

u^b

^b
**UNIVERSITÄT
BERN**



RÜCKBAUMATERIALIEN -

Verwertungspotential der Feinfraktionen als CO₂-neutrales Rohmaterial in der Klinkerproduktion und PFAS-Vorkommen

Fachstelle Sekundärrohstoffe, Institut für Geologie, Uni Bern

Im Auftrag der Wyss Academy for Nature, des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kt. ZH (AWEL) und des cercle déchets (CD).

Bern, 23. Dezember 2024



Impressum

Auftraggeberin

Wyss Academy for Nature
Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL
Cercle déchets
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe

Auftragnehmerin

Fachstelle Sekundärrohstoffe, Institut für Geologie, Universität Bern

Berichtverfassung

Mirjam Wolffers	Fachstelle Sekundärrohstoffe (Projektleiterin)
Ilona Bosoppi	Fachstelle Sekundärrohstoffe

Ko-Referat

Urs Eggenberger	Fachstelle Sekundärrohstoffe
-----------------	------------------------------

Versuche und Analytik

Fachstelle Sekundärrohstoffe
Bachema AG

Begleitgruppe

Dominik Oetiker	AWEL, Sektion Abfallwirtschaft
Martin Moser	cercle déchets
David Hiltbrunner	BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe
Yann Huet	Baustoff Kreislauf Schweiz

Hinweis:

Diese Studie wurde im Auftrag der Wyss Academy for Nature, des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kt. ZH (AWEL) und des cercle déchets (CD) verfasst. Für den Inhalt ist allein die Auftragnehmerin verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Ziele der Studie	3
2	Probenahme und Probenaufbereitung.....	4
2.1	Überblick beprobt Standorte	4
2.2	Probenahme	5
2.3	Probenahmestellen.....	6
2.4	Probenaufbereitung.....	8
2.5	Analyse.....	8
3	Resultate.....	9
3.1	Massenströme und Absatzkanäle	9
3.2	Chemische Zusammensetzung	11
3.3	Mineralogische Zusammensetzung	15
3.4	Organische Schadstoffe in der Feinfraktion der Mischgranulate	16
4	Beurteilung Verwertungspotential im Zementwerk	22
4.1	Verwertung als Rohmaterialersatz	22
4.2	Potential als CO ₂ -neutrales Material	24
4.3	Verwertung als Zumahlstoff	26
5	Zusammenfassung	26
6	Fazit und Ausblick	27
7	Referenzen.....	28

1 Hintergrund und Ziele der Studie

In der Schweiz fallen jährlich gut 17 Mio. Tonnen mineralische Rückbaumaterialien an, welche in Verwertungsanlagen aufbereitet und so weit als möglich als sekundäre Gesteinskörnung wieder im Bauwerk verwertet werden. Bei der Aufbereitungs- und Verwertungsquote von Rückbaumaterialien zeigen sich starke regionale Unterschiede, welche stark gekoppelt an die Verfügbarkeit und Kosten von Primärressourcen und Vorhandensein von Deponievolumen sind. Der Begriff Rückbaumaterialien umfasst die Kategorien Ausbauasphalt, Strassenaufrüttung, Beton- und Mischabbruch sowie Ziegelbruch und weitere mineralische Bauabfälle wie sortenreiner Gips, Keramik oder Glas (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023). In diese Studie liegt der Fokus auf den Rückbaumaterialien Beton- und Mischabbruch. Aufgrund des an der Gesteinskörnung anhaftenden Zementsteins und der Annahme, dass sich dieser aufgrund der geringeren Härte/Festigkeit beim Brechprozess in der Feinfaktion anreichert, könnten die Feinfractionen aus Beton- und Mischgranulat vielversprechende CO₂-neutrale Rohmaterialien in der Klinkerproduktion darstellen.

CO₂-neutrale Rohmaterialien sind Materialien, die zum Zeitpunkt ihrer Entstehung weitestgehend CO₂-frei sind, jedoch während der Nutzung, Lagerung und Aufbereitung zum alternativen Rohmaterial kurzfristig CO₂ aus der Luft binden (Wolffers et al., 2023). Das kurzfristig gebundene CO₂, welches bei der Klinkerproduktion wiederum ausgetrieben wird, trägt nicht zum Treibhauseffekt bei und kann als klimaneutral angesehen werden (Abbildung 1). Der Einsatz von CO₂-neutralen Rohmaterialien als Substitution für den Kalkstein in der Klinkerproduktion hat aus wissenschaftlicher Sicht ein großes Potential, um die CO₂-Bilanz des Zements nachhaltig zu senken. Jedoch kann kurzfristig gebundenes, klimaneutrales CO₂ heute rohstoffseitig in der Klinkerproduktion noch nicht angerechnet werden. Die Anrechenbarkeit wäre aber ein großer Treiber für die Verwertung von CO₂-neutralen Rohmaterialien (v.a. Rückbaumaterialien und Verbrennungsrückstände).

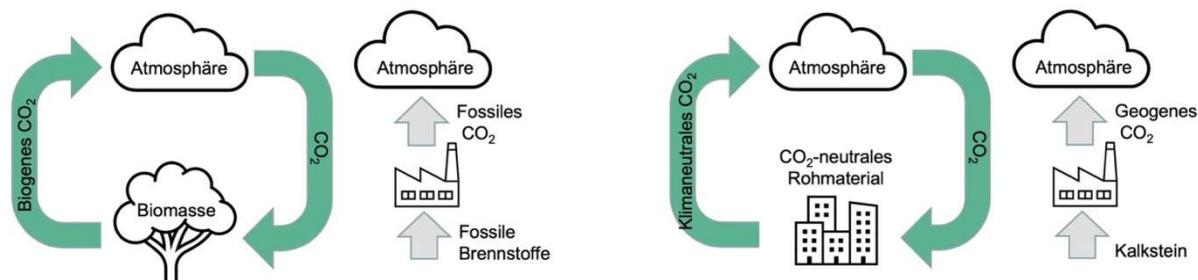


Abbildung 1: Analog wie bei den biogenen Brennstoffen für die Klinkerproduktion (links) würde durch den Einsatz von CO₂-neutralen Rohmaterialien kurzfristig gebundenes CO₂ in die Atmosphäre emittiert, welches als klimaneutral angesehen werden kann, da es nicht zum Treibhauseffekt beiträgt. Durch eine konsequente Teilsubstitution von Kalkstein durch CO₂-neutrale Rohmaterialien könnte daher der Ausstoß von geogenem und somit treibhausgasförderndem CO₂ in die Atmosphäre reduziert werden.

Die heute anfallenden Mengen an Betonabbruch werden auf ca. 5 Mio t geschätzt (Hiltbrunner, 2017). Es handelt sich bei den Mengenangaben um modellierte Zahlen, die mit einer Unsicherheit verbunden sind. Betonabbruch wird zu Betongranulat aufbereitet und das produzierte Betongranulat hauptsächlich gebunden als RC-Gesteinskörnung oder ungebunden als RC-Kiessand im Strassenbau verwertet. Die Recyclingquote von Betonabbruch beträgt laut Schätzungen ca. 85 % (Matasci et al., 2019). Gespräche mit Betonproduzenten haben gezeigt, dass die Feinfaktion 0 – 4 mm der Betongranulate als Füller im Beton eingesetzt wird, sich jedoch die hohe Wasseraufnahmefähigkeit aufgrund des anhaftenden Zementsteins negativ auf die Produktion auswirkt.

Die jährlich anfallende Menge Mischabbruch wird auf ca. 2.4 Mio. t geschätzt (Rubli, 2020). Davon gelangen gut 70% in Aufbereitungsanlagen, um Mischgranulat herzustellen. Das produzierte Mischgranulat wird entweder gebunden als RC-Gesteinskörnung im Konstruktions-, Mager- oder Spritzbeton eingesetzt sowie auch zunehmend als Zumahlstoff in der Zementproduktion. Das Modul «Verwertung mineralischer

Rückbaumaterialien» (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023) fordert bei der Produktion von Mischgranulaten für den Einsatz in ungebundenen Anwendungen im Falle einer Trockenaufbereitung die Vorabsiebung der Feinfraktion 0 – 8 mm. Die abgesiebte Feinfraktion ist nach den Vorgaben der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) zu verwerten oder entsorgen.

Da die Datengrundlage zu den stofflichen Qualitäten der Feinfraktionen von Beton- und Mischgranulaten sehr limitiert ist, sollen in dieser Studie die stofflichen Qualitäten der Feinfraktionen von Betongranulat (0 - 4 mm)- und Mischgranulat (0 – 8 mm) erhoben und das Verwertungspotential als Rohmaterialersatz im Zementwerk untersucht werden. In Bezug auf den Mischanbruch war das ursprüngliche Ziel dieser Studie, die stofflichen Qualitäten der Vorabsiebung zu beproben. Da diese aber an den besuchten Standorten nicht separat ausgesiebt wird, wurde die Feinfraktion 0 - 8 mm der Mischgranulat beprobt, da diese die Vorabsiebung enthält. Die gewonnenen Daten bilden zudem eine wichtige Grundlage, um das Schadstoffpotential im Falle einer Deponierung zu evaluieren.

Die Studie ist in das mehrjährige Forschungsprojekt «Ersatzrohstoffe in der Kreislaufwirtschaft» der Wyss-Academy for Nature der Universität Bern eingebettet, in welchem die stofflichen Qualitäten und das Verwertungspotential von div. Mineralischen Abfällen der Schweiz untersucht wird.

2 Probenahme und Probenaufbereitung

2.1 Überblick beprobte Standorte

Für die Studie wurden schweizweit 18 Anlagen berücksichtigt, deren geographische Verteilung auf Abbildung 2 dargestellt ist. Es handelt sich dabei um Anlagen mit mobilen Brechsystemen, die vereinzelt zusätzlich mit Infrastruktur zur nassen Aufbereitung (Waschanlage, Schwimm-Sink Anlage) ausgerüstet sind. Die Details zu den Anlagestandorten bezüglich Anlagengrösse und zusätzlicher Aufbereitungsinfrastruktur ist in Tabelle 1 gelistet.

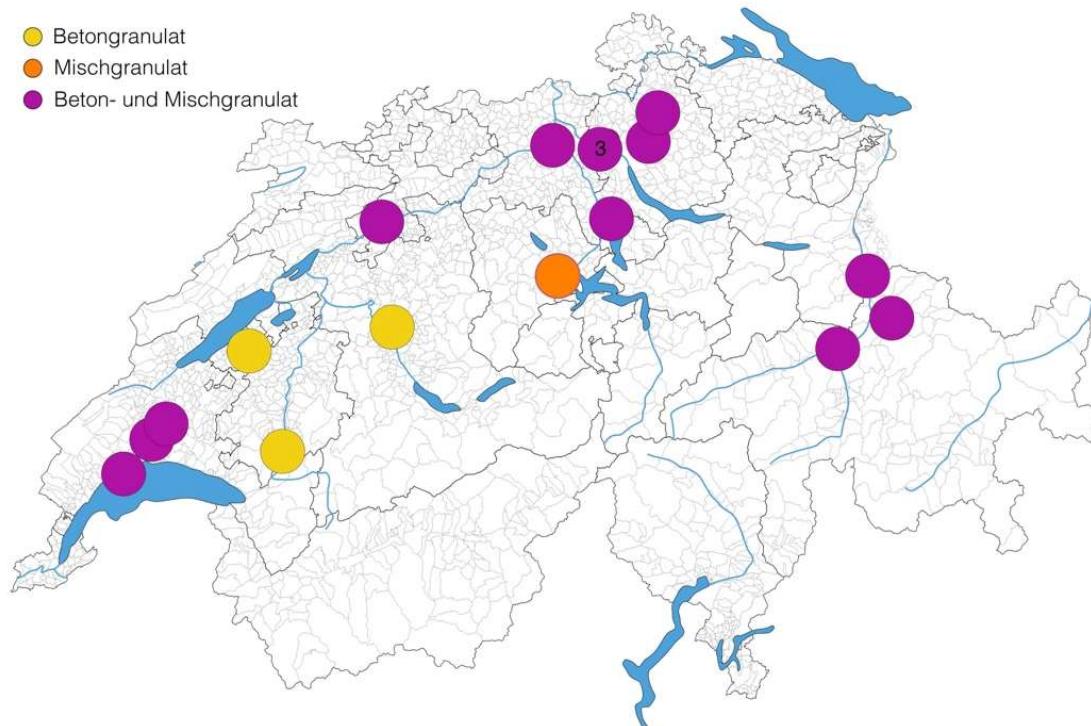


Abbildung 2: Übersicht über die regionale Verteilung der beprobten Anlagen. Im Raum Zürich fallen 3 beprobte Anlagen in denselben geografischen Grobstandort (gekennzeichnet mit der Zahl 3). Die Farbe der Kreise markiert, an welchen Standorten welche Proben entnommen wurden. Gelbe Kreise: Beprobung Betongranulat; Orange Kreise: Beprobung Mischgranulat; Violette Kreise: Beprobung Beton- und Mischgranulat.

Tabelle 1: Anlagenliste mit Angaben zur Anlagengrösse: Kleine Anlage <40'000 t/Jahr, mittlere Anlage 40-80'000 t/Jahr, grosse Anlage >80'000 t/Jahr prozessierte Menge Beton- resp. Mischabbruch.

