

CROW-CUR Aanbeveling 128:2021 AEC-vulstof in ongewapend aardvochtig beton



Over CROW

CROW bedenkt slimme en praktische oplossingen voor vraagstukken over infrastructuur, openbare ruimte, verkeer en vervoer in Nederland. Dat doen we samen met externe professionals die kennis met elkaar delen en toepasbaar maken voor de praktijk.

CROW is een onafhankelijke kennisorganisatie zonder winstoogmerk die investeert in kennis voor nu en in de toekomst. Wij streven naar de beste oplossingen voor vraagstukken van beleid tot en met beheer in infrastructuur, openbare ruimte, verkeer en vervoer en werk en veiligheid. Bovendien zijn wij experts op het gebied van aanbesteden en contracteren.

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

CROW-CUR Aanbeveling 128:2021
AEC-vulstof in ongewapend
aardvochtig beton

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

CROW

Postbus 37, 6710 BA Ede
Telefoon (0318) 69 53 00
E-mail klantenservice@crow.nl
Website www.crow.nl

Augustus 2021

ISBN: 978 90 6628 694 8

CROW en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben de hierin opgenomen gegevens zorgvuldig verzameld naar de laatste stand van wetenschap en techniek. Desondanks kunnen er onjuistheden in deze publicatie voorkomen. Gebruikers aanvaarden het risico daarvan.

CROW sluit, mede ten behoeve van degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die voortvloeit uit het gebruik van de gegevens.

De inhoud van deze publicatie valt onder bescherming van de auteurswet.

De auteursrechten berusten bij CROW.

Woord vooraf

In de markt is de afgelopen jaren de behoefte aan geschikte vulstoffen voor beton, met name met een puzzolaan karakter, toegenomen. Deze leemte kan mede worden ingevuld door AEC-vulstof, die wordt geproduceerd uit AEC-bodemas, waarbij naast de voor bodemas gebruikelijke bewerkingsstappen heel specifiek een nat maalproces is inbegrepen. Met de toepassing van deze vulstof wordt tevens een minerale reststof hoogwaardig benut.

De toepassing van AEC-vulstof in beton is in deze CROW-CUR Aanbeveling beperkt tot ongewapende betonproducten vervaardigd met aardvochtig beton, zoals bijvoorbeeld betonstraatstenen, betontegels en betonnen trottoirbanden. Met het opstellen van deze CROW-CUR Aanbeveling waarin de kwaliteitseisen voor AEC-vulstof zijn vastgelegd, wordt het mogelijk om AEC-vulstof als nieuw type grondstof in BRL 1804 "Vulstof voor toepassing in beton en mortel" op te nemen.

Bij levering onder een certificaat op basis van BRL 1804 kan deze vulstof met vertrouwen worden toegepast als type I vulstof in ongewapende betonproducten vervaardigd met aardvochtig beton.

De gezamenlijke ambitie om de betonketen verder te verduurzamen, is vastgelegd in het Betonakkoord. Een van de daarin gestelde doelen is 100% hoogwaardig hergebruik van vrijkomende betonreststromen. Buiten de scope van deze CROW-CUR Aanbeveling, maar wel afgestemd met de leden van deze CROW-werkgroep, is deze toepassing van AEC-vulstof daarom eveneens getoetst op circulariteit en de milieueisen conform Besluit Bodemkwaliteit. Betongranulaat gemaakt van beton met AEC-vulstof is vergeleken met referentie betongranulaat dat is gemaakt met enkel primaire grondstoffen, zowel op civieltechnische, milieutechnische aspecten als op circulariteit. Hiermee kan worden aangetoond dat betongranulaat en vulstof gerecycled uit betonpuin met AEC-vulstof op een verantwoorde wijze in een volgende leven als grondstof in beton kan worden gebruikt.

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Deze CROW-CUR Aanbeveling is inhoudelijk gebaseerd op de resultaten verkregen in een uitgebreid onderzoek aan beton vervaardigd met AEC-vulstoffen, die zijn vastgelegd in een achtergrondrapport.

Deze CROW-CUR Aanbeveling is opgesteld door de CROW-werkgroep 'AEC-vulstof in ongewapend beton'. Op het moment van verschijnen van deze Aanbeveling was de samenstelling van de werkgroep als volgt:

Angelo Sarabèr (*Sarabèr Consultancy, voorzitter*)
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 (*Gemeente Amersfoort*)
Edwin Vermeulen (*Betonhuis*)
Martin Verweij (*Cementbouw*)
Gert van der Wegen (*SGS INTRON, rapporteur*)

De begeleiding vanuit CROW werd verzorgd door Ad van Leest.

De uitgave van deze Aanbeveling is mede mogelijk gemaakt door een financiële bijdrage van: Blue Phoenix Group, Betonhuis Cement en Rijkswaterstaat GPO.

De inhoud van deze CROW-CUR Aanbeveling 128 is voorafgaand aan het verschijnen, gedeeld met de leden van NEN-normcommissie 353 039 'Beton' en de daaronder ressorterende werkgroep 'Vulstoffen'. De daarbij verkregen reacties en commentaren zijn voor zover als mogelijk verwerkt in deze aanbeveling.

Inhoud

1	Onderwerp en toepassingsgebied	6
2	Termen en definities	6
1.1	Onderwerp	6
1.2	Toepassingsgebied	6
3	Materiaaleisen	7
	Bijlage	9
	Achtergrondrapport bij CROW-CUR Aanbeveling 128:2021: Onderzoek geschiktheid nat gemalen AEC-bodemas als vulstof in ongewapend aardvochtig beton – Rapport SGS INTRON B.V.	

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

1

Onderwerp en toepassingsgebied

1.1 Onderwerp

Deze CROW-CUR Aanbeveling geeft definities, eisen en regels voor AEC-vulstof, die wordt geproduceerd uit AEC-bodemas afkomstig uit een AEC-installatie met een natte ontslakker, waarbij naast de voor bodemas gebruikelijke bewerkingsstappen, met name zeven en het verwijderen van ferro- en non-ferrometalen, heel specifiek een nat maalproces is inbegrepen. De AEC-vulstof moet worden geproduceerd uit de gehele gradering van de betreffende AEC-bodemas.

1.2 Toepassingsgebied

Deze CROW-CUR Aanbeveling is bedoeld voor AEC-vulstof dat wordt toegepast in ongewapende, niet-constructieve betonproducten vervaardigd met betonspecie van consistentieclassen C0 (droog) en C1 (aardvochtig) en met een maximale dosering aan AEC-vulstof van 140 kg/m³.

2

Termen en definities

AEC-bodemas

AEC-bodemas ontstaat bij het verbranden van huishoudelijk afval en daaraan gelijkgestelde bedrijfsafvalstoffen (inclusief biomassa) in een afval-energiecentrale (AEC) met een roosteroven. Bodemas uit een biomassa-energiecentrale kan tot een maximum van 5,0 % m/m onderdeel zijn van de AEC-bodemas, mits dit afkomstig is van een binnen dezelfde inrichting gelegen biomassa-energiecentrale en aan de onbewerkte AEC-bodemas is toegevoegd. Ketelas kan deel uitmaken van de AEC-bodemas voor zover dit ketelas betreft die tezamen met de AEC-bodemas geproduceerd is en direct bij het verbrandingsproces zelf is toegevoegd.

AEC-vulstof

De vulstof geproduceerd uit AEC-bodemas, afkomstig uit een AEC-installatie met een natte ontslakker, waarbij naast de voor bodemas gebruikelijke bewerkingsstappen heel specifiek een nat maalproces is inbegrepen.

AEC-vulstof moet voldoen aan de eisen gesteld in onderstaande tabel.

Eigenschap	Methode	Eis
Korrelverdeling	NEN-EN 933-10	100% < 2 mm 85-100% < 125 µm 70-100% < 63 µm
Alkaligehalte, uitgedrukt als Na ₂ O-equivalent	Röntgenfluorescentiespectrometrie (XRF) NEN-EN 196-2	≤ 5,0 %(m/m) ¹⁾
Methyleenblauwadsorptie	NEN-EN 933-9	≤ 1,2 %(m/m)
Gehalte aan chloriden	NEN-EN 196-2	≤ 1,0 %(m/m) ²⁾
Gehalte aan sulfaten - SO ₃	NEN-EN 196-2	≤ 4,0 %(m/m) ³⁾
Invloed op sterkteontwikkeling ^{4,5)}	NEN-EN 196-1	≥ 65%
Invloed op bindtijd ⁴⁾	NEN-EN 196-3	< 120 minuten
Bepaling van vormhoudendheid ⁶⁾	NEN-EN 196-3	< 10 mm
TOC-gehalte	NEN-EN 13639	≤ 6 %(m/m)
Gehalte metallisch Al + Zn	CUR-Aanbeveling 116	≤ 0,2 %(m/m)

1) Indien de XRF-waarde >5 %(m/m), dient de bepaling te worden uitgevoerd als basisch oplosbaar alkaligehalte conform NEN-EN 196-2, waarbij de ontsluiting van het monster AEC-vulstof plaatsvindt volgens 4.4.4.2 maar dan met een oplossing van 107 g LiOH per 1000 ml in plaats van de beschreven KOH-oplossing.

2) Deze eis geldt bij 25 %(m/m) vervanging van cement door AEC-vulstof. Bij hogere vervangingspercentages wordt de grenswaarde evenredig lager.

3) Indien het gehalte aan zuuroplosbare sulfaten, uitgedrukt als SO₃, $0,2 \leq x \leq 4,0$ %(m/m) bedraagt, mag het gehalte aan sulfaten in het gebruikte toeslagmateriaal niet hoger zijn dan 0,2 %(m/m) (AS0,2) en dient deze beperking aan het gebruik van toeslagmaterialen op de productspecificaties te worden vermeld. Vulstoffen met een sulfaatgehalte, uitgedrukt als SO₃, hoger dan 4,0 %(m/m) mogen niet worden toegepast.

4) Eis te hanteren bij een mengsel van 25 %(m/m) vulstof en 75 %(m/m) CEM I 42,5 in vergelijking met proefstukken vervaardigd met 100% van dezelfde CEM I 42,5.

5) Indien het luchtgehalte van de mortelspecie met de AEC-vulstof hoger is dan die van de referentie mortelspecie, dan mag voor elk % hoger luchtgehalte de druksterkte van de referentie mortel met 5% worden verlaagd alvorens de toetsing uit te voeren. Deze correctie is geïntroduceerd omdat AEC-vulstof in plastische species een verhoogd luchtgehalte kan veroorzaken, hetgeen niet optreedt bij droge en aardvochtige species.

6) Eis te hanteren bij een mengsel van 25 %(m/m) vulstof en 75 %(m/m) CEM I 42,5.

Titels van de vermelde normen en documenten

NEN-EN 196-1	Beproevingmethoden voor cement – Deel 1: Bepaling van de sterkte
NEN-EN 196-2	Beproevingmethoden voor cement – Deel 2: Chemische analyse van cement
NEN-EN 196-3	Beproevingmethoden voor cement – Deel 3: Bepaling van begin en einde van de binding en bepaling van de vormhoudendheid
NEN-EN 933-9	Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen – Deel 9: Beoordeling van fijn materiaal – Methyleenblauwproef
NEN-EN 13639	Bepaling van het totale gehalte aan organisch koolstof in kalksteen
CUR-Aanbeveling 116	AEC-granulaat als toeslagmateriaal voor beton
Achtergrondrapport bij CROW-CUR Aanbeveling 128	'Onderzoek geschiktheid gemalen AEC-bodemas als vulstof in ongewapend aardvochtig beton', SGS INTRON rapport A117460/R20210149, juli 2021

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Bijlage

Achtergrondrapport bij CROW-CUR Aanbeveling 128:2021

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Onderzoek geschiktheid nat gemalen AEC-bodemas als vulstof in ongewapend aardvochtig beton

Rapport SGS INTRON B.V.

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Inhoud

Samenvatting	13
1 Inleiding	14
2 Opzet onderzoek	15
2.1 Karakterisering AEC-vulstoffen	15
2.2 Pasta- en mortelproeven	15
2.3 Betononderzoek 1 ^e leven	16
2.4 Circulariteit	17
2.4.1 Betontechnologisch: betongranulaat	17
2.4.2 Betontechnologisch: vulstof	17
2.4.3 Milieuhygiënisch	17
3 Resultaten en beschouwing	18
3.1 Karakterisering AEC-vulstoffen	18
3.1.1 Chemische analyses en waterbehoefte	18
3.1.2 Korrelverdeling	19
3.1.3 Elementaire samenstelling	19
3.1.4 Mineralogische samenstelling	19
3.1.5 Microstructuur en samenstelling	21
3.1.6 Conclusies karakterisering	22
3.2 Pasta- en mortelproeven	23
3.2.1 Pastaproeven	23
3.2.2 Mortelproeven: sterkte-ontwikkeling	23
3.2.3 Mortelproeven: expansie in water van 40°C	24
3.2.4 Mortelproeven: invloed AEC-vulstof op ASR	25
3.3 Betononderzoek 1e leven	26
3.3.1 Samenstelling betontegels	26
3.3.2 Mechanische eigenschappen	26
3.3.3 Vorstdooizoutbestandheid	27
3.3.4 Waterabsorptie en uitdroging	28
3.3.5 Conclusies betononderzoek 1e leven	28
3.4 Circulariteit	29
3.4.1 Betontechnologisch: betongranulaat	29
3.4.2 Betontechnologisch: vulstof	30
3.4.3 Milieuhygiënisch	31
4 Conclusies geschiktheid AEC-vulstof	33
5 CROW-CUR Aanbeveling	33
6 Nawoord	35
Bijlagen	
A Herkomst en representativiteit input materiaal proeven	36
B Gegevens XRD en XRF meetmethoden	43
C Productie betontegels	44
D Korrelverdelingen vulstoffen en cement	45
E Rontgendiffractogrammen	46
F SEM/EDAX	47
G Schuimproef AEC-vulstoffen	48

Samenvatting

Inleiding

Uit AEC-bodemassas kan met een opwerkproces, waaronder een natte maalstap, een vulstof worden geproduceerd voor toepassing in ongewapend, aardvochtig beton. Om deze AEC-vulstof op een verantwoorde en geaccepteerde wijze toe te kunnen passen in beton, is een beoordelings-systeem nodig in de vorm van een CROW-CUR Aanbeveling. Deze aanbeveling vormt tevens de technische grondslag voor opname van dit type vulstof in de beoordelingsrichtlijn BRL 1804, op basis waarvan certificatie van de vulstof kan plaatsvinden.

Met een uitgebreid karakteriserings- en betononderzoek zijn de relevante eigenschappen en prestaties van de AEC-vulstof in kaart gebracht. Hierbij is tevens aandacht besteed aan de circulariteit van het beton waarin AEC-vulstof is toegepast. Deze inzichten hebben geleid tot de formulering van de CROW-CUR Aanbeveling.

De resultaten van het uitgevoerde onderzoek zijn vastgelegd in dit rapport, dat als achtergrond-document dient bij de betreffende CROW-CUR Aanbeveling.

