

234

AEC-granulaat als toeslagmateriaal voor beton



Achtergrondrapport bij CUR-Aanbeveling 116

ISBN- 978-90-376-0532-7

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van CURNET.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken, mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt. "©CUR-rapport 234 'AEC-granulaat als toeslagmateriaal voor beton - Achtergrondrapport bij CUR-Aanbeveling 116', Stichting CURNET, Gouda, 2012."

Aansprakelijkheid

CURNET en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en CURNET sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens CURNET en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

Colofon

Omslagillustratie: INTRON

Foto's en overige illustraties in dit rapport zijn afkomstig van INTRON

AEC-granulaat als toeslagmateriaal voor beton

Achtergrondrapport bij CUR-Aanbeveling 116

Voorwoord	5
Samenvatting	6
1 Inleiding	8
2 Kaders en Opzet van het onderzoek	9
2.1 Kaders	9
2.2 Fase 1: karakterisering AVI-bodemassas en vooronderzoek betonsterkte	9
2.3 Fase 2: Uitgebreid betononderzoek	11
3 Fase 1: karakterisering en vooronderzoek betonsterkte	13
3.1 Karakterisering fracties AV-granulaat	13
3.1.1 Toegepaste materialen	13
3.1.2 Bewerking fracties AV-granulaat	14
3.1.3 Karakterisering AV-granulaat	15
3.2 Karakterisering monsters INASHCO en Boskalis Dolman	17
3.2.1 Monsters INASHCO	17
3.2.2 Monsters Boskalis Dolman	18
3.2.3 Druksterkte bij 20% vervanging zand en grind	18
3.3 Vooronderzoek betonsterkte	19
3.3.1 Samenstelling betonmengsels	19
3.3.2 Betonspecie-eigenschappen	20
3.3.3 Eigenschappen verhard beton	21
3.4 Betononderzoek aan verbeterd AV-granulaat	21
3.5 Betononderzoek uitgevoerd door Korrelbeton	22
3.6 Beschouwing	24
3.7 Conclusies fase 1	26
3.8 Besluit CUR-commissie	27
4 Fase 2: uitgebreid betononderzoek	28
4.1 Opzet onderzoek	28
4.2 Samenstelling betonmengsels	28
4.3 Eigenschappen betonspecie	29
4.4 Eigenschappen verhard beton	30
4.5 Duurzaamheid	32
4.6 Hergebruik granulaat AVI-beton	34
4.7 Conclusies fase 2	35
Literatuur	37
Bijlagen	
A. Korrelverdeling toeslagmaterialenmengsel	38
B. Individuele meetresultaten	39
C. Waterabsorptie als functie van de tijd	40
D. Rapport onderzoek Korrelbeton	41
E. Betononderzoek TU-Delft INASHCO	47
F. Krimp- en kruipgrafieken individuele proefstukken	51
G. Individuele meetresultaten duurzaamheidsproeven	53
H. Onderzoek vormvastheid AV-granulaatbeton	54

Voorwoord

Het Afval Energie Bedrijf (AEB) van de Gemeente Amsterdam heeft proeven uitgevoerd met een pilot opwerkingsinstallatie (inclusief een wasinstallatie) waarmee AVI-bodemas kan worden verwerkt tot een zand- en granulaatfractie. Beoogd wordt dit zand en granulaat, vooralsnog genoemd AV-granulaat, onder meer in beton toe te passen.

Op verzoek van AEB heeft CUR-voorschriftencommissie VC 89 'Gewassen AVI-bodemas in beton' ingesteld met als doelstelling:

- verkrijgen van inzicht in de toepassingsmogelijkheden van gewassen AVI-bodemas als toeslagmateriaal in beton;
- verkrijgen van de basisgegevens voor het formuleren van een CUR-Aanbeveling, waarin materiaaltechnische, betontechnologische, constructieve en duurzaamheidsaspecten zijn verdisconteerd.

Medio 2009 is INASHCO toegetreden tot bovengenoemde CUR-commissie. Dit bedrijf heeft een droge techniek ontwikkeld, waarmee AVI-bodemas kan worden verwerkt tot toeslagmateriaal voor beton.

Eind 2009 is Boskalis Dolman toegetreden tot de commissie. Vanuit hun ervaring met grondreinigingstechnieken verwerken zij AVI-bodemas met een nat proces, vergelijkbaar met hetgeen door AEB wordt toegepast.

