

CROW-CUR-Empfehlung 128:2021 Füllstoff aus der Abfallverbrennung in unbewehrtem erdfeuchtem Beton



Über CROW

CROW entwickelt intelligente und praktische Lösungen für Fragen aus den Bereichen Infrastruktur, öffentlicher Raum, Verkehr und Transport in den Niederlanden. Hierzu arbeiten wir mit externen Fachleuten zusammen, die ihre Kenntnisse miteinander teilen und für die Praxis anwendbar machen.

CROW ist eine gemeinnützige unabhängige Wissensplattform, die in Wissen für heute und die Zukunft investiert. Wir suchen nach den besten Lösungen für Fragen im Zusammenhang mit der Infrastruktur, dem öffentlichen Raum, dem Verkehr und dem Transport sowie dem sicheren Arbeiten. Darüber hinaus sind wir Fachleute auf dem Gebiet von Ausschreibungen und Vertragsabschlüssen.

CROW-CUR-Empfehlung 128:2021
Füllstoff aus der
Abfallverbrennung in
unbewehrtem erdfeuchtem
Beton

CROW

Postbus 37, 6710 BA Ede

Telefon (0318) 69 53 00

E-mail klantenservice@crow.nl

Website www.crow.nl

August 2021

CROW und die Personen, die bei dieser Veröffentlichung mitgewirkt haben, haben die hierin enthaltenen Daten sorgfältig und nach dem letzten Stand von Wissenschaft und Technik zusammengestellt. Dennoch können in dieser Veröffentlichung Unrichtigkeiten vorkommen. Die Nutzer erkennen diese Gefahr an.

CROW schließt, auch im Interesse derer, die an dieser Veröffentlichung mitgewirkt haben, jede Haftung für Schäden, die sich aus der Nutzung der Daten ergeben könnten, aus.

Der Inhalt dieser Veröffentlichung ist durch das Urheberrecht geschützt.

Die Urheberrechte liegen beim CROW.

Vorbemerkung

In den vergangenen Jahren hat im Markt der Bedarf an geeigneten Füllstoffen für Beton, insbesondere an Puzzolanen, zugenommen. Diese Bedarf Lücke kann u.a. durch Füllstoffe aus der Abfallverbrennung geschlossen werden, die aus Müllverbrennungsschlacke produziert werden, wobei neben den für Rostschlacke üblichen Bearbeitungsschritten auch ein spezieller nasser Mahlprozess eingesetzt wird. Mit Einsatz dieses Füllstoffs wird gleichzeitig ein mineralischer Reststoff einer hochwertigen Verwendung zugeführt.

Der Einsatz von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung in Beton ist in dieser CROW-CUR-Empfehlung auf unbewehrte Betonprodukte beschränkt, die aus erdfeuchtem Beton hergestellt werden, z.B. Pflastersteine, Platten und Bordsteine aus Beton. Mit der Erstellung dieser CROW-CUR-Empfehlung, in der die Qualitätsanforderungen für Füllstoffe aus der Abfallverbrennung festgelegt werden, wird es möglich, diese Füllstoffe als neuen Rohstofftyp in BRL 1804 „Füllstoffe zum Einsatz in Beton und Mörtel“ aufzunehmen.

Bei Lieferung mit einem Zertifikat auf der Grundlage von BRL 1804 können diese Füllstoffe als Füllstoffe des Typs I in Produkten aus unbewehrtem Beton, die aus erdfeuchtem Beton hergestellt werden, ohne Bedenken eingesetzt werden.

Die gemeinsame Ambition, die Produktionskette für Beton noch nachhaltiger zu machen, wird in dieser Betonvereinbarung festgeschrieben. Eines der darin festgelegten Ziele ist eine zu 100% hochwertige Wiederverwendung anfallender Betonrestströme. Außerhalb des Rahmens dieser CROW-CUR-Empfehlung, aber mit den Mitgliedern der CROW-Arbeitsgruppe sehr wohl abgestimmt, ist dieser Einsatz von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung daher auch unter den Aspekten der Recyclingfähigkeit und den Anforderungen des Umweltschutzes entsprechend der Verordnung zur Bodenqualität geprüft worden. Betongranulat aus Beton mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung wird unter bautechnischen und Umweltschutzaspekten sowie unter dem Gesichtspunkt der Recyclingfähigkeit mit Betongranulat ausschließlich aus primären Rohstoffen verglichen. Hierbei kann nachgewiesen werden, dass Betongranulat und Füllstoffe aus Betonschotter mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung in verantwortbarer Weise einem neuen Leben als Rohstoff für Beton zugeführt werden kann.



Diese CROW-CUR-Empfehlung baut vom Inhalt her auf den Ergebnissen einer ausführlichen Untersuchung von Beton mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung auf, die in einem Hintergrundbericht festgehalten worden sind.

Diese CROW-CUR-Empfehlung ist von der CROW-Arbeitsgruppe ‚Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in unbewehrtem Beton‘ erstellt worden. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Empfehlung bestand diese Arbeitsgruppe aus:

Angelo Sarabèr (*Sarabèr Consultancy, Vorsitzender*)
Angelo Antoniadis (*Kiwa*)
Erwin Bakker (*Blue Phoenix Group*)
Rob Bleijerveld (*Mineralz*)
Eugene Caron (*Master Builders Solutions Nederland*)
Mark van Kempen (*Blue Phoenix Group*)
Felix Leenders (*Mobilis*)
Erik Onstenk (*Pelt & Hooykaas*)
Math Pluis (*Betonhuis*)
Jos van der Scheer (*Kijlstra Betonwaren*)
Evert Schut (*RWS*)
Henk Soen (*Blue Phoenix Group*)
Ludwig Temme (*Gemeinde Amersfoort*)
Edwin Vermeulen (*Betonhuis*)
Martin Verweij (*Cementbouw*)
Gert van der Wegen (*SGS INTRON, Berichterstatter*)

Die Begleitung von Seiten des CROW erfolgte durch Ad van Leest.

Die Veröffentlichung dieser Empfehlung ist auch möglich geworden durch die finanziellen Beiträge von: Blue Phoenix Group, Betonhuis Cement und Rijkswaterstaat GPO.

Der Inhalt dieser CROW-CUR-Empfehlung 128 ist vor der Veröffentlichung mit den Mitgliedern der NEN-Normenkommission 353 039 ‚Beton‘ und der darunter angesiedelten Arbeitsgruppe ‚Füllstoffe‘ geteilt worden. Die dabei erhalten Reaktionen und Anmerkungen sind in diese Empfehlung soweit wie möglich berücksichtigt worden.

Inhalt

1	Gegenstand und Anwendungsbereich	6
2	Begriffe und Begriffsbestimmungen	6
1.1	Gegenstand	6
1.2	Anwendungsbereich	6
3	Anforderungen an Materialien	7
	Anlage	9
	Hintergrundbericht zur CROW-CUR-Empfehlung 128:2021: Untersuchung zur Eignung nass gemahlener Müllverbrennungsschlacke als Füllstoff in unbewehrtem erdfeuchtem Beton – Bericht SGS INTRON B.V.	

1

Gegenstand und Anwendungsbereich

1.1 Gegenstand

Diese CROW-CUR-Empfehlung enthält Definitionen, Anforderungen und Regeln für Füllstoffe aus der Abfallverbrennung, die aus Müllverbrennungsschlacke produziert werden, wobei neben den für Rostschlacke üblichen Bearbeitungsschritten, insbesondere Sieben und Entfernen von Eisen- und Nicht-Eisen-Metallen, auch ein spezieller nasser Mahlprozess eingesetzt wird. Die Füllstoffe aus der Abfallverbrennung werden aus den gesamten verschiedenen Korngrößen der entsprechenden Müllverbrennungsschlacke produziert.

1.2 Anwendungsbereich

Diese CROW-CUR-Empfehlung gilt für Füllstoffe aus der Abfallverbrennung, die in Produkten aus unbewehrtem nicht tragendem Beton aus Betonsorten der Konsistenzklassen C0 (trocken) und C1 (erdfeucht) mit einer maximalen Dosierung der Füllstoffe aus der Verbrennung von Haushaltsabfällen von 140 kg/m^3 eingesetzt werden.

2

Begriffe und Begriffsbestimmungen

Müllverbrennungsschlacke

Müllverbrennungsschlacke entsteht beim Verbrennen von Haushaltsabfall und diesem gleichgestelltem Gewerbeabfall (einschließlich Biomasse) in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) mit Rostfeuerung und angeschlossenen Kraftwerk. Rostschlacke aus einem Biomassekraftwerk darf bis zu einem Maximum von 5,0 Masse-% in Müllverbrennungsschlacke enthalten sein, sofern diese aus einem in derselben Anlage gelegenen Biomassekraftwerk stammt und der unbearbeiteten Müllverbrennungsschlacke hinzugefügt wird. Kesselasche kann in der Müllverbrennungsschlacke enthalten sein, soweit es sich dabei um Kesselasche handelt, die zusammen mit der Müllverbrennungsschlacke angefallen ist und direkt im Verbrennungsprozess selbst hinzugefügt wird.

Füllstoffe aus der Abfallverbrennung

Füllstoffe, die aus Müllverbrennungsschlacke produziert werden und aus einer Müllverbrennungsanlage mit nasser Entschlackung stammen, wobei neben den für Rostschlacke üblichen Bearbeitungsschritten auch ein spezieller nasser Mahlprozess eingesetzt wird.

Füllstoffe aus der Abfallverbrennung müssen den Anforderungen in der nachstehenden Tabelle entsprechen.

Eigenschaft	Methode	Anforderung
Korngrößenverteilung	NEN-EN 933-10	100% < 2 mm 85-100% < 125 µm 70-100% < 63 µm
Alkaligehalt, ausgedrückt als Na ₂ O-Äquivalent	Röntgenfluoreszenzspektrometrie (XRF) NEN-EN 196-2	≤ 5,0 Masse-% ¹⁾
Methylenblauadsorption	NEN-EN 933-9	≤ 1,2 Masse-%
Gehalt an Chloriden	NEN-EN 196-2	≤ 1,0 Masse-% ²⁾
Gehalt an Sulfaten - SO ₃	NEN-EN 196-2	≤ 4,0 Masse-% ³⁾
Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung ^{4,5)}	NEN-EN 196-1	≥ 65%
Einfluss auf die Abbindezeit ⁴⁾	NEN-EN 196-3	< 120 Minuten
Bestimmung der Formbeständigkeit ⁶⁾	NEN-EN 196-3	< 10 mm
TOC-Gehalt	NEN-EN 13639	≤ 6 Masse-%
Gehalt an metallischem Al + Zn	CUR-Empfehlung 116	≤ 0,2 Masse-%

- 1) Falls der XRF-Wert über 5 Masse-% liegt, muss die Bestimmung über den basisch löslichen Alkaligehalt entsprechend NEN-EN 196-2 erfolgen, wobei die Erschließung der Probe der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung nach 4.4.4.2 erfolgt, jedoch mit einer Lösung von 107 g LiOH pro 1000 ml anstelle der beschriebenen KOH-Lösung.
- 2) Diese Anforderung gilt bei Ersatz von 25 Masse-% des Zements durch Füllstoff aus der Abfallverbrennung. Bei einem höheren Ersatzanteil verringert sich der Grenzwert entsprechend.
- 3) Falls der Gehalt an säurelöslichen Sulfaten, ausgedrückt als SO₃, 0,2 ≤ x ≤ 4,0 Masse-% beträgt, darf der Gehalt an Sulfaten im eingesetzten Zuschlagstoff nicht höher als 0,2 Masse-% (AS0,2) sein und diese Einschränkung ist beim Einsatz von Zuschlagstoffen in den Produktspezifikationen anzugeben. Füllstoffe mit einem Sulfatgehalt, ausgedrückt als SO₃, von mehr als 4,0 Masse-% dürfen nicht eingesetzt werden.
- 4) Anzuwendende Vorschrift bei einem Gemisch von 25 Masse-% Füllstoffe und 75 Masse-% CEM I 42,5 im Vergleich zu Proben, die aus 100% desselben CEM I 42,5 hergestellt worden sind.
- 5) Falls der Luftgehalt der Mörtelsorte mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung höher als der der Referenzmörtelsorte ist, darf pro Prozentpunkt höherem Luftgehalt die Druckfestigkeit des Referenzmörtels um 5% verringert werden, bevor die Prüfung durchgeführt wird. Diese Korrektur ist eingeführt worden, da Füllstoff aus der Abfallverbrennung in plastischen Sorten einen höheren Luftgehalt verursachen kann, was bei trockenen und erdfeuchten Sorten nicht auftritt.
- 6) Anzuwendende Vorschrift bei einem Gemisch von 25 Masse-% Füllstoffe und 75 Masse-% CEM I 42,5.

Titel der angegebenen Normen und Veröffentlichungen

NEN-EN 196-1	Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
NEN-EN 196-2	Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement
NEN-EN 196-3	Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung des Beginns und Endes beim Abbinden und Bestimmung der Formbeständigkeit
NEN-EN 933-9	Prüfverfahren für die geometrischen Eigenschaften von Zuschlagstoffen – Teil 9: Beurteilung feinkörniger Stoffe – Methylenblau-Methode
NEN-EN 13639	Bestimmung des Gesamtgehalts an organischem Kohlenstoff in Kalksteinen
CUR-Empfehlung 116	MVA-Granulat als Zuschlagstoff für Beton
Hintergrundbericht zur CROW-CUR-Empfehlung 128	Untersuchung zur Eignung gemahlener Müllverbrennungsschlacke als Füllstoff in unbewehrtem erdfeuchtem Beton', SGS INTRON Bericht A117460/R20210149, Juli 2021

Anlage

Hintergrundbericht zur CROW-CUR-Empfehlung 128:2021

Untersuchung zur Eignung nass gemahlener Müllverbrennungsschlacke als Füllstoff in unbewehrtem erdfeuchtem Beton

Bericht SGS INTRON B.V.

Inhalt

Zusammenfassung	13
1 Einleitung	14
2 Gegenstand der Untersuchung	15
2.1 Charakterisierung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung	15
2.2 Betonbrei- und Mörteluntersuchungen	15
2.3 Betonuntersuchung 1. Leben	16
2.4 Recyclingfähigkeit	17
2.4.1 Betontechnologisch: Betongranulat	17
2.4.2 Betontechnologisch: Füllstoff	17
2.4.3 Umwelthygiene	17
3 Ergebnisse und Betrachtung	18
3.1 Charakterisierung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung	18
3.1.1 Chemische Analysen und Wasserbedarf	18
3.1.2 Korngrößenverteilung	19
3.1.3 Elementare Zusammensetzung	19
3.1.4 Mineralogische Zusammensetzung	20
3.1.5 Mikrostruktur und Zusammensetzung	21
3.1.6 Schlussfolgerungen zur Charakterisierung	22
3.2 Betonbrei- und Mörteluntersuchungen	23
3.2.1 Untersuchungen von Betonbrei	23
3.2.2 Mörteluntersuchungen: Entwicklung der Festigkeit	23
3.2.3 Mörteluntersuchungen: Ausdehnung in Wasser von 40 °C	24
3.2.4 Mörteluntersuchungen: Einfluss des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung auf die AKR	25
3.3 Betonuntersuchung 1. Leben	26
3.3.1 Zusammensetzung der Betonplatten	26
3.3.2 Mechanische Eigenschaften	26
3.3.3 Frost-Tausalz-Beständigkeit	27
3.3.4 Wasseraufnahme und Austrocknung	28
3.3.5 Schlussfolgerungen aus der Betonuntersuchung zum 1. Leben	28
3.4 Recyclingfähigkeit	29
3.4.1 Betontechnologisch: Betongranulat	29
3.4.2 Betontechnologisch: Füllstoff	30
3.4.3 Umwelthygiene	31
4 Schlussfolgerungen zur Eignung des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung	33
5 CROW-CUR-Empfehlung	33
6 Nachwort	35
Anlagen	
A Herkunft und Repräsentativität des Eingangsmaterials für die Untersuchungen	36
B Daten XRD und XRF Messmethoden	43
C Herstellung der Betonplatten	44
D Korngrößenverteilungen Füllstoffe und Zement	45
E Röntgendiffraktogramme	46
F SEM/EDAX	47
G Schaumversuch Füllstoffe aus der Abfallverbrennung	48

Zusammenfassung

Einleitung

Aus Müllverbrennungsschlacke kann mit einem Aufbereitungsprozess, zu dem nasses Mahlen gehört, ein Füllstoff zum Einsatz in unbewehrtem erdfeuchtem Beton hergestellt werden. Um diese Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in einer verantwortlichen und akzeptablen Weise in Beton einsetzen zu können, ist eine Systematik zur Beurteilung in Form einer CROW-CUR-Empfehlung erforderlich. Diese Empfehlung bildet gleichzeitig die technische Grundlage zur Aufnahme dieser Art von Füllstoffen in die Bewertungsrichtlinie BRL 1804, auf deren Basis die Zertifizierung der Füllstoffe erfolgen kann.