Het onderzoek is opgesteld en uitgevoerd onder begeleiding van CROW-werkgroep N1794 'AEC-vulstof in ongewapend beton'

Uitgevoerde werkzaamheden

Representatieve monsters AEC-vulstof zijn gekarakteriseerd wat betreft relevante eigenschappen voor toepassing in beton. Daarnaast is de invloed van de AEC-vulstof op de van belang zijnde prestaties van fabrieksmatig vervaardigde betontegels onderzocht, met als referenties betontegels zonder vulstof en met kalksteenmeel als vulstof.

Voor de beoordeling van de invloed van de AEC-vulstof op de circulariteit van daarmee vervaardigd beton, zijn betongranulaten met AEC-vulstof gekarakteriseerd en beton met deze betongranulaten onderzocht op enkele basiseigenschappen, zowel betontechnologisch als milieuhygiënisch. Tevens is nagegaan of verharde cementsteen met AEC-vulstof na fijnmalen in principe weer kan worden toegepast als vulstof in beton.

Conclusies

Op basis van het uitgevoerde onderzoek kan worden geconcludeerd dat de onderzochte AEC-vulstof geschikt is om te worden toegepast in ongewapende, niet-constructieve betonproducten vervaardigd met droge of aardvochtige betonspecie.

Tevens is aangetoond dat door toepassing van AEC-vulstof in dergelijke betonproducten, de materiaalstromen ontstaan door recycling van dat beton (betongranulaat en poederfractie) opnieuw als grondstof in een 2^e teven beton kunnen worden toegepast. Deze toepassing van AEC-vulstof is dus volledig circulair op de onderzochte aspecten.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om aanvullend op de generieke eigenschappen genoemd in BRL 1804 de volgende aspecten voor AEC-vulstof te regelen in de CROW-CUR Aanbeveling:

- Alkaligehalte (Na_2O -eq)
- TOC-gehalte
- Gehalte aan metallisch Al + Zn
- Chloridgehalte

Blue Phoenix Group (BPG) wil AEC-vulstof op de markt brengen als gecertificeerde vulstof voor toepassing in ongewapende betonproducten vervaardigd met aardvochtige betonspecie. Deze AEC-vulstof wordt geproduceerd uit AEC-bodemas, waarbij naast de voor bodemas gebruikelijke bewerkingsstappen, met name zeven en het verwijderen van ferro- en non-ferrometalen, heel specifiek een nat maalproces wordt toegepast. Het product wordt geleverd als een poeder-vormige vulstof.

Om deze AEC-vulstof te kunnen certificeren conform BRL 1804, dient eerst een technische grondslag in de vorm van een CROW-CUR Aanbeveling te worden opgesteld. Het hiervoor benodigd onderzoek is vastgesteld door de CROW-werkgroep N1794 'AEC-vulstof in ongewapend beton'. In dit onderzoek is tevens aandacht gegeven aan de circulariteit van beton waarin AEC-vulstof is toegepast.

In dit rapport, dat als achtergrondrapport dient bij de CROW-CUR Aanbeveling, zijn de resultaten van het uitgevoerde onderzoek weergegeven. Tevens zijn de gemaakte keuzes voor bepaalde aspecten, zoals die in de CROW-CUR Aanbeveling zijn opgenomen, nader toegelicht.

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Het onderzoek is uitgevoerd aan 3 monsters AEC-vulstof, waarvan het uitgangsmateriaal volgens Blue Phoenix Group afkomstig is van 3 verschillende Nederlandse Afval-EnergieCentrales (AEC) en representatief is voor Nederlandse AEC-bodemas (zie bijlage A). In deze bijlage is tevens informatie opgenomen over de monsternamen van de AEC-bodemassen en het opwerkproces tot AEC-vulstof.

Het onderzoeksprogramma is opgesplitst in meerdere onderdelen:

- Karakterisering van de 3 monsters AEC-vulstof
- Invloed vulstof op pasta- en morteleigenschappen
- Betontechnologisch onderzoek aan betonproduct waarin AEC-vulstof is toegepast ('1^e leven')
- Onderzoek 2^e leven (circulariteit), zowel betontechnologisch als milieuhygiënisch.

Op basis van de verkregen resultaten in de eerste twee onderdelen, is één AEC-vulstof gekozen die in de beide daaropvolgende onderdelen over de volle breedte is onderzocht.

2.1 Karakterisering AEC-vulstoffen

Van de 3 monsters AEC-vulstof zijn de volgende eigenschappen bepaald:

- Korrelverdeling (lasergranulometrie)
- Waterbehoefte β_p -waarde: bijlage C van BRL 1804
- Chloridegehalte (zuur- en wateroplosbaar): resp. NEN-EN 196-2 en NEN-EN 1744-1
- Sulfaatgehalte (zuur- en wateroplosbaar): resp. NEN-EN 196-2 en NEN-EN 1744-1
- Gehalte aan alkaliën (Na_2O -eq): NEN-EN 196-2
- Gehalte aan wateroplosbaar fosfaat: bijlage C van NEN-EN 450-1
- Gehalte aan organische bestanddelen (TOC): NEN-EN 13639
- Gehalte aan metallisch Al+Zn: bijlage A van CUR-Aanbeveling 116
- Elementsamenstelling met röntgenfluorescentiespectroscopie (XRF): NEN-EN 196-2
- Mineralogische samenstelling: kwantitatieve röntgendiffractometrie (XRD)
- Microstructuur/samenstelling: scanningelektronenmicroscopie (SEM) + elementanalyse (EDXA)

Een beknopte specificatie van de XRF- en XRD-meetmethode is opgenomen in bijlage B.

2.2 Pasta- en mortelproeven

Met de 3 monsters AEC-vulstof en een gangbare kalksteenmeel uit de markt (als referentie) zijn pasta- en mortelproeven uitgevoerd, waarbij 25 % (m/m) van het cement is vervangen door deze vulstoffen. Als extra referentie zijn deze proeven tevens uitgevoerd aan pasta's en mortels zonder vulstof (100% cement). Normpasta's en normmortels zijn vervaardigd volgens respectievelijk NEN-EN 196-3 en NEN-EN 196-1 met als bindmiddel CEM I 52,5 N (ENCI Maastricht). Er is gekozen voor een CEM I 52,5 N omdat dit cement is toegepast bij de productie van de betontegels die zijn gebruikt voor het betononderzoek.

De volgende eigenschappen zijn bepaald:

- Luchtgehalte (verse mortelspecie) analoog aan NEN-EN 12350-7
- Bindtijd (pasta) volgens NEN-EN 196-3
- Vormvastheid (Le Chatelier) volgens NEN-EN 196-3
- Autoclaafproef (aan pasta) volgens ASTM C151
- Expansie bij opslag onder water van 40°C. Op het einde van de proef is een slijpplaatje microscopisch onderzocht
- Druksterkte na 7, 28 en 90 dagen verharden volgens NEN-EN 196-1

De invloed van AEC-vulstof op de alkali-silicareactie (ASR) is onderzocht met de zeer versnelde mortelbalk expansietest (UAMBT) volgens bijlage E van CUR-Aanbeveling 89 aan de volgende combinaties:

- CEM I 52,5 zonder AEC-vulstof in combinatie met zowel reactief als niet-reactief toeslagmateriaal (2 referenties)
- De in voorgaande stappen van het onderzoek geselecteerde AEC-vulstof, die 25% m/m van het cement vervangt, in combinatie met zowel reactief als niet-reactief toeslagmateriaal
- Beide andere AEC-vulstoffen (bij 25 % m/m cementvervanging) enkel in combinatie met reactief toeslagmateriaal

Omdat geen reactief toeslagmateriaal beschikbaar was, is gekozen om boriumsilicaatglas te gebruiken als alkalireactief materiaal. Glasparels van dit materiaal zijn gebroken en afgezeefd in de gewenste korrelfracties voor de UAMBT test. Om substantiële expansies te verkrijgen zijn proefstukken van 25x25x285 mm gebruikt in deze proef.

2.3 Betononderzoek 1^e leven

Volgens de oorspronkelijke opzet zou dit onderzoek worden uitgevoerd aan betonstraatstenen geperst in het laboratorium met een samenstelling en verdichtingsdruk zoals gangbaar in de praktijk. Door het ontbreken van de intensieve verdichtingsenergie, hetgeen niet mogelijk was in het laboratorium, bleken de in het laboratorium geproduceerde betonstraatstenen een splijttreksterkte te bezitten die slechts de helft is van wat gebruikelijk is in de praktijk. Daarom is in overleg met de CROW-werkgroep besloten om de proefstukken toch in de praktijk te gaan produceren met een projectmatige aansturing door Blue Phoenix Group in samenwerking met SGS INTRON. SGS INTRON medewerkster ir. Bianca Baetens heeft het gehele productieproces bijgewoond en vastgelegd. In bijlage C zijn de belangrijkste gegevens van deze productie weergegeven.

Er zijn 5 series betontegels vervaardigd:

- Beton zonder vulstof (referentie 1), zoals die gebruikelijk wordt geproduceerd
- Beton met kalksteenmeel als vulstof (referentie 2)
- Beton met de 3 monsters AEC-vulstof

De 4 vulstoffen zijn gedoseerd als 25 % m/m vervanging van het cement.

Na 28 dagen uitharden bij 20°C en het eigen vochtgehalte zijn de volgende eigenschappen van de betontegels in drievoud bepaald:

- Volumieke massa volgens NEN-EN 12390-7
- Dynamische E-modulus (berekend uit ultrasone voortplantingssnelheid)
- Druksterkte aan uitgezaagde kubus analoog aan NEN-EN 12390-3
- Buigtreksterkte volgens bijlage F van NEN-EN 1339
- Vorstdooizoutbestandheid volgens bijlage D van NEN-EN 1339
- Capillaire waterabsorptie en uitdroging

2.4 Circulariteit

Momenteel wordt door een andere CROW-werkgroep een systematiek opgesteld voor de beoordeling van grondstoffen op geschiktheid voor circulair beton. Omdat die systematiek nog niet beschikbaar was bij aanvang van onderhavig onderzoek zijn niet alle aspecten onderzocht, zoals met name zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) en radioactiviteit. De volgende betontechnologische en milieuhygiënische aspecten zijn wel onderzocht.

2.4.1 Betontechnologisch: betongranulaat

Van 3 betonmengsels zijn een aantal betontegels na initiële verharding gedurende 28 dagen bij 20°C aansluitend gedurende 2 maanden versneld verhard in water van 40°C voor het bewerkstelligen van een hogere hydratatiegraad ('verouderd' beton). Vervolgens zijn die betontegels verkleind in een kaakbreker en droog afgezeefd tot betongranulaat 4-22 mm. Dit is gebeurd voor het betonmengsel zonder vulstof (referentie 1), het betonmengsel met kalksteenmeel als vulstof (referentie 2) en het betonmengsel met de geselecteerde AEC-vulstof in het eerste deel van het onderzoek.

Aan deze vervaardigde 3 grove betongranulaten is het volgende onderzoek uitgevoerd:

- Karakterisering:
 - (korrel)dichtheid en waterabsorptie volgens NEN-EN 1097-6
 - korrelverdeling volgens NEN-EN 933-1
- Vervaardigen plastisch beton (S3) met 320 kg/m³ CEM I 42,5 N en wcf 0,50 en bepalen van:
 - de druksterkte na 7 en 28 dagen volgens NEN-EN 12390-3
 - de waterindringing na 28 dagen verharden volgens NEN-EN 12390-8
 - de chloridemigratiecoëfficiënt na 28 dagen verharden volgens NT Build 492

2.4.2 Betontechnologisch: vulstof

Met innovatieve recyclingtechnieken kan de cementsteen grotendeels van het toeslagmateriaal worden gescheiden, waardoor deze poederfractie mogelijk weer als vulstof in beton kan worden toegepast. Om de invloed van de AEC-vulstof op de kwaliteit van een 2^e leven vulstof vast te stellen, is het volgende onderzoek uitgevoerd:

Er zijn 3 cementpasta's met een water-bindmiddelfactor (wbf) van 0,35 (vergelijkbaar met die van de betontegels) vervaardigd: een cementpasta zonder vulstof (referentie 1), een cementpasta met kalksteenmeel als vulstof (referentie 2) en een cementpasta met de geselecteerde AEC-vulstof in het eerste deel van het onderzoek. Deze cementpasta's zijn na een initiële verharding gedurende 28 dagen bij 20°C vervolgens gedurende 2 maanden versneld verhard in water van 40°C voor het bewerkstelligen van een hogere hydratatiegraad ('verouderde' cementsteen). Na deze versnelde verharding zijn de proefstukken verkleind in een kaakbreker tot een korrelgrootte <4 mm en daarna 1 uur droog gemalen in een kogelmolen tot poederfijnheid.

De 3 aldus vervaardigde 2^e 'leven' vulstoffen zijn onderzocht op de volgende eigenschappen:

- Invloed op bindtijd volgens NEN-EN 196-3
- Vormhoudendheid volgens NEN-EN 196-3
- Druksterkte na 7 en 28 dagen volgens NEN-EN 196-1

2.4.3 Milieuhygiënisch

Enkele betontegels vervaardigd zonder vulstof (referentie 1) en die met de geselecteerde AEC-vulstof zijn na 28 dagen verharden bij 20°C en eigen vochtgehalte (luchtdicht ingepakt in plastic folie) gebroken tot <4 mm. Van deze beide monsters betongranulaat is de uitloging bepaald met de kolomproef volgens NEN 7383.

3.1 Karakterisering AEC-vulstoffen

Er zijn door BPG 3 monsters AEC-vulstof voor het uit te voeren onderzoek afgeleverd op het laboratorium van SGS INTRON te Sittard. Deze monsters zijn door BPG bewust geproduceerd met een zekere variatie, onder meer met verschillende gehalten TOC, om het effect ervan op de mortel- en beton(specie)eigenschappen inzichtelijk te maken.

3.1.1 Chemische analyses en waterbehoefte

In tabel 1 zijn de resultaten van de chemische analyses en de bepaling van de waterbehoefte weergegeven.

Tabel 1. Karakterisering AEC-vulstoffen

Eigenschap	Eenheid	AEC-1	AEC-2	AEC-3	Generieke eis BRL 1804
Onoplosbaar (HCl/Na ₂ CO ₃)	% (m/m)	41,7	43,5	44,1	-
Sulfaat, wateroplosbaar (SO ₃)	% (m/m)	1,18	0,70	0,88	-
Sulfaat, zuuroplosbaar (SO ₃)	% (m/m)	2,10	1,31	1,65	≤ 4,0
Chloride, wateroplosbaar	% (m/m)	0,19	0,11	0,29	-
Chloride, zuuroplosbaar	% (m/m)	0,32	0,23	0,42	-
Alkali-equivalent, XRF	% (m/m)	4,8	4,8	4,6	≤ 5,0
Oplosbaar fosfaat (P ₂ O ₅)	% (m/m)	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	-
Metallisch aluminium + zink	% (m/m)	< 0,03	< 0,03	< 0,03	-
TOC	% (m/m)	5,8	2,0	0,69	-
Waterbehoefte βp-waarde	V/V	1,54	1,18	1,32	-

Het sulfaatgehalte is lager dan de generieke eis gesteld in BRL 1804 (≤ 4,0 % (m/m)) evenals de eis gesteld in EN 450-1 aan poederkoolvliegas (≤ 3,0 % (m/m)).