Bij het opstellen van dit achtergrondrapport bij CUR-Aanbeveling 116 was de samenstelling van CUR-commissie VC 89 als volgt:

ing. R.T. de Vree, voorzitter	KIWA BMC B.V.
ing. J. van der Bom	NVPG
F. Gabriëls	Struyk Verwo Groep
A. Hoenselaar	
ing. A.C. Kok	Boskalis Dolman bv
R. Leunenberg	Steenkorrelgroep B.V.
drs. D. van Mechelen	Van Nieuwpoort Beheer B.V.
H.H.M. Soen,	
drs. E. Vega (coördinator)	CUR Bouw & Infra
dr. ir. G. van der Wegen, rapporteur	SGS Intron B.V.
prof. dr. ir. K. van Breugel, corresponderend lid	TU Delft

L. Baaten, ir. P.J. Bleeker, ing. H. van Craaikamp en ing. P. Leenders maakten eerder deel uit van de commissie.

Ten behoeve van het onderzoek en de eindrapportage zijn financiële bijdragen ontvangen van:

Afval Energie Bedrijf Amsterdam
 Boskalis Dolman
 Fonds Collectief Onderzoek GWW
 INASHCO

Samenvatting

Het Afval Energie Bedrijf (AEB) van de Gemeente Amsterdam heeft proeven uitgevoerd met een pilot opwerkingsinstallatie (inclusief een wasinstallatie) waarmee AVI-bodemas kan worden verwerkt tot een zand- en granulaatfractie. Beoogd wordt dit zand en granulaat, vooralsnog genoemd AV-granulaat, onder meer in beton toe te passen.

INASHCO past een droog proces toe om AVI-bodemas geschikt te maken als toeslagmateriaal voor beton. Boskalis Dolman gebruikt een nat proces vergelijkbaar met dat van AEB. De producten van genoemde bedrijven zijn eveneens onderzocht in het kader van dit CUR-project.

Uit de uitgevoerde karakteriseringsonderzoeken blijkt dat:

- de onderzochte fracties bewerkt AVI-bodemas voldoen aan de eisen gesteld in de Europese norm NEN-EN 12620 met de Nederlandse aanvulling NEN 5905;
- AVI-bodemas vervaardigd met het droge proces een hoger gehalte aan deeltjes <63 µm, chloriden, sulfaten, alkaliën en gloeiverlies heeft dan die afkomstig van het natte proces;
- het gehalte aan sulfaat in de grove fracties laag, maar in fijne fracties vaak beduidend hoger is. Echter, slechts een deel van het sulfaat is water oplosbaar, waarbij tevens dient te worden bedacht dat bij gedeeltelijke vervanging van zand en/of grind slechts een evenredig deel van dit sulfaat in het beton aanwezig is. Dit vormt dus meestal geen belemmering voor toepassing in beton;
- het gehalte aan chloriden en alkaliën in AVI-bodemas hoger is dan in rivierzand/grind, maar dit vormt bij gewassen AVI-bodemas (zeker bij gedeeltelijke vervanging) geen belemmering voor toepassing in beton. Vanwege het hoge chloridgehalte in droog bewerkte AVI-bodemas kan dit materiaal alleen in ongewapend beton worden toegepast;
- de dichtheid van de fijne fractie een belangrijke maatstaf is voor de prestatiekenmerken van het bewerkte AVI-bodemas. Voor constructief beton dient deze ten minste 2200 kg/m³ te bedragen.

Het betontechnologisch en constructief onderzoek heeft, wat betreft de onderzochte mengselsamenstellingen, aangetoond dat:

- met AVI-bodemas homogene en stabiele mengsels zijn te vervaardigen die een geringere neiging tot waterafscheiding vertonen;
- inherent aan het poreuze en hoekige karakter van AVI-bodemas de betonspecie een hogere waterbehoefte vertoont c.q. een hogere dosering plastificeerder nodig heeft voor eenzelfde verwerkbaarheid. Bij maximaal 20% (V/V) zand en/of grind is dit effect slechts beperkt;
- door de hogere porositeit van het AVI-bodemas en de beperkte gasvorming (door metallisch aluminium en zink) de betonspecie een hoger luchtgehalte en een lagere dichtheid bezit. Bij een gehalte aan metallisch Al <1% m/m is de toename van het luchtgehalte in de speciefase minder dan 1% (V/V);
- AVI-bodemas een vertraging van de afbinding kan veroorzaken, die in het algemeen geen probleem opleverde. Controle op overmatige vertraging van de bindtijd is gewenst;