Die relevanten Eigenschaften und Leistungsmerkmale der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung sind mit Hilfe einer ausführlichen Charakterisierung und Betonuntersuchung kartiert worden. Hierbei ist gleichzeitig die Recyclingfähigkeit des Betons berücksichtigt worden, in dem Füllstoffe aus der Abfallverbrennung eingesetzt werden. Diese Erkenntnisse haben zur Formulierung der CROW-CUR-Empfehlung geführt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind in diesem Bericht enthalten, der als Hintergrunddokument zur entsprechenden CROW-CUR-Empfehlung dient.

Die Untersuchung ist unter Begleitung der CROW-Arbeitsgruppe N1794 ‚Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in unbewehrtem Beton‘ durchgeführt worden.

Ausgeführte Maßnahmen

Repräsentative Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung sind hinsichtlich ihrer für den Einsatz in Beton relevanten Eigenschaften charakterisiert worden. Daneben ist der Einfluss der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung auf die relevanten Eigenschaften industriell hergestellter Betonplatten untersucht worden, wobei als Referenzen Betonplatten ohne Füllstoffe und mit Kalksteinmehl als Füllstoff herangezogen worden sind.

Zur Beurteilung des Einflusses der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung auf die Recyclingfähigkeit des hiermit hergestellten Betons sind Betongranulate mit Füllstoffe aus der Abfallverbrennung charakterisiert und Beton mit diesen Betongranulaten hinsichtlich einiger Grundeigenschaften, sowohl betontechnologischer als auch umwelthygienischer Art, untersucht worden. Gleichzeitig ist untersucht worden, ob ausgehärtete Zementsteine mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung nach feinem Mahlen grundsätzlich wieder als Füllstoff für Beton eingesetzt werden können.

Schlussfolgerungen

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen kann gefolgert werden, dass der untersuchte Füllstoff aus der Abfallverbrennung für den Einsatz in unbewehrten, nicht tragenden Betonprodukten aus trockenen oder erdfeuchten Betonsorten geeignet ist.

Gleichzeitig ist nachgewiesen worden, dass die durch das Recycling dieses Betons entstandenen Materialströme (Betongranulat und Pulverfraktion) durch Einsatz von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung in derartigen Betonprodukten für ein zweites Leben erneut als Rohstoff in Beton eingesetzt werden können. Diese Anwendung von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung entspricht somit bei den untersuchten Aspekten vollständig den Anforderungen an die Recyclingfähigkeit.

Empfehlungen

Es wird empfohlen, ergänzend zu den in BRL 1804 genannten generischen Eigenschaften, die folgenden Aspekte von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung in der CROW-CUR-Empfehlung zu regeln:

- Alkaligehalt (Na_2O -Äq.)
- TOC-Gehalt
- Gehalt an metallischem Al + Zn
- Gehalt an Chloriden

Die Blue Phoenix Group (BPG) will Füllstoffe aus der Abfallverbrennung als zertifizierte Füllstoffe zum Einsatz in unbewehrten Betonprodukten aus erdfeuchten Betonsorten auf den Markt bringen. Diese Füllstoffe aus der Abfallverbrennung werden aus Müllverbrennungsschlacke produziert, wobei neben den für Rostschlacke üblichen Bearbeitungsschritten, insbesondere Sieben und Entfernen von Eisen- und Nicht-Eisen-Metallen, auch ein spezieller nasser Mahlprozess angewandt wird. Das Produkt wird als pulverförmiger Füllstoff geliefert.

Um diese Füllstoffe aus der Abfallverbrennung nach BRL 1804 zertifizieren zu können, muss zuerst eine technische Grundlage in Form einer CROW-CUR-Empfehlung erstellt werden. Die hierzu erforderliche Untersuchung ist von der CROW-Arbeitsgruppe N1794 ‚Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in unbewehrtem Beton‘ durchgeführt worden. In dieser Untersuchung ist gleichzeitig die Recyclingfähigkeit des Betons berücksichtigt worden, in dem Füllstoffe aus der Abfallverbrennung eingesetzt werden.

In diesem Bericht, der als Hintergrunddokument zur entsprechenden CROW-CUR-Empfehlung dient, sind die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung aufgeführt. Gleichzeitig werden die getroffenen Entscheidungen zu bestimmten Aspekten, wie in die CROW-CUR-Empfehlung aufgenommen, näher erklärt.

Durchgeführt wurde die Untersuchung an drei Proben von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung, deren Ausgangsmaterial laut Blue Phoenix Group aus drei verschiedenen niederländischen Müllverbrennungsanlagen (MVA) mit angeschlossenem Kraftwerk stammen und die für niederländische Müllverbrennungsschlacke repräsentativ sind (siehe Anlage A). Diese Anlage enthält außerdem Informationen zur Entnahme der Proben der Müllverbrennungsschlacken und zum Aufbereitungsprozess als Füllstoff aus der Abfallverbrennung.

Das Untersuchungsprogramm besteht aus mehreren Teilen:

- Charakterisierung der drei Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung
- Einfluss der Füllstoffe auf die Eigenschaften von Betonbrei und Mörtel
- betontechnologische Untersuchung des Betonprodukts, in dem Füllstoffe aus der Abfallverbrennung verarbeitet worden sind (1. Leben)
- Untersuchung der Recyclingfähigkeit (2. Leben), sowohl betontechnologisch als auch umwelthygienisch.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den ersten beiden Teilen ist ein Füllstoff aus der Abfallverbrennung ausgewählt worden, der in den beiden folgenden Teilen in der gesamten Breite untersucht wurde.

2.1 Charakterisierung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung

An den drei Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung sind die folgenden Eigenschaften bestimmt worden:

- Korngrößenverteilung (Lasergranulometrie)
- Wasserbedarf β_p -Wert: Anlage C von BRL 1804
- Gehalt an Chloriden (säure- und wasserlöslich): NEN-EN 196-2 bzw. NEN-EN 1744-1
- Gehalt an Sulfaten (säure- und wasserlöslich): NEN-EN 196- bzw. NEN-EN 1744-1
- Konzentration an Alkali (Na_2O -Äq.): NEN-EN 196-2
- Gehalt an wasserlöslichem Phosphat: Anlage C von NEN-EN 450-1
- Gehalt an organischen Bestandteilen (TOC): NEN-EN 13639
- Gehalt an metallischem Al+Zn: Anlage A von CUR-Empfehlung 116
- Elementzusammensetzung mit Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF): NEN-EN 196-2
- Mineralogische Zusammensetzung: quantitative Röntgendiffraktometrie (XRD)
- Mikrostruktur/Zusammensetzung: Rasterelektronenmikroskopie (REM) + Elementanalyse (EDXA)

Eine zusammengefasste Spezifikation der XRF- und XRD-Messmethoden ist in Anlage B enthalten.

2.2 Betonbrei- und Mörteluntersuchungen

Mit den drei Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung und einem handelsüblichen Kalksteinmehl (als Referenz) sind Betonbrei- und Mörteluntersuchungen durchgeführt worden, wobei 25 Masse-% des Zements durch diese Füllstoffe ersetzt wurden. Als weitere Referenz sind diese Untersuchungen ebenfalls an Betonbrei und Mörtel ohne Füllstoffe (100% Zement) vorgenommen worden. Normbrei und Normmörtel sind nach NEN-EN 196-3 bzw. NEN-EN 196-1 mit CEM I 52,5 N (ENCI Maastricht) als Bindemittel hergestellt worden. CEM I 52,5 N ist gewählt worden, da dieser Zement bei der Herstellung der Betonplatten, die für die Betonuntersuchung verwendet wurden, eingesetzt wird.

Die folgenden Eigenschaften sind bestimmt worden:

- Luftgehalt (frische Mörtelsorte) entsprechend NEN-EN 12350-7
- Abbindezeit (Betonbrei) entsprechend NEN-EN 196-3

- Formbeständigkeit (Le Chatelier) entsprechend NEN-EN 196-3
- Untersuchung im Autoklaven (am Betonbrei) entsprechend ASTM C151
- Ausdehnung bei Lagerung unter Wasser von 40 °C. Am Ende der Prüfung wird ein Mikroschliff mikroskopisch untersucht
- Druckfestigkeit nach 7, 28 und 90 Tagen Aushärtung entsprechend NEN-EN 196-1

Der Einfluss der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) wird mit dem stark beschleunigtem Mörtelstabtest (UAMBT) nach Anlage E zur CUR-Empfehlung 89 mit den folgenden Kombinationen untersucht:

- CEM I 52,5 ohne Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in Kombination mit sowohl reaktiven als auch nicht-reaktiven Zuschlagstoffen (2 Referenzen)
- Der in den vorstehenden Schritten der Untersuchung ausgewählte Füllstoff aus der Abfallverbrennung, der 25 Masse-% des Zements ersetzt, in Kombination mit sowohl reaktiven als auch nicht-reaktiven Zuschlagstoffen
- Die beiden anderen Füllstoffe aus der Abfallverbrennung (bei 25 Masse-% Zementersatz), jeweils in Kombination mit nicht-reaktiven Zuschlagstoffen

Da keine reaktiven Zuschlagstoffe verfügbar waren, ist entschieden worden, Borosilikatglas als alkalireaktives Material zu verwenden. Glasperlen aus diesem Material wurden vor dem UAMBT-Test gebrochen und in den gewünschten Korngrößenfraktionen gesiebt. Um eine deutliche Ausdehnung zu erreichen, sind bei dieser Untersuchung Probestücke von 25x25x285 mm verwendet worden.

2.3 Betonuntersuchung 1. Leben

Entsprechend dem ursprünglichen Vorhaben sollte diese Untersuchung an im Labor mit in der Praxis üblichen Werten für Zusammensetzung und Verdichtungsdruck gepressten Betonpflastersteinen vorgenommen werden. Mangels ausreichender Verdichtungsenergie, die im Labor nicht möglich war, zeigten die im Labor hergestellten Betonpflastersteine eine Spaltzugfestigkeit von etwa der Hälfte der in der Praxis üblichen Werte. Daher ist in Abstimmung mit der CROW-Arbeitsgruppe entschieden worden, die Probestücke doch in der Praxis mit einer Projektleitung durch Blue Phoenix Group in Zusammenarbeit mit SGS INTRON herstellen zu lassen. SGS INTRON Mitarbeiterin Ing. Bianca Baetens hat den gesamten Herstellungsprozess festgelegt und begleitet. In Anlage C sind die wichtigsten Daten dieser Herstellung aufgeführt.

Es sind 5 Serien von Betonplatten angefertigt worden:

- Beton ohne Füllstoffe (Referenz 1), so wie er gewöhnlich produziert wird
- Beton mit Kalksteinmehl als Füllstoff (Referenz 2)
- Beton mit den 3 Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung

Diese 4 Füllstoffe sind zu 25 Masse-% als Ersatz für den Zement dosiert worden.

Nach 28 Tagen Aushärten bei 20 °C und beim eigenen Feuchtigkeitsgehalt sind die folgenden Eigenschaften der Betonplatten dreifach bestimmt worden:

- Volumetrische Masse NEN-EN 12390-7
- Dynamisches E-Modul (berechnet aus der Ultraschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit)
- Druckfestigkeit eines ausgesähten Würfels entsprechend NEN-EN 12390-3
- Biegezugfestigkeit nach Anlage F von NEN-EN 1339
- Frost-Tausalz-Widerstand nach Anlage D von NEN-EN 1339
- Kapillare Wasseraufnahme und Austrocknung

2.4 Recyclingfähigkeit

Zurzeit wird durch eine andere CROW-Arbeitsgruppe eine Systematik zur Beurteilung der Eignung von Rohstoffen für Recyclingbeton erstellt. Da diese Systematik zum Beginn der vorliegenden Untersuchung noch nicht verfügbar war, sind nicht alle Aspekte untersucht worden, darunter insbesondere besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC) und Radioaktivität. Die folgenden betontechnologischen und umwelthygienischen Aspekte sind jedoch untersucht worden.

2.4.1 Betontechnologisch: Betongranulat

Aus 3 Betonmischungen ist eine Anzahl von Betonplatten nach einer anfänglichen Aushärtung während 28 Tagen bei 20 °C mit anschließender beschleunigter Aushärtung in Wasser von 40 °C während zwei Monaten ausgehärtet worden, um einen höheren Hydratationsgrad herbeizuführen („gealterter“ Beton). Anschließend sind die Betonplatten in einem Backenbrecher zerkleinert und trocken zu einem Betongranulat mit 4 - 22 mm gesiebt worden. Dies ist bei der Betonmischung ohne Füllstoffe (Referenz 1), der Betonmischung mit Kalksteinmehl als Füllstoff (Referenz 2) und der Betonmischung mit dem im ersten Teil der Untersuchung ausgewählten Füllstoff aus der Abfallverbrennung erfolgt.

Diese hergestellten 3 grobkörnigen Betongranulate sind wie folgt untersucht worden

- Charakterisierung:
 - (Korn)dichte und Wasseraufnahme entsprechend NEN-EN 1097-6
 - Korngrößenverteilung entsprechend NEN-EN 933-1
- Herstellung von plastischem Beton (S3) mit 320 kg/m³ CEM I 42,5 N und W/Z-Wert von 0,50 und Bestimmung von:
 - Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen entsprechend NEN-EN 12390-3
 - Wassereindringtiefe nach 28 Tagen Aushärtung entsprechend NEN-EN 12390-8
 - Chloridmigrationskoeffizient nach 28 Tagen Aushärtung entsprechend NT Build 492

2.4.2 Betontechnologisch: Füllstoff

Mit innovativen Recyclingtechniken kann der Zementstein größtenteils von den Zuschlagstoffen getrennt werden, wodurch diese Pulverfraktion wieder als Füllstoff in Beton verwendet werden kann. Um den Einfluss der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung auf die Qualität eines Füllstoffs im 2. Leben festzustellen, wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

Es sind 3 Zementbreie mit einem Wasserbindemittelwert (W/B-Wert) von 0,35 (vergleichbar mit dem der Betonplatten) hergestellt worden: ein Zementbrei ohne Füllstoff (Referenz 1), ein Zementbrei mit Kalksteinmehl als Füllstoff (Referenz 2) und ein Zementbrei mit dem im ersten Teil der Untersuchung ausgewählten Füllstoff aus der Abfallverbrennung. Diese Zementbreie sind nach einer ersten Aushärtung während 28 Tagen bei 20 °C anschließend zwei Monate lang beschleunigt in Wasser von 40 °C ausgehärtet worden, um einen höheren Hydratationsgrad herbeizuführen („gealterter“ Beton). Nach dieser beschleunigten Aushärtung sind die Probestücke in einem Backenbrecher auf eine Korngröße < 4 mm zerkleinert und anschließend in einer Kugelmühle 1 Stunde lang pulverfein gemahlen worden.

Die drei so hergestellten Füllstoffe des 2. Lebens sind auf die folgenden Eigenschaften hin untersucht worden:

- Einfluss der Abbindezeit entsprechend NEN-EN 196-3
- Formbeständigkeit entsprechend NEN-EN 196-3
- Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen entsprechend NEN-EN 196-1

2.4.3 Umwelthygiene

Einige Betonplatten, die ohne Füllstoff hergestellt worden waren (Referenz 1), und die Platten mit dem ausgewählten Füllstoff aus der Abfallverbrennung sind nach 28 Tagen Aushärten bei 20 °C und eigenem Feuchtigkeitsgehalt (luftdicht in Kunststoffolie eingepackt) auf < 4 mm gebrochen worden. Diese beiden Proben von Betongranulat sind mit Hilfe eines Säulentests entsprechend NEN 7383 auf Auslaugung untersucht worden.

3.1 Charakterisierung AEC-vulstoffen

BPG hat 3 Proben von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung für die durchzuführenden Untersuchungen an das Labor von SGS INTRON in Sittard geliefert. Diese Proben sind von BPG bewusst mit einer bestimmten Variation hergestellt worden, u.a. mit verschiedenen Anteilen von TOC, um deren Auswirkungen auf die Eigenschaften des Mörtels und der Betonsorten sichtbar zu machen.

3.1.1 Chemische Analysen und Wasserbedarf

Die Ergebnisse der chemischen Analysen und der Bestimmung des Wasserbedarfs sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Charakterisierung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung

Eigenschaft	Einheit	MVA-1	MVA-2	MVA-3	Generische Anforderung BRL 1804
Nicht löslich (HCl/Na ₂ CO ₃)	Masse-%	41,7	43,5	44,1	-
Sulfat, wasserlöslich (SO ₃)	Masse-%	1,18	0,70	0,88	-
Sulfat, säurelöslich (SO ₃)	Masse-%	2,10	1,31	1,65	≤ 4,0
Chlorid, wasserlöslich	Masse-%	0,19	0,11	0,29	-
Chlorid, säurelöslich	Masse-%	0,32	0,23	0,42	-
Alkali-Äquivalent, XRF	Masse-%	4,8	4,8	4,6	≤ 5,0
Lösliches Phosphat (P ₂ O ₃)	Masse-%	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	-
Metallisches Aluminium + Zink	Masse-%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	-
TOC	Masse-%	5,8	2,0	0,69	-
Wasserbedarf β _p -Wert	V/V	1,54	1,18	1,32	-

Der Sulfatgehalt ist niedriger als in der generischen Anforderung von BRL 1804 (≤ 4,0 Masse-%) sowie der Anforderung in EN 450-1 an Kohlenstaubflugasche (≤ 3,0 Masse-%).