Anlagen N°	Anlagengrösse		Bemerkungen
	Mischabbruch (t/y)	Betonabbruch (t/y)	
1	Klein	Mittel	
2	Klein	Klein	
3	k.A.	Klein	
4	Klein	Klein	
5	Klein	Mittel	Verfügt über Schwimm-Sink Anlage
6	Klein	Klein	
7	-	Klein	
8	Klein	Klein	Vorabsiebung wird in Waschanlage aufbereitet
9	Klein	Klein	
10	Mittel	Mittel	Vorabsiebung wird in Waschanlage aufbereitet
11	Mittel	-	Verfügt über Schwimm-Sink Anlage
12	Mittel	Mittel	
13	-	Klein	
14	Mittel	Gross	
15	Klein	Klein	Vorabsiebung wird in Waschanlage aufbereitet
16	Klein	Mittel	Vorabsiebung wird in Waschanlage aufbereitet
17	Mittel	Klein	Mischabbruch wird in Waschanlage aufbereitet
18	-	Mittel	

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte im Zeitraum März - Mai 2023. Die Proben wurden dem Haufen entnommen, nach vorgängiger Durchmischung des Haufens durch einen Pneulader. Es wurden jeweils ca. 30 Inkrementen à 5 kg zu einer Sammelprobe vermengt (Abbildung 3). Nach Homogenisieren der Sammelprobe wurde die Feinfraktion (Mischgranulat 0 - 8mm, Betongranulat 0 - 4 mm) durch ein Sandsieb abgesiebt und die jeweiligen Fraktionen gewogen. Von der Feinfraktion wurde jeweils eine repräsentative Teilprobe von ca. 25 kg entnommen.



Abbildung 3: Impressionen der Probenahme.

2.3 Probenahmestellen

Die beprobteten Standorte verfügen mehrheitlich über ein trockenes Aufbereitungsverfahren zur Herstellung von Beton- und Mischgranulat. In der trockenen Aufbereitung werden dabei mobile Brech- und Siebanlagen verwendet, während die Nassaufbereitung von Mischabbruch gerade an grösseren Standorten über stationäre Waschanlagen läuft. Die Prozessschritte für die Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch in mobilen Brech- und Siebanlagen sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Grün markiert sind die für diese Studie gewählten Probenahmestellen.



Abbildung 4: Schematische Darstellung der Prozessschritte für die trockene Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch in mobilen Brech- und Siebanlagen. Grün markiert sind die für diese Studie gewählten Probenahmestellen.

Die Unterschiede der verschiedenen Probetypen sind in Tabelle 2 erläutert. Grundsätzlich galt das Hauptinteresse dieser Studie den Probentypen Feinfraktion Betongranulat 0 - 4 mm und Feinfraktion Mischgranulat 0-8 mm (Qualität 1 (Q1)). Zum qualitativen Vergleich wurden aber noch vereinzelt Proben der anderen Probentypen beprobt, da insbesondere die Mischgranulat Feinfraktion Qualität 2 (Q2) und 3 (Q3) bereits im Zementherstellungsprozess als Zumahlstoff eingesetzt werden. Eine Übersicht über die entnommenen Proben findet sich in Tabelle 3 (Mischgranulat) und Tabelle 4 (Betongranulat).

Tabelle 2: Erläuterung der Charakteristiken der versch. Probentypen.

Probentyp	Erläuterung
Betonabbruch Vorabsiebung 0-4 mm	Vorabsiebung vor Brech- und Siebstufe, fällt vor Aufbereitungsprozess an
Betongranulat Feinfraktion 0-4 mm	Siebfraktion des gebrochenen Materials, fällt nach Aufbereitungsprozess an
Mischabbruch Vorabsiebung 0-8 mm	Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung, fällt vor Aufbereitungsprozess an
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q1	Siebfraktion des auf 0-16/0-22 gebrochenen Inputmaterials, fällt nach Aufbereitungsprozess an
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q2	Siebfraktion des auf 0-8 gebrochenen Inputmaterials, fällt nach Aufbereitungsprozess an
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q3	Siebfraktion des auf 0-8 gebrochenen Überkorns, fällt nach Aufbereitungsprozess an
RCM Sand 0-4 mm	Mischsand aus nasser Aufbereitung

Tabelle 3: Probenliste Mischgranulat gelistet nach Probentyp.

Anlagen N°	Probenkürzel	Fraktion Anlage	Fraktion beprobt	Beprobung	Analyse Org. Schadstoffe
Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung					
8	RC-M 8.1	0-16	0-8	repräsentativ	1
10	RC-M 10.1	0-22	0-8	Stichprobe	1
15	RC-M 15.1	0-22	0-8	Stichprobe	1
16	RC-M 16.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q1					
1	RC-M 1.1	0-16	0-8	repräsentativ	1
2	RC-M 2.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
2	RC-M 2.2	0-4	0-4	Stichprobe	-
4	RC-M 4.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
5	RC-M 5.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
5	RC-M 5.2	0-16	0-8	repräsentativ	1
6	RC-M 6.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
9	RC-M 9.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
11	RC-M 11.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
12	RC-M 12.1	0-22	0-8	repräsentativ	1
12	RC-M 12.2	0-4	0-4	Stichprobe	1
14	RC-M 14.1	0-16	0-8	repräsentativ	1
17	RC-M 17.1	0-16	0-8	repräsentativ	1
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q2					
4	RC-M 4.3	0-8	0-8	Stichprobe	1
9	RC-M 9.2	0-8	0-8	Stichprobe	1
10	RC-M 10.2	0-8	0-8	Stichprobe	1
15	RC-M 15.2	0-8	0-8	Stichprobe	1
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q3					
8	RC-M 8.2	0-8	0-8	Stichprobe	-
11	RC-M 11.2	0-8	0-8	repräsentativ	-
Mischsand 0-4mm aus nasser Aufbereitung					
3	RC-M 3.1	0-4	0-4	Stichprobe	-
15	RC-M 15.3	0-4	0-4	Stichprobe	-
17	RC-M 17.2	0-4	0-4	Stichprobe	-

Tabelle 4: Probenliste Betongranulat, gelistet nach Probentyp.

Anlagen N°	Probenkürzel	Fraktion Anlage	Fraktion beprobt	Beprobung	Analyse Org. Schadstoffe
Vorabsiebung (Austrag Feingut bei hohem Feinanteil)					
10	RC-B 10.1	0-22	0-4	Stichprobe	-
Betongranulat Feinfaktion 0-4 mm					
1	RC-B 1.1	0-16	0-4	repräsentativ	-
2	RC-B 2.1	0-16	0-4	repräsentativ	-
3	RC-B 3.1	0-22	0-4	Stichprobe	-
4	RC-B 4.1	0-22	0-4	repräsentativ	-
5	RC-B 5.1	0-8	0-4	repräsentativ	-
5	RC-B 5.2	0-4	0-4	repräsentativ	-
6	RC-B 6.1	0-22	0-4	repräsentativ	-
7	RC-B 7.1	0-16	0-4	repräsentativ	-
8	RC-B 8.1	0-16	0-4	repräsentativ	-
9	RC-B 9.1	0-22	0-4	repräsentativ	-
12	RC-B 12.1	0-22	0-4	repräsentativ	-
13	RC-B 13.1	0-30	0-4	repräsentativ	-
14	RC-B 14.1	0-22	0-4	repräsentativ	-
15	RC-B 15.1	0-22	0-4	Stichprobe	-
16	RC-B 16.1	0-22	0-4	repräsentativ	-
16	RC-B 16.2	0-4	0-4	repräsentativ	-
17	RC-B 17.1	0-16	0-4	repräsentativ	-
18	RC-B 18.1	0-16	0-4	Stichprobe	-

2.4 Probenaufbereitung

Die Proben der Feinfaktionen wurden im Labor bei 40°C getrocknet, gesplittet und auf ca. 2 mm gebrochen. Die gebrochene Probe wurde im Rotationsprobenteiler in eine Analyse- und Rückstellprobe geteilt. Die Analyseprobe wurde in der Scheibenschwingmühle auf <100 µm gemahlen.

Für die chemische Analyse wurde ein Aliquot der gemahlenen Probe bei 105°C getrocknet und zu Glas- und Pulverpillen verarbeitet. Für die Analyse der Hauptelemente wurden Glasperlen mit geeglühten (950°C) Probenmaterial im Verhältnis 1:10 mit Flux (PANalytical C-0640-70; LiT/LiM/LiI = 67/33/0.5) im Katanax-P1-Ofen hergestellt. Für die Analyse der Spurenelemente wurde getrocknetes Probenmaterial (105°C) im Verhältnis 1:4 mit Cereox-Hochstwachs im Achatmörser homogenisiert und mittels hydraulischer Presse (Specac Atlas Autotouch 25T) bei einem Druck von 16 t zu Pulverpresslingen gepresst.

Für die mineralogische Analyse wurde die gemahlene Probe im Verhältnis 1:5 mit dem internen Standard Korund (Al_2O_3) ohne Zugabe von Ethanol in einer Spezialmühle (Retsch XRD McCrone) auf <5 µm gemahlen und homogenisiert.

Für die Analyse der organischen Schadstoffe wurden repräsentative Teilproben ins Analyselabor der Bachema geschickt. Die gemahlenen Proben wurden gemäss VVEA Vollzugshilfe «Messmethoden im Abfall und Altlastenbereich» aufbereitet. Für Kohlenwasserstoff-Index $C_{10}\text{-}C_{40}$ und Polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) wurde die Probe mit einem geeigneten Lösungsmittel extrahiert. Für die Analyse des organischen Kohlenstoffs (TOC400) war keine weitere Probenaufbereitung notwendig.

2.5 Analyse

Die chemische Zusammensetzung wurde mittels Röntgenfluoreszenz (XRF) mit dem wellenlängendispersiven (WD-XRF) PANalytical Zetium Spektrometer am Institut für Erdwissenschaften der Universität Freiburg durchgeführt. Für die quantitative Analyse der Hauptelemente wurden die PANalytical WROXI-Kalibrierung auf Glasperlen verwendet. Für die quantitative Analyse der Spurenelemente wurde die PANalytical ProTrace-Kalibrierung auf Pulverpresslingen verwendet.

Die mineralogische Zusammensetzung wurde mittels Röntgendiffraktion (XRD) mit einem PANalytical EMPYREAN Diffraktometer (CuK α -Strahlung) bestimmt. Die Messungen wurden an desorientierten Proben von 5 bis 75° 2Theta bei 40 kV / 40 mA durchgeführt (fixer Divergenzschlitz). Für die Quantifizierung (Rietveld-Verfeinerung) wurde die Software HighScorePlus v.4.9. von PANalytical verwendet.

3 Resultate

3.1 Massenströme und Absatzkanäle

3.1.1 Massenanteile der Feinfraktionen 0-4mm (Betongranulat) und 0-8mm (Mischgranulat)

Eine Auswertung der gewogenen Anteile der Feinfraktionen von Beton- und Mischgranulat (ausgesiebt nach dem Brechen aus 0 - 16/22) ist in Tabelle 5 dargestellt. Der Anteil der Feinfraktion 0 - 4 mm bei Betongranulat beträgt im Mittel ca. 45 gew.%, während der Anteil der Feinfraktion 0 - 8 mm bei Mischgranulat ca. 60 gew.% beträgt. Die groben Feldwerte decken sich gut mit den vorhandenen Siebkurven der einzelnen Werke.

Tabelle 5: Berechnete Anteile der Feinfraktionen in Beton- und Mischgranulat, in Bezug auf die Fraktion 0-16/0-22.

	Betongranulat 0-4 mm	Mischgranulat 0-8 mm
Mittelwert Massenanteil (%)	44	58
Minimum Massenanteil (%)	36	40
Maximum Massenanteil (%)	60	69

3.1.2 Abschätzung Massenströme Betongranulat Feinfraktion 0 – 4 mm

Die heute anfallenden Mengen an Betonabbruch werden auf ca. 5 Mio. t geschätzt (Hiltbrunner, 2017). Die Recyclingquote von Betonabbruch beträgt laut Schätzungen der EMPA bereits ca. 85 % (Matasci et al., 2019). In den beprobten Anlagen werden die Betongranulate je nach Anlage auf 0 - 22 mm oder auf 0 - 16 mm gebrochen. Zur Vereinfachung werden diese unter 0 - 22 mm zusammengefasst. Um einen groben Wert für die verfügbare Menge Betongranulat Feinfraktion 0 - 4 mm zu erhalten, wurde unter der Annahme, dass der Anteil 0 - 4 mm etwa 45 % beträgt (Tabelle 5), geschätzt, dass in der Schweiz knapp 2 Mio. Tonnen Feinfraktion 0 - 4 mm aus der Aufbereitung von Betonabbruch anfallen (Abbildung 5). Dafür wurde der Einfachheit halber, und weil keine Zahlen hierzu vorliegen, angenommen, dass andere Produktionschargen (Bsp. 0 - 45 mm) ebenfalls einen Feinanteil von ca. 45% aufweisen. Realistischerweise würde die Zahl also etwas tiefer liegen, da mit dieser Annahme der Anteil Feinfraktion in der Fraktion 0 – 45 mm eher überschätzt wird.