- een vervangingspercentage van 20% (V/V) zand en/of grind door gewassen AVI-bodemas (met een dichtheid van ten minste 2200 kg/m³) haalbaar is in constructief beton. Bij eenzelfde druksterkte als het referentiebeton bezit beton vervaardigd met gewassen AVI-bodemas eenzelfde splijttreksterkte, E-modulus en vervormingscapaciteit; de uittrekkkracht van ingestort geribd wapeningsstaal is bij eenzelfde druksterkte eveneens gelijkwaardig;
- de krimp en kruip bij 20% (V/V) grindvervanging door AVI-bodemas (dichtheid korrels ≥ 2200 kg/m³) vergelijkbaar is met of beperkt hoger is dan die van het referentiebeton. Bij 20% (V/V) zand + 20% (V/V) grindvervanging neemt zowel de krimp als de kruip fors toe;
- bij toepassing van droog bewerkte AVI-bodemas (dichtheid korrels ≥ 2100 kg/m³) de druksterkte van daarmee vervaardigd beton ca. 10% lager is dan die met overeenkomstig gewassen AVI-bodemas.

Met betrekking tot de duurzaamheid kan, voor de onderzochte mengselsamenstellingen, worden geconcludeerd dat:

- de carbonatatieweerstand van beton vervaardigd met gewassen AVI-bodemas (dichtheid korrels ≥ 2200 kg/m³ en $\leq 20\%$ (V/V) vervanging zand en/of grind) tenminste gelijkwaardig is aan die van het referentiebeton;
- dit ook geldt voor de vorstdooi- en vorstdooizoutweerstand;
- de weerstand tegen chloride-indringing daarentegen geringer is dan bij het referentiebeton. Dit kan worden ondervangen door een juiste cementkeuze;
- de expansiemetingen en het microscopisch onderzoek geen *destructieve* expansie (bijvoorbeeld als gevolg van ASR of vorming van aluminiumhydroxide-gel) van het beton heeft aangetoond. Dit aspect verdient wel nadere aandacht bij de kwaliteitscontrole van het productieproces.

Met granulaat van AVI-bodemasbeton ($\leq 20\%$ (V/V) vervanging zand en/of grind) is eenzelfde kwaliteit beton te vervaardigen als met de reguliere kwaliteit betongranulaat. Dit betekent dat toepassing van AVI-bodemas als toeslagmateriaal in beton geen beperkingen oplegt aan het hergebruik ervan.

Hoofdstuk 1

Inleiding

Het Afval Energie Bedrijf (AEB) van de Gemeente Amsterdam heeft proeven uitgevoerd met een pilot opwerkingsinstallatie (inclusief wasinstallatie) waarmee AVI-bodemas kan worden verwerkt tot een zand- en granulaatfractie. Beoogd wordt dit zand en granulaat onder meer in beton toe te passen.

Het gewassen AVI-bodemas afkomstig van de opwerkingsinstallatie wordt door AEB AV-granulaat genoemd.

Na het afronden van dit rapport heeft de Vereniging Afvalbedrijven de naam voor Afval Verbrandings Installaties (AVI) gewijzigd in Afval Energie Centrales (AEC). De AEC-bodemas die door aanvullende bewerkingen geschikt wordt gemaakt voor toepassingen als toeslagmaterialen voor beton, wordt AEC-granulaat genoemd (zowel voor de fijne als grove fractie). In dit rapport wordt de naam AV-granulaat gehanteerd.

In CUR-rapport 185 [1] zijn de resultaten van een uitgebreid onderzoek [2] naar de toepassing van *ongewassen* AVI-bodemas in beton weergegeven. Uit dit onderzoek, waarin het vervangingspercentage zand en grind door AVI-bodemas oploopt tot 100%, komen in dit kader als belangrijkste bevindingen naar voren:

- de 28-daagse druksterkte varieert, afhankelijk van het percentage AVI-bodemas en betonsamenstelling, tussen ca. 20 en 40 MPa;
- aandachtspunten AVI-bodemas zijn: hoog gehalte aan fijne bestanddelen (< 63 µm), relatief hoog gehalte aan chloride en aanwezigheid van vertragende bestanddelen.