Aan het chloridegehalte wordt in BRL 1804 geen generieke eis gesteld omdat voor de toepassing in gewapend en voorgespannen beton een maximaal chloridegehalte voor de betonspecie geldt in verband met het risico op wapeningscorrosie. Het totale chloridegehalte gesommeerd over alle toegepaste grondstoffen moet voldoen aan dat criterium. Omdat het toepassingsgebied van AEC-vulstoffen is beperkt tot ongewapend beton is dat maximaal chloridegehalte niet relevant. Een andere reden om het chloridegehalte te beperken, is de invloed op het krimpedrag van het beton. Dit is pas merkbaar bij hoge chloridegehalten (> 1 % (m/m) op cementmassa). Zelfs bij een zeer hoge dosering AEC-vulstof van bijvoorbeeld 50% op cementmassa, is de bijdrage aan het chloridegehalte beperkt tot 0,2 % (m/m) op cement en zal dus geen negatief effect hebben.

Het alkali-equivalent is bepaald met XRF, waarmee het totaalgehalte wordt gemeten inclusief de alkaliën die in de amorfe fractie (glas) van de AEC-vulstoffen aanwezig is. Hoewel deze alkaliën pas vrijkomen nadat dit glas door puzzolane reacties (gedeeltelijk) oplost, voldoen de gemeten waarden aan de generieke eis gesteld in BRL 1804 (≤ 5,0 % (m/m)).

De gehalten aan wateroplosbaar fosfaat en metallisch aluminium + zink zitten onder de bepalingsgrenzen van de voorgeschreven meetmethoden en zijn dus effectief afwezig. Er zijn geen generieke eisen voor deze 2 aspecten in BRL 1804. Wat betreft wateroplosbaar fosfaat wordt in NEN-EN 450-1 aan poederkoolvliegas en in BRL 1804 aan vulstof die vrijkomt bij thermisch reinigen van al dan niet teerhoudend asfalt een eis gesteld van < 0,01 % (m/m). Het wateroplosbaar fosfaat ligt dus minstens een factor 10 lager dan deze eis.

De TOC-waarde verschilt (bewust) sterk per AEC-vulstof en ligt voor alle 3 onderzochte AEC-vulstoffen boven de aanvullende eis die is gesteld voor kalksteenmeel in BRL 1804 ($\leq 0,5 \%$ (m/m)). Beton vervaardigd met kalksteenmeel met een TOC-gehalte boven $0,5 \%$ (m/m) blijkt gevoelig te zijn voor vorstdooi(zout)aantasting. Dit aspect is nader onderzocht voor de AEC-vulstoffen (zie paragraaf 3.3).

De β_p -waarde van de 3 onderzochte AEC-vulstoffen is hoger dan die van cement (CEM I 52,5 = circa 1,2) en andere vulstoffen zoals poederkoolvliegias (circa 0,7) en kalksteenmeel (circa 0,8). Dit betekent dat bij plastische mortel- en betonspecies AEC-vulstoffen een hogere waterbehoefte veroorzaken.

De bepaling van de methyleenblauwadsorptie maakte geen onderdeel uit van het bovengeschreven karakteriseringsonderzoek. Metingen uitgevoerd aan 3 monsters AEC-vulstof van dezelfde herkomst als AEC-3 maar genomen over een periode van meerdere maanden in 2018 resulteerde in een methyleenblauwadsorptie van $0,16 \%$ (m/m) [SGS INTRON rapport A101790/R20180428c d.d. 7-12-2018]. Deze waarde ligt ruim onder de eis van $<1,2 \%$ (m/m) in BRL 1804.

3.1.2 Korrelverdeling

De korrelverdeling van de 3 onderzochte AEC-vulstoffen, evenals die van het CEM I 52,5 N en kalksteenmeel toegepast bij de productie van de betontegels, gemeten met lasergranulometrie is grafisch weergegeven in bijlage D. De kenmerkende korrelafmetingen zijn getoond in tabel 2.

Tabel 2. Kenmerken korrelverdeling

Korrel eigenschap	AEC-1	AEC-2	AEC-3	Kalksteenmeel	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

Uit tabel 2 blijkt dat het monster AEC-3 een enigszins fijnere maling heeft dan de beide andere onderzochte monsters AEC-vulstof, die nagenoeg identiek zijn. De korrelverdeling van de 4 vulstoffen en het cement zijn vergelijkbaar. De korrelverdeling van de 3 AEC-vulstoffen voldoen aan de eisen gesteld in BRL 1804.

3.1.3 Elementaire samenstelling

De resultaten van de elementaire samenstelling bepaald met röntgenfluorescentie (XRF) zijn getoond in tabel 3. De variatie tussen de 3 monsters AEC-vulstoffen is zeer gering. De hoofdbestanddelen (uitgedrukt als oxiden) bestaan uit silicium, calcium, ijzer en aluminium (ca. 85% van het totaal). Het gehalte aan sulfaat ligt in lijn met de nat-chemische analyse.

3.1.4 Mineralogische samenstelling

De mineralogische samenstelling van de 3 onderzochte monsters AEC-vulstoffen is weergegeven in tabel 4. De röntgendiffractogrammen zijn getoond in bijlage E.

De monsters hebben eenzelfde mineralogische samenstelling, met slechts een geringe variatie in gehalten.

Ze bevatten allen een relatief grote hoeveelheid amorf materiaal (circa 66%). De mineralen die in hoofdzaak zijn aangetroffen, zijn kwarts (circa 14%), meliliet-type mineralen (circa 6%) en calciëet (circa 4%).

Tabel 3. Elementaire samenstelling (%(m/m) als oxiden)

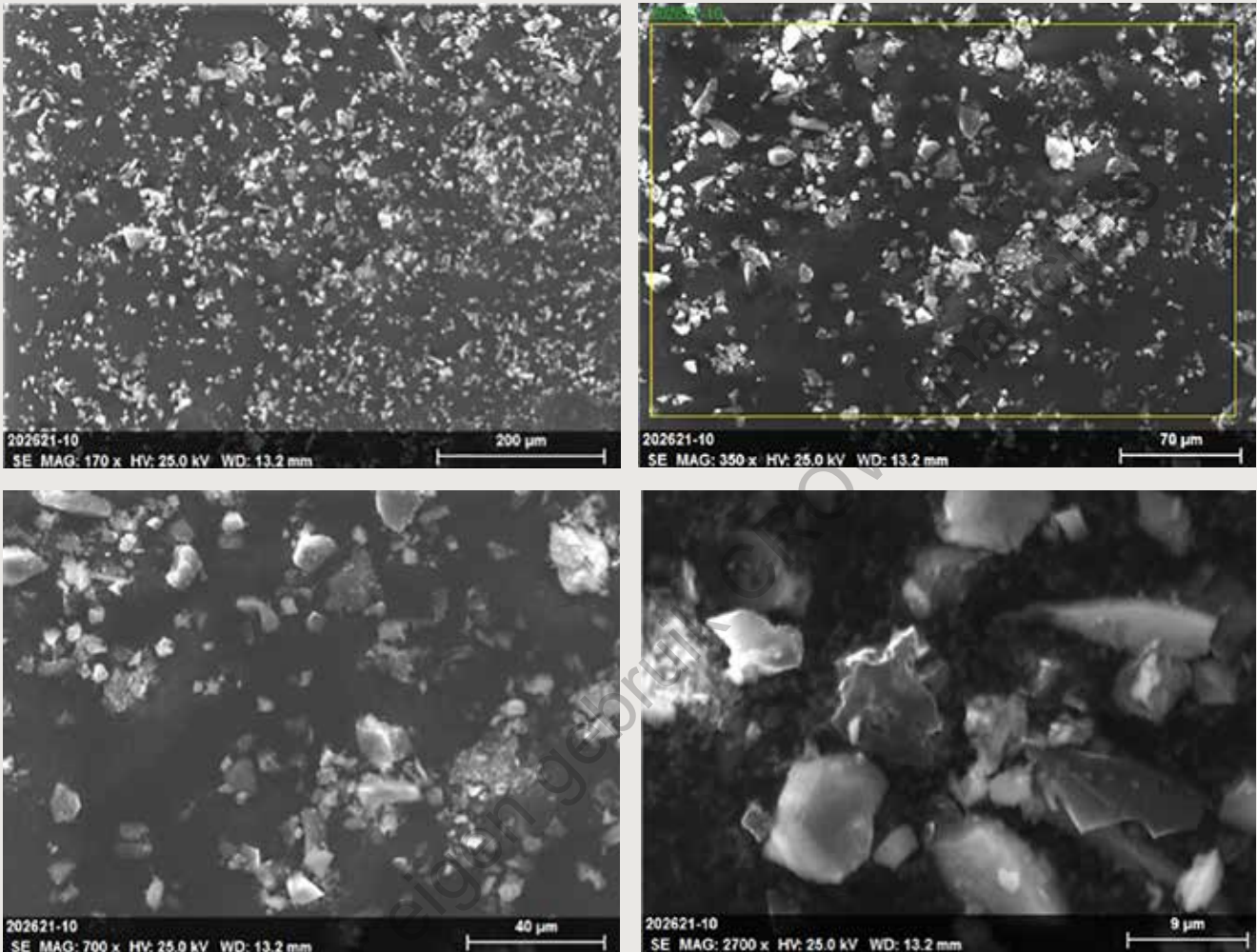
Element (als oxide)	AEC-1	AEC-2	AEC-3
Silicium als SiO ₂	50,07	47,61	50,46
Calcium als CaO	18,18	17,03	16,41
IJzer als Fe ₂ O ₃	7,90	11,04	10,59
Aluminium als Al ₂ O ₃	7,43	8,23	7,98
Natrium als Na ₂ O	4,13	4,13	3,94
Zwavel als SO ₃	2,69	1,60	1,64
Magnesium als MgO	2,39	2,42	2,02
Fosfor als P ₂ O ₅	1,10	1,23	0,94
Titaan 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
Koper als CuO	0,31	0,38	0,27
Mangaan als Mn ₃ O ₄	0,16	0,21	0,18
Lood als PbO	0,11	0,11	0,11
Chroom als Cr ₂ O ₃	0,10	0,11	0,09
Zirkoon 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
Nikkel als NiO	0,02	0,03	0,03
Vanadium als V ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01

Tabel 4. Mineralogische samenstelling (202621-1 = AEC-1; 202621-2 = AEC-2; 202621-3 = AEC-3)

Mineraal	Theoretische formule ²	202621-1	202621-2	202621-3
Silikaten				
Kwarts	SiO ₂	14,8	11,3	15,6
Cristobaliet	SiO ₂	0,2	0,2	0,1
Alkaliveldspaat	(Na,K)AlSi ₃ O ₈	0,6	0,5	0,9
Plagioklaas/Albiet	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	1,0	1,1	1,1
Meliliet-type mineralen	(Ca,Na)(Al,Mg,Fe)(Si,Al) ₂ O ₇	5,0	6,5	5,9
Petedunniet	Ca(Zn,Mn,Fe,Mg)Si ₂ O ₆	1,2	1,7	2,0
C ₂ S*, Lamiet	Ca ₂ SiO ₄	1,2	0,1	0,5
Muscoviet/Mica	(K,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ .(H ₂ O)]	1,2	0,9	1,1
Carbonaten				
Calciet	CaCO ₃	4,5	4,8	3,1
Sulfaten				
Bassaniet	CaSO ₄ • 1/2H ₂ O	0,6	0,7	1,1
Anhydriet	CaSO ₄	0,3	0,1	0,1
Oxiden/Hydroxiden				
Magnetiet	Fe ₃ O ₄	1,6	2,4	2,2
Hemaliet	Fe ₂ O ₃	0,8	1,0	0,7
Periklaas	MgO	0,2	0,1	0,1
Wuestiet	FeO	0,5	0,9	1,0
Rutiel	TiO ₂	0,3	2,1	0,1
Fosfaten				
Apatiet	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)	0,8	0,9	0,5
Andere/Amorf		66,3	66,6	65,8

3.1.5. Microstructuur en samenstelling

Met de scanningelektronenmicroscop (SEM) is de morfologie en de gemiddelde samenstelling van de AEC-deeltjes nader bekeken. De verkregen resultaten zijn in detail weergegeven in bijlage F. Hieruit blijkt dat de 3 onderzochte monsters AEC-vulstoffen veel gelijkheid vertonen zowel in morfologie als in gemiddelde samenstelling. Figuur 1 geeft een indruk van de typische korrelvorm en -grootte.



Figuur 1. Typische korrelvorm en -grootte voor de 3 AEC-vulstoffen

3.1.6 Conclusies karakterisering

Ondanks de verschillende herkomst van de AEC-bodemas als uitgangsmateriaal voor het maalproces, vertonen de daarmee geproduceerde AEC-vulstoffen slechts een geringe variatie in de onderzochte eigenschappen met uitzondering van het TOC-gehalte, waarvan de variatie bewust zo gekozen is.

AEC-vulstof bestaat voor circa 2/3 deel uit amorf materiaal. De minerale bestanddelen betreffen voornamelijk kwarts, een meliliet-type silicaat en calciëet.

Uit de chemische en mineralogische analyses zijn geen bestanddelen (in dusdanige hoeveelheden) naar voren gekomen die een belemmering zouden kunnen vormen voor de toepassing van deze AEC-vulstoffen in beton.

3.2 Pasta- en mortelproeven

3.2.1 Pastaproeven

De resultaten van de pastaproeven, waarbij 25 %m/m van het cement is vervangen door de vulstof, zijn samengevat in tabel 5.

Tabel 5. Resultaten pastaproeven

Eigenschap	REF	KSM	AEC-1	AEC-2	AEC-3
Waterbehoefte (%(m/m))	27,2	26,0	31,6	29,0	30,4
Begin binding (min)	110	120	230	175	125
verschil t.o.v. REF		+10	+120	+65	+15
Einde binding (min)	150	190	310	265	200
verschil t.o.v. REF		+40	+160	+115	+50
Vormhoudendheid (mm)	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5
Autoclaaf:					
watergehalte (%(m/m))	24,9	23,5	28,8	26,9	27,5
gem. expansie (%)	0,031	0,015	0,055	0,044	0,051

Uit deze tabel blijkt dat de AEC-vulstoffen een hogere waterbehoefte en een vertraging van de bindtijden van de pasta's veroorzaken. Een hoger watergehalte en een gedeeltelijke vervanging van het cement resulteert meestal in een tragere binding (grotere afstand van de cementkorrels). De vertragende werking van AEC-vulstof lijkt echter ook gerelateerd te zijn aan het TOC-gehalte ervan. De vertragende werking neemt af in de volgorde AEC-1 (5,8%) → AEC-2 (2,0%) → AEC-3 (0,69%). De vulstof AEC-3 heeft een vergelijkbare bindtijd als pasta met kalksteenmeel (KSM). De 3 AEC-vulstoffen voldoen aan de eis gesteld in BRL 1804 (maximale vertraging begin binding van 120 minuten), waarbij AEC-1 precies op deze eis ligt.