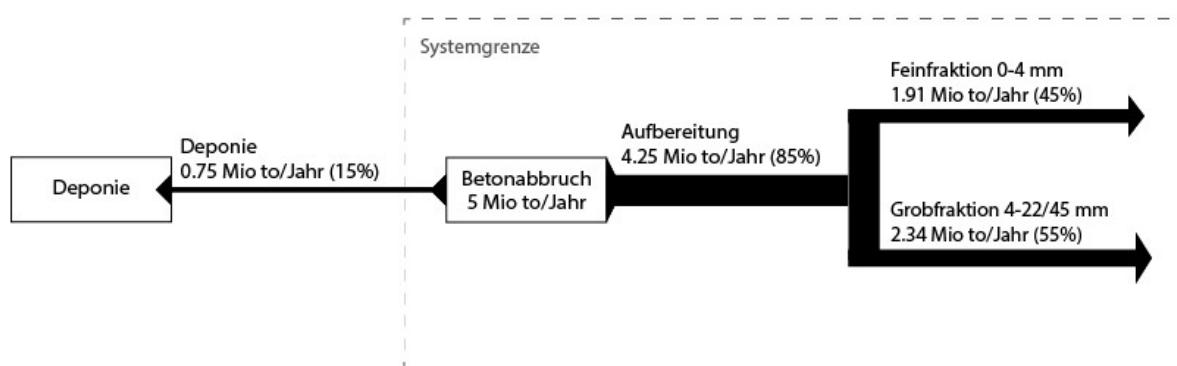


Abbildung 5: Grobe Abschätzung der anfallenden Massenströme der Fein- und Grobfraktion des Betongranulates.

3.1.3 Abschätzung Massenströme Mischgranulat Feinfaktion 0 – 8 mm

Jährlich fallen in der Schweiz ca. 2.4 Mio. t Mischabbruch an (Rubli, 2020). Davon gelangen gut 70% (ca. 1.7 Mio. t) in Aufbereitungsanlagen (Abbildung 6). Laut (Rubli, 2020) beträgt der Anteil der Feinfaktion <8 mm zw. 25 - 40%. Die Studie von Rubli et al. (2017) beschreibt bei der Mischgranulatfraktion 0 – 32 mm eine Vorabsiebung von 35% Feinfaktion (<8 mm). Nach dem Brechen entstehen erneut 25% Feinkorn (<8 mm). Ohne Vorabsiebung ergibt sich nach dem Brechen eine totale Feinkornmenge (<8 mm) von 60%. Bei den in dieser Studie untersuchten Proben (Fraktion 0 - 22 mm, ohne Vorabsiebung) ergibt sich aus den Siebfractionen ebenfalls einen Anteil an Feinfaktion (<8 mm) von ca. 60% (Tabelle 5). Unter der vereinfachten Annahme, dass auch die Fraktion 0 - 45 mm, welche chargeweise produziert wird, einen Feinanteil von ca. 60% aufweist, resultiert für die Schweiz eine jährliche Menge an Feinfaktion 0 – 8 mm des Mischgranulats von ca. 1 Mio. Tonnen.

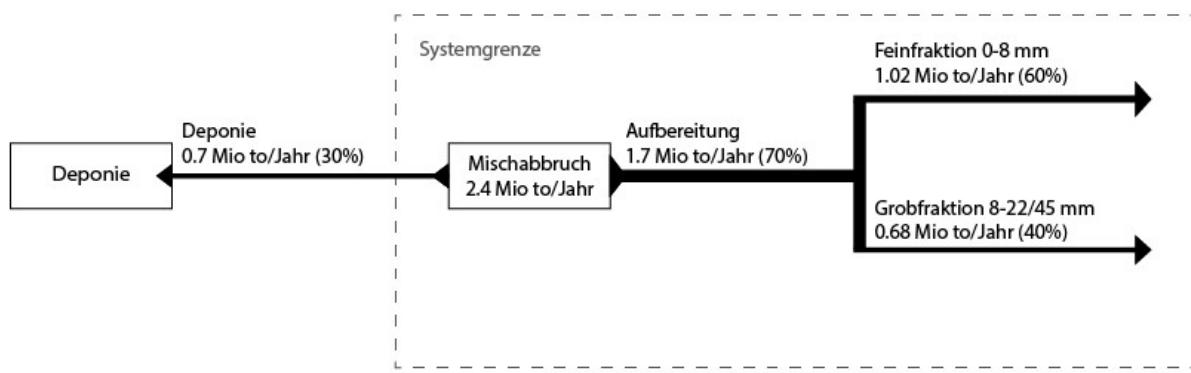


Abbildung 6: Grobe Abschätzung der anfallenden Massenströme der Fein- und Grobfraktion von Mischgranulat.

3.1.4 Absatzkanäle

Momentan wird ein grosser Anteil des verfügbaren Betonabbruchs für die Herstellung von Beton verwendet, Tendenz steigend. Von einigen beprobten Werken ist bekannt, dass die anfallende Menge Betonabbruch regional teils nicht ausreicht, um den Bedarf an RC-Beton zu decken. Gespräche mit den Betonproduzenten haben gezeigt, dass die Feinfaktion 0 – 4 mm der Betongranulat als Filler im Beton eingesetzt wird, sich jedoch die hohe Wasseraufnahmefähigkeit aufgrund des anhaftenden Zementsteins negativ auf die Produktion auswirkt. Im Gegensatz hierzu ist in Werken, welche das Betongranulat begassen, die Feinfaktion (meist 0 – 8 mm) sehr gefragt, da dieser aufgrund der grösseren spezifischen Oberfläche eine höhere CO₂-Aufnahmefähigkeit zugeschrieben wird. Es gibt somit starke regionale und Anlagen- / und prozessbedingte Unterschiede in der Attraktivität, resp. Verwertungswege von Betongranulat Feinfaktion.

Mischgranulat ist aufgrund der auffälligen Farbe (rote Backsteinbruchstücke) als RC-Gesteinskörnung für Beton weniger beliebt und auf dem Markt besser verfügbar.

Eine Auswertung der erhobenen Jahresoutputmengen im Rahmen der jährlichen Inspektionen des arv und FSKB (2023) zeigt, dass etwa 40% des aufbereiteten Betongranulats und ca. 70% des aufbereiteten Mischgranulats in gebundener Form verwertet wird (Tabelle 6). Dabei wird oftmals die Fraktion 0 - 16/22 in gebundener Form verwertet, während die Fraktion 0 - 45 eher in ungebundenen Anwendungen zum Einsatz kommt.

Tabelle 6: Übersicht über die verwerteten Mengen an Beton- und Mischgranulat im gebundenen und ungebundenen Einsatz (Jahresoutput 2023 arv & FSKB; Es fehlen Daten aus den Kantonen VS, GE, NE, TI, AI, AR).

	Ungebundener Einsatz	Gebundener Einsatz
RC-Betongranulat	1'926'944	1'364'628
RC-Mischgranulat	353'616	890'679

3.2 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung (Abbildung 7, Tabelle 7) der Feinfaktion des Betongranulats (0 – 4 mm) zeichnet sich durch die Hauptoxide SiO_2 (ca. 25 - 50 gew. %) und CaO (ca. 20 - 35 gew. %) aus. Nebenbestandteile sind vor allem Al_2O_3 (ca. 3 - 5 gew. %) sowie Fe_2O_3 , MgO , K_2O und Na_2O (ca. 1 - 2 gew. %). Die chemische Zusammensetzung der Feinfaktion des Mischgranulats (0 – 8 mm) ist sehr ähnlich und zeichnet sich durch die Hauptoxide SiO_2 (ca. 40 - 45%) und CaO (ca. 20 - 30 gew. %) aus. Im Gegensatz zum Betongranulat weist das Mischgranulat eine engere Spannweite an chemischer Hauptzusammensetzung auf, mit höheren SiO_2 -, Al_2O_3 -, Fe_2O_3 -, MgO - und SO_3 -Gehalten.

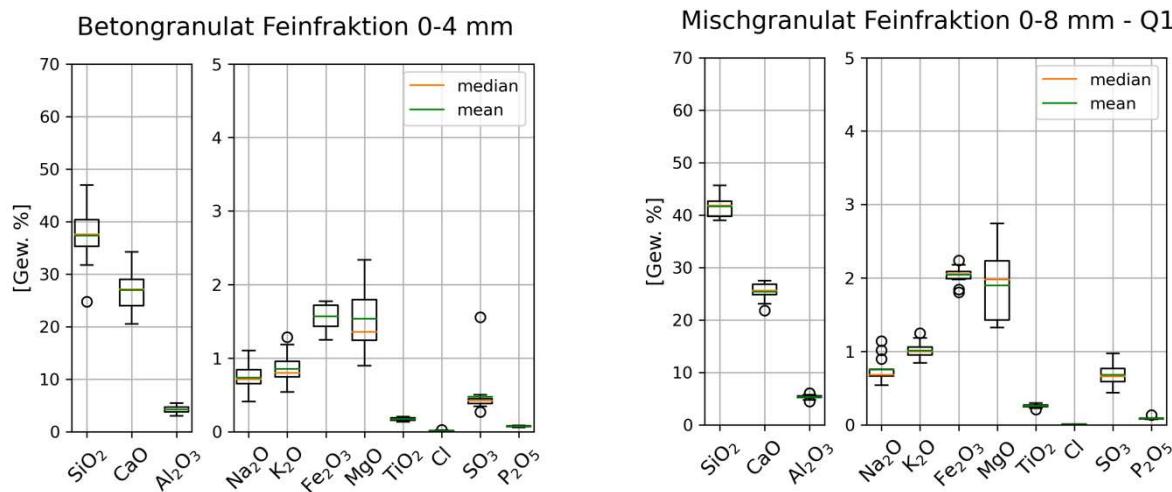


Abbildung 7: Chemische Zusammensetzung (Hauptelemente) der Beton- und Mischgranulate.

Tabelle 7: Hauptelementgehalte in den Betongranulaten. Angaben in gew.%.

Anlagen-N°	Proben-kürzel	LOI	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	Mn3O4	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2
Vorabsiebung (Austrag Feingut bei hohem Feinanteil)														
10	RC-B 10.1	21.46	4.64	23.59	0.01	1.96	0.82	1.91	0.06	0.69	0.08	0.43	36.16	0.20
Betongranulat Feinfaktion 0-4 mm														
1	RC-B 1.1	20.08	4.56	23.66	0.01	1.49	0.96	1.18	0.05	0.88	0.07	0.34	36.30	0.17
2	RC-B 2.1	20.71	4.11	26.68	0.00	1.73	0.79	2.20	0.06	0.70	0.08	0.50	42.21	0.20
3	RC-B 3.1	17.54	4.90	23.45	0.00	1.75	1.18	1.40	0.05	0.75	0.07	1.56	46.96	0.20
4	RC-B 4.1	21.12	3.68	23.20	< 0.001	1.44	0.74	1.21	0.04	0.65	0.06	0.38	36.71	0.15
5	RC-B 5.1	22.71	4.48	29.05	0.00	1.64	0.92	1.62	0.05	0.79	0.08	0.42	37.95	0.18
5	RC-B 5.2	22.05	3.83	25.58	< 0.001	1.42	0.79	1.23	0.04	0.68	0.08	0.42	33.24	0.14
6	RC-B 6.1	22.57	4.73	29.94	0.00	1.68	0.95	1.30	0.05	0.86	0.08	0.43	37.12	0.19
7	RC-B 7.1	26.77	2.97	34.17	0.01	1.25	0.54	1.27	0.05	0.49	0.06	0.34	31.69	0.13
7	RC-B 8.1	18.42	5.45	20.50	0.01	1.77	1.29	2.33	0.06	0.97	0.09	0.40	40.23	0.20
9	RC-B 9.1	22.26	3.50	24.79	< 0.001	1.43	0.67	1.52	0.04	0.59	0.07	0.41	33.10	0.15
12	RC-B 12.1	21.43	3.47	23.56	0.00	1.49	0.63	1.85	0.05	0.55	0.06	0.38	34.95	0.17
13	RC-B 13.1	22.83	4.18	25.51	0.01	1.39	0.91	1.14	0.05	0.77	0.08	0.27	36.15	0.16
14	RC-B 14.1	21.91	4.16	28.65	0.00	1.70	0.77	2.15	0.05	0.72	0.08	0.48	38.95	0.19
15	RC-B 15.1	27.82	3.03	31.69	0.00	1.40	0.54	1.62	0.05	0.41	0.07	0.47	24.77	0.13
16	RC-B 16.1	21.53	4.79	29.78	0.01	1.58	0.97	1.31	0.05	0.94	0.07	0.43	38.26	0.17
16	RC-B 16.2	19.26	5.45	27.45	0.01	1.77	1.12	1.31	0.06	1.10	0.07	0.38	41.67	0.20
17	RC-B 17.1	21.84	4.20	27.58	0.01	1.73	0.79	2.03	0.06	0.69	0.08	0.44	40.38	0.18
18	RC-B 18.1	21.05	4.16	28.87	< 0.001	1.55	0.80	0.90	0.04	0.71	0.08	0.45	40.73	0.16

Die verschiedenen Mischgranulat-Qualitäten zeigen keine grossen Unterschiede in der Hauptchemie (Abbildung 8, Tabelle 8). Die Qualitäten 2 und 3 (Q2, Q3) unterscheiden sich chemisch kaum von Qualität 1 (Q1). Die Vorabsiebung des Mischabbruchs zeigt durch die tieferen SiO₂-Gehalte ein etwas erhöhtes Ca:Si Verhältnis. Der RCM-Sand zeichnet sich durch etwas höhere SiO₂-Gehalte aus, was vermutlich mit dem fehlenden, tendenziell CaO-reicherem Feinanteil in Zusammenhang steht. Die Vorabsiebung des Betonabbruchs unterscheidet sich chemisch kaum von der Betongranulat Feinfaktion 0 - 4 mm.