De technologie van het opwerken van AVI-bodemas tot zand en granulaat is inmiddels verder ontwikkeld. Door toepassing van andere scheidingstechnieken is de kwaliteit van de granulaatfractie en met name van de zandfractie aanzienlijk verbeterd. Dit levert in relatie tot de toepassing als toeslagmateriaal voor beton een beduidend betere kwaliteit AVI-bodemas op. Een karakteriseringsonderzoek [3] bevestigt de verbeteringen, maar geeft als nieuw aandachtspunt de mogelijke gevoeligheid voor alkali-silicareactie (ASR).

Door de tussentijdse toetreding van INASHCO en Boskalis Dolman zijn de doelstellingen van CUR-commissie VC 89 weliswaar hetzelfde gebleven, maar is de uitwerking ervan enigszins aangepast.

Hoofdstuk 2

Kaders en Opzet van het onderzoek

2.1 Kaders

Tijdens de eerste bijeenkomst van de commissie zijn de volgende kaders afgesproken:

- toepassing betreft ongewapend en gewapend beton, geen voorgespannen beton;
- toepassing betreft geheel of gedeeltelijke vervanging van zand, grind of een combinatie ervan;
- onderzoek wordt gebaseerd op korrelgroepen die zoveel mogelijk aansluiten bij de huidige betonpraktijk: initiële keuze voor de fracties 0-4 mm en 4-32 mm;
- hergebruiksmogelijkheden (tweede levensfase granulaat) worden in het onderzoeksprogramma opgenomen.

Omdat er nog onvoldoende inzicht was in de haalbare betonkwaliteiten bij de verschillende vervangingspercentages zand en/of grind door AVI-bodemas is het onderzoek gefaseerd uitgevoerd:

- fase 1: karakterisering fracties AVI-bodemas en vooronderzoek betonsterkte;
- fase 2: volledig betontechnologisch, constructief en duurzaamheidsonderzoek, aangevuld met hergebruiksmogelijkheden.

Het onderzoek van fase 1 en 2 is volledig uitgevoerd aan gewassen AVI-bodemas verkregen van AEB (AV-granulaat). Monsters bewerkte AVI-bodemas verkregen van INASHCO en Boskalis Dolman zijn alleen gekarakteriseerd en met deze monsters is de invloed van 20% zand- en grindvervanging op de druksterkte van beton nagegaan. Deze resultaten hiervan zijn eveneens opgenomen bij de gerapporteerde bevindingen van fase 1 en 2.

2.2 Fase 1: karakterisering AVI-bodemas en vooronderzoek betonsterkte

Karakterisering AVI-bodemas

AEB produceerde destijds de fracties 0-2 mm, 2-6 mm, 6-20 mm en >20 mm geproduceerd. Door INTRON zijn deze 3 fracties (droog) gezeefd in deelfracties en vervolgens samengevoegd tot fracties 0-2 mm, 2-4 mm, 4-16 mm en 16-32 mm. Hierbij is aandacht gegeven aan een goede korrelopbouw van de vervaardigde fracties.

Van de vervaardigde fracties zijn de volgende eigenschappen bepaald:

- korrelverdeling conform NEN-EN 933-1;
- gehalte aan fijne bestanddelen conform NEN-EN 933-1;
- samenstelling op hoofdbestanddelen: glas, sintels, keramisch, lichte deeltjes, e.d.;
- dichtheid en waterabsorptie conform NEN-EN 1097-6;
- gehalte chloriden en sulfaten conform NEN-EN 1744-1 (respectievelijk h.8 en h.12);
- gehalte aan alkaliën conform NEN-EN 196-21, met ontsluiting conform NEN 5937;

- gloeiverlies conform proef 124 van Standaard RAW Bepalingen;
- bindtijdvertraging conform methode CUR-commissie B 38 (extractie gedurende 24 uur van gemalen ($< 125 \mu\text{m}$) AV-granulaat met verzadigd kalkwater bij een massaverhouding 1:1; dit extract wordt gebruikt als aanmaakwater en vergeleken met leidingwater bij bindtijdbepaling van cement conform NEN-EN 196-3).

De verkregen resultaten zijn weergegeven in 3.1 van dit rapport. In deze paragraaf zijn tevens de resultaten opgenomen van de karakteriseringsonderzoeken aan monsters bewerkte AVI-bodemas afkomstig van INASHCO en Boskalis Dolman.