De vormhoudendheid (Le Chatelier) is van alle 5 pasta's uitstekend, er is nauwelijks of geen expansie.

De autoclaafexpansie is voor de pasta's met AEC-vulstof hoger dan die van de beide referentie-pasta's, maar voldoet nog ruimschoots aan de betreffende eis in ASTM C1157-20 (<0,80%) en BRL 1804 (<0,40%).

3.2.2 Mortelproeven: sterkte-ontwikkeling

De in het mortelonderzoek toegepaste cement en kalksteenmeel (KSM) is dezelfde als die bij de productie van de betontegels is gebruikt. De mortelsamenstelling is conform NEN-EN 196-1, waarbij 25 %m/m van het cement is vervangen door betreffende vulstoffen. De resultaten van het mortelonderzoek zijn samengevat in tabel 6.

Uit deze tabel blijkt dat de plastische mortelspecies met AEC-vulstoffen een zeer hoog luchtgehalte vertonen en daardoor een lage dichtheid bezitten. De grote verschillen in dichtheid van de verharde mortels wordt nagenoeg volledig veroorzaakt door het verschil in luchtgehalte. Het verschil in dichtheid tussen kalksteenmeel en AEC-vulstof (respectievelijk 2,7 en 2,5 kg/dm³) resulteert in een verschil van maximaal 10 kg/m³ in de dichtheid van de verharde mortels. Door dit verschil in luchtgehalte liggen de druksterkten van de mortels met AEC-vulstoffen op een relatief laag niveau (60-80% van de referentiemortel). Indien we echter corrigeren voor het verschil in luchtgehalte (onderste rij in tabel 6) dan bedraagt de 28 daagse druksterkte van de 3 mortels met AEC-vulstof circa 90% van de referentiemortel, terwijl die van de mortel met kalksteenmeel slechts circa 70% daarvan is. Dit duidt op een additionele bijdrage van de AEC-vulstoffen in de sterkte-opbouw van de mortel.

Bij toepassing van de AEC-vulstoffen in aardvochtige betonspecies blijkt er geen verhoging van het luchtgehalte op te treden (zie paragraaf 3.3). De oorzaak van het verhoogde luchtgehalte in de plastische mortelspecies met AEC-vulstoffen is nader onderzocht met een 'schuimproef' (zie bijlage G). Door het mengen (krachtig roeren met een glasstaaf) van de AEC-vulstof met water ontstaat er een laagje met luchtbelletjes op het water. Er zijn dus blijkbaar oppervlakte-actieve bestanddelen in de AEC-vulstof aanwezig.

Deze luchtbelletjes kunnen niet zijn ontstaan door waterstofgasvorming uit metallisch aluminium, omdat geen metallisch aluminium is gemeten bij de karakterisering van de AEC-vulstoffen en tevens geen alkalisch milieu aanwezig is in deze schuimproef (demiwater: neutrale pH).

Tabel 6. Resultaten mortelonderzoek

Eigenschap	Referentie	KSM	AEC-1	AEC-2	AEC-3
Mortelspecies:					
dichtheid (kg/m ³)	2.219	2.229	2.058	2.041	2.149
luchtgehalte (%V/V)	4,0	2,9	10,0	11,5	6,8
Druksterkte (MPa):					
7 dagen	49,8 (100%)	35,9 (72%)	30,5 (61%)	28,7 (58%)	38,4 (77%)
28 dagen	66,2 (100%)	47,7 (72%)	40,7 (61%)	38,8 (59%)	49,2 (74%)
90 dagen	71,4 (100%)	54,3 (76%)	48,4 (68%)	45,4 (64%)	57,7 (81%)
Buigtreksterkte (MPa):					
7 dagen	7,7 (100%)	6,2 (81%)	5,2 (68%)	4,9 (64%)	5,8 (75%)
28 dagen	8,6 (100%)	7,8 (91%)	6,1 (71%)	6,0 (70%)	6,6 (77%)
Dichtheid (kg/m ³):					
7 dagen	2.264	2.261	2.075	2.075	2.171
28 dagen	2.294	2.280	2.089	2.103	2.189
Druksterkte 28d (MPa) bij correctie naar 4% lucht (1% lucht = 5% sterkte)	66,2 (100%)	45,1 (68%)	58,1 (88%)	62,1 (94%)	57,2 (86%)

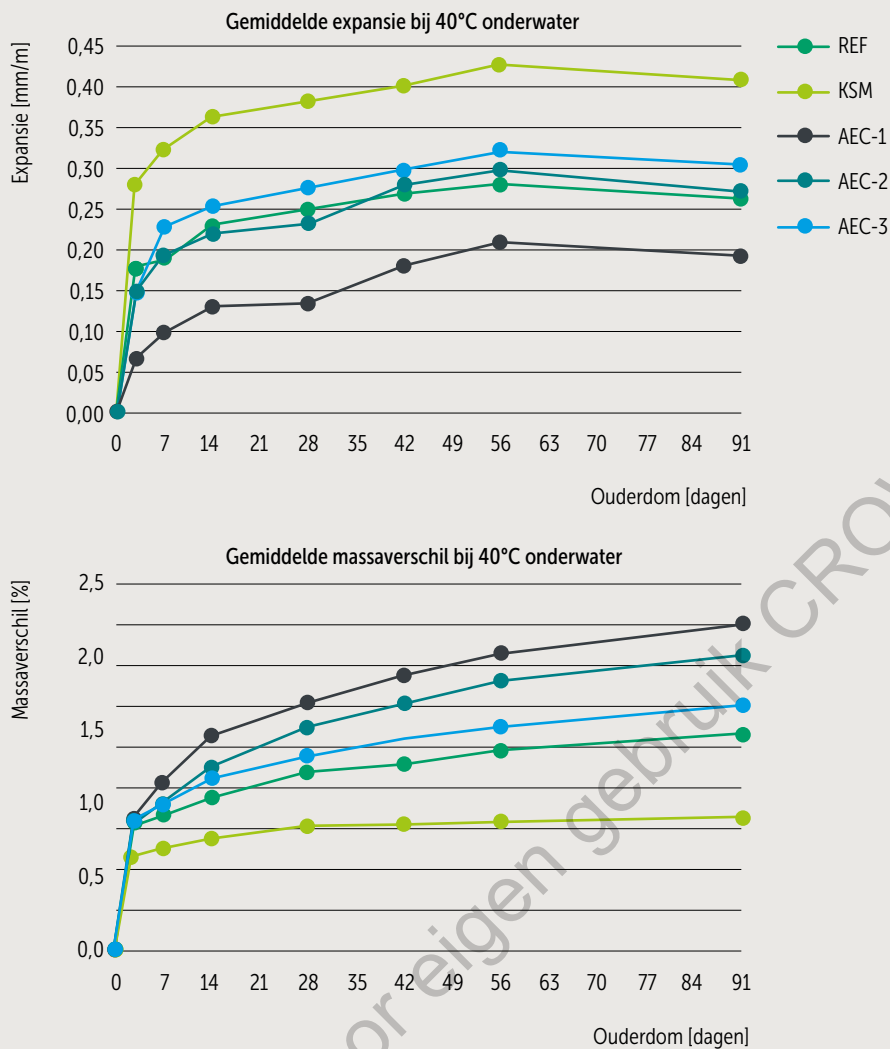
3.2.3 Mortelproeven: expansie in water van 40°C

Voor deze expansieproef zijn per mengsel 3 prisma's (40 x 40 x 160 mm) aangemaakt conform NEN-EN 196-1 bij 20°C. Bij de mengsels met vulstof is 25 % (m/m) van het cement vervangen door de betreffende vulstof. Na aanmaak zijn de prisma's 23,5 uur afgedekt met een glasplaat en vervolgens uit de mal genomen voor preparatie van de meetpunten. Hierbij is zorg gedragen dat de prisma's niet kunnen uitdrogen. De eerste lengtemeting (0 meting) is op 24 uur na aanmaak bij 20°C uitgevoerd en rekenkundig gecorrigeerd naar 40°C met een uitzettingscoëfficiënt van $13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Vervolgens zijn de prisma's onderwater opgeslagen bij 40°C voor de overige lengtemetingen. Naast de lengte is ook de massa van elke prisma gemeten. De gemiddelde expansie en massatoename van de onderzochte mengsels zijn weergegeven in figuur 2.

De expansie neemt na circa 6 weken niet of nauwelijks meer toe en ligt voor de mengsels met AEC-vulstof op het niveau van het referentiemengsel zonder vulstof, zodat mag worden geconcludeerd dat er geen expansiemechanismen (meer) actief zijn.

De expansie en de door waterabsorptie veroorzaakte massatoename van de mortels met AEC-vulstoffen is vergelijkbaar met die van de referentiemortel zonder vulstof (REF). Het gemeten expansieniveau van 0,2-0,3% is ruimschoots lager dan de eis aan mortelprisma's in de UAMBT-test (<1,0‰).

Omdat ook de Le Chatelier proef en de autoclaaftest geen relevante expansieniveaus vertoonden, mag worden gesteld dat de onderzochte AEC-vulstoffen geen aanleiding kunnen geven tot destructieve expansiemechanismen.



Figuur 2. Expansie (boven) en massatoename (onder)

Opvallend is dat de mortel met kalksteenmeel (KSM) een beduidend hogere expansie en een lagere massatoename vertoont. Dit zou betekenen dat betreffende kalksteenmeel een expansief bestanddeel bevat. De gemeten expansie valt binnen voorgenoemde eisen en heeft niet geleid tot scheurvorming.

3.2.4 Mortelproeven: invloed AEC-vulstof op ASR

De invloed van AEC-vulstof op de alkali-silicareactie (ASR) is onderzocht met de zeer versnelde mortelbalk expansietest (UAMBT) in combinatie met niet-reactief en reactief toeslagmateriaal. De metingen zijn uitgevoerd aan de slanke proefstukken (25x25x285 mm) om een hoger expansieniveau te verkrijgen en daarmee de invloed duidelijker zichtbaar te maken. De verkregen resultaten zijn samengevat in tabel 7.

Tabel 7. Invloed AEC-vulstof op ASR

Bindmiddel	Toeslagmateriaal	Expansie (%)
100% CEM I 52,5 R	niet-reactief	2,2
100% CEM I 52,5 R	reactief	4,2
75% CEM I 52,5 R + 25% AEC-3	niet-reactief	0,4
75% CEM I 52,5 R + 25% AEC-3	reactief	4,5
75% CEM I 52,5 R + 25% AEC-1	reactief	3,7
75% CEM I 52,5 R + 25% AEC-2	reactief	3,7

Het toegepaste reactieve toeslagmateriaal, boriumsilicaatglas, blijkt de expansie met ongeveer een factor 2 te vergroten. In combinatie met het niet-reactieve toeslagmateriaal resulteert de AEC-vulstof wel in een beduidend lagere expansie. Hiervoor is geen duidelijke verklaring. In combinatie met het reactieve toeslagmateriaal blijken de AEC-vulstoffen geen relevante invloed op de ASR-expansie te hebben (ongeveer dezelfde expansie als het referentiemengsel). Dit betekent dat op basis van deze proeven aan de AEC-vulstof geen remmende werking op ASR kan worden toegekend.

3.3 Betononderzoek 1e leven

3.3.1. Samenstelling betontegels

De samenstelling van de betontegels vervaardigd bij een betonfabriek te Drachten zijn weer-gegeven in tabel 8.

Tabel 8. Samenstelling (kg/m³)¹⁾ vervaardigde betontegels

Component	REF	KSM	AEC-1	AEC-2	AEC-3
CEM I 52,5 N	289	219	218	219	219
Vulstof	0	79	73	73	73
Water (effectief)	80	89	106	106	105
Absorptiewater (in toeslagmateriaal)	11	11	11	11	11
Zand 0-2	791	791	801	794	790
Graniet 2-8	1.154	1.154	1.152	1.177	1.157
'Wbf' (effectief)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36

1) Exclusief circa 5% V/V lucht

3.3.2 Mechanische eigenschappen

Van de 5 series betontegels zijn de volumieke massa, de voortplantingssnelheid van ultrasone geluidsgolven en de buigtreksterkte op een ouderdom van 28 dagen bepaald. Aanvullend is de druksterkte op een ouderdom van 90 dagen bepaald aan gezaagde proefstukken uit de betontegels.

De verkregen resultaten zijn samengevat in tabel 9. Als aanvullende informatie is in deze tabel tevens de effectieve water-'bindmiddel' factor ('wbf') opgenomen, waarbij de vulstoffen ondanks dat ze een type I vulstof zijn toch zijn beschouwd als onderdeel van het 'bindmiddel'.

Tabel 9. Mechanische eigenschappen betontegels

Eigenschap	REF	KSM	AEC-1	AEC-2	AEC-3
'Wbf' (effectief)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36
Volumieke massa (kg/m ³)	2.180	2.210	2.280	2.260	2.270
Ultrasone snelheid (km/s)	3,98	4,07	4,17	4,10	4,06
Berekende dyn. E-modulus (GPa) ¹⁾	31,0	32,9	35,7	34,2	33,7
Buigtreksterkte (MPa)	5,6	5,6	8,5	7,3	7,6
Volumieke massa (kg/m ³)	2.260	n.b.	2.280	2.290	2.290
Druksterkte (MPa)	31,7	n.b.	53,9	51,8	53,6
Verhouding buigtrek/druksterkte(%)	18	n.b.	16	14	14

1) Berekend met $E_{dyn} = 0,9\rho v^2$ (aanname Poisson's ratio = 0,2)

De sterkte van de betontegels met AEC-vulstoffen ligt ondanks de hogere 'wbf' (0,36 versus 0,28 voor REF en 0,30 voor KSM) ruim boven die van beide referenties. Dit kan mede worden toegeschreven aan de betere verdichting, zoals blijkt uit de gemeten volumieke massa van de betontegels, die het gevolg is van de betere verdichtbaarheid van de betonmengsels met AEC-vulstoffen. De druk- en buigtreksterkte van de (plastische) mortels met AEC-vulstoffen liggen beduidend onder het niveau van de referentiemortel (zie tabel 6), hetgeen grotendeels is toe te schrijven aan het verhoogde luchtgehalte in die mortels met AEC-vulstoffen. Echter in aardvochtige beton, het toepassingsgebied van de beoogde CROW-CUR Aanbeveling, is geen sprake van een verhoogd luchtgehalte door de AEC-vulstoffen, eerder het tegenovergestelde (zie volumieke massa's in tabel 9).