An den Chloridgehalt wird in BRL 1804 keine besondere Anforderung gestellt, da für die Verwendung in bewehrtem und vorgespanntem Beton für diese Betonsorte ein maximaler Chloridgehalt im Zusammenhang mit der Gefahr der Bewehrungskorrosion gilt. Der gesamte Chloridgehalt aller eingesetzten Rohstoffe zusammen muss diesem Kriterium entsprechen. Da der Einsatz von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung auf unbewehrten Beton beschränkt ist, ist dieser maximale Chloridgehalt nicht relevant. Ein anderer Grund, den Chloridgehalt zu beschränken, ist der Einfluss auf das Schrumpfverhalten des Betons. Dies ist erst bei hohen Chloridgehalten (> 1 Masse-% in der Zementmasse) feststellbar. Selbst bei einer sehr hohen Dosierung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung von z.B. 50% der Zementmasse ist der Beitrag zum Chloridgehalt auf 0,2 Masse-% bei Zement beschränkt und sollte daher keine nachteiligen Auswirkungen haben.

Das Alkali-Äquivalent ist per XRF bestimmt worden, womit der gesamte Gehalt einschließlich der Alkalien gemessen wurde, die in der amorphen Fraktion (Glas) der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung vorhanden sind. Obwohl diese Alkalien erst freigesetzt werden, nachdem sich dieses Glas durch puzzolanische Reaktionen (teilweise) aufgelöst hat, entsprechen die gemessenen Wert der generischen Anforderung in BRL 1804 (≤ 5,0 Masse-%).

Der Gehalt an wasserlöslichem Phosphat und metallischen Aluminium + Zink liegt unterhalb der Nachweisgrenze der vorgeschriebenen Messverfahren und diese Stoffe sind damit effektiv nicht vorhanden. Es gibt in BRL 1804 keine generischen Anforderungen zu diesen beiden Aspekten. Hinsichtlich des wasserlöslichen Phosphats gilt in NEN-EN 450-1 für Kohlenstaub-flugasche und

in BRL 1804 für Füllstoffe aus der thermischen Reinigung von Asphalt mit und ohne Teeranteil ein Wert von < 0,01 Masse-%. Das wasserlösliche Phosphat liegt damit mindestens um den Faktor 10 unter dieser Anforderung.

Der TOC-Wert ist bei den drei verschiedenen Füllstoffen aus der Abfallverbrennung (bewusst) unterschiedlich und oberhalb der ergänzenden Anforderung gehalten worden, die in BRL 1804 für Kalksteinmehl gilt ($\leq 0,5$ Masse-%).

Mit Kalksteinmehl hergestellter Beton mit einem TOC-Gehalt über 0,5 Masse-% scheint für Schädigung durch Frost-Tausalz anfällig zu sein. Dieser Aspekt ist bei den Füllstoffen aus der Abfallverbrennung näher untersucht worden (siehe Abschnitt 3.3).

Der β_p -Wert der 3 untersuchten Füllstoffe aus der Abfallverbrennung liegt über dem von Zement (CEM I 52,5 = ca. 1,2) und anderen Füllstoffen wie Kohlenstaubflugasche (ca. 0,7) und Kalksteinmehl (ca. 0,8).

Das heißt, dass bei plastischen Mörtel- und Betonsorten die Füllstoffe aus der Abfallverbrennung einen höheren Wasserbedarf herbeiführen.

Die Bestimmung der Methylenblauadsorption gehörte nicht zur vorstehend beschriebenen Charakterisierungsuntersuchung. Messungen an 3 Proben von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung derselben Herkunft wie MVA-3, jedoch über einen Zeitraum von mehreren Monaten in 2018 genommen, ergaben eine Methylenblauadsorption von 0,16 Masse-% [SGS INTRON Bericht A101790/ R20180428c vom 7.12.2018]. Dieser Wert liegt deutlich unter der Anforderung von <1,2 Masse-% in BRL 1804.

3.1.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der 3 untersuchten Füllstoffe aus der Abfallverbrennung sowie die des bei der Herstellung der Betonplatten eingesetzten CEM I 52,5 N und Kalksteinmehls, per Lasergranulometrie gemessen, wird in Anlage D grafisch wiedergegeben. Die charakteristischen Korngrößen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2. Charakteristische Korngrößenverteilung

Korneigenschaft	MVA-1	MVA-2	MVA-3	Kalksteinmehl	CEM I 52,5N
d10 (μm)	0,51	0,46	0,24	0,84	0,79
d50 (μm)	8,4	8,2	5,8	9,8	7,6
d90 (μm)	47	55	25	48	34

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass die Probe MVA-3 einen etwas feineren Mahlgrad hat als die beiden anderen untersuchten Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung, die nahezu identisch sind. Die Korngrößenverteilungen der 4 Füllstoffe und des Zements sind vergleichbar. Die Korngrößenverteilung der 3 Füllstoffe aus der Abfallverbrennung entspricht den Anforderungen in BRL 1804.

3.1.3 Chemische Zusammensetzung

Die Ergebnisse der per Röntgenfluoreszenz (XRF) bestimmten chemischen Zusammensetzungen zeigt Tabelle 3. Die Unterschiede zwischen den 3 Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung sind sehr gering.

Die Hauptbestandteile (als Oxide ausgedrückt) sind Silizium, Kalzium, Eisen und Aluminium (ca. 85% der Gesamtmenge). Der Sulfatgehalt deckt sich mit dem aus der nassen chemischen Analyse.

3.1.4 Mineralogische Zusammensetzung

Die mineralogische Zusammensetzung der 3 untersuchten Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung ist in Tabelle 4 gezeigt. Die Röntgendiffraktogramme befinden sich in Anlage E. Die Proben zeigen eine gleiche mineralogische Zusammensetzung mit nur geringen Unterschieden bei den Anteilen.

Sie enthalten alle eine relativ große Menge amorphen Materials (ca. 66%). Die hauptsächlich vorgefundenen Mineralien sind Quarz (ca. 14%), melilithische Mineralien (ca. 6%) und Kalzit (ca. 4%).

Tabelle 3. Chemische Zusammensetzung (Masse-% als Oxide)

Element (als Oxid)	MVA-1	MVA-2	MVA-3
Silizium als SiO ₂	50,07	47,61	50,46
Kalzium als CaO	18,18	17,03	16,41
Eisen als Fe ₂ O ₃	7,90	11,04	10,59
Aluminium als Al ₂ O ₃	7,43	8,23	7,98
Natrium als Na ₂ O	4,13	4,13	3,94
Schwefel als SO ₃	2,69	1,60	1,64
Magnesium als MgO	2,39	2,42	2,02
Phosphor als P ₂ O ₅	1,10	1,23	0,94
Titan als TiO ₂	1,15	1,32	0,98
Kalium als K ₂ O	1,01	0,97	1,02
Zink als ZnO	0,54	0,60	0,50
Kupfer als CuO	0,31	0,38	0,27
Mangan als Mn ₃ O ₄	0,16	0,21	0,18
Blei als PbO	0,11	0,11	0,11
Chrom als Cr ₂ O ₃	0,10	0,11	0,09
Zirkon als ZrO ₂	0,14	0,06	0,07
Barium als BaO	0,21	0,27	0,20
Strontium als SrO	0,07	0,05	0,05
Nickel als NiO	0,02	0,03	0,03
Vanadium als V ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01

Tabelle 4. Mineralogische Zusammensetzung (202621-1 = MVA-1; 202621-2 = MVA-2; 202621-3 = MVA-3)

Mineral	Theoretische Formel ²	202621-1	202621-2	202621-3
Silikate				
Quarz	SiO ₂	14,8	11,3	15,6
Cristobalit	SiO ₂	0,2	0,2	0,1
Alkalifeldspat	(Na,K)AlSi ₃ O ₈	0,6	0,5	0,9
Plagioklas/Albit	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	1,0	1,1	1,1
Meliithische Mineralien	(Ca,Na)(Al,Mg,Fe)(Si,Al) ₂ O ₇	5,0	6,5	5,9
Petedunnit	Ca(Zn,Mn,Fe,Mg)Si ₂ O ₆	1,2	1,7	2,0
C ₂ S*, Lamit	Ca ₂ SiO ₄	1,2	0,1	0,5
Muskovit/Glimmer	(K,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]	1,2	0,9	1,1
Karbonate				
Calcit	CaCO ₃	4,5	4,8	3,1
Sulfate				
Bassanit	CaSO ₄ • 1/2H ₂ O	0,6	0,7	1,1
Anhydrit	CaSO ₄	0,3	0,1	0,1
Oxide/Hydroxide				
Magnetit	Fe ₃ O ₄	1,6	2,4	2,2
Hemalit	Fe ₂ O ₃	0,8	1,0	0,7
Periklas	MgO	0,2	0,1	0,1
Wüstit	FeO	0,5	0,9	1,0
Rutil	TiO ₂	0,3	2,1	0,1
Phosphate				
Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)	0,8	0,9	0,5
Andere/Amorph		66,3	66,6	65,8

3.1.5 Mikrostruktur und Zusammensetzung

Die Morphologie und die durchschnittliche Zusammensetzung der Partikel aus der Müllverbrennung sind mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) näher untersucht worden. Die Ergebnisse sind detailliert in Anlage F aufgeführt. Daraus geht hervor, dass die drei untersuchten Proben der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung sowohl bei der Morphologie als auch bei der durchschnittlichen Zusammensetzung sehr ähnlich sind. Abbildung 1 gibt einen Eindruck der typischen Kornform und -größe.

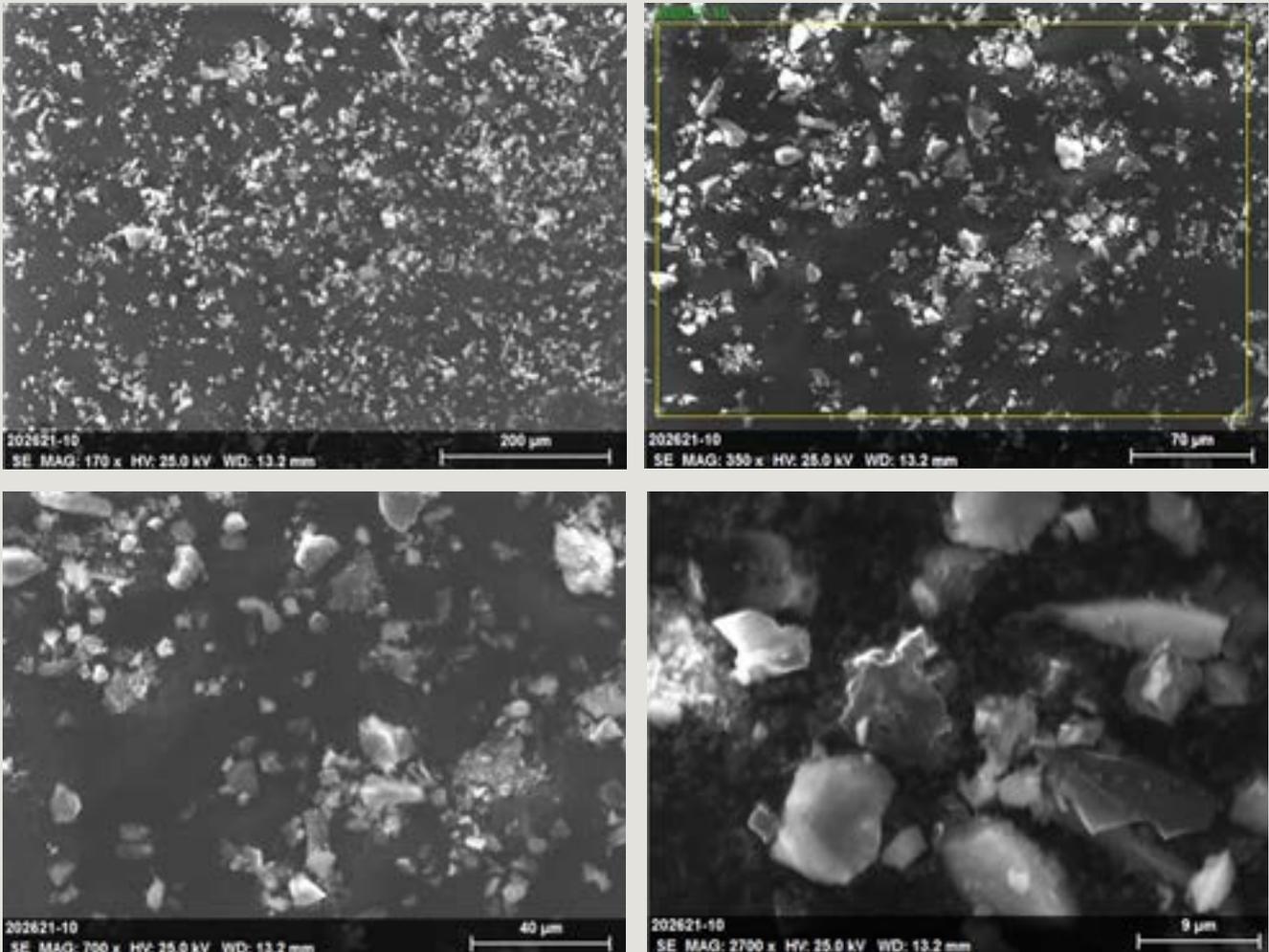


Abbildung 1. Typische Kornform und -größe der 3 Füllstoffe aus der Abfallverbrennung

3.1.6 Schlussfolgerungen zur Charakterisierung

Trotz der unterschiedlichen Herkunft der Müllverbrennungsschlacke als Ausgangsmaterial für den Mahlvorgang zeigen die damit hergestellten Füllstoffe aus der Abfallverbrennung nur geringe Unterschiede bei den untersuchten Eigenschaften, mit Ausnahme des TOC-Gehalts, dessen Unterschiede bewusst so gewählt worden sind.

Füllstoffe aus der Abfallverbrennung bestehen zu etwa 2/3 aus amorphem Material.

Die mineralischen Bestandteile sind vornehmlich Quarz, ein melilithisches Silikat und Calcit.

Bei den chemischen und mineralogischen Analysen haben sich keine Bestandteile (in solchen Mengen) gezeigt, dass sie ein Hindernis für den Einsatz dieser Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in Beton darstellen könnten.

3.2 Betonbrei- und Mörteluntersuchungen

3.2.1 Untersuchungen von Betonbrei

Die Ergebnisse der Betonbreiuntersuchungen, bei denen 25 Masse-% des Zements durch Füllstoffe ersetzt worden waren, sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5. Ergebnisse der Untersuchungen von Betonbrei

Eigenschaft	REF	KSM	MVA-1	MVA-2	MVA-3
Wasserbedarf (Masse-%)	27,2	26,0	31,6	29,0	30,4
Beginn des Abbindens (Minuten)	110	120	230	175	125
<i>Unterschied zu REF</i>		+10	+120	+65	+15
Ende des Abbindens (Minuten)	150	190	310	265	200
<i>Unterschied zu REF</i>		+40	+160	+115	+50
Formbeständigkeit (mm)	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5
Autoklav:					
Wassergehalt (Masse-%)	24,9	23,5	28,8	26,9	27,5
durchschn. Ausdehnung (%)	0,031	0,015	0,055	0,044	0,051

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Füllstoffe aus der Abfallverbrennung einen höheren Wasserbedarf und eine Verzögerung der Abbindezeiten des Betonbreis verursachen. Ein höherer Wassergehalt und ein teilweiser Ersatz des Zements führen in den meisten Fällen zu einem langsameren Abbinden (größere Abstand der Zementkörner). Die verzögernde Wirkung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung scheint jedoch auch mit deren TOC-Gehalt zusammenzuhängen. Die verzögernde Wirkung nimmt ab in der Reihenfolge MVA-1 (5,8%) → MVA-2 (2,0%) → MVA-3 (0,69%). Die Abbindezeit des Füllstoffs MVA-3 ist mit der eines Betonbreis mit Kalksteinmehl (KSM) vergleichbar.

Die 3 Füllstoffe aus der Abfallverbrennung erfüllen die Anforderung in BRL 1804 (maximale Verzögerung beim Beginn des Abbindens von 120 Minuten), wobei MVA-1 genau dieser Anforderung entspricht.

Die Formbeständigkeit (Le Chatelier) aller 5 Breie ist ausgezeichnet und es gibt fast keine Ausdehnung. Die Ausdehnung im Autoklaven ist bei den Breien mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung stärker ausgeprägt als bei den beiden Referenzbreien, erfüllt jedoch problemlos die Anforderungen in ASTM C1157-20 (<0,80%) und BRL 1804 (<0,40%).