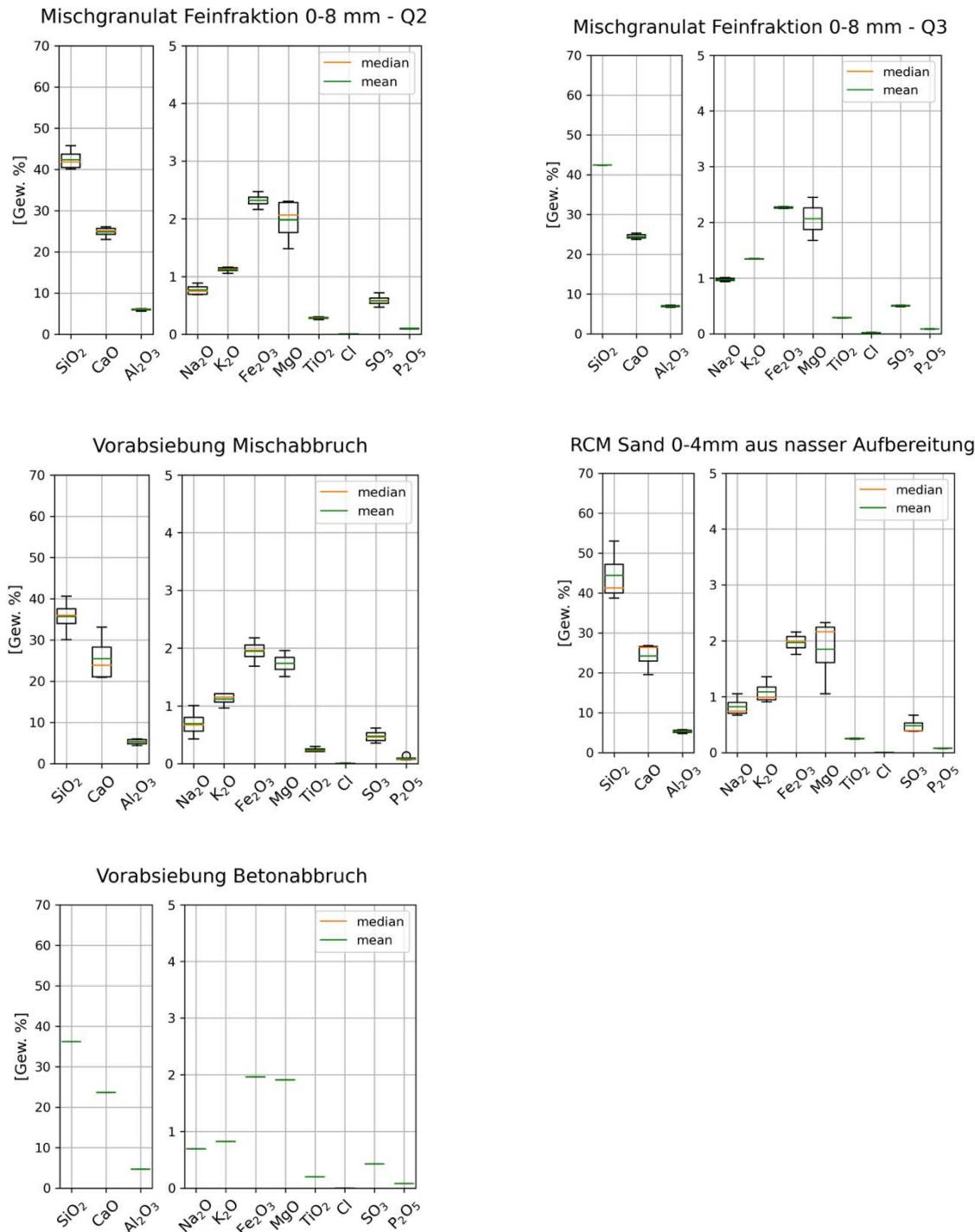


Abbildung 8: Chemische Zusammensetzung (Hauptelemente) der restlichen Qualitäten von Mischgranulat sowie der Vorabsiebungen von Beton- und Mischabbruch.

Tabelle 8: Hauptelementgehalte in den Mischgranulaten. Angaben in gew.%

Anlagen N°	Probenkürzel	LOI	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	Mn3O4	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q1														
1	RC-M 1.1	19.51	5.24	25.58	0.00	1.80	1.06	1.42	0.06	1.01	0.08	0.59	43.31	0.21
2	RC-M 2.1	19.95	5.27	26.82	0.00	2.04	1.00	2.08	0.09	0.70	0.08	0.77	40.76	0.27
2	RC-M 2.2	19.06	5.50	25.02	0.00	2.24	1.00	2.60	0.07	0.66	0.08	0.59	42.65	0.28
4	RC-M 4.1	19.35	6.03	24.80	0.01	2.18	1.15	1.53	0.06	0.76	0.13	0.77	42.61	0.29
5	RC-M 5.1	21.50	5.28	27.48	0.00	2.08	0.99	1.39	0.05	0.62	0.08	0.63	39.01	0.25
5	RC-M 5.2	21.53	5.37	26.80	0.00	2.05	1.01	1.51	0.06	0.68	0.09	0.75	39.35	0.25
6	RC-M 6.1	18.37	6.01	24.39	0.01	1.99	1.25	1.32	0.05	1.14	0.09	0.48	44.45	0.26
9	RC-M 9.1	20.78	5.20	25.76	0.00	2.15	0.95	1.98	0.06	0.67	0.09	0.74	40.37	0.27
11	RC-M 11.1	18.52	5.72	23.07	0.01	2.09	1.19	1.43	0.06	0.90	0.09	0.66	45.61	0.25
12	RC-M 12.1	19.26	5.30	25.26	0.00	2.07	0.97	2.23	0.06	0.67	0.09	0.97	42.14	0.29
12	RC-M 12.2	19.39	4.43	21.80	0.01	1.84	0.84	2.74	0.06	0.54	0.08	0.44	39.35	0.22
14	RC-M 14.1	20.01	4.78	25.81	0.01	1.98	0.91	2.23	0.06	0.68	0.08	0.96	41.79	0.26
17	RC-M 17.1	21.66	4.74	26.77	0.01	2.03	0.84	2.24	0.06	0.73	0.08	0.51	39.76	0.24
Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung														
8	RC-M 8.1	20.38	4.93	21.05	0.01	1.91	0.96	1.96	0.07	0.61	0.07	0.41	36.56	0.21
10	RC-M 10.1	19.18	5.79	20.86	0.01	2.18	1.10	1.67	0.06	0.73	0.08	0.62	35.31	0.29
15	RC-M 15.1	26.36	4.33	33.04	0.00	1.69	1.21	1.80	0.06	0.43	0.14	0.51	30.02	0.21
16	RC-M 16.1	20.20	5.97	26.59	0.01	2.01	1.21	1.51	0.06	1.01	0.08	0.36	40.57	0.24
RCM Sand 0-4mm aus nasser Aufbereitung														
3	RC-M 3.1	15.29	5.74	19.49	0.01	1.76	1.36	1.05	0.05	1.05	0.07	0.38	53.01	0.24
15	RC-M 15.3	21.95	5.32	26.76	0.01	2.16	0.99	2.32	0.06	0.67	0.08	0.39	38.70	0.26
17	RC-M 17.2	20.60	4.73	26.32 < 0.001		1.99	0.91	2.16	0.06	0.74	0.07	0.67	41.27	0.25
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q2														
4	RC-M 4.3	17.64	6.18	23.01	0.01	2.29	1.16	1.48	0.06	0.69	0.10	0.60	45.72	0.30
9	RC-M 9.2	18.83	5.55	25.56	0.01	2.16	1.05	1.85	0.07	0.80	0.09	0.47	43.04	0.25
10	RC-M 10.2	20.68	5.97	24.64	0.01	2.34	1.12	2.27	0.08	0.88	0.10	0.72	40.58	0.29
15	RC-M 15.2	20.18	6.10	26.03	0.00	2.47	1.14	2.30	0.07	0.69	0.09	0.55	40.01	0.28
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm – Q3														
8	RC-M 8.2	18.47	7.13	23.67	0.02	2.28	1.35	2.45	0.07	0.94	0.09	0.49	42.40	0.29
11	RC-M 11.2	18.08	6.65	25.25	0.01	2.25	1.34	1.68	0.06	1.01	0.08	0.51	42.33	0.28

In Bezug auf Schwermetalle halten sowohl Betonabbruch Vorabsiebung wie auch Feinfraktion 0 – 4 mm der Betongranulate die Grenzwerte der VVEA für eine Verwertung als Rohmaterial- und Zumahlstoff vollumfänglich ein (Tabelle 9). Dasselbe gilt für die Vorabsiebung des Mischabbruchs sowie die diversen Qualitäten der Feinfraktion 0 - 8 mm des Mischgranulates (Tabelle 10).

Eine Ausnahme bilden die Quecksilberkonzentrationen, wobei die Werte jeweils im Bereich der Nachweisgrenze liegen und dadurch wenig aussagekräftig sind.

Tabelle 9: Schwermetallgehalte in den Feinfraktionen der Betongranulate. Angaben in ppm.

Anlagen N°	Probenkürzel	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Vorabsiebung (Austrag Feingut bei hohem Feinanteil)														
10	RC-B 10.1	8	250	< 5	45	74	17	< 1.1	762	30	17	2	5	94
Betongranulat Feinfraktion 0-4 mm														
1	RC-B 1.1	8	253	< 5	55	79	10	< 1.1	587	25	14	2	2	51
2	RC-B 2.1	6	190	< 5	39	44	12	< 1.1	558	16	13	2	5	58
3	RC-B 3.1	9	223	< 5	34	60	13	< 1.0	470	18	18	3	3	60
4	RC-B 4.1	6	381	< 5	24	61	12	< 1.0	538	16	16	3	4	73
5	RC-B 5.1	6	215	< 5	28	46	13	2	525	15	19	3	3	63
5	RC-B 5.2	6	213	< 5	30	54	13	< 1.1	514	15	22	3	4	87
6	RC-B 6.1	6	434	< 5	33	61	14	2	519	26	15	2	4	67
7	RC-B 7.1	4	198	< 5	28	92	10	< 1.2	589	18	11	3	< 1.7	59
8	RC-B 8.1	9	225	< 5	60	76	11	< 1.1	672	32	23	3	6	56
9	RC-B 9.1	7	208	< 5	22	54	11	< 1.0	556	18	17	3	3	93
12	RC-B 12.1	8	189	< 5	26	61	11	< 1.0	596	20	14	3	3	55
13	RC-B 13.1	7	212	< 5	33	60	12	< 1.1	560	21	15	3	3	60
14	RC-B 14.1	10	180	< 5	55	43	11	< 1.1	557	16	11	3	3	46
15	RC-B 15.1	8	169	< 5	33	61	14	2	630	22	13	3	2	51
16	RC-B 16.1	8	217	< 5	60	79	8	< 1.2	527	24	13	2	2	55
16	RC-B 16.2	6	228	< 5	58	58	7	< 1.2	548	25	11	2	2	49
17	RC-B 17.1	9	275	< 5	49	76	13	< 1.1	588	17	22	3	4	69
18	RC-B 18.1	8	185	< 5	29	44	9	2	467	15	13	2	3	65
Anh. 4.1 (Rohmaterialersatz)	30		5	250	500	500	1		500	500	30	100	2000	
Anh. 3.2 (Tolerierbar/Zumahlstoff)	15		5		250	250	0.5		250	250	15		500	
Anh. 5.2 (Deponie Typ B)	30		10		500	500	1		500	500	30		1000	

Tabelle 10: Schwermetallgehalte in den Feinfraktionen der Mischgranulate. Angaben in ppm.

