10.4	17.0	30.4	23.5	17.8	22.8
ZH	27.7	26.8	26.0	22.9	24.4	30.9	30.0	30.4	27.1	27.8	28.3	27.5
SG	25.7	31.6	26.5	23.7	18.5	23.1	21.3	24.9	27.6	27.8	27.8	25.3
BE	11.6	9.0	9.1	4.3	7.6	12.5	9.7	9.7	10.0	10.3	10.5	9.5

Tabelle A. 4: Gegenüberstellung der Eluate der Mischabbruchgranulate 8 - 32 mm aus den Trocken- und Nassaufbereitungsanlagen mit den Eluatwerten der VVEA Anhang 5 Ziff. 2 und 3 sowie weiteren Grenzwerten gemäss der Gewässerschutzverordnung (GSchV).

	VVEA-Eluate Proben		VVEA Anhang 5, Ziff. 2	VVEA Anhang 5, Ziff. 3	GSchV Anh. 2 Ziff. 1	GSchV Anh. 2 Ziff. 22	GSchV Anh. 3.2 Ziff. 2
	Trocken 8-32mm	Nass 8-32mm	Eluate Deponie Typ B	Eluate Deponie Typ C	Anforderungen an die Wasserqualität	Grundwassernutzung als Trinkwasser	Einleitung Industrieabwasser in Gewässer
Sulfat	mg/l	93±36	46±14			40	
PAK	µg/l	3.3±3.2	0.6±0.3				
Chrom, ges.	µg/l	5.7±2.5	11±12	2000	5		2000
Chrom-VI	µg/l	26±13	19±2	100			100
Kupfer	µg/l	2.5±0.7	<2	500	5		500
Vanadium	µg/l						
Zink	mg/l	0.02±0.01	0.025±0.007	10	0.02		2
Blei	mg/l	<0.001	<0.001	1	0.01		0.5
Cadmium	µg/l			100	0.2		100
DOC	mg/l	4.5±0.8	3.5±2.2	20	20	1 bis 4	2
KW ges.	mg/l	<0.01	<0.01				10
Ammonium	mg/l	0.11±0.11	0.19±0.19	0.6	6	0.24	0.1 bis 0.5
Nitrat	mg/l	8.3±7.5	2.8±0.08			25	25
Nitrit	mg/l	0.28±0.09	0.26±0.05	1	1		
Gehalt in Feststoff							
PAK	mg/kg	1.0±0.8	0.5±0.1				