Verder valt op dat de druksterkte van het referentiebeton (REF) circa 60% bedraagt van die van de betontegels met AEC-vulstof, terwijl dat percentage voor de buigtreksterkte circa 70% bedraagt. Dit kan niet worden verklaard uit de spreiding in de individuele meetresultaten.

De volumieke massa van de druksterkte proefstukken van het referentiebeton (REF) ligt 80 kg/m³ hoger dan die van de proefstukken voor de buigtreksterkte (2.260 versus 2.180 kg/m³). Dit is het gevolg van de waterabsorptie van circa 4 %(m/m) (zie paragraaf 3.3.4) die optreedt tijdens de in NEN-EN 12504-1 voorgeschreven conditionering van 48 uur onder water voor de druksterkte proefstukken. De proefstukken met AEC-vulstof absorberen tijdens die conditionering slechts 0,7 %(m/m) (zie paragraaf 3.3.4), hetgeen overeenkomt met een toename in volumieke massa van circa 16 kg/m³. Dit ligt in lijn met de volumieke massa's getoond in tabel 9 voor de betontegels met AEC-vulstof.

3.3.3 Vorstdooizoutbestandheid

De vorstdooizoutbestandheid is bepaald op een ouderdom van de proefstukken van 28 dagen. De verkregen resultaten zijn weergegeven in tabel 10. In deze tabel is de water-'bindmiddel' factor van het betonmengsel en het TOC-gehalte van de AEC-vulstoffen als aanvullende informatie opgenomen.

Tabel 10. Vorstdooizoutbestandheid

Eigenschap	REF	KSM	AEC-1	AEC-2	AEC-3	Eis NEN-EN 1339
Afschilfering na 14 cycli (kg/m ²):						
proefstuk 1	0,002	0,013	0,009	1,30	1,21	≤1,5
proefstuk 2	0,017	0,010	0,042	0,79	1,40	≤1,5
proefstuk 3	0,007	0,009	0,053	0,10	1,31	≤1,5
gemiddeld	0,01	0,01	0,03	0,73	1,3	≤1,0
'Wbf' (effectief)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36	-
TOC vulstof (%m/m)	-	-	5,8	2,0	0,69	-

De substantieel hogere wbf van de betonmengsels met de 3 AEC-vulstoffen resulteert wel in een hogere mate van afschilfering bij de vorstdooizoutproef. De zeer geringe afschilfering van REF en KSM is het gevolg van de lage effectieve wbf.

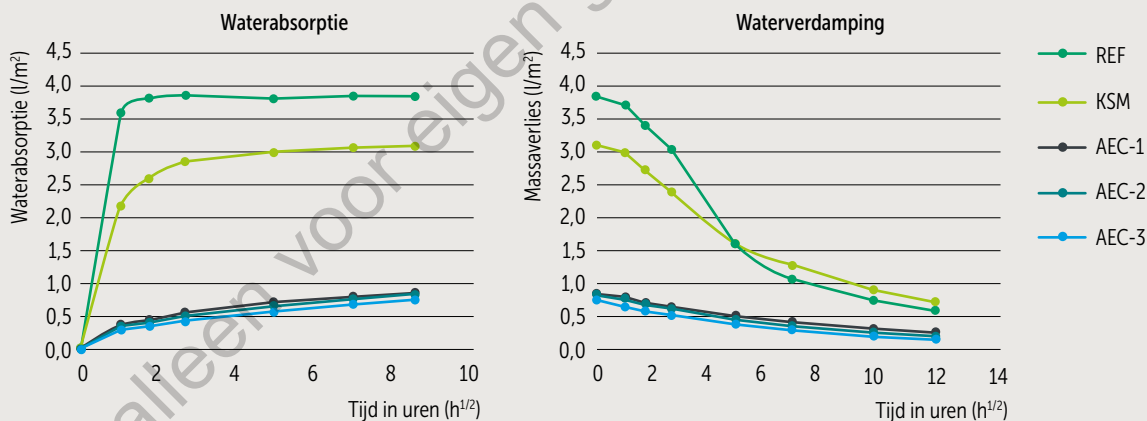
De 3 betonmengsels met AEC-vulstof vertonen, ondanks eenzelfde wbf, onderling een sterk verschil in bestandheid tegen vorstdooizoutbelastingen. De afschilfering van het betonmengsel met vulstof AEC-1 ligt op hetzelfde niveau als REF en KSM, terwijl beide andere mengsels met AEC-vulstof daar ruim boven liggen. Bekend is dat het TOC-gehalte van kalksteenmeel van invloed is op de vorstdooi(zout)bestandheid van daarmee vervaardigd beton, waardoor er een eis is gesteld aan de maximale waarde ervan. Voor AEC-vulstof blijkt die invloed van het TOC-gehalte niet te gelden, eerder het omgekeerde: hoe hoger het TOC-gehalte, des te geringer de mate van afschilfering.

3.3.4 Waterabsorptie en uitdroging

Om de verkregen resultaten van de weerstand tegen vorstdooizoutbelasting beter te kunnen begrijpen, zijn aanvullend op het oorspronkelijk onderzoeksprogramma, capillaire waterabsorptie- en uitdrogingsproeven gedaan. Betontegels tot dan toe opgeslagen op pallets zijn afzonderlijk op laboratoriumtafels gelegd en gedurende 1 maand uitgedroogd bij 20°C en circa 50%RV. De proefstukken zijn dan circa 4 maanden oud.

De capillaire waterabsorptie is gedurende 72 uur gemeten aan de bovenzijde van de betontegels (= bekistingsvlak). Na de absorptieproef is het massaverlies door droging bij 20°C en circa 50%RV gedurende 144 uur bepaald. De resultaten zijn in figuur 3 weergegeven.

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.



Figuur 3. Waterabsorptie (links) en uitdroging (rechts)

3.3.5 Conclusies betononderzoek 1e leven

Met de AEC-vulstoffen als gedeeltelijke cementvervanger kunnen aardvochtige betonproducten worden vervaardigd met een goede (buig)trek- en druksterkte, zelfs hoger dan die van het referentiebeton. De vorstdooizoutbestandheid van het beton met AEC-vulstoffen varieert sterk: van zeer hoog tot een niveau dat minimaal vereist wordt in betreffende productnorm (NEN-EN 1339). Deze variatie kan niet verklaard worden door de waterabsorptie en/of de effectieve water-'bindmiddel'-factor van het betreffende beton. De hogere TOC-gehalten in AEC-vulstof hebben geen nadelig effect op de vorstdooizoutbestandheid van het beton met deze AEC-vulstoffen.

3.4 Circulariteit

Op basis van de verkregen resultaten in het hierboven omschreven onderzoek heeft de CROW-werkgroep vulstof AEC-3 en daarmee vervaardigde betontegels gekozen voor het onderhavige circulariteitsonderzoek.

3.4.1 Betontechnologisch: betongranulaat

Betontegels zonder vulstof (REF), met kalksteenmeel (KSM) en met de geselecteerde AEC-vulstof (AEC-3) zijn na 2 maanden versneld hydrateren bij 40°C verkleind met een kaakbreker, waarbij vervolgens de fractie 4-22 mm droog is uitgezeefd.

Karakterisering betongranulaten 4-22 mm

De resultaten van de karakterisering van de op deze wijze vervaardigde 3 betongranulaten zijn weergegeven in tabel 11.

Tabel 11. Eigenschappen betongranulaten

Eigenschap	REF	KSM	AEC-3
Korrelverdeling (%m/m) (natte zeving)			
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
Korrel dichtheid (ρ_{rd} ; kg/dm ³)	2,23	2,23	2,23
Waterabsorptie 24h (%m/m)	6,4	6,4	6,0

Uit de natte zeving blijkt dat de monsters REF en KSM nog een substantiële hoeveelheid 2-4 mm fractie te bevatten. Deze fracties <4 mm zijn door natte zeving verwijderd in de monsters die zijn gebruikt voor de bepaling van de korrel dichtheid en de waterabsorptie.

De korrel dichtheid van de 3 betongranulaten zijn hetzelfde. De waterabsorptie van het monster betongranulaat AEC-3 is enigszins lager dan die van de monsters REF en KSM.

Onderzoek 2^e leven beton

Met bovengenoemde 3 monsters betongranulaat als grof toeslagmateriaal zijn betonmengsels vervaardigd met de samenstelling zoals getoond in tabel 12. Van deze betonmengsels zijn een aantal eigenschappen bepaald zoals weergegeven in die tabel.

Tabel 12. Samenstelling en eigenschappen 2^e leven beton

Eigenschap	Betongranulaat REF	Betongranulaat KSM	Betongranulaat AEC-3
Betonsamenstelling (kg/m³):			
CEM I 42,5 N	320	320	320
Water effectief	160	160	160
Absorptiewater	70	70	66
Betongranulaat 4-22 mm	1.049	1.049	1.049
Rivierzand 0-4 mm	666	666	666
Specie eigenschappen			
Zetmaat (mm)	110	120	130
Schudmaat (mm)	400	390	420
Temperatuur (°C)	19,3	19,0	18,8
Luchtgehalte (%V/V)	1,8	1,8	1,9
Volumieke massa (kg/m ³)	2.235	2.255	2.245
Eigenschappen verhard beton			
Kubusdruksterkte (MPa) na:			
7 dagen	36,5	34,1	36,0
28 dagen	42,4	42,8	44,0
Volumieke massa (kg/m ³) na:			
7 dagen	2.290	2.290	2.280
28 dagen	2.290	2.280	2.290
Maximale waterindringing (mm)	24	25	13
Chloridemigratiecoëfficiënt ($\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	22,0	21,6	15,7

Uit de verkregen resultaten blijkt dat de druksterkte van het beton vervaardigd met de 3 betongranulaten vergelijkbaar is. Deze ligt tevens op een vergelijkbaar niveau als het referentiebeton (met dezelfde effectieve wcf en cement) die in het CROW-project 'Nieuwe recyclingmethoden voor toeslagmaterialen' is gemeten na 28 dagen verhard (46,5 MPa).

De dichtheid (weerstand tegen indringing van water en chloride-ionen) van het beton met betongranulaat AEC-3 is beter dan die vervaardigd met de betongranulaten REF en KSM. Ook hier sluiten de resultaten goed aan bij die verkregen in het voorgenoemde CROW-project.

Ondanks de beperkte omvang van dit onderzoek is de conclusie gerechtvaardigd dat de beton-technologische kwaliteit van betongranulaat met AEC-vulstoffen vergelijkbaar is met die van regulier betongranulaat en daarmee geen beperking vormt voor een 2^e leven toepassing.

3.4.2 Betontechnologisch: vulstof

Er zijn cementpasta's aangemaakt met 100% CEM I 52,5N (REF), 75% CEM I 52,5N + 25% kalksteenmeel (KSM) en 75% CEM I 52,5N + 25% AEC-vulstof AEC-3. De wbf van de 3 vervaardigde pasta's bedraagt 0,35. Deze 3 cementpasta's zijn versneld gehydrateerd gedurende 2 maanden onder

water van 40°C. De verharde proefstukken zijn gebroken in een laboratorium kaakbreker, gedroogd bij 110°C en vervolgens gedurende 20 minuten gemalen in een kogelmolen. De korrelverdeling van deze 3 vervaardigde '2^e leven' vulstoffen zijn getoond in tabel 13. De invloed van deze vulstoffen op de bindtijd, vormvastheid en sterkte-ontwikkeling bij 25 %(m/m) cementvervanging (CEM I 52,5N) is eveneens weergegeven in deze tabel.

Tabel 13. Eigenschappen 2^e leven vulstoffen

Eigenschap	Cement	REF	KSM	AEC-3	Eis BRL 1804
Korrelverdeling zeefrest (%m/m):					
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
fractie<63 µm	-	77	73	78	-
	100% cement	bij 25 %(m/m) cementvervanging			
Waterbehoefte (%m/m)	24,2	28,6	29,0	29,0	-
Beginbinding (min)	140	190	195	220	-
Vershil met cement	-	+50	+55	+80	<120
Eindebinding (min)	170	240	235	260	-
Vershil met cement	-	+70	+65	+90	<120
Vormvastheid (mm)	0,0	0,5	0,5	0,0	<10
Druksterkte (MPa) na:					
7 dagen	39,8	35,0	32,3	31,9	-
28 dagen	47,7 (100%)	41,7 (87%)	38,5 (81%)	40,6 (85%)	>65%
Buigtreksterkte (MPa) na:					
7 dagen	6,8	6,3	5,8	5,5	-
28 dagen	7,5 (100%)	6,8 (91%)	6,7 (89%)	6,5 (87%)	-
Volumieke massa (kg/m ³) na:					
7 dagen	2.260	2.200	2.200	2.210	-
28 dagen	2.238	2.201	2.181	2.200	-

Uit tabel 13 blijkt dat alle 3 de onderzochte '2^e leven' vulstoffen een vertraging van de bindtijd veroorzaken. Dit is inherent aan de 25%m/m vervanging van het cement en daaraan gerelateerde hogere wcf. De AEC-3 '2^e leven' vulstof geeft een enigszins sterkere vertraging dan beide referentievulstoffen, maar ligt nog steeds ruim binnen de gestelde eis hieraan.

De vormvastheid (Le Chatelier test) is voor alle 3 de onderzochte '2^e leven' vulstoffen uitstekend. Dat geldt ook voor de invloed op de druksterkte-ontwikkeling. Die voldoet ook ruimschoots aan de gestelde eis.

Op basis van deze resultaten mag geconcludeerd worden dat er geen beperkingen zijn voor hergebruik van de poederfractie die vrijkomt bij recycling van 1^e leven beton met AEC-vulstoffen.

3.4.3 Milieuhygienisch

Enkele betontegels zonder vulstof (REF) en met de vulstof AEC-3, vervaardigd voor het onderzoek 1^e leven, zijn na 28 dagen verhardend bij 20°C (ingepakt in plastic folie = eigen vochtgehalte; geen contact met water) gebroken tot <4 mm. Aan deze beide verkleinde monsters is de uitloging met

de kolomproef gemeten. De verkregen resultaten staan samengevat in tabel 14, waarin tevens de eisen uit het Besluit Bodemkwaliteit (BBK) voor niet-vormgegeven materialen zijn aangegeven.

Tabel 14. Uitloging (kolomproef) gebroken betontegels REF en AEC-3

Component	Cumulatieve uitloging L/S 10 (mg/kg)		
	Betongranulaat REF	Betongranulaat AEC-3	Max. waarde BBK
pH	12,5-12,8	12,5-12,8	-
antimoon	<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
chromium	0,16	0,27	0,63
kobalt	<0,030	<0,030	0,54
koper	0,071	0,13	0,9
kwik	<0,00040	<0,00040	0,02
lood	<0,100	<0,100	2,3
molybdeen	0,037	0,071	1
nikkel	<0,050	<0,050	0,44
seleen	<0,0070	<0,0070	0,15
tin	<0,020	<0,020	0,4
vanadium	<0,20	<0,20	1,8
zink	<0,20	<0,20	4,5
fluoride	2,6	2,3	55
chloride	61	110	616
sulfaat	60	52	2.430
bromide	<0,80	<0,80	20

Uit deze tabel blijkt dat betongranulaat met AEC-3 wat betreft de componenten: barium, chromium, koper, molybdeen en chloride een hogere uitloging vertoont dan het betongranulaat zonder vulstof (REF). Deze uitloging voldoet in alle gevallen nog ruimschoots aan de eisen van het BBK.