3.2.2 Mörteluntersuchungen: Entwicklung der Festigkeit

Der bei den Untersuchungen von Mörtel eingesetzte Zement und das Kalksteinmehl (KSM) sind die gleichen wie bei der Herstellung der Betonplatten. Die Zusammensetzung des Mörtels entspricht NEN-EN 196-1, wobei 25 Masse-% des Zements durch die betreffenden Füllstoffe ersetzt worden sind. Die Ergebnisse der Mörteluntersuchung sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die plastischen Mörtelsorten mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung einen sehr hohen Luftgehalt und daher eine niedrige Dichte aufweisen. Die großen Unterschiede der Dichte der ausgehärteten Mörtel werden nahezu vollständig durch den unterschiedlichen Luftgehalt verursacht.

Der Unterschied der Dichte von Kalksteinmehl und Füllstoff aus der Abfallverbrennung (2,7 bzw. 2,5 kg/dm³) führt zu einem Unterschied von maximal 10 kg/m³ bei der Dichte des ausgehärteten Mörtels. Durch diesen Unterschied des Luftgehalts liegen die Druckfestigkeiten des Mörtels mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung bei relativ niedrigen Werten (60-80% des Referenzmörtels). Wenn wir jedoch eine Korrektur entsprechend dem Unterschied beim Luftgehalt vornehmen

(unterste Zeile in Tabelle 6), beträgt die Druckfestigkeit der 3 Mörtel mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung nach 28 Tagen ca. 90% der des Referenzmörtels, während der Mörtel mit Kalksteinmehl nur ca. 70% erreicht. Dies weist auf einen zusätzlichen Einfluss der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung beim Aufbau der Festigkeit des Mörtels hin.

Beim Einsatz der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung in erdfeuchten Betonsorten scheint keine Zunahme des Luftgehalts aufzutreten (siehe Abschnitt 3.3). Die Ursache des erhöhten Luftgehalts in den plastischen Mörtelsorten mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung ist mit einem ‚Schaumversuch‘ näher untersucht worden (siehe Anlage G). Durch Mischen (kräftiges Rühren mit einem Glasstab) des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung mit Wasser entsteht eine Lage Luftblasen auf dem Wasser. Es gibt daher erkennbar oberflächenaktive Bestandteile im Füllstoff aus der Abfallverbrennung. Diese Luftblasen können nicht durch Bildung von Wasserstoffgas aus metallischem Aluminium entstanden sein, da bei der Charakterisierung der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung kein metallisches Aluminium gemessen worden ist und gleichzeitig in diesem Schaumversuch kein alkalisches Milieu vorhanden ist (demin. Wasser: neutraler pH-Wert).

Tabelle 6. Ergebnisse der Untersuchungen von Mörtel

Eigenschaft	Referenz	KSM	MVA-1	MVA-2	MVA-3
Mörtelsorte:					
Dichte (kg/m ³)	2.219	2.229	2.058	2.041	2.149
Luftgehalt (Volumen-%)	4,0	2,9	10,0	11,5	6,8
Druckfestigkeit (MPa):					
7 Tage	49,8 (100%)	35,9 (72%)	30,5 (61%)	28,7 (58%)	38,4 (77%)
28 Tage	66,2 (100%)	47,7 (72%)	40,7 (61%)	38,8 (59%)	49,2 (74%)
90 Tage	71,4 (100%)	54,3 (76%)	48,4 (68%)	45,4 (64%)	57,7 (81%)
Biegezugfestigkeit (MPa):					
7 Tage	7,7 (100%)	6,2 (81%)	5,2 (68%)	4,9 (64%)	5,8 (75%)
28 Tage	8,6 (100%)	7,8 (91%)	6,1 (71%)	6,0 (70%)	6,6 (77%)
Dichte (kg/m ³):					
7 Tage	2.264	2.261	2.073	2.075	2.171
28 Tage	2.294	2.280	2.089	2.103	2.189
Druckfestigkeit 28 Tage (MPa) bei Korrektur auf 4% Luft (1% Luft = 5% Festigkeit)	66,2 (100%)	45,1 (68%)	58,1 (88%)	62,1 (94%)	57,2 (86%)

3.2.3 Mörteluntersuchungen: Ausdehnung in Wasser von 40 °C

Für diesen Ausdehnungsversuch sind pro Mischung 3 Prismen (40 x 40 x 160 mm) entsprechend NEN-EN 196-1 bei 20 °C hergestellt worden. Bei den Mischungen mit Füllstoffen sind 25 Masse-% des Zements durch den jeweiligen Füllstoff ersetzt worden. Nach dem Anrühren sind die Prismen 23,5 Stunden lang mit einer Glasplatte abgedeckt und anschließend zur Vorbereitung der Messpunkte aus der Form genommen worden. Hierbei ist darauf geachtet worden, dass die Prismen nicht austrocknen konnten. Die erste Längenmessung (Nullmessung) ist 24 Stunden nach dem Ansatz bei 20 °C ausgeführt und rechnerisch mit einem Ausdehnungskoeffizienten von 13.10⁻⁶ °C⁻¹ auf 40 °C korrigiert worden. Anschließend sind die Prismen für die übrigen Längenmessungen unter Wasser bei 40 °C gelagert worden. Neben der Länge ist auch die Masse jedes Prismas gemessen worden. Die durchschnittliche Ausdehnung und Massenzunahme der untersuchten Mischungen zeigt Abbildung 2.

Die Ausdehnung nimmt nach 6 Wochen nicht mehr oder kaum noch zu und liegt bei den Mischungen mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung auf dem Niveau der Referenzmischungen ohne Füllstoffe. Daraus kann geschlossen werden, dass keine Ausdehnungsmechanismen (mehr) aktiv sind. Die Ausdehnung und die durch Wasseraufnahme verursachte Massenzunahme der Mörtel mit

Füllstoffen aus der Abfallverbrennung ist der des Referenzmörtels ohne Füllstoff (REF) vergleichbar. Die gemessene Ausdehnung von 0,2-0,3‰ liegt deutlich unter den Anforderungen für Mörtelprismen im UAMBT-Test (<1,0‰). Da auch der Versuch nach Le Chatelier und der Test im Autoklaven keine relevante Ausdehnung gezeigt haben, kann behauptet werden, dass die untersuchten Füllstoffe aus der Abfallverbrennung keine destruktiven Ausdehnungsmechanismen verursachen können.

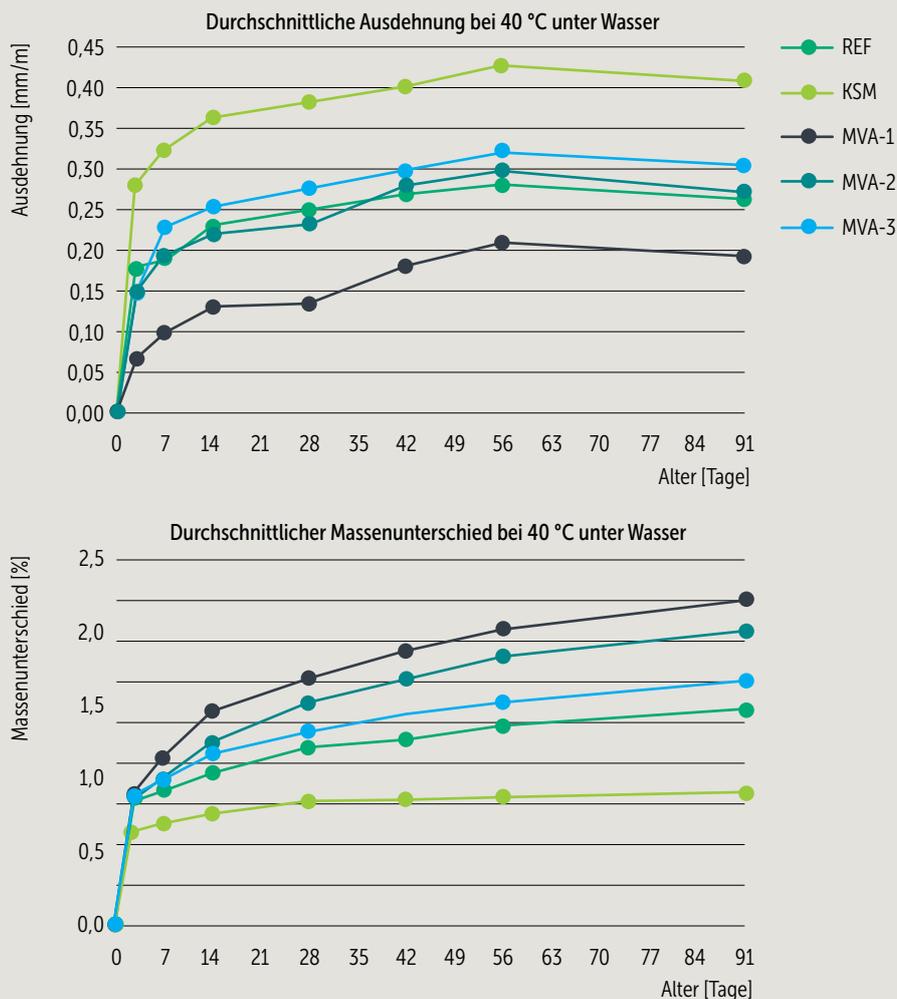


Abbildung 2. Ausdehnung (oben) und Massenzunahme (unten)

Es fällt auf, dass der Mörtel mit Kalksteinmehl (KSM) eine deutlich höhere Ausdehnung und eine geringere Massenzunahme zeigt. Das würde bedeuten, dass das betreffende Kalksteinmehl einen expansiven Bestandteil enthält. Die gemessene Ausdehnung liegt innerhalb der vorgenannten Anforderungen und hat nicht zu Rissbildung geführt.

3.2.4 Mörteluntersuchungen: Einfluss des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung auf die AKR

Der Einfluss der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) wurde mit dem stark beschleunigtem Mörtelstabtest (UAMBT) in Kombination mit nicht-reaktiven und reaktiven Zuschlagstoffen untersucht. Die Messungen sind an schlanken Probestücken (25x25x285 mm) vorgenommen worden, um eine stärkere Ausdehnung zu erreichen und den Einfluss so deutlicher sichtbar zu machen. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7. Einfluss des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung auf die AKR

Bindemittel	Zuschlagstoff	Ausdehnung (‰)
100% CEM I 52,5 R	nicht-reaktiv	2,2
100% CEM I 52,5 R	reaktiv	4,2
75% CEM I 52,5 R + 25% MVA-3	nicht-reaktiv	0,4
75% CEM I 52,5 R + 25% MVA-3	reaktiv	4,5
75% CEM I 52,5 R + 25% MVA-1	reaktiv	3,7
75% CEM I 52,5 R + 25% MVA-2	reaktiv	3,7

Der eingesetzte reaktive Zuschlagstoff, Borosilikatglas, scheint die Ausdehnung etwa um den Faktor 2 zu erhöhen. In Kombination mit einem nicht-reaktiven Zuschlagstoff ergibt der Füllstoff aus der Abfallverbrennung eine wesentlich geringere Ausdehnung. Hierfür gibt es keine eindeutige Erklärung.

In Kombination mit dem reaktiven Zuschlagstoff scheinen die Füllstoffe aus der Abfallverbrennung keinen relevanten Einfluss auf die AKR-Ausdehnung zu haben (ungefähr gleiche Ausdehnung wie bei der Referenzmischung). Das heißt, dass dem Füllstoff aus der Abfallverbrennung auf der Grundlage dieser Untersuchungen keine hemmende Wirkung auf die AKR zugesprochen werden kann.

3.3 Betonuntersuchung 1. Leben

3.3.1 Zusammensetzung der Betonplatten

Die Zusammensetzung der von einer Betonfabrik in Drachten hergestellten Betonplatten zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8. Zusammensetzung (kg/m³)¹⁾ der hergestellten Betonplatten

Komponente	REF	KSM	MVA-1	MVA-2	MVA-3
CEM I 52,5 N	289	219	218	219	219
Füllstoff	0	79	73	73	73
Wasser (effektiv)	80	89	106	106	105
Absorptionswasser (im Zuschlagstoff)	11	11	11	11	11
Sand 0-2	791	791	801	794	790
Granit 2-8	1.154	1.154	1.152	1.177	1.157
W/B-Wert' (effektiv)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36

1) ausgenommen ca. 5 Vol-% Luft

3.3.2 Mechanische Eigenschaften

Bei den 5 Serien von Betonplatten sind die volumetrische Masse, die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen und die Biegezugfestigkeit bei einem Alter von 28 Tagen bestimmt worden. Zusätzlich ist die Druckfestigkeit bei einem Alter von 90 Tagen an Proben bestimmt worden, die aus den Betonplatten herausgesägt worden waren.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Als zusätzliche Information ist in dieser Tabelle auch der effektive W/B-Wert (Wasserbindemittelwert) aufgeführt worden, wobei die Füllstoffe, ungeachtet der Tatsache, dass sie ein Füllstoff des Typs I sind, dennoch als Teil des Bindemittels' betrachtet worden sind.

Tabelle 9. Mechanische Eigenschaften der Betonplatten

Eigenschaft	REF	KSM	MVA-1	MVA-2	MVA-3
'W/B-Wert' (effektiv)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36
Volumetrische Masse (kg/m ³)	2.180	2.210	2.280	2.260	2.270
Ultraschallgeschwindigkeit (km/s)	3,98	4,07	4,17	4,10	4,06
Berechnetes dyn. E-Modul (GPa) ¹⁾	31,0	32,9	35,7	34,2	33,7
Biegezugfestigkeit (MPa)	5,6	5,6	8,5	7,3	7,6
Volumetrische Masse (kg/m ³)	2.260	nicht erm	2.280	2.290	2.290
Druckfestigkeit (MPa)	31,7	nicht erm	53,9	51,8	53,6
Verhältnis Biegezug/Druckfestigkeit (%)	18	nicht erm	16	14	14

1) Berechnet mit $E_{dyn} = 0,9\rho v^2$ (angenommene Poissonzahl = 0,2)

Die Festigkeit der Betonplatten mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung liegt trotz des höheren W/B-Werts (0,36 gegenüber 0,28 für REF und 0,30 für KSM) deutlich über dem Wert der beiden Referenzen. Dies kann teilweise einer besseren Verdichtung zugeschrieben werden, die sich bei der gemessenen volumetrischen Masse der Betonplatten zeigt und Folge einer besseren Verdichtbarkeit der Betongemische mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung ist. Die Druck- und Biegezugfestigkeit der (plastischen) Mörtel mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung liegt erheblich unter dem Niveau des Referenzmörtels (siehe Tabelle 6), was größtenteils dem höheren Luftgehalt der Mörtel mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung zuzuschreiben ist. Bei erdfeuchtem Beton, dem Anwendungsbereich der betrachteten CROW-CUR-Empfehlung, ist keine Rede von einem höheren Luftgehalt durch die Füllstoffe aus der Abfallverbrennung, eher das Gegenteil (siehe volumetrische Massen in Tabelle 9).

Weiterhin fällt auf, dass die Druckfestigkeit des Referenzbetons (REF) ca. 60% der Betonplatten mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung beträgt, während dieser Prozentwert bei der Biegezugfestigkeit ca. 70% beträgt. Dies kann durch die Streuung der einzelnen Messergebnisse nicht erklärt werden.

Die volumetrische Masse der Probestücke des Referenzbetons (REF) für die Druckfestigkeitsprüfung ist 80 kg/m³ höher als die der Probestücke für die Biegezugfestigkeit (2.260 statt 2.180 kg/m³). Dies ist die Folge der Wasserabsorption von ca. 4 Masse-% (siehe Abschnitt 3.3.4), die während der in NEN-EN 12504-1 vorgeschriebenen Konditionierung von 48 Stunden unter Wasser für die Probestücke zur Druckfestigkeitsprüfung auftritt. Die Probestücke mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung nehmen während der Konditionierung nur 0,7 Masse-% auf (siehe Abschnitt 3.3.4), was einer Zunahme der volumetrischen Masse von ca. 16 kg/m³ entspricht. Dies deckt sich mit der in Tabelle 9 angegebenen volumetrischen Masse der Betonplatten mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung.

3.3.3 Frost-Tausalz-Beständigkeit

Die Frost-Tausalz-Beständigkeit wird bei einem Alter der Probestücke von 28 Tagen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 aufgeführt. In dieser Tabelle sind der Wasserbindemittelwert des Betongemischs und der TOC-Gehalt der Füllstoffe aus der Abfallverbrennung als zusätzliche Information enthalten.