Vooronderzoek betonsterkte

Voor een efficiënte invulling van fase 2 van dit onderzoeksproject is van de mengsels aangegeven in tabel 2.1 nagegaan wat de haalbare sterkte is. De betonsamenstelling is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

- 320 kg/m^3 CEM I 42,5N;
- effectieve wcf = 0,50 (effectief watergehalte 160 l/m^3);
- consistentieklasse S3 (zetmaat 100-150 mm), in te stellen door eventueel toevoegen van een (super)plastificeerder;
- toeslagmaterialen: rivierzand en -grind zelfde korrelopbouw als overeenkomstige fractie AV-granulaat.

Tabel 2.1 Onderzochte mengsels toeslagmaterialen (%(V/V) van fijne of grove fractie).

Mengsel nr.	1	2	3	4	5	6	7
Rivierzand 0-4 mm	100	50	0	100	100	50	0
AV-granulaat 0-4 mm	0	50	100	0	0	50	100
Riviergrind 4-32 mm	100	100	100	50	0	50	0
AV-granulaat 4-32 mm	0	0	0	50	100	50	100

Van de vervaardigde betonmengsels zijn de volgende eigenschappen bepaald:

betonspecie:

- zetmaat conform NEN-EN 12350-2;
- schudmaat conform NEN-EN 12350-5;
- volumieke massa conform NEN-EN 12350-6;
- luchtgehalte conform NEN-EN 12350-7;

verhard beton:

- druksterkte na 3 en 28 dagen verharden (in 3-voud) conform NEN-EN 12390-3;
- slijttreksterkte na 28 dagen verharden (in 3-voud) conform NEN-EN 12390-6.

De verkregen resultaten zijn samengevat in 3.2. In 3.3 zijn de resultaten getoond van aanvullend vooronderzoek naar de sterkte van beton vervaardigd met verbeterd AV-granulaat. De verkregen inzichten zijn aangevuld met sterkte-onderzoek uitgevoerd door het bedrijf Korrelbeton; deze zijn weergegeven in 3.4. Een beschouwing van deze beton-technologische resultaten is gegeven in hoofdstuk 3.5. De conclusies getrokken uit het karakteriseringsonderzoek en de betonsterkte-onderzoeken zijn samengevat in 3.6.

Op basis hiervan is in overleg met de begeleidingscommissie een keuze gemaakt voor de te onderzoeken mengselsamenstellingen in fase 2 van dit onderzoek. Aan deze keuze is

een inkadering van het toepassingsgebied (met name het vervangingspercentage zand en/of grind en de druksterkteklassen) van de op te stellen CUR-Aanbeveling gekoppeld.

2.3 Fase 2: Uitgebreid betononderzoek

Fase 2 van het onderzoeksproject is gebaseerd op de hieronder omschreven opzet.

Beton technologisch, constructief en duurzaamheidonderzoek

Van de in fase 1 geselecteerde betonsamenstellingen zijn de volgende eigenschappen bepaald:

Betonspecie:

- zetmaat 0, 15, 30, 45 en 60 minuten na aanmaak betonspecie conform NEN-EN 12350-2;
- schudmaat 0, 15, 30, 45 en 60 minuten na aanmaak betonspecie conform NEN-EN 12350-5;
- volumieke massa conform NEN-EN 12350-6;
- luchtgehalte conform NEN-EN 12350-7;
- bindtijd conform ASTM C403 (penetration resistance) in combinatie met temperatuurmeting;
- waterafscheiding conform ASTM C232 (bleeding);

Verhard beton:

- druksterkte na 1, 3, 28 en 91 dagen verharden (in drievoud) conform NEN-EN 12390-3;
- splijttreksterkte na 28 dagen verharden (in drievoud) conform NEN-EN 12390-6;
- elasticiteitsmodulus na 28 dagen verharden (in drievoud) conform CUR-rapport 94-12;
- prismadruksterkte en maximaal in rekening te brengen vervorming na 28 dagen verharden (in drievoud) conform CUR-rapport 94-12;
- lange-duur druksterkte tot ouderdom van 1 jaar (in drievoud) conform CUR-rapport 94-12;
- krimp (bij 20°C en 50%RV) tot een ouderdom van 1 jaar (in drievoud) conform CUR-rapport 94-12;
- kruip (bij een drukbelasting van 1/3 van prismadruksterkte) tot een ouderdom van 1 jaar (in drievoud) conform CUR-rapport 94-12;
- uittrekproeven wapeningsstaal (met 1 staafdiameter 12 mm in vijfvoud);
- carbonatatie gedurende 1 jaar expositie bij 20°C, 65%RV en 3% (V/V) CO₂ conform RILEM CPC 18/CUR-Aanbeveling 48 met zowel CEM I als CEM III/B als bindmiddel;
- chloride-indringing (in vijfvoud) conform de (aangepaste) NT Build 492 (Rapid Chloride Migration test);
- vorstdooizoutbestandheid conform CUR-Aanbeveling 48 (CDF-methode in 4-voud);
- vorstdooibestandheid conform CIF-methode (in vijfvoud);
- gevoeligheid voor alkali-silicareactie conform CUR-Aanbeveling 89 (PFM-microscopie en CPT-methode).