Anlagen N°	Probenkürzel	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q1														
1	RC-M 1.1	7	288	< 5	30	46	11	< 1.0	639	23	35	3	4	98
2	RC-M 2.1	8	269	< 5	53	65	15	< 1.1	923	24	29	3	4	84
2	RC-M 2.2	8	237	< 5	53	61	16	< 1.1	730	26	26	3	4	76
4	RC-M 4.1	10	269	< 5	83	54	12	< 1.2	619	26	33	2	4	97
5	RC-M 5.1	8	286	< 5	43	57	13	< 1.1	557	22	23	3	4	102
5	RC-M 5.2	8	265	< 5	47	48	14	< 1.1	577	22	37	< 1.6	4	155
6	RC-M 6.1	10	311	< 5	63	53	11	< 1.1	565	28	24	3	5	88
9	RC-M 9.1	10	277	< 5	52	58	13	< 1.1	608	22	25	7	4	127
11	RC-M 11.1	5	342	< 5	77	74	11	< 1.2	565	21	50	4	6	138
12	RC-M 12.1	8	335	< 5	25	61	13	1	620	22	34	4	4	128
12	RC-M 12.2	8	276	< 5	41	84	16	< 1.1	644	24	42	2	4	74
14	RC-M 14.1	7	232	< 5	39	67	16	< 1.1	591	22	37	3	5	95
17	RC-M 17.1	7	198	< 5	55	66	13	< 1.2	616	22	32	3	3	76
Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung														
8	RC-M 8.1	9	289	< 5	51	78	19	< 1.1	796	42	33	4	5	116
10	RC-M 10.1	12	313	< 5	59	86	22	< 1.1	713	32	94	4	5	112
15	RC-M 15.1	6	280	< 5	57	51	21	< 1.2	691	23	40	2	5	116
16	RC-M 16.1	9	299	< 5	34	75	19		546	31	58	3	9	153
RCM Sand 0-4mm aus nasser Aufbereitung														
3	RC-M 3.1	4	374	< 5	43	51	9	< 1.0	518	20	103	10	6	280
15	RC-M 15.3	10	270	< 5	46	78	15		682	30	27	3	4	84
17	RC-M 17.2	10	233	< 5	36	49	12	< 1.1	577	20	28	3	6	116
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q2														
4	RC-M 4.3	9	296	< 5	75	63	15	< 1.1	610	26	55	3	5	113
9	RC-M 9.2	8	257	< 5	30	54	14		658	22	14	3	4	64
10	RC-M 10.2	12	297	< 5	59	70	19	< 1.1	740	37	150	5	5	114
15	RC-M 15.2	9	285	< 5	56	65	18	< 1.1	728	29	38	< 1.6	5	72
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q3														
8	RC-M 8.2	8	402	< 5	75	192	20	< 1.0	727	36	117	4	12	116
11	RC-M 11.2	9	305	< 5	41	70	13	< 1.1	580	24	40	< 1.5	4	67
Anhang Tabelle 10:														
Anh. 4.1 (Rohmaterialersatz)	30		5	250	500	500	1		500	500	30	100	2000	
Anh. 3.2 (Tolerierbar/Zumahlstoff)	15		5	250	250	0.5			250	250	15		500	
Anh. 5.2 (Deponie Typ B)	30		10	500	500	1			500	500	30		1000	

3.3 Mineralogische Zusammensetzung

Eine Auswahl an Proben wurde auch auf die mineralogische Zusammensetzung untersucht (Tabelle 11). Da die mineralogische Zusammensetzung stark von der Lithologie der eingesetzten Gesteinskörnung abhängt, ist die Schwankung entsprechend gross und es lässt sich mineralogisch kaum ein Unterschied zwischen Beton- und Mischgranulat erkennen. Die Beton- und Mischgranulate sind dominiert durch die Hauptminerale Quarz, Feldspäte, Karbonate (Kalzit und Dolomit) sowie Schichtsilikate (z.B. Glimmer). Vereinzelt wurde auch Gips oder Portlandit nachgewiesen. Der errechnete amorphe (= nicht kristalline) Anteil im Beton- und Mischgranulat lässt sich in Bezug auf die Gesteinskörnung entweder der Präsenz von Tonmineralphasen, röntgenamorphen Phasen oder Rückständen von am Korn haftendem Zementstein zuordnen. Im Mischgranulat ist der amorphe Anteil auch verursacht durch amorphe Phasen in den Keramikbestandteilen, wodurch im Durchschnitt der Gehalt an amorphen Anteil im Mischgranulat höher ist als im Betongranulat. Zwischen den Mischgranulatqualitäten Q1 und Q2/Q3 lässt sich mineralogisch kaum ein Unterschied feststellen.

Tabelle 11: Mineralogische Zusammensetzung von ausgewählten Proben der versch. Probentypen von Beton- und Mischgranulat.

Probenkürzel	Quarz	Kalzit	Feldspäte	Dolomit	Schichtsilikate	Andere*	Amorph
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q1							
RC-M 3.1	40	30	12	3	6	0	10
RC-M 4.2	30	36	9	5	8	2	10
RC-M 15.1	20	54	6	5	7	0	8
RC-M 17.1	30	40	8	7	9	0	7
Mischgranulat Feinfraktion 0-8 mm - Q2 und Q3							
RC-M 4.3	33	34	10	4	8	0	11
RC-M 8.2	27	32	11	5	10	0	15
RC-M 10.2	30	39	10	6	15	0	0
RC-M 15.2	26	37	9	6	9	0	13
Betongranulat Feinfraktion 0-4 mm							
RC-B 3.1	34	32	10	3	10	0	11
RC-B 7.1	25	54	5	3	6	0	6
RC-B 8.1	32	31	12	8	12	0	6
RC-B 14.1	27	38	8	7	9	2	9
RC-B 17.1	32	42	9	8	9	0	0

*Gips, Portlandit

3.4 Organische Schadstoffe in der Feinfraktion der Mischgranulate

3.4.1 Schwerflüchtige organische Schadstoffe nach VVEA

In Tabelle 12 sind die Gehalte an schwerflüchtigen organischen Schadstoffen nach VVEA aufgeführt und den verschiedenen Anforderungen an Verwertung und Deponierung gegenübergestellt. In der Tendenz erfüllen die Qualitäten der untersuchten Mischgranulat Feinfraktionen die Anforderungen nach Anhang 3 Ziffer 2 (T-Material) und können unter anderem als Rohstoff für die Herstellung von gebundenen Baustoffen oder als Rohmaterial für die Herstellung von Zementklinker verwertet werden. Zwei Proben überschreiten für PAK und Benzo(a)pyren diesen Grenzwert (kleiner Faktor zwei). Zwei weitere Proben überschreiten die Grenzwerte für Typ B-Material. Eine davon überschreitet die Grenzwerte bei Benzo(a)pyren und PAK, die andere bei PCB. Die Proben halten aber die Grenzwerte für eine Verwertung im Zementwerk als Rohmaterialersatz ein.

Die Daten sind vergleichbar mit der Zusammenstellung der organischen Schadstoffe im Bericht zur Mischaabbruchverwertung in der Schweiz (Rubli, 2020). In beiden Datensätzen sind vereinzelt erhöhte Werte insbesondere bei PAK und PCB anzutreffen. Anders als erwartet, wurden bei den aktuellen Proben jedoch keine generell erhöhten Werte in den Proben der Vorabsiebung gemessen. Grundsätzlich zeigt sich, dass die meisten Proben aus der Trockenaufbereitung in Bezug auf organische Schadstoffe die Anforderungen zur Verwertung im Zementwerk sowie zur Ablagerung auf Deponien Typ B einhalten.

Tabelle 12: Gehalte an schwerflüchtigen organischen Schadstoffen nach VVEA der untersuchten Mischgranulat Feinfractionen.

		Kohlenstoff org. (TOC400)	KW-Index (C10-C40)	Benzo(a)pyren	Summe PAK	PCB Summe n. VVEA
Anlagen N°	Probenkürzel	% TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
Mischgranulat Feinfaktion 0-8mm - Q1						
1	RC-M 1.1	0.2	170	0.6	5.9	0.1
2	RC-M 2.1	0.2	78	0.4	3.9	0.1
4	RC-M 4.1	0.3	48	0.3	2.8	0.3
5	RC-M 5.1	0.3	190	2.2	22	<0.05
5	RC-M 5.2	0.4	170	1.0	11	0.3
6	RC-M 6.1	0.2	83	0.2	2.3	0.2
9	RC-M 9.1	0.3	110	0.5	5.2	0.1
11	RC-M 11.1	0.4	200	4.8	69	0.1
12	RC-M 12.1	0.3	190	0.6	7.0	0.1
12	RC-M 12.2	0.2	56	0.6	6.6	0.1
14	RC-M 14.1	0.2	85	0.5	4.5	1.2
17	RC-M 17.1	0.2	110	0.8	8.8	0.1
Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung						
8	RC-M 8.1	0.3	170	1.9	17	0.1
10	RC-M 10.1	0.4	190	0.3	4.0	0.1
15	RC-M 15.1	0.2	45	0.3	2.5	0.1
16	RC-M 16.1	0.1	36	0.2	1.7	<0.05
Mischgranulat Feinfaktion 0-8mm - Q2						
4	RC-M 4.3	0.3	67	0.2	1.8	0.2
9	RC-M 9.2	0.1	38	0.1	0.8	0.1
10	RC-M 10.2	0.4	210	0.8	8.3	0.4
15	RC-M 15.2	0.2	40	0.3	2.4	<0.05

VVEA Grenzwerte

Anh. 4.1: Verwertung als Rohmaterialersatz	5	5000	10	250	10
Anh. 3.2: Tolerierbar	1	250	1.5	12.5	0.5
Anh. 5.2: Deponie Typ B	2	500	3	25	1

3.4.2 PFAS im Feststoff

Im Feststoff der Mischgranulate wurden insgesamt 15 per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) nachgewiesen (Tabelle 13). Von den Substanzen mit positivem Befund gehören 7 zum 9er-Summenparameter, welcher mittels der Toxizitäts-Equivalenz-Faktoren (TEF) beurteilt wird. Die Substanz PFOS wurden in allen Proben nachgewiesen, PFOA nur in einer Probe nicht. Am dritthäufigsten wurde EtFOSAA über der Bestimmungsgrenze detektiert - eine Substanz, welche nicht zum 9er-Summenparameter zählt. In der Verteilung der restlichen nachgewiesenen Substanzen lässt sich kaum ein Muster erkennen. Die Werte liegen jedoch in den meisten Fällen auch nur knapp über der Bestimmungsgrenze von 0.1 µg/kg. Auffallend ist, dass die Proben der Qualität 2 (Q2) der Feinfaktion 0 – 8 der Mischgranulate bei der grössten Anzahl an Substanzen Werte über der Bestimmungsgrenze zeigen. Bei dieser Fraktion wurde das gesamte Inputmaterial (Mischabbruch) ohne Vorabsiebung direkt auf 0 – 8 mm gebrochen (anstatt auf 0 - 16/ 22 wie bei Q1 (ebenfalls ohne Vorabsiebung)), wodurch man annehmen könnte, dass die Fraktion Q2 gegenüber Q1 verdünnt ist (da zusätzlicher Feinanteil generiert wird).

Tabelle 13: Übersicht der gemessenen PFAS-Konzentrationen im Feststoff. Werte über der Bestimmungsgrenze sind rot markiert. Die Leitsubstanzen der 9er-Summenparameter sind zur Übersicht gelb markiert.

Anlagen N°	Probenkürzel	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTrDA	PFTeDA	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	(P)FOSA	MeFOSAA	MeFOSAA	EFOSA	EFOSAA	HFO-DA/GemX	DONA	SCL-PF3ONS / F-53B	8:2-FTUCA	4:2-FTS	6:2-FTS	8:2-FTS
Mischgranulat Feinfaktion 0-8mm - Q1																															
1	RC-M 1.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
2	RC-M 2.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1		
4	RC-M 4.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.5	<0.1	0.5	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	
5	RC-M 5.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
5	RC-M 5.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.7	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
6	RC-M 6.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	2.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	
9	RC-M 9.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
11	RC-M 11.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
12	RC-M 12.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
12	RC-M 12.2	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
14	RC-M 14.1	0.1	<0.1	0.3	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
17	RC-M 17.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.7	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	0.3	0.2	<0.1	
Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung																															
8	RC-M 8.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
10	RC-M 10.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.8	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.3	1.9	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
15	RC-M 15.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	
16	RC-M 16.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
Mischgranulat Feinfaktion 0-8mm - Q2																															
4	RC-M 4.3	<0.1	<0.1	0.4	0.2	0.8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
9	RC-M 9.2	<0.1	<0.1	0.2	0.1	0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.2	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1	2.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
10	RC-M 10.2	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.3	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.9	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.3	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
15	RC-M 15.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

3.4.3 PFAS im Eluat

Um nebst dem Schadstoffpotential im Feststoff auch das Freisetzungspotential von PFAS zu beurteilen, wurden Eluattests mit zwei unterschiedlichen Flüssig-Feststoff-Verhältnissen (L/S) gewählt. Mit der Analyse einer L/S-Ratio von 10 und einer L/S-Ratio von 2 soll festgestellt werden, ob sich die PFAS bei diesen unterschiedlichen Bedingungen anders verhalten. Dies könnte Hinweise zur Mobilität und damit zum Emissionspotential geben. Bei der Analyse der Eluate ist zu beachten, dass wegen der erhöhten Matrixbelastung der Proben die Bestimmungsgrenze bei den Eluaten mit L/S-Ratio von 2 teilweise höher liegt als beim L/S-Ratio von 10. Dies führte in Einzelfällen dazu, dass bei sehr tiefen Analytkonzentrationen bei einer grösseren L/S-Ratio eine Substanz nachgewiesen wurde, beim kleineren L/S-Ratio jedoch nicht. Im Allgemeinen wird jedoch davon ausgegangen, dass bei einem L/S-Ratio von 2 eine bessere Nachweisbarkeit gegeben ist.