Tabelle 10. Frost-Tausalz-Beständigkeit

Eigenschaft	REF	KSM	MVA-1	MVA-2	MVA-3	Anforderung NEN-EN 1339
Abblättern nach 14 Zyklen (kg/m ²):						
Probestück 1	0,002	0,013	0,009	1,30	1,21	≤1,5
Probestück 2	0,017	0,010	0,042	0,79	1,40	≤1,5
Probestück 3	0,007	0,009	0,053	0,10	1,31	≤1,5
Mittelwert	0,01	0,01	0,03	0,73	1,3	≤1,0
'W/B-Wert' (effektiv)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36	-
TOC Füllstoff (Masse-%)	-	-	5,8	2,0	0,69	-

Der wesentlich höhere W/B-Wert der Betonmischungen mit den 3 Füllstoffen aus der Abfallverbrennung führt zu einem stärkeren Abblättern bei der Frost-Tausalz-Untersuchung. Das sehr geringe Abblättern bei REF und KSM ist Folge des niedrigen effektiven W/B-Werts.

Die 3 Betonmischungen mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung zeigen trotz des gleichen W/B-Werts eine sehr unterschiedliche Beständigkeit gegen Frost-Tausalz-Belastungen. Das Abblättern der Betonmischung mit Füllstoff MVA-1 liegt auf demselben Niveau wie bei REF und KSM, während die beiden anderen Mischungen mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung deutlich darüber liegen. Es ist bekannt, dass der TOC-Gehalt von Kalksteinmehl sich auf die Frost-Tausalz-Beständigkeit von damit produziertem Beton auswirkt, weshalb es eine Anforderung zum Maximalwert gibt. Bei Füllstoff aus der Abfallverbrennung scheint der Einfluss des TOC-Gehalts nicht gegeben zu sein, eher das Gegenteil: je höher der TOC-Gehalt desto geringer das Abblättern.

3.3.4 Wasseraufnahme und Austrocknung

Um die ermittelten Ergebnisse zur Beständigkeit gegenüber Frost-Tausalz-Belastung besser verstehen zu können, sind zusätzlich zum ursprünglichen Untersuchungsprogramm Austrocknungsversuche zur kapillaren Wasseraufnahme durchgeführt worden. Betonplatten, die bis dahin auf Paletten gelagert worden waren, sind einzeln auf Labortische gelegt und während eines Monats bei 20 °C und ca. 50% RH ausgetrocknet worden. Die Probestücke waren dann ca. 4 Monate alt. Die kapillare Wasseraufnahme ist während 72 Stunden an der Oberseite der Betonplatten (= Verschalungsfläche) gemessen worden. Nach der Absorptionsuntersuchung ist der Massenverlust durch Trocknen bei 20 °C und ca. 50% RH über 144 Stunden bestimmt worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 gezeigt.

De waterabsorptie en uitdroging van de betontegels met AEC-vulstoffen ligt op een beduidend lager niveau dan die van beide referentie betontegels (REF en KSM). Blijkbaar is de poriestructuur van de betontegels met AEC-vulstoffen (ondanks of juist dankzij de hogere wbf) minder grof en is het beton minder poreus.

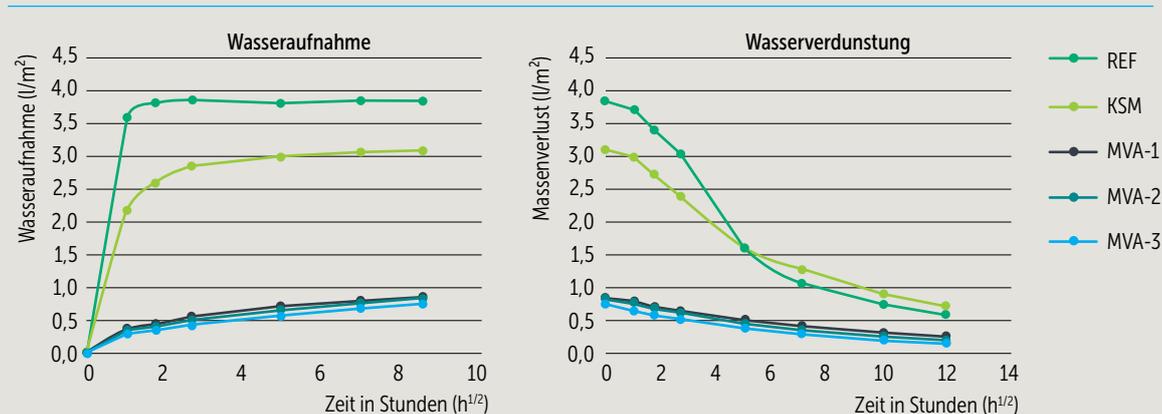


Abbildung 3. Wasseraufnahme (links) und Austrocknung (rechts)

3.3.5 Conclusies betononderzoek 1e leven

Mit den Füllstoffen aus der Abfallverbrennung als teilweiser Zementersatz können erdfeuchte Betonprodukte mit einer guten (Biege-)Zug- und Druckfestigkeit hergestellt werden, die sogar über der des Referenzbetons liegt. Die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung schwankt stark: von sehr hoch bis zu einem Niveau, das den Mindestanforderungen der entsprechenden Produktnorm (NEN-EN 1339) entspricht. Diese Schwankung kann durch die Wasseraufnahme bzw. den effektiven W/B-Wert des jeweiligen Betons nicht erklärt werden. Die höheren TOC-Gehalte des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung haben keine nachteiligen Auswirkungen auf die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons mit diesen Füllstoffen aus der Abfallverbrennung.

3.4 Recyclingfähigkeit

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der vorstehend beschriebenen Untersuchung hat die CROW-Arbeitsgruppe Füllstoff MVA-3 und damit hergestellte Betonplatten für die vorliegende Untersuchung der Recyclingfähigkeit gewählt.

3.4.1 Betontechnologisch: Betongranulat

Betonplatten ohne Füllstoff (REF), mit Kalksteinmehl (KSM) und mit dem ausgewählten Füllstoff aus der Abfallverbrennung (MVA-3) sind nach 2 Monaten beschleunigter Hydratation bei 40 °C mit einem Backenbrecher zerkleinert worden, wonach die Fraktion 4 - 22 mm trocken ausgesiebt worden ist.

Charakterisierung der Betongranulate 4-22 mm

Die Ergebnisse der Charakterisierung der auf diese Weise hergestellten 3 Betongranulate sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11. Eigenschaften der Betongranulate

Eigenschaft	REF	KSM	MVA-3
Korngrößenverteilung (Masse-%) (nass gesiebt)			
22,4 mm	100	100	100
20 mm	98	97	97
16 mm	81	74	77
14 mm	73	69	65
12,5 mm	67	63	57
11,2 mm	61	55	50
10 mm	53	47	44
8 mm	41	34	34
6,3 mm	29	23	23
5,6 mm	25	17	17
5 mm	21	14	13
4 mm	18	11	4
2 mm	8	3	3
1 mm	7	3	2
0,5 mm	6	2	2
0,25 mm	3	1	1
0,125 mm	1	0	1
0,063 mm	0,7	0,3	0,3
Korndichte (ρ_{rd} ; kg/dm ³)	2,23	2,23	2,23
Wasseraufnahme 24 h (Masse-%)	6,4	6,4	6,0

Bei der nassen Siebung zeigt sich, dass die Proben REF und KSM noch eine erhebliche Menge der Fraktion 2 - 4 mm enthalten. Diese Fraktionen < 4 mm sind bei den Proben für die Bestimmung der Korndichte und der Wasseraufnahme durch nasses Sieben entfernt worden.

Die Korndichten der 3 Betongranulate sind gleich. Die Wasseraufnahme der Probe des Betongranulats MVA-3 ist etwas geringer als die der Proben REF und KSM.

Untersuchung des Betons im 2. Leben

Mit den vorgenannten 3 Proben des Betongranulats als grober Zuschlagstoff sind Betonmischungen mit der Zusammensetzung nach Tabelle 12 hergestellt worden. An diesen Betonmischungen ist eine Reihe von Eigenschaften bestimmt worden, wie in der Tabelle angegeben.

Tabelle 12. Zusammenstellung der Eigenschaften des Betons im 2. Leben

Eigenschaft	Betongranulat REF	Betongranulat KSM	Betongranulat MVA-3
Betonzusammensetzung (kg/m³):			
CEM I 42,5 N	320	320	320
Wasser effektiv	160	160	160
Absorptionswasser	70	70	66
Betongranulat 4-22 mm	1.049	1.049	1.049
Flusssand 0-4 mm	666	666	666
Eigenschaften der Sorte			
Setzmaß (mm)	110	120	130
Ausbreitmaß (mm)	400	390	420
Temperatur (°C)	19,3	19,0	18,8
Luftgehalt (Volumen-%)	1,8	1,8	1,9
Volumetrische Masse (kg/m ³)	2.235	2.255	2.245
Eigenschaften des ausgehärteten Betons			
Würfeldruckfestigkeit (MPa) nach:			
7 Tagen	36,5	34,1	36,0
28 Tagen	42,4	42,8	44,0
Volumetrische Masse (kg/m ³) nach:			
7 Tage	2.290	2.290	2.280
28 Tage	2.290	2.280	2.290
Maximale Wassereindringtiefe (mm)	24	25	13
Chloridmigrationskoeffizient ($\cdot 10^{-12} m_2/s$)	22,0	21,6	15,7

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Druckfestigkeit des mit den 3 Betongranulaten hergestellten Betons vergleichbar ist. Sie liegt auch auf einem mit dem Referenzbeton vergleichbaren Niveau (mit demselben effektiven W/Z-Wert und Zement), das im CROW-Projekt „Neue Recyclingmethoden für Zuschlagsstoffe“ nach einer Aushärtung von 28 Tagen gemessen worden ist (46,5 MPa).

Die Dichtigkeit (Widerstand gegen das Eindringen von Wasser und Chlorid-Ionen) des Betons mit Betongranulat MVA-3 ist besser als bei dem Beton mit den Betongranulaten REF und KSM. Auch hier passen die Ergebnisse gut zu denen, aus dem vorgenannten CROW-Projekt.

Trotz des beschränkten Umfangs dieser Untersuchung ist die Schlussfolgerung zulässig, dass die betontechnologische Qualität von Betongranulat mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung der von herkömmlichem Betongranulat vergleichbar ist und somit keine Einschränkung für einen Einsatz im 2. Leben darstellt.

3.4.2 Betontechnologisch: Füllstoff

Es sind Zementbreie mit 100% CEM I 52,5N (REF), 75% CEM I 52,5N + 25% Kalksteinmehl (KSM) und 75% CEM I 52,5N + 25% Füllstoff aus der Abfallverbrennung MVA-3 angerührt worden. Der W/B-Wert der 3 hergestellten Breie betrug 0,35. Diese 3 Zementbreie sind beschleunigt hydratiert

worden während 2 Monaten unter Wasser von 40 °C. Die ausgehärteten Probestücke sind im Labor in einem Backenbrecher zerkleinert, bei 110 °C getrocknet und anschließend 20 Minuten lang in einer Kugelmühle gemahlen worden. Die Korngrößenverteilung dieser 3 hergestellten Füllstoffe im ‚2. Leben‘ zeigt Tabelle 13.

Der Einfluss dieser Füllstoffe auf die Abbindezeit, die Formbeständigkeit und die Entwicklung der Festigkeit bei 25 Masse-% Zementersatz (CEM I 52,5N) ist ebenfalls in dieser Tabelle angegeben.

Tabelle 13. Eigenschaften der Füllstoffe im 2. Leben

Eigenschaft	Zement	REF	KSM	MVA-3	Anforderung BRL 1804
Korngrößenverteilung Siebrest (Masse-%):					
0,5 mm	-	0	1	0	-
0,25 mm	-	1	2	1	-
0,125 mm	-	4	6	3	0-15
0,063 mm	-	23	27	22	0-30
Fraktion <63 µm	-	77	73	78	-
	100% Zement	bei 25 Masse-% Zementersatz			
Wasserbedarf (Masse-%)	24,2	28,6	29,0	29,0	-
Beginn des Abbindens (Minuten)	140	190	195	220	-
Unterschied gegenüber Zement	-	+50	+55	+80	<120
Ende des Abbindens (Minuten)	170	240	235	260	-
Unterschied gegenüber Zement	-	+70	+65	+90	<120
Formbeständigkeit (mm)	0,0	0,5	0,5	0,0	<10
Druckfestigkeit (MPa) nach:					
7 Tagen	39,8	35,0	32,3	31,9	-
28 Tagen	47,7 (100%)	41,7 (87%)	38,5 (81%)	40,6 (85%)	>65%
Biegezugfestigkeit (MPa) nach:					
7 Tagen	6,8	6,3	5,8	5,5	-
28 Tagen	7,5 (100%)	6,8 (91%)	6,7 (89%)	6,5 (87%)	-
Volumetrische Masse (kg/m ³) nach:					
7 Tagen	2.260	2.200	2.200	2.210	-
28 Tagen	2.238	2.201	2.181	2.200	-

Tabelle 13 zeigt, dass alle 3 untersuchte Füllstoffe im ‚2. Leben‘ eine Verzögerung der Abbindezeit bewirken. Das hängt mit dem Zementersatz von 25 Masse-% und dem dadurch höheren W/Z-Wert zusammen. Der Füllstoff MVA-3 ergibt im 2. Leben eine etwas stärkere Verzögerung gegenüber den beiden Referenzfüllstoffen, liegt jedoch weiterhin klar innerhalb der hierfür geltenden Anforderungen. Die Formbeständigkeit (Le Chatelier Test) ist bei allen 3 untersuchten Füllstoffen im 2. Leben ausgezeichnet. Das gilt auch für den Einfluss auf die Entwicklung der Druckfestigkeit. Auch die erfüllt deutlich die entsprechende Anforderung.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse darf geschlossen werden, dass für die Wiederverwendung der Pulverfraktion aus dem Recycling von Beton mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung im 1. Leben keine Einschränkungen bestehen.

3.4.3 Umwelthygiene

Einige Betonplatten ohne Füllstoff (REF) und mit Füllstoff MVA-3, die für die Untersuchung im 1. Leben hergestellt worden waren, sind nach 28 Tagen Aushärten bei 20 °C (eingepackt in Kunststoffolie = eigener Feuchtigkeitsgehalt, kein Kontakt mit Wasser) auf < 4 mm gebrochen worden. An diesen beiden zerkleinerten Proben ist die Auslaugung im Säulentest gemessen worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 aufgeführt, die gleichzeitig die Anforderungen aus der Verordnung zur Bodenqualität (BBK) für nicht geformte Materialien enthält.

Tabelle 14. Auslaugung (Säulentest) bei zerkleinerten Betonplatten REF und MVA-3

Komponente	Kumulative Auslaugung L/S 10 (mg/kg)		
	Betongranulat REF	Betongranulat MVA-3	Max. Wert BBK
pH	12,5-12,8	12,5-12,8	-
Antimon	<0,0040	0,0060	0,32
Arsen	<0,050	<0,050	0,9
Barium	6,4	11	22
Cadmium	<0,00100	<0,00100	0,04
Chrom	0,16	0,27	0,63
Kobalt	<0,030	<0,030	0,54
Kupfer	0,071	0,13	0,9
Quecksilber	<0,00040	<0,00040	0,02
Blei	<0,100	<0,100	2,3
Molybdän	0,037	0,071	1
Nickel	<0,050	<0,050	0,44
Selen	<0,0070	<0,0070	0,15
Zinn	<0,020	<0,020	0,4
Vanadium	<0,20	<0,20	1,8
Zink	<0,20	<0,20	4,5
Fluorid	2,6	2,3	55
Chlorid	61	110	616
Sulfat	60	52	2.430
Bromid	<0,80	<0,80	20

Diese Tabelle zeigt, dass bei Betongranulat mit MVA-3 bei den Komponenten Barium, Chrom, Kupfer, Molybdän und Chlorid eine höhere Auslaugung auftritt, als bei Betongranulat ohne Füllstoff (REF). Diese Auslaugung liegt in allen Fällen deutlich unter den Anforderungen der BBK.

So darf geschlossen werden, dass die umwelthygienische Qualität des Betongranulats mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung der von gewöhnlichem Betongranulat vergleichbar ist. Die Komponenten, bei denen sich eine etwas höhere Auslaugung zeigt, liegen immer noch deutlich unter den Grenzwerten der BBK.

4

Schlussfolgerungen zur Eignung des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen kann gefolgert werden, dass der von Blue Phoenix Group hergestellte Füllstoff aus der Abfallverbrennung für den Einsatz in unbewehrten, nicht tragenden Betonprodukten aus trockenen oder erdfeuchten Betonsorten geeignet ist. Gleichzeitig ist nachgewiesen worden, dass die durch das Recycling dieses Betons entstandenen Materialströme (Betongranulat und Pulverfraktion) durch Einsatz von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung in derartigen Betonprodukten für ein zweites Leben erneut als Rohstoff in Beton eingesetzt werden können. Diese Anwendung von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung entspricht somit bei den untersuchten Aspekten vollständig den Anforderungen an die Recyclingfähigkeit.