Geconcludeerd mag worden dat de milieuhygiënische kwaliteit van betongranulaat met AEC-vulstoffen vergelijkbaar is met die van regulier betongranulaat. De componenten die een enigszins verhoogde uitloging geven, voldoen nog steeds ruimschoots aan de eisen van BBK.

4

Conclusies geschiktheid AEC-vulstof

Op basis van het uitgevoerde onderzoek kan worden geconcludeerd dat de door Blue Phoenix Group geproduceerde AEC-vulstof geschikt is om te worden toegepast in ongewapende, niet-constructieve betonproducten vervaardigd met droge of aardvochtige betonspecie. Tevens is aangetoond dat door toepassing van AEC-vulstof in dergelijke betonproducten, de materiaalstromen ontstaan door recycling van dat beton (betongranulaat en poederfractie) opnieuw als grondstof in een 2^e leven beton kunnen worden toegepast. Deze toepassing van AEC-vulstof is dus volledig circulair op de onderzochte aspecten.

5

CROW-CUR Aanbeveling

In BRL 1804 zijn generieke eisen opgenomen die gelden voor alle vulstoffen en dus ook voor AEC-vulstof. Deze eisen betreffen:

- Korrelverdeling
- Methyleenblauwadsorptie
- Alkaligehalte, uitgedrukt als Na₂O-equivalent
- Gehalte aan chloriden
- Gehalte aan sulfaten - SO₃
- Invloed op bindtijd
- Bepaling van vormhoudendheid
- Invloed op sterkteontwikkeling

Op basis van het uitgevoerde onderzoek dienen de volgende aspecten van AEC-vulstof nog specifiek geregeld te worden:

- Alkaligehalte:

Deze wordt meestal bepaald met XRF, hetgeen een totaalgehalte oplevert inclusief de alkaliën in glasdeeltjes. De alkaliën in glasdeeltjes komen pas vrij als het amorfe glas oplost in het alkalisch milieu van het beton. Dat zal nooit volledig zijn.

Indien het XRF-meetresultaat van het alkaligehalte de eis van 5,0 %(m/m) overschrijdt, leidt dit niet

direct tot afkeur, maar mag het alkaligehalte van de AEC-vulstof opnieuw worden bepaald met basische ontsluiting volgens NEN-EN 196-2 en vervolgens aan de gestelde eis worden getoetst.

■ TOC-gehalte:

Het TOC-gehalte van de AEC-vulstof blijkt geen nadelige invloed te hebben op de vorstdoizoutbestandheid van daarmee vervaardigd beton. Wel kan een hoger TOC-gehalte leiden tot een sterkere vertraging van de bindtijd van cement. Op basis van de resultaten verkregen in het uitgevoerde onderzoek dient daarom het TOC-gehalte van de AEC-vulstof te worden begrensd tot maximaal 6 %(m/m).

Omdat de invloed op de bindtijd een generieke eis betreft, is een extra borging van dit aspect aanwezig.

■ Metallisch Al+Zn:

Metallisch aluminium en zink kunnen in een alkalisch milieu leiden tot waterstofgasontwikkeling. Deze metalen kunnen in AEC-bodemas, de grondstof voor de productie van AEC-vulstof, in geringe gehalten aanwezig zijn. Door het productieproces (natte maling en het alkalisch milieu) en de hoge fijnheid van de AEC-vulstof zal het gehalte aan metallisch Al+Zn zeer gering zijn.

Daarom is er een strenge eis van maximaal 0,2 %(m/m) geformuleerd voor AEC-vulstof.

Deze eis is een factor 5 lager dan die voor AEC-granulaat, dat een 4 maal hogere dosering kent dan AEC-vulstof in beton. Dus een factor 20 strengere eis vergeleken met AEC-granulaat, dat al meerdere jaren grootschalig zonder problemen in betonstraatstenen en -tegels wordt toegepast.

Hoewel voor het chloridengehalte van vulstoffen in BRL 1804 geen eisen worden vermeld, omdat deze conform NEN 8005 aan de betonspecie worden gesteld, is besloten om als extra waarborg voor AEC-vulstof toch een eis in de CROW-CUR Aanbeveling op te nemen. Met de eis dat deze $\leq 1,0$ %(m/m) moet zijn bij een dosering van AEC-vulstof van maximaal 80 kg/m^3 beton (komt overeen met circa 25 %(m/m) op cement), zal het chloridengehalte van het daarmee vervaardigd betongranulaat $\leq 0,05$ %(m/m) zijn. Deze waarde komt overeen met de 'Richtlijn voor specificaties van recyclinggranulaten voor beton' van Betonhuis/BRBS.

N.B.: Bij een hogere dosering van AEC-vulstof in beton wordt de eis aan het chloridegehalte evenredig lager. Bij de maximaal toegestane dosering van 140 kg/m^3 wordt de eis voor het chloridegehalte: $<0,6$ %(m/m).

Overwogen zou kunnen worden om in de CROW-CUR Aanbeveling een opmerking te plaatsen dat de toepassing van AEC-vulstof in ongewapende betonproducten vervaardigd met aardvochtige betonspecie kan leiden tot een verhoogde gevoeligheid voor afschilfering bij vorstdoizoutbelasting. Echter, omdat dergelijke betonproducten in bijna alle gevallen een deklaag hebben waarin geen AEC-vulstof wordt toegepast, is dit niet relevant.

In dit nawoord wordt een aantal aspecten nader belicht die niet direct betrekking hebben op het uitgevoerde onderzoek en de doelstelling van dit rapport, maar die toch van belang zijn voor een goed begrip van de toepassing van AEC-vulstof in beton.

Het verschil tussen AEC-granulaat en AEC-vulstof wordt soms niet goed onderkend. Beide materialen hebben een verschillende functie in beton (respectievelijk toeslagmateriaal en vulstof) en hebben een duidelijk andere invloed op de eigenschappen van dat beton.

Vanwege het verbruik van Ca(OH)_2 wordt in de CROW-CUR Aanbeveling 128: 2021 de toepassing van AEC-vulstof beperkt tot 140 kg/m^3 beton. Bovenmatig verbruik van Ca(OH)_2 heeft tot gevolg dat op termijn door carbonatatie de CSH-gel wordt aangetast, waarbij een poreuze silicagel ontstaat. De weerstand van beton tegen vorst-dooiwisselingen neemt hierdoor sterk af.

Indien aan de in hoofdstuk 5 beschreven eis aan het chloridegehalte van de AEC-vulstof wordt voldaan, is er geen risico op chloride-geïnitieerde wapeningscorrosie door toepassing van AEC-vulstof houdend betongranulaat in een 2e leven beton.

Dat geldt ook voor de vorstdooi(zout)gevoeligheid van AEC-houdend betongranulaat. De gemeten afschilfering van de onderzochte betontegels met AEC-vulstof is vergelijkbaar of zelfs minder dan die van regulier beton waaruit traditionele betongranulaten worden geproduceerd.

Het uitgevoerde onderzoek aangevuld met bovengenoemde overwegingen laat zien dat AEC-houdend betongranulaat van vergelijkbare kwaliteit is als traditioneel betongranulaat en geschikt is voor toepassing als toeslagmateriaal in beton (2^e leven). Voor deze betongranulaten kan dezelfde regelgeving van toepassing zijn.

Omdat AEC-vulstof vanwege zijn puzzolane eigenschappen wezenlijk bijdraagt aan de sterkte-ontwikkeling, zal deze vulstof een substantiële hoeveelheid Ca(OH)_2 in het beton verbruiken. Daarom moet de AEC-vulstof worden meegenomen in de berekening van het minimum gehalte aan Portlandcementklinker in het bindmiddel. Aanbevolen wordt om het kalkbindend vermogen van AEC-vulstof vast te stellen.

Bijlage A Herkomst en representativiteit input materiaal proeven



CROW-Werkgroep: "AEC-vulstof als type 1 voor de toepassing in ongewapend beton" *Herkomst en representativiteit input materiaal proeven*

Datum: 03-03-2021

Inleiding

Ten behoeve van het onderzoeksprogramma voor CROW-CUR Aanbeveling 'AEC-vulstof in ongewapend aardvochtig beton', zijn door Blue Phoenix Group BPG drie monsters AEC-vulstof aan SGS Intron geleverd. In dit memo wordt nader ingegaan op de herkomst van de gebruikte grondstoffen (=AEC-bodemassen), het gehanteerde maalproces en de representativiteit van de grondstoffen en de geproduceerde vulstof.

Herkomst input materiaal voor productie van monsters AEC-vulstof

Op verzoek van de werkgroep is gekozen om monsters aan te leveren die representatief zijn voor de Nederlandse AEC-bodemassen. Aanvullend wil de werkgroep AEC-bodemassen zien waarin het aandeel sulfaat en TOC variëren; dit om de effecten van sulfaat/TOC bij toepassing in beton te kunnen beoordelen. BPG heeft bodemas gebruikt afkomstig van drie van de twaalf Nederlandse AEC-centrales: AVR Duiven, AVR Rozenburg en EEW Delfzijl. AVR Duiven vertoont hoge waarden voor sulfaat en TOC.

Door de 12 Nederlandse AEC-centrales wordt totaal ongeveer 1.900.000 T aan AEC-bodemassen geproduceerd. De bemonsterde drie installaties produceren ongeveer 600.000T aan AEC-bodemassen. Ze vertegenwoordigen ongeveer 30% van het totale volume en de centrales zijn geografisch verspreid over Nederland.

AEC-installaties & AEC-bodemassen:

- Proces beschrijving (CvD Grondstoffen & Milieu 21-02-2018)
 - AEC-bodemas ontstaat bij het verbranden van huishoudelijk afval en bedrijfsafvalstoffen (inclusief biomassa) in een afval-energiecentrale (AEC) of biomassa-energie centrale. De verbranding vindt plaats in een rooster- of wervelbedoven, waarbij de temperatuur in de verbrandingskamer minimaal 850°C bedraagt. Na het verbrandingsproces wordt de resterende bodemas in een waterbassin geblust, waarna deze in een tussendepot kan worden gebracht voordat een verdere bewerking plaatsvindt. Tijdens de opwerking ondergaat de ruwe bodemas diverse bewerkingsstappen, zoals zeven en het verwijderen van ferro-, en non-ferrometalen. AEC-ketelas kan onderdeel zijn van de AEC-bodemassen, in de meeste installaties wordt dit in de installatie samengevoegd. Ook bodemas uit een biomassa-energiecentrale kan onderdeel zijn van de AEC-bodemassen, deze bodemas wordt tijdens de opwerking gedoseerd toegevoegd.
- De AEC-bodemassen worden aansluitend gebroken naar een D_{max} van 40 mm; deze fractie is het input materiaal voor het productie proces tot AEC-vulstof.
- De AEC-installaties voldoen aan de IPPC richtlijnen (zie bijlage 1)
- AEC-installaties hebben een strikt inname beleid en controleren regelmatig het aangeleverde afval. Contractueel (klant - AEC verbrander) ligt vast over wat mag worden aangeleverd; Er worden regelmatig steekproeven gedaan, deze vrachten worden uitgestort over de vloer voor visuele inspectie.

- RIVM neemt jaarlijks monsters om de gemiddelde samenstelling van het Nederlandse afval te bepalen.
- De AEC-bodemassen voldoen aan de eisen die gesteld worden in de BRL2307-1. Dit kan zijn via partijkeuringen of via een proces certificaat.
- AEC-vliegassen worden gescheiden gehouden en zijn dus geen onderdeel van de AEC-bodemas.

BEC assen

Biomassa Energie Centrale (BEC) bodemassen: van de 12 AEC-centrales produceren alleen AVR Rozenburg, HVC Alkmaar en Twence BEC-bodemassen. De BEC-bodemassen van AVR Rozenburg en HVC Alkmaar worden bij de AEC-bodemassen bijgevoegd. HVC voegt alleen de grove fractie bij de AEC-bodemassen. Het gaat in totaal over ongeveer 7.000T aan BEC-bodemassen die AVR Rozenburg & HVC Alkmaar toevoegen aan ongeveer 600.000T AEC-bodemassen. Aan de overige 1.300.000T AEC-granulaten worden geen BEC-bodemassen toegevoegd. Verdere uitleg over BEC assen is gerapporteerd in de bijlage 2.

Monsternamen aangeleverde monsters.

De monsters zijn genomen door de laborant van Blue Phoenix, bij AVR samen met de betreffende functionaris van AVR.

De werkwijze is gelijk per locatie:

- Ruwe bodemas is genomen vanuit:
 - AVR Duiven: uit de ruwe bodemas voorraad direct achter de ontslakker.
 - AVR Rozenburg: uit de algemene opslag ruwe bodemas.
 - EEW: uit de algemene opslag ruwe bodemas te Wijster.
- Met een kraan en een vracht auto is een volume apart gelegd van ongeveer 30-50 T
- Deze 30-50 T ruwe AEC-bodemas is door de kraan gelijkmatig verdeeld, uitgespreid.
- Uit deze gespreide laag zijn met een kraan monsters genomen.
- Gelijkmatig verdeeld over de ruwe AEC-bodemas.
- De kraan heeft de monsters in ongeveer 5-10 Big-Bags van ongeveer 1 m³ gestopt.

Alle big bags zijn afgevoerd naar Blue Phoenix opwerk installatie te Rotterdam/Pernis waar ze zijn opgewerkt in de AEC-vulstof installatie.

Representativiteit van de genomen monsters

De uit deze monsters vervaardigde AEC-vulstof is chemisch geanalyseerd. De concentratie aan hoofdelementen kan worden gebruikt om de representativiteit van de bij de AEC's genomen monsters te beoordelen door deze te vergelijken met eerdere opgestuurde analyses en gegevens uit de literatuur.