Über beide L/S-Ratios betrachtet konnten insgesamt 22 der 30 gesuchten PFAS-Substanzen nachgewiesen werden (Tabelle 14). Fast alle Eluatproben weisen positive Befunde für die Leitsubstanzen der 9er-Summenparameter auf. Wie bereits in früheren PFAS-Untersuchungen (Weibel, 2024) festgestellt, sind die gemessenen Konzentrationen im Eluat mit L/S 2 im Vergleich zu den Konzentrationen im Eluat mit L/S 10 in der Tendenz etwas tiefer (zum Vergleich hochgerechnet auf ein L/S 1).

Tabelle 14: Übersicht der gemessenen PFAS-Konzentrationen im Eluat (L/S 2 und L/S 10). Werte über der Bestimmungsgrenze sind rot markiert. Die Leitsubstanzen der 9er-Summenparameter sind zur Übersicht gelb markiert.

		Anlagen N°		Probenkürzel L/S		Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q1		Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q1		Vorabsitzung vor nasser Aufbereitung		Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q2	

Beurteilt man die nachgewiesenen PFAS anhand des TEQ-gewichteten 9er-Summenwerts (Tabelle 15) zeigen sich stark erhöhte Werte in allen untersuchten Qualitäten. Es ist somit zu erwarten, dass aus abgelagertem Mischabbruch auf Typ-B Deponien zukünftig beträchtliche Mengen an PFAS via Sickerwasser mobilisiert werden.

Tabelle 15: TEQ-gewichtete Summenwerte der PFAS für L/S 2 und L/S 10.

Anlagen N°	Probenkürzel	Summe PFAS TEQ L/S 2	Summe PFAS TEQ L/S 10
		µg/L TEQ	µg/L TEQ
Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q1			
1	RC-M 1.1	0.06	0.02
2	RC-M 2.1	0.43	0.14
4	RC-M 4.1	0.75	0.21
5	RC-M 5.1	0.27	0.08
5	RC-M 5.2	0.53	0.16
6	RC-M 6.1	0.69	0.21
9	RC-M 9.1	0.61	0.15
11	RC-M 11.1	0.17	0.06
12	RC-M 12.1	0.31	0.08
12	RC-M 12.2	0.29	0.07
14	RC-M 14.1	0.33	0.09
17	RC-M 17.1	0.33	0.12
Vorabsiebung vor nasser Aufbereitung			
8	RC-M 8.1	0.17	0.04
10	RC-M 10.1	0.65	0.19
15	RC-M 15.1	0.32	0.07
16	RC-M 16.1	0.09	0.02
Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q2			
4	RC-M 4.3	0.67	0.25
9	RC-M 9.2	1.20	0.36
10	RC-M 10.2	0.81	0.19
15	RC-M 15.2	0.25	0.06

3.4.4 Vergleich PFAS im Eluat vs. PFAS im Feststoff

Der Vergleich der PFAS-Konzentrationen der Eluate bei einer L/S-Ratio von 2 (umgerechnet auf Feststoff) sind in Tabelle 16 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass grundsätzlich die positiv- resp. negativ-Befunde gut übereinstimmen. Die einzelnen Analysenwerte weichen teilweise etwas ab, was mit der unterschiedlichen Bestimmungsgrenze bei den Feststoff- und Eluatanalysen, dem intensiveren Kontakt von Feststoff-Wasser und den etwas geringeren Lösungs- bzw. Desorptionsraten auf Grund der höheren Ionenkonzentrationen bei L/S 2 zu erklären ist. Der Vergleich der PFAS-Konzentrationen von Feststoff und Eluat deutet darauf hin, dass die meisten PFAS im Feststoff stark mobilisierbar sind. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die Mobilisierung vom Feststoff ins Eluat (L/S 2) für die 9 Leitsubstanzen des Summenparameters und bestätigt, dass die Substanzen mit Werten zw. 42 – 100% sehr gut mobilisierbar sind. Da jedoch die Bestimmungsgrenze bei der Analyse im Feststoff höher ist als jene im Eluat, konnte die Mobilisierbarkeit abgesehen von den zwei dominierenden Substanzen PFOA und PFOS nur für ein paar wenige Proben genau berechnet werden. Die Resultate sind somit nur bedingt aussagekräftig.

Tabelle 16: Vergleich der PFAS-Konzentrationen im Feststoff und dem Eluat (L/S 2; umgerechnet auf den Feststoff).

Anlagen	Probenkürzel	L/S	µg/kg TS													
			8:2-FTS	6:2-FTS	8:2-FTUCA	EtFOSAA	EtFOSA	MeFOSAA	MeFOSA	(P)FOSA	PFOS	PFHxS	PFPeS	PFBS		
Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q1																
1	RC-M 1.1	Eluat	0.01	0.03	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.01	<0.1	<0.1	0.01	0.03	0.01	
	Feststoff		<0.1	<0.1	0.10	<0.1	<0.1	0.02	0.07	0.01	0.09	0.01	0.21	0.02	0.01	
2	RC-M 2.1	Eluat	0.02	0.12	0.05	0.25	0.01	0.02	0.07	0.01	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.02	0.03
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	0.30	0.07
4	RC-M 4.1	Eluat	0.04	0.03	0.10	0.07	0.35	0.01	0.03	0.07	0.02	0.20	0.01	0.43	0.03	0.02
	Feststoff		<0.1	<0.1	0.10	<0.1	0.50	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	1.20	<0.1
5	RC-M 5.1	Eluat	0.03	0.06	0.04	0.14	0.01	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.14	0.02	0.40
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	0.50
5	RC-M 5.2	Eluat	0.02	0.05	0.04	0.23	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.32	0.04	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.70	<0.1	<0.1	0.50
6	RC-M 6.1	Eluat	0.07	0.02	0.08	0.04	0.20	0.01	0.03	0.07	0.01	0.05	0.01	0.51	0.03	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	0.13
9	RC-M 9.1	Eluat	0.03	0.02	0.07	0.05	0.26	0.03	0.12	0.01	0.00	0.02	0.01	0.28	0.05	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.40	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.60	<0.1	<0.1	0.40
11	RC-M 11.1	Eluat	0.06	0.03	0.12	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.01	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	0.40
12	RC-M 12.1	Eluat	0.03	0.06	0.04	0.17	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.00	0.17	0.02	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	0.30
12	RC-M 12.2	Eluat	0.19	0.02	0.07	0.04	0.17	0.01	0.01	0.20	0.01	0.05	0.01	0.13	0.03	0.01
	Feststoff		<0.10	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	0.30
14	RC-M 14.1	Eluat	0.24	0.06	0.30	0.06	0.25	0.01	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	0.10	0.02	0.01
	Feststoff		<0.10	<0.1	<0.30	<0.1	<0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	0.20
17	RC-M 17.1	Eluat	0.02	0.04	0.04	0.23	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.15	0.01	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	0.70
Vorabsiebung vor wasser Aufbereitung																
8	RC-M 8.1	Eluat	0.14	0.05	0.02	0.08	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.09	0.01	0.00	0.02	0.01
	Feststoff		<0.20	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	0.60
10	RC-M 10.1	Eluat	0.07	0.03	0.12	0.06	0.34	0.02	0.05	0.04	0.01	0.03	0.01	0.34	0.07	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.10	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.80	<0.1	0.30	0.19
15	RC-M 15.1	Eluat	0.05	0.02	0.06	0.03	0.12	0.01	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.19	0.02	0.01
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	0.20
16	RC-M 16.1	Eluat	0.04	0.01	0.02	0.01	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.08
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	<0.1	0.10
Mischgranulat Feinfraktion 0-8mm - Q2																
4	RC-M 4.3	Eluat	0.10	0.05	0.36	0.09	0.29	0.01	0.12	0.02	0.31	0.01	0.33	0.02	0.03	0.07
	Feststoff		<0.1	<0.1	0.40	0.20	0.80	<0.1	<0.10	<0.1	0.30	<0.1	1.00	<0.1	0.20	0.30
9	RC-M 9.2	Eluat	0.05	0.18	0.16	0.85	0.01	0.02	0.01	0.05	0.02	0.63	0.13	0.01	0.07	0.33
	Feststoff		<0.1	0.20	0.10	0.90	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.20	0.20	<0.1	0.10	2.20
10	RC-M 10.2	Eluat	0.07	0.02	0.12	0.08	0.37	0.03	0.08	0.09	0.01	0.03	0.01	0.43	0.06	0.12
	Feststoff		<0.1	<0.1	0.10	0.30	<0.1	0.10	0.10	<0.1	<0.1	0.90	<0.1	0.30	<0.1	1.40
15	RC-M 15.2	Eluat	0.08	0.02	0.08	0.03	0.15	0.01	0.04	0.02	0.00	0.01	0.09	0.02	0.01	0.05
	Feststoff		<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	0.20	<0.1

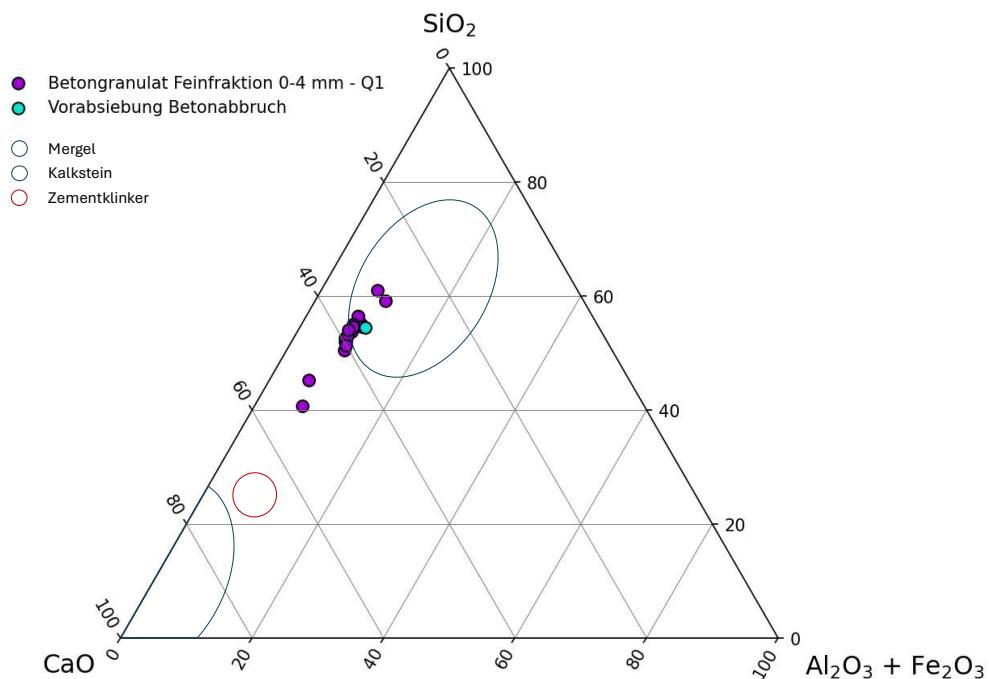
Tabelle 17: Überblick über die Mobilisierung vom Feststoff ins Eluat (L/S 2) für die 9 Leitsubstanzen des Summenparameters, angegeben als % mobilisiert aus dem Feststoff. Werte > 100% wurden als 100% berücksichtigt.

	PFBA	PPPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFBS	PFHxS	PFOS
% mobilisiert									
Mittel	91	0	97	73	79	0	94	100	42
Min	72	0	90	45	36	0	88	100	22
Max	100	0	100	100	100	0	100	100	94
Anzahl	3	0	6	2	19	0	2	1	20

4 Beurteilung Verwertungspotential im Zementwerk

4.1 Verwertung als Rohmaterialersatz

In Abbildung 9 ist die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Qualitäten der Beton- und Mischgranulate im Ternärsystem $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ dargestellt. Als Vergleich ist in farbigen Ovalen die chemische Zusammensetzung der Primärrohstoffe der Klinkerherstellung dargestellt. Der optische Vergleich erlaubt die qualitative Aussage, dass Mischgranulat in Bezug auf die im Zementsystem relevanten Hauptelemente $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ einer Mergelqualität entspricht und somit ein denkbarer Mergelerersatz darstellt. Es fällt zudem auf, dass die verschiedenen Mischgranulate in Bezug auf die im Zementsystem relevanten Hauptelemente nur eine minime chemische Streuung aufweisen. Die Betongranulate sind chemisch den Mischgranulaten ähnlich, sie weisen aber ein etwas erhöhtes Ca:Si Verhältnis auf, wodurch sie im Triplot näher bei der CaO -Ecke liegen. Qualitativ kann aufgrund der Position im Triplot dem Betongranulat eine etwas bessere Qualität als die Mergelqualität zugewiesen werden, die chemisch etwas näher bei der gewünschten Klinkerzusammensetzung liegt.