5

CROW-CUR-Empfehlung

BRL 1804 enthält generische Anforderungen für alle Füllstoffe und somit auch für Füllstoffe aus der Abfallverbrennung. Diese Anforderungen betreffen:

- Korngrößenverteilung
- Methylenblauadsorption
- Alkaligehalt, ausgedrückt als Na_2O -Äquivalent
- Gehalt an Chloriden
- Gehalt an Sulfaten - SO_3
- Einfluss auf die Abbindezeit
- Bestimmung der Formbeständigkeit
- Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung

Ausgehend von der durchgeführten Untersuchung müssen die folgenden Aspekte von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung noch spezifisch geregelt werden:

- Alkaligehalt:
Dieser wird meistens mit XRF bestimmt, die einen Gesamtgehalt einschließlich der Alkalien in Glaspartikeln liefert. Die Alkalien in Glaspartikeln werden erst dann freigesetzt, wenn sich das amorphe Glas in der alkalischen Umgebung des Betons auflöst. Das wird niemals vollständig geschehen.

Wenn das XRF-Messergebnis des Alkaligehalts den Grenzwert von 5,0 Masse-% überschreitet, führt dies nicht direkt zum Ausschluss, sondern der Alkaligehalt des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung darf mittels basischer Erschließung nach NEN-EN 196-2 erneut bestimmt und anschließend mit dem Grenzwert verglichen werden.

- TOC-Gehalt:

Der TOC-Gehalt des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung scheint keinen nachteiligen Einfluss auf die Frost-Tausalz-Beständigkeit des damit hergestellten Betons zu haben. Ein höherer TOC-Gehalt kann jedoch zu einer stärkeren Verzögerung der Abbindezeit von Zement führen. Ausgehend von Ergebnissen der durchgeführten Untersuchung muss daher der TOC-Gehalt von Füllstoff aus der Abfallverbrennung auf maximal 6 Masse-% begrenzt werden.

Da der Einfluss auf die Abbindezeit eine generische Anforderung betrifft, ist für diesen Aspekt eine zusätzliche Sicherung gegeben.

- Metallisches Al+Zn:

Metallisches Aluminium und Zink können in einer alkalischen Umgebung zum Entstehen von Wasserstoffgas führen. Diese Metalle können in Müllverbrennungsschlacke, die Ausgangsstoff für die Produktion von Füllstoff aus der Abfallverbrennung ist, in geringen Konzentrationen vorhanden sein. Durch den Produktionsprozess (nasses Mahlen und die alkalische Umgebung) und die hohe Feinheit des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung sollte der Gehalt an metallischen Al+Zn sehr gering sein.

Daher ist für Füllstoff aus der Abfallverbrennung ein sehr strenger Grenzwert von maximal 0,2 Masse-% formuliert worden.

Dieser Wert liegt um den Faktor 5 unter dem für MVA-Granulat, das eine viermal höhere Dosierung erfährt als Füllstoff aus der Abfallverbrennung in Beton. Somit ist die Vorgabe um den Faktor 20 strenger als bei MVA-Granulat, das bei Betonpflastersteinen und Platten bereits seit mehreren Jahren problemlos in großem Rahmen eingesetzt wird.

Obwohl zum Chloridgehalt von Füllstoffen in BRL 1804 keine Anforderungen enthalten sind, da diese entsprechend NEN 8005 an die Betonsorte gestellt werden, ist entschieden worden, als zusätzliche Sicherheit für Füllstoffe aus der Abfallverbrennung doch eine Anforderung in die CROW-CUR-Empfehlung aufzunehmen. Mit der Anforderung, dass dieser Wert $\leq 1,0$ Masse-% bei einer Dosierung des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung von maximal 80 kg/m^3 Beton (entspricht ca. 25 Masse-% des Zements) sein muss, wird der Chloridgehalt des damit hergestellten Betongranulats $\leq 0,05$ Masse-% sein. Dieser Wert stimmt mit der „Richtlinie für Spezifikationen von Recyclinggranulaten für Beton“ von Betonhuis/BRBS überein.

Hinweis: Bei einer höheren Dosierung des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung im Beton wird der Grenzwert zum Chloridgehalt entsprechend niedriger. Bei der maximal zulässigen Dosierung von 140 kg/m^3 beträgt der Grenzwert für den Chloridgehalt: $< 0,6$ Masse-%.

Es sollte erwogen werden, in der CROW-CUR-Empfehlung einen Hinweis vorzusehen, dass der Einsatz von Füllstoff aus der Abfallverbrennung in unbewehrten Betonprodukten aus erdfeuchten Betonsorten zu einer erhöhten Anfälligkeit für Abblättern durch Frost-Tausalz-Belastung führen kann. Da derartige Betonprodukte in nahezu allen Fällen eine Deckschicht ohne Füllstoffe aus der Abfallverbrennung haben, ist dies jedoch nicht relevant.

In diesem Nachwort wird eine Reihe von Aspekten, die nicht im direkten Zusammenhang mit der durchgeführten Untersuchung und dem Ziel dieses Berichts stehen, aber dennoch für das Verständnis der Anwendung von Füllstoffen aus der Abfallverbrennung in Beton von Belang sind, näher erläutert.

Der Unterschied zwischen MVA-Granulat und Füllstoff aus der Abfallverbrennung wird manchmal nicht richtig verstanden. Beide Materialien haben im Beton unterschiedliche Funktionen (als Zuschlagstoff bzw. Füllstoff) aber einen unterschiedlichen anderen Einfluss auf die Eigenschaften des Betons.

Wegen des Verbrauchs an Ca(OH)_2 wird in der CROW-CUR-Empfehlung 128: 2021 der Einsatz von Füllstoff aus der Abfallverbrennung auf 140 kg/m^3 Beton begrenzt. Übermäßiger Verbrauch von Ca(OH)_2 führt mit der Zeit dazu, dass das CSH-Gel durch Karbonisierung angegriffen wird, wobei ein poröses Silikagel entsteht. Die Beständigkeit des Betons gegenüber Frost-Tau-Zyklen nimmt dadurch stark ab.

Wenn die im Kapitel 5 beschriebene Anforderung zum Chloridgehalt des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung eingehalten wird, besteht keine Gefahr einer durch das Chlorid verursachten Korrosion der Bewehrung durch Einsatz von Betongranulat, das Füllstoff aus der Abfallverbrennung enthält, in einem Beton im 2. Leben.

Dies gilt auch für die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betongranulats mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung.

Das gemessene Abblättern der untersuchten Betonplatten mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung ist gleich oder sogar weniger stark als bei gewöhnlichem Beton, aus dem herkömmliche Betongranulate hergestellt wurden.

Die durchgeführte Untersuchung lässt, zusammen mit den vorstehenden Überlegungen, erkennen, dass Granulat aus Beton mit Füllstoff aus der Abfallverbrennung eine vergleichbare Qualität wie herkömmliches Betongranulat aufweist und für den Einsatz als Zuschlagstoff in Beton (2. Leben) geeignet ist. Für diese Betongranulate können dieselben Regeln gelten.

Da Füllstoff aus der Abfallverbrennung wegen seiner puzzolanischen Eigenschaften wesentlich zur Entwicklung der Festigkeit beiträgt, sollte dieser Füllstoff eine erhebliche Menge an Ca(OH)_2 im Beton verbrauchen. Daher muss Füllstoff aus der Abfallverbrennung in die Berechnung des Mindestgehalts an Portlandzementklinker im Bindemittel aufgenommen werden. Es wird empfohlen, die Fähigkeit des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung, Kalk zu binden, festzulegen.

Anlage A Herkunft und Repräsentativität des Eingangsmaterials für die Untersuchungen



CROW-Arbeitsgruppe:

„Füllstoff aus der Abfallverbrennung als Typ 1 für den Einsatz in unbewehrtem Beton“

Herkunft und Repräsentativität des Eingangsmaterials für die Untersuchungen

Datum: 03-03-2021

Einleitung

Für das Untersuchungsprogramm zur CROW-CUR-Empfehlung „Füllstoff aus der Abfallverbrennung in unbewehrtem erdfeuchtem Beton“ sind von der Blue Phoenix Group BPG an SGS Intron drei Proben an Füllstoff aus der Abfallverbrennung geliefert worden. In diesem Memo wird näher auf die Herkunft der verwendeten Rohstoffe (= Müllverbrennungsschlacke), das eingesetzte Mahlverfahren sowie die Repräsentativität der Rohstoffe und des hergestellten Füllstoffs eingegangen.

Herkunft des Ausgangsmaterials für die Herstellung der Proben des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung

Auf Anforderung der Arbeitsgruppe ist entschieden worden, Proben zu liefern, die für niederländische Müllverbrennungsschlacken repräsentativ sind. Ergänzend wünschte die Arbeitsgruppe Müllverbrennungsschlacken mit unterschiedlichem Sulfat- und TOC-Gehalt, um die Auswirkungen von Sulfat und TOC beim Einsatz in Beton beurteilen zu können. BPG hat Rostschlacke aus drei der zwölf niederländischen MVA mit angeschlossenen Kraftwerk verwendet: AVR Duiven, AVR Rozenburg und EEW Delfzijl. AVR Duiven zeigt hohe Werte bei Sulfat und TOC.

Die 12 niederländischen MVA mit angeschlossenen Kraftwerk erzeugen insgesamt ca. 1.900.000 t Müllverbrennungsschlacke. Die drei Anlagen, bei denen die Proben gewonnen wurden, produzieren ungefähr 600.000 t Müllverbrennungsschlacke. Dies entspricht ungefähr 30% des Gesamtvolumens, und die Anlagen sind geografisch über die Niederlande verteilt.

Müllverbrennungsanlagen und Müllverbrennungsschlacke:

- Prozessbeschreibung (Sachverständigengremium Rohstoffe und Umwelt 21.02.2018)
 - Müllverbrennungsschlacke entsteht beim Verbrennen von Haushaltsabfall und Gewerbeabfall (einschließlich Biomasse) in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) mit angeschlossenen Kraftwerk oder einem Biomasse-Kraftwerk.
Die Verbrennung erfolgt in einem Rost- oder Wirbelschichtofen, wobei die Temperatur im Brennraum mindestens 850 °C beträgt. Nach dem Verbrennungsprozess wird die verbleibende Rostschlacke in einem Wasserbecken gelöscht und bis zur weiteren Verarbeitung in ein Zwischenlager gebracht. Während der Verarbeitung durchläuft die rohe Rostschlacke mehrere Bearbeitungsschritte, z.B. Sieben und Entfernen von Eisen- und Nicht-Eisen-Metallen. MVA-Kesselasche kann Bestandteil der Müllverbrennungsschlacke sein. In den meisten Anlagen werden beide in der Anlage zusammengeführt. Auch Rostschlacke aus einem Biomasse-Kraftwerk kann Bestandteil der Müllverbrennungsschlacke sein. Diese Rostschlacke wird während der Aufbereitung dosiert hinzugefügt.
- Die Müllverbrennungsschlacken werden anschließend auf ein D_{max} von 40 mm gebrochen. Diese Fraktion ist das Ausgangsmaterial für den Produktionsprozess des Füllstoffs aus der Abfallverbrennung.
- Die Müllverbrennungsanlagen entsprechen den IPPC-Richtlinien (siehe Anlage 1)

- Müllverbrennungsanlagen haben strenge Annahmeregeln und kontrollieren regelmäßig den angelieferten Abfall. Vertraglich (Kunde - Müllverbrennungsanlage) ist festgelegt, was angeliefert werden darf. Es werden regelmäßige Stichproben durchgeführt. Diese Ladungen werden zur Sichtprüfung auf dem Boden abgekippt.
- RIVM nimmt jährlich Proben, um die durchschnittliche Zusammensetzung des niederländischen Abfalls zu bestimmen.
- Die Müllverbrennungsschlacken entsprechen den Anforderungen in BRL2307-1. Dies kann über die Zulassung von Parteien oder eine Zertifizierung des Prozesses erfolgen.
- MVA-Flugaschen werden getrennt gehalten und sind daher kein Bestandteil von Müllverbrennungsschlacke.

Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken

Rostschlacke aus Biomasse-Kraftwerken (BMKW): von den 12 MVA mit angeschlossenem Kraftwerk produzieren nur AVR Rozenburg, HVC Alkmaar und Twence BMKW-Verbrennungsschlacke. BMKW-Verbrennungsschlacken von AVR Rozenburg und HVC Alkmaar werden zu den Müllverbrennungsschlacken hinzugefügt. HVC fügt nur die grobe Fraktion der Müllverbrennungsschlacken hinzu. Insgesamt geht es um ca. 7.000 t BMKW-Verbrennungsschlacken, die von AVR Rozenburg und HVC Alkmaar zu ungefähr 600.000 t Müllverbrennungsschlacke hinzugefügt werden. Den übrigen 1.300.000 t MAV-Granulate werden keine BMKW-Verbrennungsschlacken beigegeben. Weitere Informationen zu BMKW-Schlacken enthält Anlage 2.

Entnahme der angelieferten Proben.

Die Proben sind vom Laboranten von Blue Phoenix und bei AVR zusammen mit dem entsprechenden Mitarbeiter von AVR genommen worden.

Die Vorgehensweise bei den verschiedenen Standorten ist gleich:

- Rohe Rostschlacke wurde entnommen bei:
 - AVR Duiven: aus dem Vorrat an roher Rostschlacke direkt hinter dem Entschlacker.
 - AVR Rozenburg: aus dem allgemeinen Lager für rohe Rostschlacke.
 - EEW: aus dem allgemeinen Lager für rohe Rostschlacke in Wijster.
- Mit einem Kran und einem LKW ist eine Menge von ungefähr 30 - 50 t beiseite geschafft worden
- Diese 30 - 50 t rohe Müllverbrennungsschlacke sind mit dem Kran gleichmäßig verteilt und ausgebreitet worden.
- Aus dieser ausgebreiteten Schicht sind mit einem Kran Proben entnommen worden.
- Gleichmäßig verteilt über die rohe Müllverbrennungsschlacke.
- Der Kran hat die Proben in ungefähr 5 - 10 Bigbags von ungefähr 1m³ gegeben.

Alle Bigbags sind zur Aufbereitungsanlage von Blue Phoenix in Rotterdam/Pernis transportiert und dort in der Anlage für Füllstoff aus der Abfallverbrennung aufbereitet worden.

Repräsentativität der genommenen Proben

Der aus diesen Proben hergestellte Füllstoff aus der Abfallverbrennung ist chemisch analysiert worden. Die Konzentration der Hauptbestandteile kann herangezogen werden, um die Repräsentativität der bei MVA genommenen Proben zu beurteilen, indem sie mit früheren Analysen und Daten aus der Literatur verglichen werden.

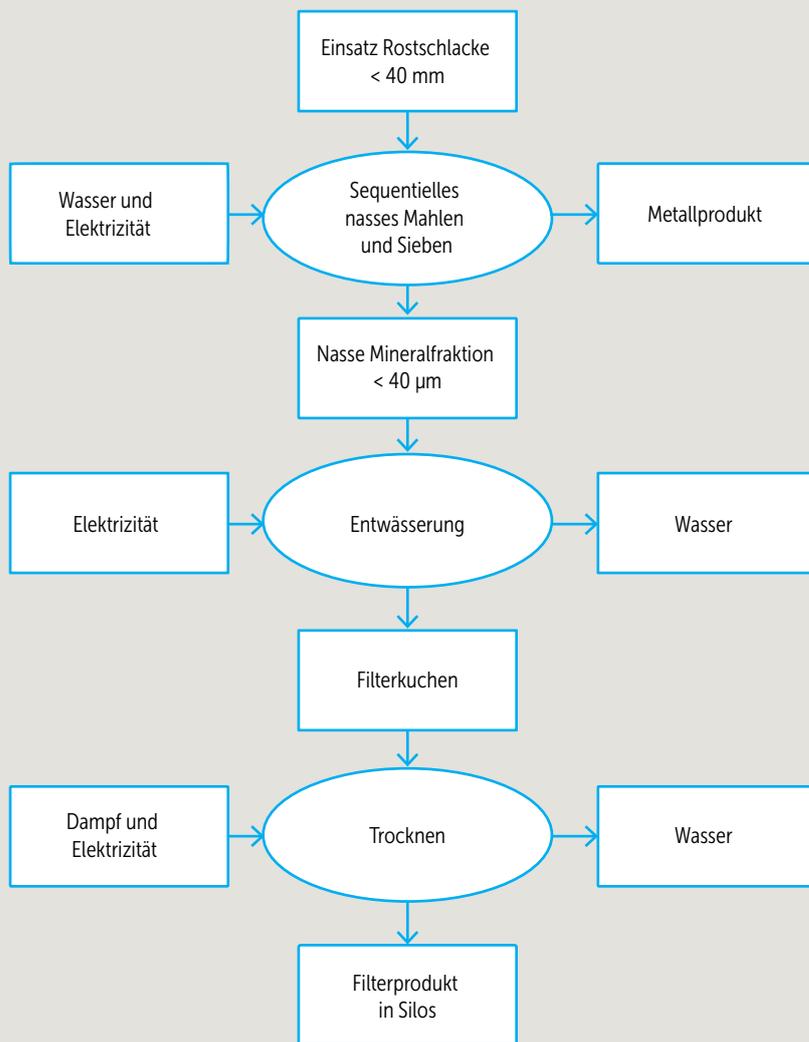
Der CROW-Arbeitsgruppe sind bereits früher die nachstehenden repräsentativen Analysen bzw. Berichte übergeben worden:

- 1 Elementaranalyse zweier niederländischer und einer englischen Rostschlacke (SGS 15.05.2020)
- 2 Charakterisierung einer MVA-Quelle aus drei verschiedenen Zeiträumen in den Niederlanden (SGS 13.11.2018)
- 3 Charakterisierung von drei geografisch über die Niederlande verteilten MVA-Quellen (SGS 03.12.2020)

In der nachstehenden Tabelle sind alle Messwerte zusammengefasst. Sie liefern ein repräsentatives Bild der Qualität der Rostschlacken. Sie sind geografisch über die Niederlande verteilt, es handelt sich um einen repräsentativen Teil des Gesamtvolumens und sie zeigen den Verlauf derselben Quelle während eines Zeitraums. Alle XRF-Messungen sind auf die gleiche Weise durchgeführt worden.