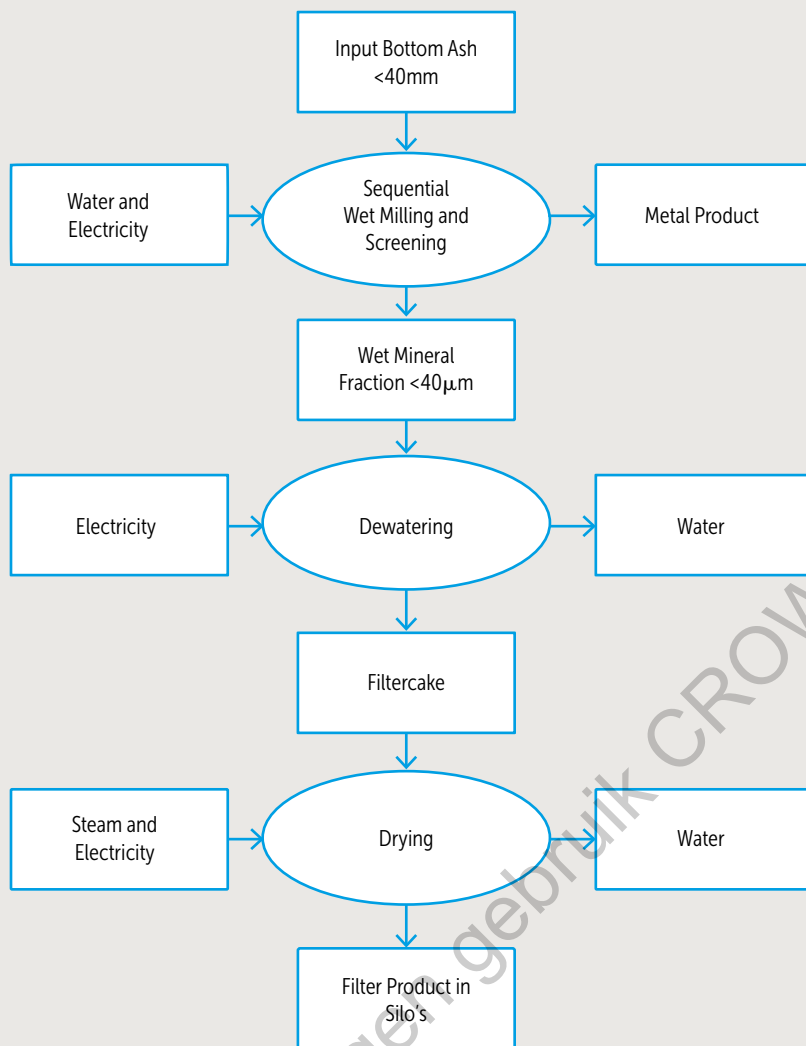
Aan de CROW-werkgroep zijn al eerder onderstaande representatieve analyses/rapporten toegestuurd, te weten:

- 1 Elementaire analyse van twee Nederlandse en één Engelse bodemassen (SGS 15-05-2020)
- 2 Karakterisering van één AEC bron uit drie verschillende perioden uit Nederland (SGS 13-11-2018)
- 3 Karakterisering van drie AEC bronnen geografisch verspreid over Nederland (SGS 03-12-2020)

In onderstaande tabel zijn alle metingen samengevat. Het geeft een representatief beeld van de kwaliteit van de bodemassen. Het is geografisch gespreid over Nederland, het is een representatief deel van het totale volume en het geeft van een en dezelfde bron het verloop aan gedurende een periode. Alle XRF metingen zijn op dezelfde wijze uitgevoerd.

Tabel 1. Chemische analyse AVI-bodemassen CROW aangeleverde monsters (%wt)

SGS reportage	AEC Filler EEW 13-11-2018			AEC Filler DVN 03-12-2020	AEC Filler RZB 03-12-2020	AEC Filler EEW 03-12-2020	AEC Filler UK 15-05-2020
	Sept. 2018	Okt. 2018	Nov. 2018				
Silicium als SiO ₂	49,61	50,25	46,22	50,07	47,61	50,46	43,92
Calcium als CaO	18,08	16,38	18,44	18,18	17,03	16,41	20,74
IJzer 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
Zwavel 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
Fosfor als P ₂ O ₅	1,08	1,01	1,18	1,10	1,23	0,94	1,06
Titaan 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
Chloride als Cl	0,77	0,59	0,72	-	-	-	-
Koper als CuO	0,28	0,31	0,35	0,31	0,38	0,27	0,31
Mangaan als MnO	0,16	0,23	0,19	-	-	-	0,29
Mangaan als Mn ₃ O ₄				0,16	0,21	0,18	-
Lood als PbO	0,12	0,13	0,14	0,11	0,11	0,11	0,12
Chroom als Cr ₂ O ₃	0,08	0,11	0,09	0,10	0,11	0,09	0,10
Zirkoon 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
Jodium als I				-	-	-	-
Nikkel als NiO				0,02	0,03	0,03	0,03
Vanadium als V ₂ O ₅				0,01	0,01	0,01	-



Opwerkproces tot AEC-vulstof

De ontvangen grondstoffen zijn gemalen in de pilot-installatie van BPG te Rotterdam. Het betreft een nat maal proces. Tijdens het proces is gestuurd op het bereiken van voldoende maalfijnheid en het verwijderen van storende stoffen zoals o.a. metallisch aluminium. Chloride, sulfaat en organisch stof (TOC) zijn niet verwijderd in het opwerkingsproces. Het behouden van de hoge gehalten was doel van deze proefproducties voor het onderzoek.

Conclusie

De AEC-bodemassen bestaan overwegend uit silicaten respectievelijk calcium oxides; Aangevuld met respectievelijk ijzer en aluminium oxides.

BEC assen worden zeer beperkt bijgevoegd. AVR Rozenburg bevat het hoogste aandeel BEC assen; AVR is onderdeel van het gehele R&D programma. BEC assen analyses zijn weergegeven in de bijlage 2.

Bijlage 1: IPPC Installatie

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



The screenshot shows the Infomil website page for IPPC installations. The page has a yellow header with the Infomil logo and navigation links. The main content area is white with a blue title 'IPPC-installaties'. Below the title is a paragraph explaining that IPPC installations are larger industrial enterprises subject to the Industrial Emissions Directive (2010/75/EU). A second paragraph states that the directive requires these enterprises to have an integrated permit based on the Best Available Techniques (BAT) conclusion. A third paragraph notes that permit holders must also consider specific BAT documents. To the right of the text is a photograph of an industrial facility with smokestacks. Below the text are three columns of links: 'Regelgeving' (Regulation), 'Vergunningverlening' (Permitting), and 'Informatie' (Information). A fourth column on the right is titled 'Hoe werkt het vanaf 2022?' (How it works from 2022) and features the 'Informatiepunt Leefomgeving' logo and a link to 'IPPC-installaties in Omgevingswet'.

Kenniscentrum InfoMil
Rijkswaterstaat
Historie en Rijkswater en Wiermas

Home Actueel Rijkswaterstaat **Onderwerpen** Helpdesk Zoeken

Home > Onderwerpen > Duurzaamheid, energie > IPPC-installaties

IPPC-installaties

IPPC-installaties zijn de grotere 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

- [BBTs 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

- [Nieuws](#)
- [Vraag en antwoord](#)
- [Checklist IPPC van BTO](#)
- [IPPC-advies en oplossingen en beleidskennlijn](#)

Hoe werkt het vanaf 2022?

Informatiepunt Leefomgeving

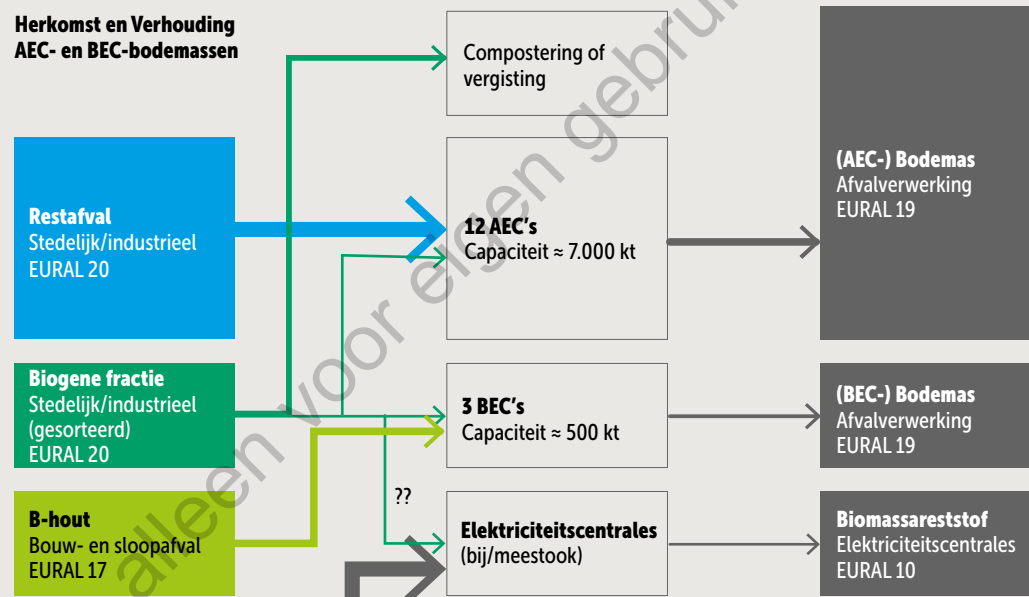
- [IPPC-installaties in Omgevingswet](#)

Bijlage 2: BEC assen

Binnen de werkgroep 'reststoffen' van de Vereniging Afvalbedrijven VA is de aanvraag van de CROW-werkgroep -informatie over 'BEC-assen'- besproken. Aansluitend is er overleg geweest met de drie producenten van BEC- assen in Nederland. Onderstaand informatie is tot stand gekomen na overleg tussen de 3 VA leden die zowel AEC-bodemassen als BEC-assen produceren.

De VA rapporteert over 2019 de tonnages (afgeronde getallen):

- AEC-bodemassen Nederland: 1.900.000 T
- AEC-bodemassen per locatie waar ook BEC-assen worden geproduceerd
 - AVR Rozenburg 350.000 T
 - HVC 240.000 T
 - Twence 150.000 T
- BEC-assen 15.700 T
 - AVR Rozenburg 5.500 T
 - HVC 1.250 T
 - Twence 9.000 T
- De BEC-assen van Twence worden niet gemengd met AEC-bodemassen;
- Samenvattend: 7.000T/Y (1,2%) wordt bijgemengd bij AEC-bodemassen.



Schematische weergave van de BEC-assen

Chemische analyses BEC-assen (AVR RZB)

Resultaten

Analyse	Eenheid	
XRF Elementaire samenstelling		WROXI
SiO ₂	%(m/m) d.s.	48,26
CaO	%(m/m) d.s.	20,53
Fe ₂ O ₃	%(m/m) d.s.	5,07
Al ₂ O ₃	%(m/m) d.s.	7,26
Na ₂ O	%(m/m) d.s.	1,85
SO ₃	%(m/m) d.s.	2,40
MgO	%(m/m) d.s.	2,39
P ₂ O ₅	%(m/m) d.s.	0,69
TiO ₂	%(m/m) d.s.	6,58
K ₂ O	%(m/m) d.s.	1,48
ZnO	%(m/m) d.s.	0,54
Cl	%(m/m) d.s.	-
CuO	%(m/m) d.s.	0,20
Mn ₃ O ₄	%(m/m) d.s.	0,24
PbO	%(m/m) d.s.	0,19
Cr ₂ O ₃	%(m/m) d.s.	0,11
ZrO ₂	%(m/m) d.s.	0,04
BaO	%(m/m) d.s.	0,86
SrO	%(m/m) d.s.	0,08
NiO	%(m/m) d.s.	0,02

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Bijlage B Gegevens XRD en XRF meetmethoden

XRD

Met kwantitatieve röntgendiffractometrie (XRD) is de mineralogische samenstelling van de 3 AEC-vulstoffen bepaald.

De bepaling is uitgevoerd op een Bruker D8 Advance diffractometer met Bragg-Brentano geometrie en een Lynxeye positiegevoelige detector. Cu $K\alpha$ straling 45kV 40 mA en een divergentiespleet V12 met een hoogte van 5 mm is gebruikt. Instelling detectie: LL 0.19 en W 0.06.

De 2θ scan is uitgevoerd tussen 10-110° met stapgrootte van 0,030° en een meettijd van 2 seconden per stap.

De verkregen data is verwerkt met Bruker software Diffrac.EVA versie 4.3.

XRF

Met röntgenfluorescentiespectroscopie is de elementsamenstelling van de 3 AEC-vulstoffen bepaald.

De bepaling is uitgevoerd op een Axios WD-XRF Panalytical met een röntgenbuis van 2,4 kW.

Als analysemethode is AP WROXI gebruikt, met een pakket van Panalytical met 21 oxides gemaakt van synthetische standaarden. Van de standaarden zijn glasparsels gemaakt door een hoeveelheid standaard te mengen met LiT:LiM (verhouding 66%:34%) en daarna te smelten.

Een lijst van de gebruikte golflengten per element is beschikbaar.

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

Bijlage C Productie betontegels

Op vrijdag 11-09-2020 zijn bij een betonfabriek te Drachten betonstraattegels 300x300x60 mm geproduceerd met de 5 beoogde betonmengsels. Per mengsel is een charge van 1,25 m³ beton vervaardigd, waarmee ruim 200 tegels zijn gemaakt met een kleine tegelpers. De vervaardigde tegels bevatten geen deklaag.



De samenstelling van de 5 betonmengsels is weergegeven in onderstaande tabel.