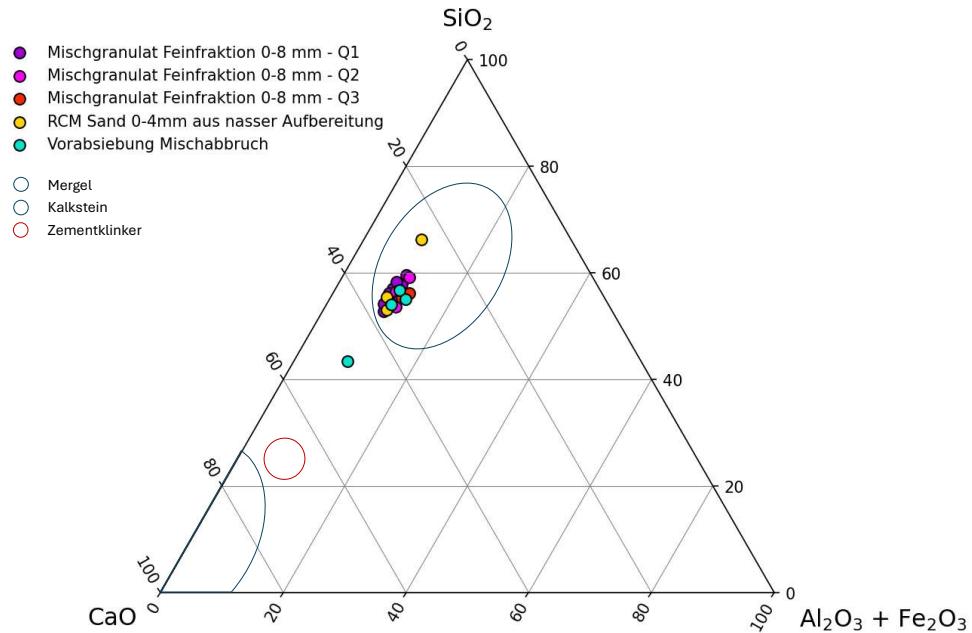


Abbildung 9: Übersicht der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Betongranulate (oben) und Mischgranulate (unten) im Ternärsystem $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$.

4.1.1 Potential als Rohmaterialersatz

Um das Potential für den Rohmaterialersatz und die damit verbundenen CO_2 -Einsparungen abzuschätzen, wurden Modellierungen zur Rohmehlzusammensetzung gemacht. Für die chemische Zusammensetzung des Rohmehls werden Größen wie der Kalkstandard, das Silikatmodul und das Tonerdemodul verwendet (Locher, 2000).

Der **Kalkstandard** (KSt) setzt den vorhandenen CaO -Gehalt in Verhältnis zum Anteil an CaO , der zur Bildung von Si-, Al- oder Fe-haltigen Klinkerphasen beiträgt. Zur Berechnung wird folgende Formel verwendet:

$$KSt = 100 * \frac{\text{CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

Das **Silikatmodul** (SM) ist ein Mass für das Verhältnis zwischen festen und schmelzförmigen Anteilen im Drehrohrofen. Zugrunde liegt die Annahme, dass SiO_2 vor allem in den kristallinen Phasen als Alit und Belit gebunden ist, Al_2O_3 und Fe_2O_3 dagegen meist in der Schmelze vorliegt. Ein ausgewogenes Silikatmodul liegt zwischen 2.3 und 2.8. Ein niedriges Silikatmodul deutet darauf hin, dass das Material leicht Anbackungen bildet. Die Berechnung folgt folgender Formel:

$$SM = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Das **Tonerdemodul** (TM) ist ein weiterer Indikator für die Schmelzbildung. Bei einem Tonerdemodul von ca. 1.4 bis 1.6 würden unter sonst idealen Materialzusammensetzungen das gesamte Al_2O_3 und Fe_2O_3 bei den geringstmöglichen Temperaturen vollständig in die Schmelzphase gehen.

$$TM = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Für die Rohmaterialmischung wird ein Kalkstandard von 100 angestrebt, ein Silikatmodul von 2.7 und ein Tonerdemodul von 2.0. Für die Mischgranulate wurden nur die Analysen der Feinfraktionen Q1 berücksichtigt, für die Betongranulate die Feinfraktionen 0 - 4 mm. Die anderen Qualitäten werden jeweils auf Kundenanfrage und für einen bereits existierenden Markt produziert.

Tabelle 18: Mischsimulation zum Substitutionspotential von Beton- und Mischgranulat (Mergel: Mittelwert aus den Schweizer Werken (Kündig, 1997)).

	Kalkstein			Mergel			Korrekturstoff			RC-Material			Zementmischung		
	KST	SM	TM	KST	SM	TM	KST	SM	TM	KST	SM	TM	KST	SM	TM
Soll													101	2.6	1.8
Einfaches System	Kalkstein mittel 70% 327 2.0 1.7						Betongranulat 0-4mm 30% 24 6.5 2.7			Zementmischung 100% 97. 4.3 2.1					
Komplexes System	Kalkstein mittel 60% 327 2.0 1.7			Mergel 25% 53 2.5 257			Walzzunder 0.55% 2.2 0.03 0.01			Betongranulat 0-4mm 15% 24 6.5 2.7			Zementmischung 100% 99 2.8 1.6		
Einfaches System	Kalkstein mittel 74% 327 2.0 1.7						Mischgranulat 0-8 mm 26% 20 5.7 2.6			Zementmischung 100% 99 3.9 2.1					
Komplexes System	Kalkstein mittel 62.5% 327 2.0 1.7			Mergel 22% 53 2.5 257			Walzzunder 0.58% 2.2 0.03 0.01			Mischgranulat 0-8 mm 15% 20 5.7 2.6			Zementmischung 100% 99 2.8 1.6		

In der Praxis stehen den Zementwerken eine Vielzahl von Materialien zur Verfügung, welche sie den beiden Hauptbestandteilen, Kalkstein und Mergel, beimischen können, um die gewünschten Werte zu erhalten. Für die vorliegende Modellrechnung wurde ein vereinfachtes System mit wenigen Komponenten betrachtet (Tabelle 18). Im einfachsten System mit einem mittleren Kalkstein (KST 330) und Betongranulat können bis zu 30% Betongranulat beigegeben werden, um einen KST von ca. 100 zu erreichen. Das Silikatmodul ist dabei jedoch mit 4.27 klar zu hoch und bildet den limitierenden Faktor. Ein vergleichbares Bild zeigt auch das Mischgranulat mit 26% Mischgranulat und einem Silikatmodul von 3.9. Werden weitere Stoffe zur Korrektur beigegeben, können unter Einhaltung der drei definierten Moduli (KST, SM, TM) sowohl bei Betongranulat als auch bei Mischgranulat einen Massenanteil von 15% erreicht werden. Der mögliche Anteil an Beton- oder Mischgranulat hängt somit von der Verfügbarkeit an Korrekturstoffen zum Ausgleich des hohen Silizium-Gehalts in den Rückbaustoffen ab. Eine Substitution von 15% wird somit unter der Voraussetzung, dass ausreichend Korrekturstoffe verfügbar sind, als realistisch betrachtet. Würde in allen Schweizer Zementwerken 15% der jährlichen Rohmaterialmischung (4.9 Mio. Tonnen (cemsuisse, 2024)) durch Beton- oder Mischgranulate substituiert, könnte ein Anteil von ca. 15% des jährlich verfügbaren Betongranulates, respektive ca. 30% des jährlich verfügbaren Mischgranulates in der Klinkerproduktion verwertet werden.

4.2 Potential als CO₂-neutrales Material

4.2.1 Betongranulat Feinfraktion 0 – 4 mm

In der Annahme, dass das untersuchte Betongranulat aus einem standardmässigen Konstruktionsbeton stammt, kann das CO₂-Einsparungspotential durch die Rohmaterialsubstitution im Zementwerk grob abgeschätzt werden (Abbildung 10). In 1 Tonne Beton ist etwa 150 kg Zement gebunden (je nach Sorte bis das Doppelte). Dieser Zement besteht zu ca. 60% aus CaO, wodurch auf 1 Tonne Beton mit ca. 90 kg CaO aus dem Zement gerechnet werden kann (unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Betongranulates, da die Gesteinskörnung auch CaO (hauptsächlich karbonatisch gebunden) ins chemische System einbringt). Das CaO aus dem Zement wird bis zur Nutzung als Klinkerrohmaterial durch die spontane Hydratisierung und Karbonatisierung während der Lagerung und in der Rohmühle im Zementwerk vollständig aufkarbonatisiert. Beim anschliessenden Brennen des Rohmehls wird das aufgenommene CO₂

wieder freigesetzt. Aus 90 kg CaO entstehen dabei CO₂-Emissionen von ca. 71 kg CO₂. Diese Menge CO₂ kann als klimaneutral angesehen werden, da es sich um eine kurzfristige Bindung und Wiederfreisetzung von klimaneutralem CO₂ aus der Atmosphäre handelt (siehe Abschnitt CO₂-neutrales Rohmaterial in Kapitel 1). Aus massenbilanztechnischen Gründen seitens Schweizer CO₂-Inventar kann jedoch die Teilkarbonatisierung an der Gebäudefassade, welche während der Lebzeit des Gebäudes geschieht, nicht als klimaneutraler Baustoff angerechnet werden, da dieser Anteil im Schweizer CO₂-Inventar bereits anders verbucht wird. Dieser Anteil wird konservativ auf ca. 20% geschätzt. Die restlichen 80% der 71 kg CO₂, also 57 kg CO₂ sollten aber pro eingesetzte Tonne Betongranulat als klimaneutral angerechnet werden können.

Somit ergibt sich mit dem Beispielszenario einer Rohmaterialsubstitution von 15% durch Feinfraktion Betongranulat eine Menge von ca. 735'000 Tonnen Betongranulat, die jährlich in den Schweizer Zementwerken eingesetzt werden könnten. Durch das vorhandene CaO aus dem anhaftenden Zementstein könnten somit auf diese Menge Betongranulat gerechnet ca. 42'000 Tonnen geogenes CO₂ durch klimaneutrales CO₂ substituiert werden, wodurch ein CO₂-Einsparungspotential von ca. 42'000 Tonnen CO₂ resultiert. Dies entspricht 2.5% der gesamten jährlich durch das Kalzinieren des Rohmaterials verursachten geogenen CO₂-Emissionen der Schweizer Zementindustrie.

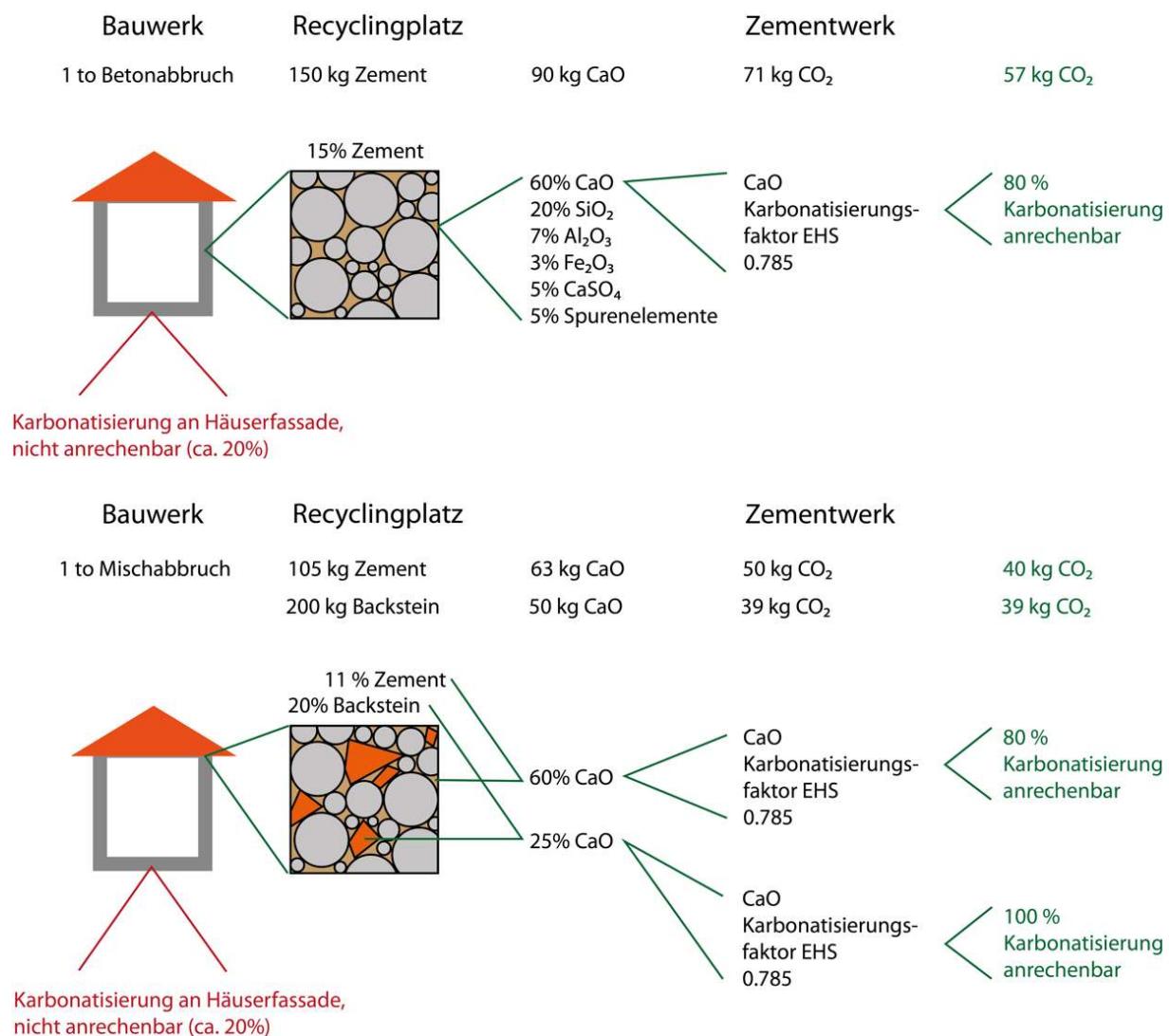


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Herleitung des Potentials an klimaneutralem CO₂ aus Betongranulat (oben) und Mischgranulat (unten).