Tabelle 1. Chemische Analyse der bei CROW angelieferten Proben von MVA-Rostschlacke (Gewichts-%)

SGS-Bericht	MVA-Füllstoff EEW 13.11.2018			MVA-Füllstoff DVN 03.12.2020	MVA-Füllstoff RZB 03.12.2020	MVA-Füllstoff EEW 03.12.2020	MVA-Füllstoff UK 15.05.2020
	Sept. 2018	Okt. 2018	Nov. 2018				
Silizium als SiO ₂	49,61	50,25	46,22	50,07	47,61	50,46	43,92
Kalzium als CaO	18,08	16,38	18,44	18,18	17,03	16,41	20,74
Eisen als Fe ₂ O ₃	11,67	11,18	12,33	7,90	11,04	10,59	11,30
Aluminium als Al ₂ O ₃	7,54	8,26	8,53	7,43	8,23	7,98	8,93
Natrium als Na ₂ O	3,73	4,33	3,84	4,13	4,13	3,94	3,91
Schwefel als SO ₃	2,27	1,84	2,62	2,69	1,60	1,64	2,02
Magnesium als MgO	2,00	1,96	2,05	2,39	2,42	2,02	2,02
Phosphor als P ₂ O ₅	1,08	1,01	1,18	1,10	1,23	0,94	1,06
Titan als TiO ₂	1,24	1,07	1,29	1,15	1,32	0,98	1,26
Kalium als K ₂ O	0,92	0,86	0,99	1,01	0,97	1,02	0,81
Zink als ZnO	0,55	0,58	0,69	0,54	0,60	0,50	0,69
Chlorid als CaO	0,77	0,59	0,72	-	-	-	-
Kupfer als CuO	0,28	0,31	0,35	0,31	0,38	0,27	0,31
Magnesium als MgO	0,16	0,23	0,19	-	-	-	0,29
Mangan als Mn ₃ O ₄				0,16	0,21	0,18	-
Blei als PbO	0,12	0,13	0,14	0,11	0,11	0,11	0,12
Chrom als Cr ₂ O ₃	0,08	0,11	0,09	0,10	0,11	0,09	0,10
Zirkon als ZrO ₂	0,04	0,05	0,03	0,14	0,06	0,07	0,05
Barium als BaO	0,11	0,10	0,14	0,21	0,27	0,20	0,18
Strontium als SrO	0,07	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
Jod als I				-	-	-	-
Nickel als NiO				0,02	0,03	0,03	0,03
Vanadium als V ₂ O ₅				0,01	0,01	0,01	-



Aufbereitungsprozess zum Füllstoff aus der Abfallverbrennung

Die erhaltenen Rohstoffe wurden in der Pilotanlage von BPG in Rotterdam gemahlen. Dabei handelt es sich um einen nassen Mahlprozess. Während des Prozesses ist die Regelung so erfolgt, dass eine ausreichende Feinheit beim Mahlen erreicht wurde und störende Stoffe, z. B. metallisches Aluminium, entfernt wurden. Chlorid, Sulfat und organische Stoffe (TOC) sind bei der Aufbereitung nicht entfernt worden. Die Wahrung des hohen Gehalts war Ziel dieser Versuchsproduktionen für die Untersuchung.

Schlussfolgerung

Die Müllverbrennungsschlacken bestehen überwiegend aus Silikaten bzw. Kalziumoxiden; zusätzlich mit Eisen- und Aluminiumoxiden.

Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken wurde in geringen Mengen hinzugefügt. AVR Rozenburg hat den höchsten Anteil an Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken geliefert; AVR ist Teil des gesamten Forschungs- und Entwicklungsprogramms. Die Analysen der BMKW-Schlacken sind in Anlage 2 enthalten.

Anlage 1: IPPC-Installation

<https://www.infomil.nl/onderwerpen/duurzaamheid-energie/ippc-installaties/>

Kenniscentrum InfoMil

Home Actueel Rijkswaterstaat **Onderwerpen** Helpdesk Zoeken

Home > Onderwerpen > Duurzaamheid-energie > IPPC-installaties

IPPC-installaties

IPPC-installaties zijn de grote industriële bedrijven die vallen onder de Richtlijn industriële emissies (2010/75/EU). Deze richtlijn geldt voor alle lidstaten van de Europese Unie.

De Richtlijn industriële emissies eist dat bedrijven de installatie pas in bedrijf nemen als ze een omgevingsvergunning hebben. Deze integrale vergunning moet voldoen aan de beste beschikbare technieken (BBT). Voor IPPC-installaties staan de beste beschikbare technieken in BBT-conclusies. Deze BBT-conclusies worden op Europees niveau vastgesteld.

Een vergunningverlener moet bij IPPC-installaties ook rekening houden met aangewezen BBT-documenten. Dit zijn documenten die staan in de bijlage van de Regeling omgevingsrecht (Mor). Ook kunnen algemene regels uit Nederlandse wetgeving van toepassing zijn.



Regelgeving

- BBE's en BBT-conclusies overzicht
- IPPC-categorie per branche
- Aangewezen BBT-documenten
- IPPC en Activiteitenbesluit
- Rapportage en database
- Toestandkoning BBT-conclusies

Vergunningverlening

- Waarom en wanneer BBT bepalen?
- Stappenplan
- Is het een IPPC-installatie?
- Bepaal de relevante BBT-conclusies
- Verzamel informatie over de installatie
- Voldoet installatie aan BBT?
- Bepaal eisen uit Activiteitenbesluit

Informatie

- Titulus
- Xraag en antwoord
- Checklist IPPC van VITO
- IPPC-database (inloggen en helpdesk e-mail)

Hoe werkt het vanaf 2022?

Informatiepunt Leefomgeving

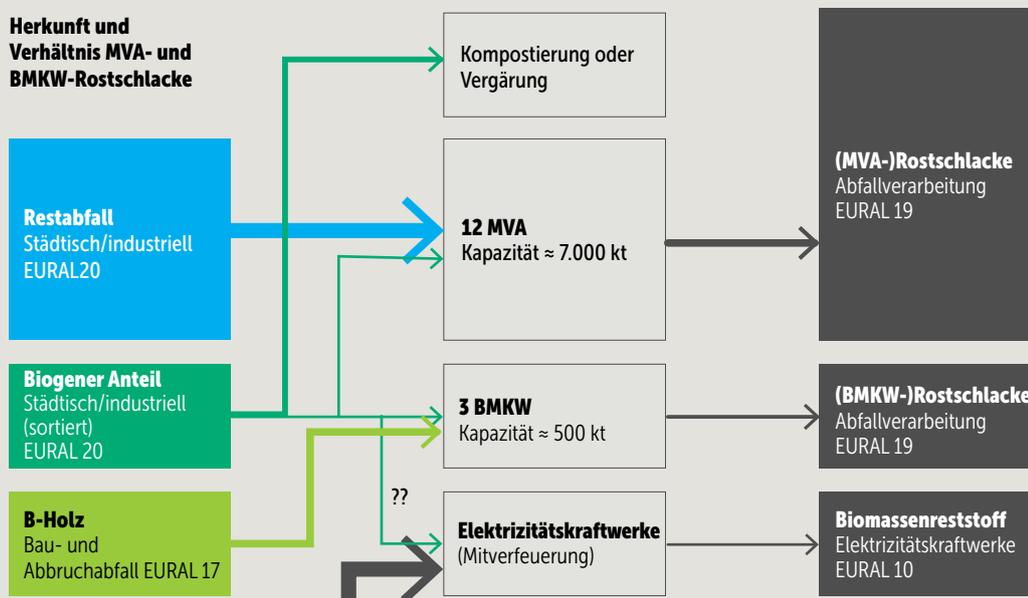
- IPPC-installaties in Omgevingswet

Anlage 2: Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken

Innerhalb der Arbeitsgruppe „Reststoffe“ der Vereniging Afvalbedrijven VA ist die Anfrage der CROW-Arbeitsgruppe nach Informationen über Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken besprochen worden. Anschließend ist eine Abstimmung mit den drei Erzeugern von BMKW-Schlacken in den Niederlanden erfolgt. Die nachstehenden Informationen sind nach Abstimmung zwischen den drei VA-Mitgliedern, die sowohl Müllverbrennungsschlacke als auch Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken erzeugen, zustande gekommen.

Die VA meldet für 2019 die folgenden Mengen (Zahlen abgerundet):

- Müllverbrennungsschlacke, Niederlande: 1.900.000 t
- Müllverbrennungsschlacken pro Standort, wo auch Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken erzeugt wird
 - AVR Rozenburg 350.000 t
 - HVC 240.000 t
 - Twence 150.000 t
- Schlacke aus Biomasse-Kraftwerken 15.700 t
 - AVR Rozenburg 5.500 t
 - HVC 1.250 t
 - Twence 9.000 t
- Die Schlacke aus dem Biomasse-Kraftwerk Twence wurde nicht mit Müllverbrennungsschlacken gemischt.
- Zusammenfassung: 7.000 t/Jahr (1,2%) wurden den Müllverbrennungsschlacken beigemischt.



Schematische Wiedergabe der BMKW-Schlacken

Ergebnisse

Analyse	Einheit	
XRF Elementare Zusammensetzung		WROXI
SiO ₂	Masse-% Trockenmasse	48,26
CaO	Masse-% Trockenmasse	20,53
Fe ₂ O ₃	Masse-% Trockenmasse	5,07
Al ₂ O ₃	Masse-% Trockenmasse	7,26
Na ₂ O	Masse-% Trockenmasse	1,85
SO ₃	Masse-% Trockenmasse	2,40
MgO	Masse-% Trockenmasse	2,39
P ₂ O ₅	Masse-% Trockenmasse	0,69
TiO ₂	Masse-% Trockenmasse	6,58
K ₂ O	Masse-% Trockenmasse	1,48
ZnO	Masse-% Trockenmasse	0,54
Cl	Masse-% Trockenmasse	–
CuO	Masse-% Trockenmasse	0,20
Mn ₃ O ₄	Masse-% Trockenmasse	0,24
PbO	Masse-% Trockenmasse	0,19
Cr ₂ O ₃	Masse-% Trockenmasse	0,11
ZrO ₂	Masse-% Trockenmasse	0,04
BaO	Masse-% Trockenmasse	0,86
SrO	Masse-% Trockenmasse	0,08
NiO	Masse-% Trockenmasse	0,02

Anlage B Daten XRD und XRF Messmethoden

XRD

Die mineralogische Zusammensetzung der drei Füllstoffe aus der Abfallverbrennung ist mit Hilfe der quantitativen Röntgendiffraktometrie (XRD) bestimmt worden.

Die Bestimmung ist auf einem Bruker D8 Advance Diffraktometer mit Bragg-Brentano-Geometrie und einem positionsempfindlichen Lynxeye-Detektor durchgeführt worden. Es ist Cu K α Strahlung 45 kV 40 mA und ein Divergenzspalt V12 mit einer Höhe von 5 mm eingesetzt worden. Einstellung der Erkennung: LL 0.19 und W 0.06.

Der 2θ Scan ist zwischen 10 und 110° in Schritten von 0,030° bei einer Messzeit von 2 Sekunden pro Schritt durchgeführt worden.

Die erhaltenen Daten sind mit Bruker Software Diffrac.EVA Version 4.3 verarbeitet worden.

XRF

Die Elementarzusammensetzung der drei Füllstoffe aus der Abfallverbrennung ist mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzspektroskopie bestimmt worden.

Die Bestimmung ist auf einem Axios WD-XRF Panalytical mit einer Röntgenröhre von 2,4 kW erfolgt.

Als Analysemethode ist AP WROXI mit einem Paket von Panalytical mit 21 Oxiden aus synthetischen Standards verwendet worden. Aus den Standards sind Glasperlen hergestellt werden, in dem eine bestimmte Menge an Standard mit LiT:LiM gemischt (Verhältnis 66%:34%) und danach eingeschmolzen wurde.

Eine Liste der für die einzelnen Elemente verwendeten Wellenlängen ist verfügbar.

Anlage C Herstellung der Betonplatten

Am Freitag den 11.09.2020 sind bei einer Betonfabrik in Drachten Betonfahrbahnplatten von 300x300x60 mm mit den 5 betrachteten Betonmischung hergestellt worden. Pro Mischung ist eine Charge von 1,25 m³ Beton angerührt worden, aus der mit einer kleinen Plattenpresse rund 200 Platten hergestellt worden sind. Die hergestellten Platten hatten keine Deckschicht.



Die Zusammensetzung der 5 Betonmischungen ist in der nachstehenden Tabelle angegeben.

Zusammensetzung (kg/m³) Betonfahrbahnplatten

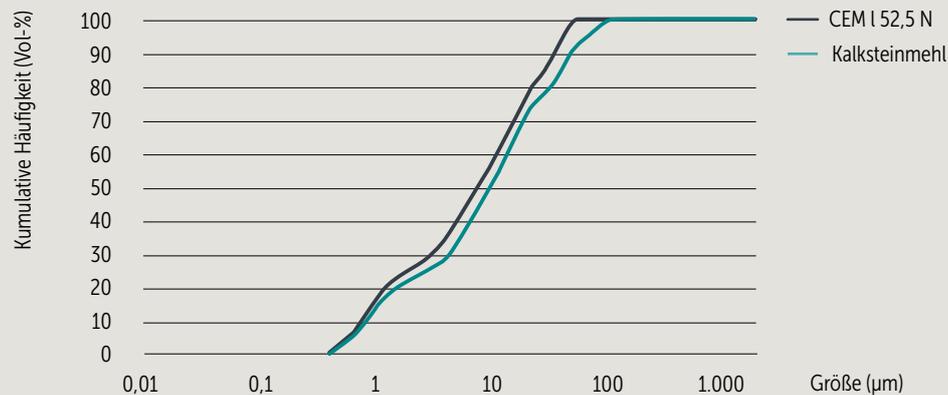
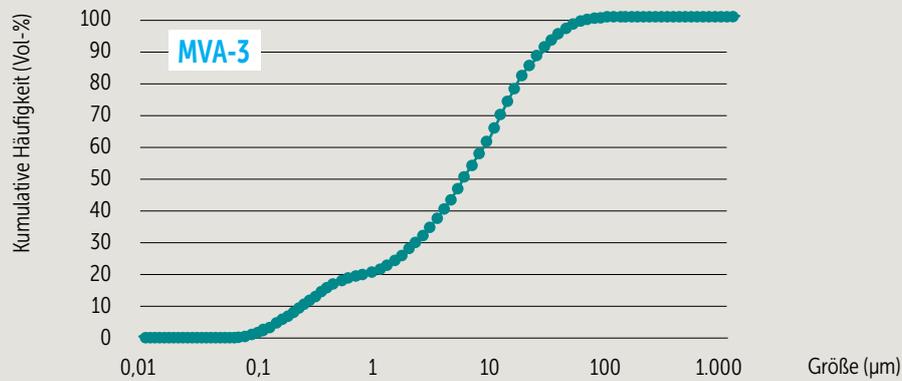
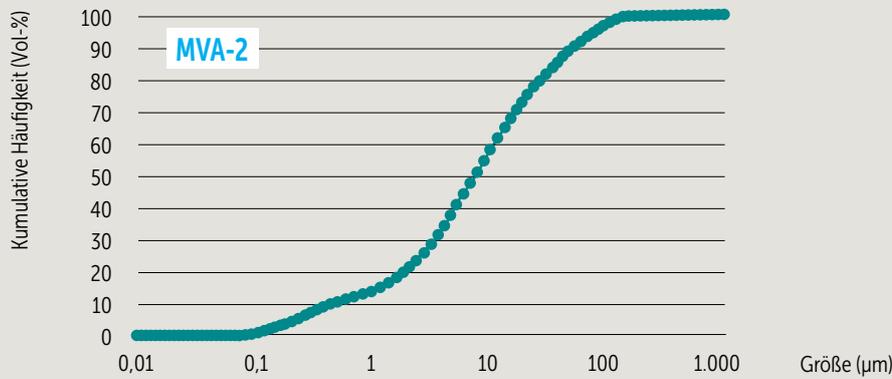
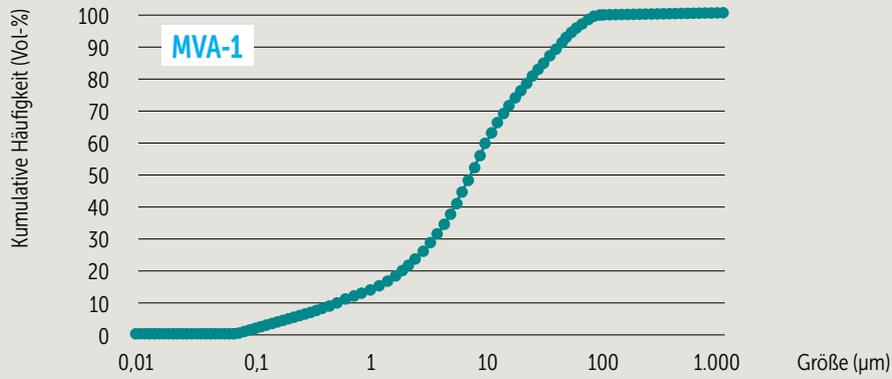
Komponente	REF	KSM	MVA-1	MVA-2	MVA-3
CEM I 52,5 N	289	219	218	219	219
Füllstoff	0	79	73	73	73
Wasser (effektiv)	80	89	106	106	105
Absorptionswasser	11	11	11	11	11
Sand 0-2	791	791	801	794	790
Granit 2-8	1.154	1.154	1.152	1.177	1.157
W/B-Wert (effektiv)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36

Die Referenzmischung (REF) ist das Grundrezept für diese Betonplatten. Um zur gleichen Konsistenz zu kommen (Kneten einer Kugel und Beurteilung des Zusammenhalts durch den Verantwortlichen für die Mühle), ist der Wassergehalt der Betonmischungen mit Kalksteinmehl um 9 l/m³ erhöht worden.