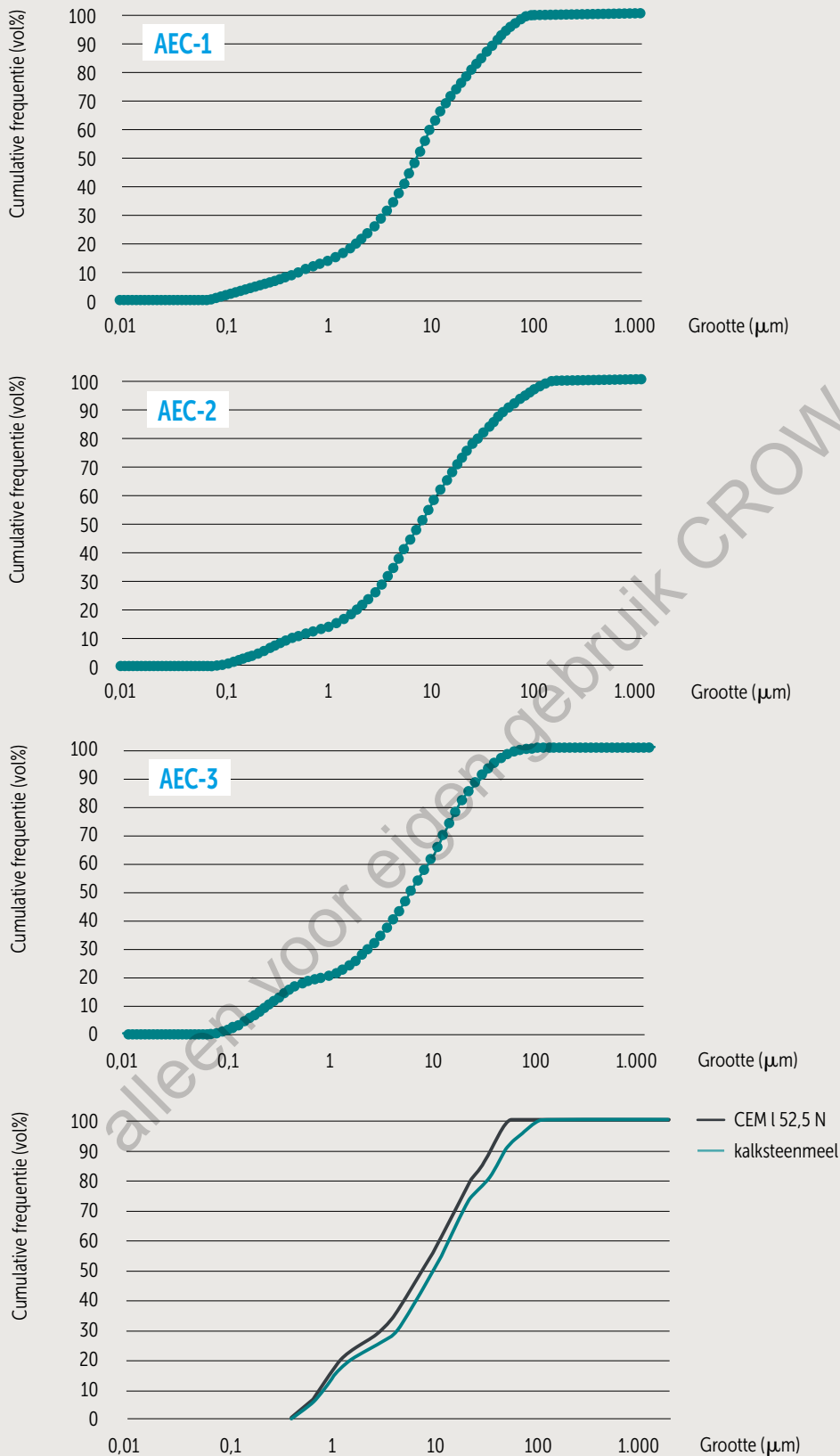
Samenstelling (kg/m³) betonstraattegels

Component	REF	KSM	AEC-1	AEC-2	AEC-3
CEM I 52,5 N	289	219	218	219	219
Vulstof	0	79	73	73	73
Water (effectief)	80	89	106	106	105
Absorptiewater	11	11	11	11	11
Zand 0-2	791	791	801	794	790
Graniet 2-8	1.154	1.154	1.152	1.177	1.157
Wbf (effectief)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36

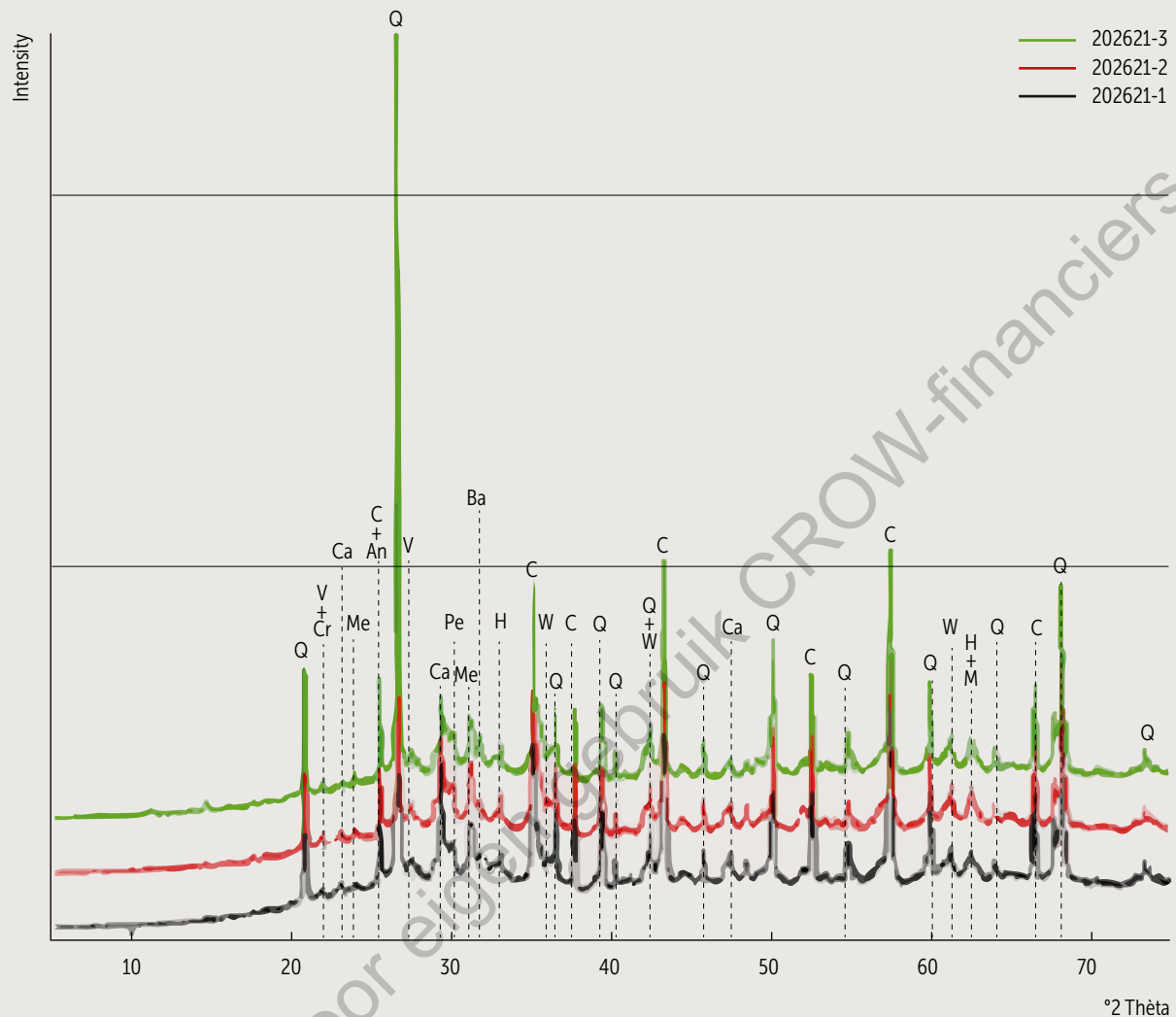
Het referentiemengsel (REF) is de basisreceptuur voor deze betontegels. Om tot eenzelfde consistentie te komen (kneden van een bal en beoordelen samenhang door de 'molenbaas'), is het watergehalte van het betonmengsel met kalksteenmeel met 9 l/m³ verhoogd. Hoewel met deze consistentie van beide betonmengsels de productie van de tegels wel goed verliep, gaf de man aan de tegelpers aan dat de beide mengsels 'aan de droge kant' waren en is de consistentie van de 3 betonmengsels met AEC-vulstoffen enigszins aangepast. Deze aanpassing in combinatie met de iets hogere waterbehoefte van de 3 AEC-vulstoffen heeft geleid tot circa 17 l/m³ extra aanmaakwater ten opzichte van het mengsel met kalksteenmeel.

Een deel van de geproduceerde betontegels zijn op 22-09-2020 afgeleverd bij het SGS INTRON laboratorium te Sittard. Elk betonmengsel stond op een aparte pallet.

Bijlage D Korrelverdelingen vulstoffen en cement



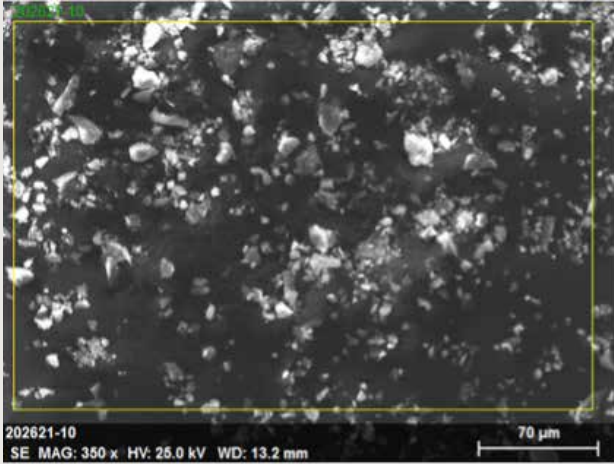
Bijlage E Rontgendiffractogrammen



Figuur 1. Diffractiepatronen van de monsters. De belangrijkste reflecties werden aangeduid: interne standaard (C), Kwarts (Q), Veldspaat (V: zowel Plagioklaas/Albiet als Alkaliveldspaat), Cristobaliet (Cr), Meliliet-type mineralen (Me), Petedunniet (Pe), Bassaniet (Ba), Calciet (Ca), Hematiet (H), Magnetiet (M) en Wuestiet (W), Anhydriet (An).

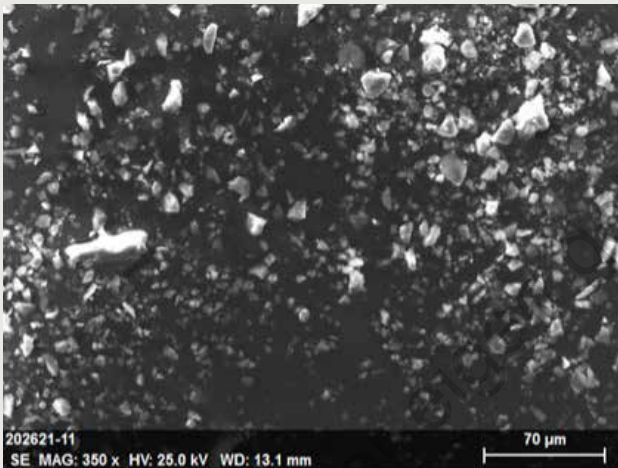
Bijlage F SEM/EDAX

Vulstof AEC-1



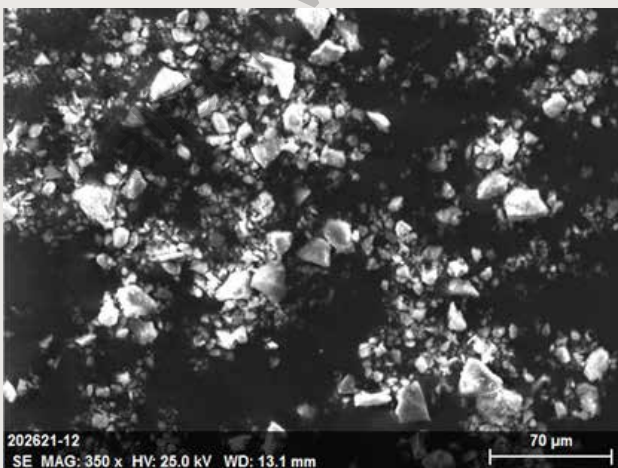
E1	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Na	11	K-series	0,90	6,79	9,52	0,10
Mg	12	K-series	0,25	1,91	2,53	0,05
Al	13	K-series	0,90	6,79	8,11	0,08
Si	14	K-series	4,31	32,46	37,25	0,22
P	15	K-series	0,43	3,22	3,35	0,05
S	16	K-series	1,32	9,91	9,97	0,08
Cl	17	K-series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

Vulstof AEC-2



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

Vulstof AEC-3



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

Bijlage G Schuimproef AEC-vulstoffen

Werkwijze:

Voeg 15 g AEC-vulstof + 150 ml demiwater in 500 ml maatcilinder.

Roer met glazen staaf en meet de hoeveelheid ontstane schuim.

Blaas vervolgens met een dunne slang perslucht onder in de maatcilinder gedurende 30 seconden.

Meet de hoeveelheid schuim nadat de grovere minder stabiele luchtbelletjes uit zichzelf zijn verdwenen.

Resultaten:

Vulstof	AEC-1	AEC-2	AEC-3
Hoeveelheid schuim na mengen met water (ml schuim/gram vulstof)	1,3	1,3	0,3
Hoeveelheid (stabiel) schuim na doorblazen lucht (ml schuim/gram vulstof)	1,7	0,7	0,7
Luchtgehalte mortelspecies (%V/V)	10,0	11,5	6,8

N.B.: meetnauwkeurigheid circa 0,3 ml/g

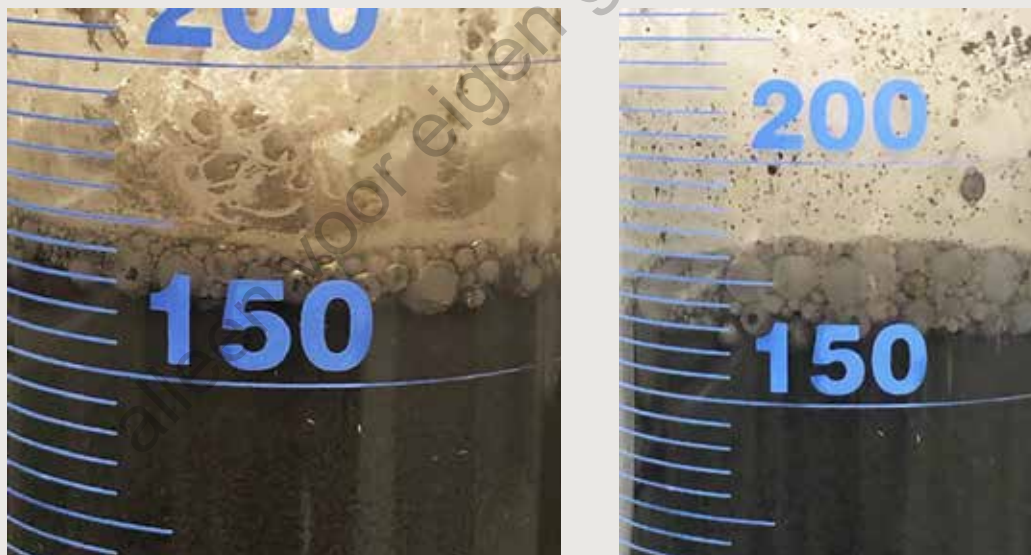
Interpretatie:

Alle 3 de vulstoffen veroorzaken bij licht mengen (roeren) al schuimvorming, dat bij doorvoeren van lucht (enigszins) toeneemt bij AEC-1 en AEC-3. Bij AEC-2 een afname.

Opvallend is dat het monster AEC-3 bij roeren een beduidend geringe schuimlaag vertoonde dan AEC-1 en AEC-2, hetgeen overeenkomt met het beduidend lager luchtgehalte van de mortelspecie met AEC-3 (onderste regel in tabel).

Er lijken dus schuimvormende (= oppervlaktespanning actieve) componenten aanwezig te zijn.

Een substantieel deel van de gevormde luchtbelletjes is kleiner dan 1 mm en zijn moeilijk uit mortelspecie te verwijderen door trillen/schokken.



Colofon

CROW-CUR Aanbeveling 128:2021
AEC-vulstof in ongewapend aardvochtig beton

[uitgave](#)

CROW, Ede

[artikelnummer](#)

AA128:2021

[foto cover](#)

Blue Phoenix Group

[pod](#)

Scanlaser bv, Zaandam

[productie](#)

CROW

[bestellen](#)

Deze uitgave is via de webshop bij CROW te bestellen.

Zie voor de actuele verkoopprijs www.crow.nl/shop

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers

alleen voor eigen gebruik CROW-financiers