4.2.2 Mischgranulat Feinfaktion 0 – 8 mm

Für Mischabbruch sieht die Rechnung etwas anders aus (Abbildung 10). In der Annahme, dass Mischabbruch zu 70% aus Betonbruch, zu 20% aus Backsteinen und zu ca. 10% aus natürlicher Gesteinskörnung besteht (Schätzung gemäss Rubli, 2020), und die chemische Zusammensetzung des Backsteins einen Anteil CaO von 25% aufweist (Schätzung gemäss Kündig, 1997), resultiert aus der Substitution von primärem Rohmaterial (und somit geogenem CO₂) mit 15% Mischgranulat ein CO₂-Einsparungspotential von ca. 58'000 Tonnen CO₂. Dies entspricht 3.5% der gesamten jährlich durch das Kalzinieren des Rohmaterials verursachten geogenen CO₂-Emissionen der Schweizer Zementindustrie.

4.3 Verwertung als Zumahlstoff

Die Holcim (Schweiz) AG brachte 2018 mit «Susteno 4» ein zertifizierter Schweizer Zement aus Portlandzementklinker, Mischgranulat, gebranntem Ölschiefer und Gips auf den Markt (Holcim Schweiz, 2023). Hierbei wird die Feinfaktion 0 – 8mm des Mischgranulates verwertet. Jährlich werden etwa 125'000 Tonnen Susteno (Bezugsjahr 2020, Tendenz steigend) mit einem Anteil von 20% (25'000 Tonnen) Mischabbruch verbaut (Holcim Schweiz, 2023). Diese momentan als Zumahlstoff verwertete Menge an Feinfaktion von Mischgranulat entspricht ca. 1% der jährlich verfügbaren Menge Mischabbruch in der Schweiz. Würde der gesamte in der Schweiz produzierte Zement (ca. 4 Mio. Tonnen (cemuisse, 2024)) einen Anteil von 20% Mischgranulat enthalten, würde dies ca. 35% der verfügbaren Menge Mischabbruch konsumieren.

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend erlauben die erhobenen Daten folgende Aussagen:

- In keiner der beprobten Anlagen wird standardmässig bei der Trockenaufbereitung eine Vorabsiebung vorgenommen. In manchen Anlagen wird es vereinzelt bei qualitativ minderwertigem Material vorgenommen, um den hohen Feinanteil auszusieben.
- Die chemischen Qualitäten der Betongranulate sind trotz unterschiedlichen Einzugsgebieten und Anlagengrössen sehr vergleichbar. Es ist aber erkennbar, dass die Lithologie der Gesteinskörnung massgebend die chemische Zusammensetzung des Betongranulats bestimmt. Chemisch lässt sich kaum ein Unterschied zwischen der Vorabsiebung und der Feinfaktion 0 – 4 mm erkennen. Auch die chemischen Qualitäten der Mischgranulate sind trotz unterschiedlichen Einzugsgebieten und Anlagengrössen sehr vergleichbar. Die unterschiedlichen Qualitäten unterscheiden sich kaum in der Zusammensetzung der Hauptelemente.
- In Bezug auf die Schwermetallgehalte halten alle untersuchten Qualitäten der Beton- und Mischgranulate sowie die Vorabsiebung die Grenzwerte der VVEA für eine Verwertung als Rohmateri- alersatz und Zumahlstoff ein.
- Die mineralogische Zusammensetzung von Beton- und Mischgranulaten ist sehr ähnlich. Die Mineralogie ist dominiert durch die Hauptminerale Quarz, Feldspäte, Karbonate und Schichtsilikate sowie vereinzelt Gips und Portlandit. In der Tendenz ist der amorphe Anteil in den Mischgranulaten höher als in den Betongranulaten, was auf die Keramikbestandteile zurückzuführen ist.
- Die Mehrheit der untersuchten Feinfaktionen der Mischgranulate unterschreiten den Grenzwert für Typ B-Deponien in Bezug auf die schwerflüchtigen organischen Schadstoffe. Lediglich zwei Proben zeigen erhöhte Werte: Eine davon überschreitet den Grenzwert für Benzo(a)pyren und PAK, die andere für PCB. Die Daten sind vergleichbar mit der Zusammenstellung der organischen Schadstoffe im Bericht zur Mischabbruchverwertung in der Schweiz (Rubli, 2020). In beiden Datensätzen sind die erhöhten Werte insbesondere bei PAK und PCB anzutreffen. Anders als erwartet, wurden bei den aktuellen Proben jedoch keine generell erhöhten Werte in den Proben der Vorabsiebung gemessen. Grundsätzlich zeigt sich, dass die meisten Proben aus der Trockenaufbereitung in Bezug auf organische Schadstoffe die Anforderungen zur Verwertung im Zementwerk sowie zur Ablagerung auf Deponien Typ B einhalten.

- Im Feststoff der Mischgranulate wurden insgesamt 15 per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) nachgewiesen. Die Werte liegen jedoch in den meisten Fällen auch nur knapp über der Bestimmungsgrenze von 0.1 µg/kg. Im Eluat konnten insgesamt 22 der 30 gesuchten PFAS-Substanzen nachgewiesen werden. Beurteilt man die nachgewiesenen PFAS anhand des TEQ-gewichteten 9er-Summenwerts, zeigen sich Mittelwerte von 0.4 µg TEQ/L (L/S 10), resp. Mittelwerte von 1.2 µg TEQ/L (L/S 2). Der Vergleich der PFAS-Konzentrationen von Feststoff und Eluat deutet darauf hin, dass die meisten PFAS im Feststoff stark mobilisierbar sind, wodurch ein beträchtliches Emissionspotential von PFAS aus Mischgranulates vorhanden ist.
- Die Feinfraktion der Misch- und Betongranulate zeigen eine dem Mergel ähnliche Zusammensetzung. Das Rohmaterialsubstitutionspotential ist dabei aber durch das hohe Silikatmodul der beiden Granulate limitiert. Eine Rohmaterialsubstitution von ca. 15% wird aber unter der Voraussetzung, dass ausreichend Korrekturstoffe verfügbar sind, als realistisch betrachtet. Würde in allen Schweizer Zementwerken 15% der jährlichen Rohmaterialmischung durch Beton- oder Mischgranulate substituiert, könnte im Vergleich zur jährlich anfallenden Menge Beton-, respektive Mischabbruch ein Anteil von ca. 15% (Betongranulat), respektive 30% (Mischgranulat) in der Klinkerproduktion verwertet werden.
- Eine Substitution von 15% in der Klinkerrohmaterialmischung durch Beton- oder Mischgranulat hätte das Potential, die geogenen CO₂-Emissionen in der Klinkerproduktion um ca. 2.5% (Betongranulat), resp. ca. 3.5% (Mischgranulat) zu reduzieren.
- Die Feinfraktion 0 – 8 mm des Mischgranulats wird bereits heute als Klinkerersatzmaterial mit einem Anteil von 20% dem Zement beigemischt. Somit wird bereits ca. 1% des anfallenden Misshabbruchs als Zumahlstoff verwertet. Würde der gesamte in der Schweiz produzierte Zement einen Anteil von 20% Mischgranulat als Zumahlstoff enthalten, würde dies ca. 35% der verfügbaren Menge Misshabbruch konsumieren.

6 Fazit und Ausblick

Mit der vorliegenden Studie konnte eine umfangreiche Bestandesaufnahme der stofflichen Qualitäten von Beton- und Mischgranulat Feinfraktionen der konventionellen Aufbereitung geschaffen werden. Dies erlaubt es einerseits, das Verwertungspotential im Zementwerk abzuschätzen, andererseits aber auch das Schadstoffpotential in Bezug auf eine Ablagerung auf Deponie Typ B zu evaluieren. In Bezug auf das Verwertungspotential im Zementwerk zeigt sich, dass die Feinfraktionen von Beton- und Mischgranulat durchaus ein Potential für eine Verwertung als Rohmaterialersatz zeigen. Obwohl die Beton- und Mischgranulate einen verhältnismässig tiefen Kalkstandard aufweisen und somit eher Mergelqualität darstellen, bietet deren Einsatz im Zementwerk ein Potential für CO₂-Einsparungen in der Klinkerproduktion. Weitere CO₂-Einsparungen in der Zementproduktion bieten sich durch den Einsatz als Zumahlstoff. Jedoch zeigen einfache Massenbilanzrechnungen zum maximalen Einsatz in der Zementproduktion, dass die Verwertung im Zementwerk im Anbetracht der anfallenden Mengen lediglich eine Teilverwertung bietet und somit eine gute Ergänzung zur bereits etablierten Verwertung als RC-Gesteinskörnung darstellt. Aus industrieller Sicht wäre es von Interesse, in einem nächsten Schritt die beiden Verwertungspfade Zementwerk und Beton ökoeffizienztechnisch und wirtschaftlich einander gegenüberzustellen, um eine Verwertungshierarchie aufzustellen. Von Seiten VVEA gibt es keine Hierarchien bei der stofflichen Verwertung. Es sollen verschiedene Verwertungsmöglichkeiten bestehen.

Die gewonnenen Daten stellen zudem eine wertvolle Referenzdatengrundlage des Status Quo der konventionellen Aufbereitung dar, zu welcher Versuchsdaten zur selektiven Aufbereitung von Beton- und Misshabbruch (Rückgewinnung Zementstein) gegenübergestellt werden können. In diesem Zusammenhang wäre es spannend, in einem weiteren Schritt die Fraktionierung der chemischen Zusammensetzung als Funktion der sinkenden Korngrösse zu untersuchen. Annahmen zufolge sollte sich der CaO-reiche Zementstein in den feineren Fraktionen anreichern und der CaO-Gehalt mit sinkender Korngrösse ansteigen und somit auch die Attraktivität für eine Verwertung als Rohmaterialersatz im Zementwerk erhöht werden.

Weiter konnte mit den erhobenen Daten eine erste Datengrundlage zum Schadstoff- und Emissionspotential von PFAS in Mischgranulaten erhoben werden. Die Daten zeigen, dass PFAS zwar vorhanden sind, in Feststoffen jedoch in geringen Mengen. Aufgrund der starken Mobilisierbarkeit und der Tatsache, dass Deponien des Typs B meistens nicht abgedichtet sind, brauchen die PFAS dennoch weitergehende Untersuchungen. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie müssen BAFU und cercle déchets nun weitere Schritte in die Wege leiten, um die Herkunft der PFAS im Mischaabbruch genauer zu untersuchen. Eine Möglichkeit zu detaillierten Datenerhebung mit bspw. Polludoc als Partner wird diskutiert. Weiter ist die Ausschleusung der PFAS im Rahmen der Aufbereitung vom Mischaabbruch genauer zu untersuchen.

7 Referenzen

- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2024. Konzentrationswerte für Stoffe , die nicht in Anhang 1 oder 3 AltIV enthalten sind 1–7.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023. Verwertung mineralischer Rückbaumaterialien - Ein Teil des Moduls Bauabfälle der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA).
- cemsuisse, 2024. Jahresbericht 2023.
- Hiltbrunner, D., 2017. Das Bauwerk als Rohstofflager. Swiss Bull. Appl. Geol. 22, 65–69.
- Holcim Schweiz, 2023. Erfolgreiche Transformation - Integrierter Geschäftsbericht 2022.
- Kündig, R., 1997. Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweizerische Geotechnische Kommission.
- Locher, F.W., 2000. Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf.
- Matasci, C., Gauch, M., Böni, H., 2019. Material - und Energieflüsse der schweizerischen Volkswirtschaft 89.
- Rubli, S., 2020. Mischaabbruchverwertung in der Schweiz - Schlussbericht 2020.
- Rubli, S., Bruppacher, A., Rubli, D., 2017. Umweltleistungen von Bauschuttaufbereitungsanlagen (BSAA) 87.
- Schweizerischer Bundesrat, 2015. Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) 1–46.
- Weibel, G., 2024. PFAS in Massenabfällen.
- Wolffers, M., Häseli, U., Dörfler, P., Weibel, G., Eggenberger, U., 2023. Mineralische Abfälle als CO₂ - neutrale Rohmaterialien in der Klinkerproduktion, in: Thomé-Kozmiensky (Ed.), Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte Und Abfälle. Thomé-Kozmiensky.