Obwohl mit dieser Konsistenz beider Betonmischungen die Herstellung der Platten gut verlaufen ist, gab der Mitarbeiter an der Plattenpresse an, dass die beiden Mischungen ‚eher trocken‘ waren und die Konsistenz der drei Betonmischungen mit Füllstoffen aus der Abfallverbrennung ist leicht angepasst worden. Die Anpassung in Verbindung mit dem etwas höheren Wasserbedarf der drei Füllstoffe aus der Abfallverbrennung hat zu ca. 17 l/m³ zusätzlichem Ansatzwasser gegenüber der Mischung mit Kalksteinmehl geführt.

Ein Teil der hergestellten Betonplatten ist am 22.09.2020 beim Labor SGS INTRON in Sittard angeliefert worden. Jede Betonmischung befand sich auf einer getrennten Palette.

Anlage D Korngrößenverteilungen Füllstoffe und Zement



Anlage E Röntgendiffraktogramme

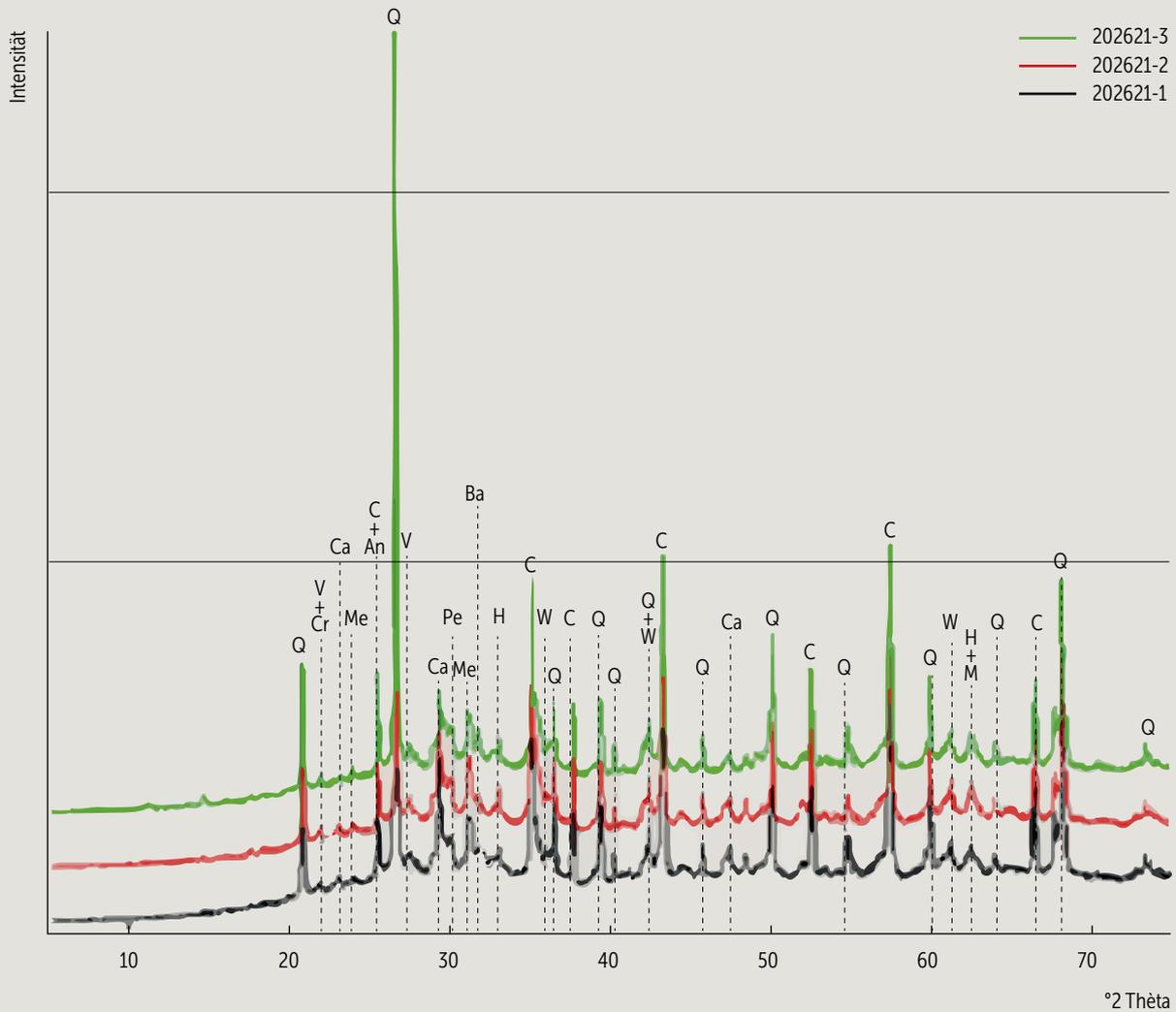
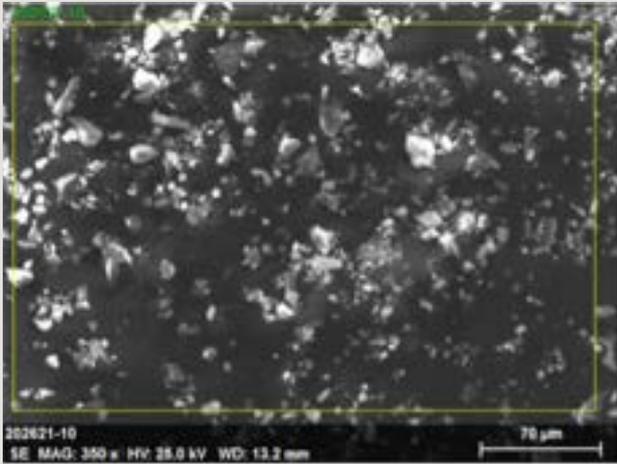


Abbildung 1. Diffractionsmuster der Proben. Es werden die wichtigsten Reflexionen gezeigt: interner Standard (C), Quarz (Q), Feldspat (V: sowohl Plagioklas/Albiet als auch Alkalifeldspat), Cristobalit (Cr), melilithische Mineralien (Me), Petedunnit (Pe), Bassanit (Ba), Calcit (Ca), Hematit (H), Magnetit (M) und Wüstit (W), Anhydrit (An).

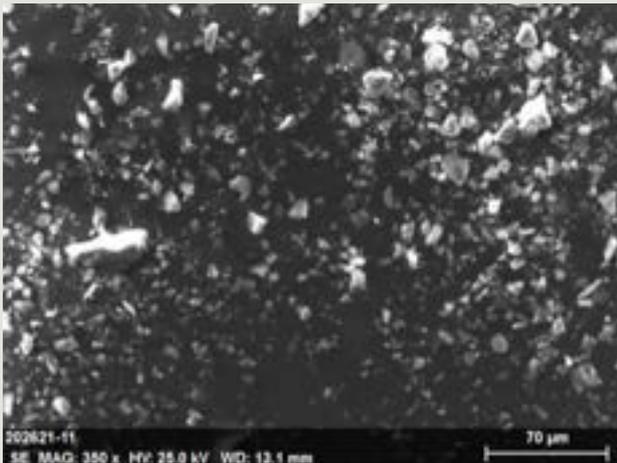
Anlage F SEM/EDAX

Füllstoff MVA-1



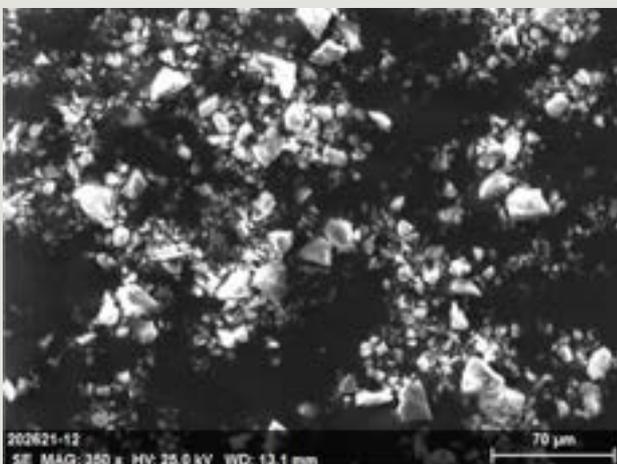
E1	AN	Serie	unn. C [Gewichts-%]	norm. C [Gewichts-%]	Atom. C [at.%]	Fehler (1 Sigma) [Gewichts-%]
Na	11	K-Serie	0,90	6,79	9,52	0,10
Mg	12	K-Serie	0,25	1,91	2,53	0,05
Al	13	K-Serie	0,90	6,79	8,11	0,08
Si	14	K-Serie	4,31	32,46	37,25	0,22
P	15	K-Serie	0,43	3,22	3,35	0,05
S	16	K-Serie	1,32	9,91	9,97	0,08
Cl	17	K-Serie	0,20	1,48	1,35	0,04
K	19	K-Serie	0,21	1,56	1,28	0,04
Ca	20	K-Serie	3,47	26,12	21,01	0,14
Fe	26	K-Serie	1,30	9,76	5,63	0,08
Summe			13,28	100,00	100,00	

Füllstoff MVA-2



E1	AN	Serie	unn. C [Gewichts-%]	norm. C [Gewichts-%]	Atom. C [at.%]	Fehler (1 Sigma) [Gewichts-%]
Na	11	K-Serie	1,20	6,91	9,73	0,12
Mg	12	K-Serie	0,50	2,86	3,81	0,06
Al	13	K-Serie	1,52	8,69	10,42	0,11
Si	14	K-Serie	5,43	31,18	35,92	0,27
P	15	K-Serie	0,58	3,31	3,46	0,05
S	16	K-Serie	1,27	7,27	7,33	0,08
Cl	17	K-Serie	0,26	1,48	1,35	0,04
K	19	K-Serie	0,17	0,97	0,80	0,03
Ca	20	K-Serie	4,25	24,39	19,69	0,16
Fe	26	K-Serie	2,25	12,93	7,49	0,09
Summe			17,43	100,00	100,00	

Füllstoff MVA-3



E1	AN	Serie	unn. C [Gewichts-%]	norm. C [Gewichts-%]	Atom. C [at.%]	Fehler (1 Sigma) [Gewichts-%]
Na	11	K-Serie	1,55	6,60	9,42	0,14
Mg	12	K-Serie	0,38	1,61	2,17	0,05
Al	13	K-Serie	2,14	9,14	11,12	0,14
Si	14	K-Serie	7,54	32,20	37,62	0,36
P	15	K-Serie	0,49	2,11	2,23	0,05
S	16	K-Serie	1,29	5,51	5,63	0,08
Cl	17	K-Serie	0,32	1,37	1,27	0,04
K	19	K-Serie	0,23	0,97	0,82	0,04
Ca	20	K-Serie	6,00	25,63	20,99	0,21
Fe	26	K-Serie	3,48	14,86	8,73	0,13
Summe			23,42	100,00	100,00	

Anlage G Schaumversuch Füllstoffe aus der Abfallverbrennung

Vorgehensweise:

15 g Füllstoff aus der Abfallverbrennung + 150 ml demin. Wasser in einen Messzylinder von 500 ml geben. Mit einem Glasstab rühren und die Menge des entstandenen Schaums messen.

Anschließend mit einem dünnen Schlauch 30 Sekunden lang Druckluft unten in den Messzylinder einblasen.

Die Schaummenge messen, nachdem die größeren, weniger stabilen Luftblasen geplatzt sind.

Ergebnisse:

Füllstoff	MVA-1	MVA-2	MVA-3
Schaummenge nach Mischen mit Wasser (ml Schaum/g Füllstoff)	1,3	1,3	0,3
Menge (stabiler) Schaum nach Einblasen von Luft (ml Schaum/g Füllstoff)	1,7	0,7	0,7
Luftgehalt der Mörtelsorte (Volumen-%)	10,0	11,5	6,8

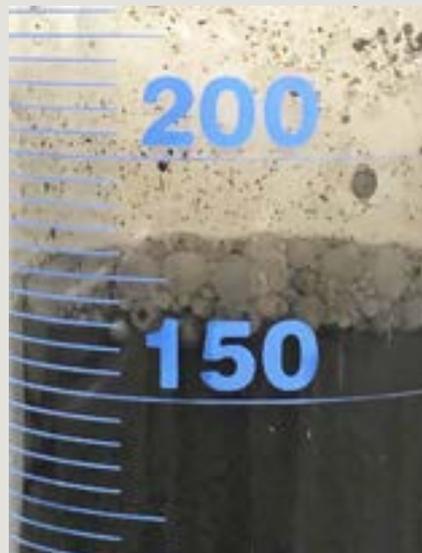
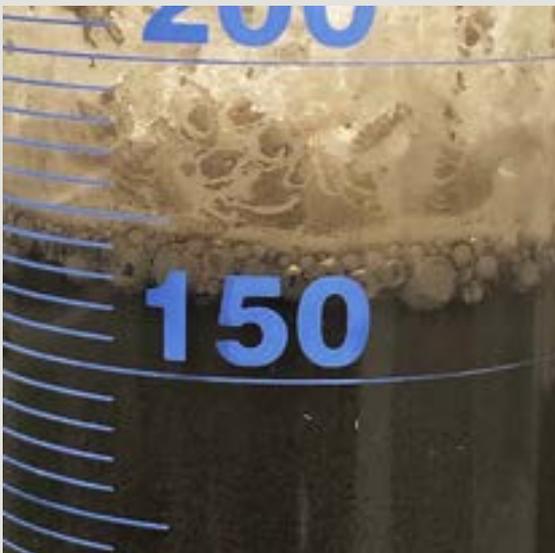
Hinweis: Messgenauigkeit ca. 0,3 ml/g

Interpretation:

Alle drei Füllstoffe führen bei leichtem Mischen (Rühren) bereits zur Schaumbildung, die durch Einblasen von Luft bei MVA-1 und MVA-3 (etwas) zunimmt. Bei MVA-2 nimmt sie ab.

Es fällt auf, dass die Probe MVA-3 beim Rühren eine erheblich geringere Schaumlage zeigte als MVA-1 und MVA-2, was mit dem wesentlich geringeren Luftgehalt der Mörtelsorte mit MVA-3 übereinstimmt (unterste Zeile in der Tabelle).

Es scheinen daher schaumbildende (= die Oberflächenspannung aktivierende) Bestandteile vorhanden zu sein. Ein erheblicher Teil der gebildeten Luftblasen ist kleiner als 1 mm und nur schwierig durch Vibration bzw. Stoß aus der Mörtelsorte zu entfernen.



Colofon

CROW-CUR-Empfehlung 128:2021
Füllstoff aus der Abfallverbrennung in unbewehrtem
erdfeuchtem Beton

[Ausgabe](#)

CROW, Ede

[Artikelnummer](#)

AA128:2021

[Umschlagfoto](#)

Blue Phoenix Group

[PoD](#)

Scanlaser bv, Zaandam

[Produktion](#)

CROW