Hergebruikmogelijkheden

Van twee betonsamenstellingen (20% (V/V) vervanging grind en 20% (V/V) vervanging zand + grind) zijn vervaardigde betonkubus na ongeveer driekwart jaar verharden gebro-

ken (voorbreker + kaakbreker) tot korrelgrootte kleiner dan 32 mm. Van het gebroken en opgewerkte granulaat (wassen + zeven fractie 4-32 mm) is opnieuw beton vervaardigd. Als referentie dient betongranulaat verkregen uit de reguliere productie van brekers.

De samenstelling van het beton is: 320 kg/m³ CEM I 42,5N, wcf = 0,50, fijn toeslagmateriaal 100% rivierzand en grof toeslagmateriaal 100% gebroken en opgewerkt AV-granulaatbeton respectievelijk regulier betongranulaat 4-32 mm. De zetmaat is ingesteld op 100-150 mm, eventueel met behulp van een (super)plastificeerder. Van deze drie betonmengsels is de druksterkte na 3 en 28 dagen verharden (in 3-voud) conform NEN-EN 12390-3 en de splijttreksterkte na 28 dagen verharden (in 3-voud) conform NEN-EN 12390-6 bepaald.



Hoofdstuk 3

Fase 1: karakterisering en vooronderzoek betonsterkte

3.1 Karakterisering fracties AV-granulaat

3.1.1 Toegepaste materialen

Voor de uitvoering van het onderzoek zijn door AEB in week 29 van 2007 de volgende hoeveelheden AV-granulaat, afkomstig van de installatie te Amsterdam, aangeleverd: fractie 0-2 mm: ca. 700 kg, fractie 2-6 mm: ca. 900 kg, fractie 6-20 mm: ca. 1200 kg en de fractie >20 mm: ca. 700 kg.

De monsters zijn verkregen door gedurende 2 weken 3 maal per dag op variërende tijdstippen een greep onder de betreffende eindband te nemen met behulp van een shovelpak waarbij de hele stroombreedte in één keer werd bemonsterd. De massa per greep bedroeg ca. 50 kg. De grepen werden per gradering toegevoegd aan de betreffende bigbag.

Door AEB zijn aanpassingen uitgevoerd aan de opwerkingsinstallatie, met name om de kwaliteit van de fijnste fracties te verbeteren. Monsters van deze verbeterde kwaliteit AV-granulaat zijn door AEB op het laboratorium van INTRON afgeleverd in week 9 van 2008. De monsterneming is op identieke wijze uitgevoerd zij het dat de bemonstering is uitgevoerd gedurende 1 dag waarbij 10 grepen per materiaalstroom zijn genomen.

AV-granulaat-2 is afkomstig van de uitgevoerde proefreiniging bij BSN Bodemsanering Nederland B.V. te Weert. Bij deze proefreiniging is circa 350 ton AVI bodemas (0/40 mm) aangevoerd door AEB en vervolgens bij de proefreiniging betrokken.

Bij de proefreiniging zijn de volgende fracties afgescheiden:

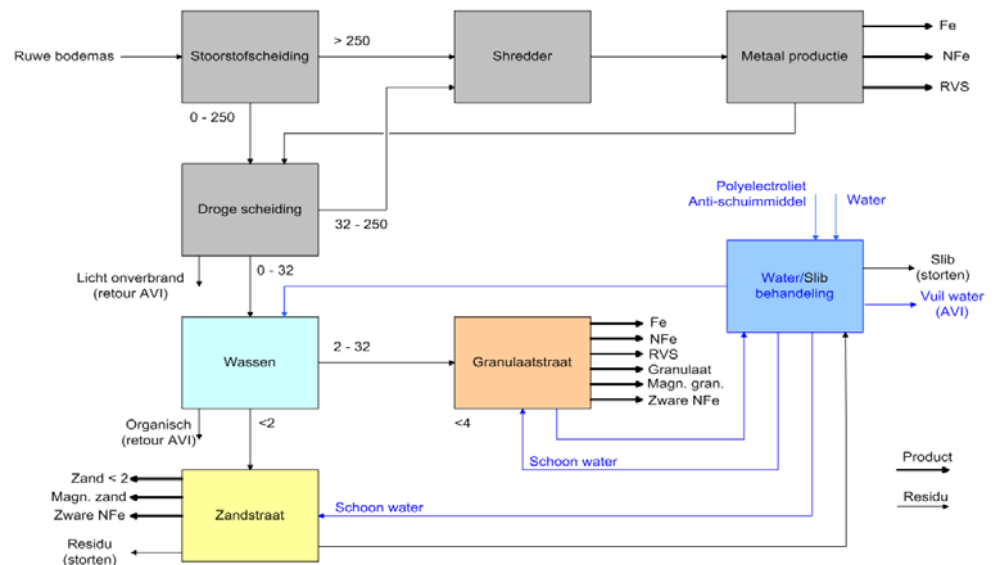
- gewassen granulaat 4/40 mm;
- gewassen en geklasseerd “zand” in de fractie van 0,063 – 4 mm;
- residu (fijne fractie, ontwaterd);
- magnetische fractie.

De gewassen granulaten zijn aanvullend behandeld waarbij non-ferro en ferro verwijderd (magneten en Eddy current systemen). Voor de uitvoering van de proeven in het kader van het CUR-onderzoek zijn bij INTRON aangeleverd:

- gewassen en nabehandelde granulaten 4/40 mm;
- gewassen en geklasseerd “zand” in de fractie van 0,063 – 4,0 mm. Deze fractie is niet verder nabehandeld.

Ter onderscheid van beide series monsters AV-granulaat wordt in het vervolg van dit rapport de eerste serie met leverdatum week 29 (2007), AV-granulaat-1 genoemd en de tweede serie met leverdatum week 9 (2008), AV-granulaat-2 genoemd.

Fig. 3.1
Stroomschema installatie
AV-granulaat.



Het rivierzand (0-4 mm) en riviergrind (4-32 mm) is afkomstig van Het Noorden.

Het cement is een CEM I 42,5N betrokken van ENCI te Maastricht.

Leidingwater van gemeente Sittard is benut als aanmaakwater.

Als superplastificeerder is gebruikt Cugla HR40 (vaste-stofgehalte 20%/m).

3.1.2 Bewerking fracties AV-granulaat

Door AEB werden destijds de fracties 0-2 mm, 2-6 mm, 6-20 mm en >20 mm geproduceerd. CUR-commissie VC89 heeft gekozen voor in de betonsector meer gangbare fracties 0-4 mm en 4-32 mm.

INTRON heeft daarom ongeveer de helft van de hoeveelheid aangeleverde 4 fracties (droog) gezeefd in deelfracties en vervolgens samengevoegd tot fracties 0-2 mm, 2-4 mm, 4-16 mm en 16-32 mm. Hierbij is uitgegaan van de gewenste korrelopbouw in het te vervaardigen beton, waarbij vervolgens is teruggerekend wat de benodigde hoeveelheden aan de geleverde 4 fracties AV-granulaat-1 zijn: 25 %m/m 0-2 mm, 26 %m/m 2-6 mm, 26 %m/m 6-20 mm en 23 %m/m >20 mm. Ieder van deze fracties is vervolgens door droge zieving op respectievelijk de zeef van 2 mm, 4 mm, 16 mm en 32 mm gescheiden in 2 deelfracties. De zeefrest op 2 mm van de fractie 0-2 mm is toegevoegd aan de zeefdoorlaat op 4 mm van de fractie 2-6 mm, hetgeen tezamen de nieuwe fractie 2-4 mm vormt. De zeefrest op 4 mm van de fractie 2-6 mm vormt samen met de zeefdoorlaat op 16 mm van de fractie 6-20 mm de nieuwe fractie 4-16 mm. De zeefrest op 16 mm van de fractie 6-20 mm vormt samen met de zeefdoorlaat op 32 mm van de fractie >20 mm de nieuwe fractie 16-32 mm. De zeefrest op 32 mm van de fractie >20 mm is niet gebruikt in het betononderzoek.

De door AEB in week 9 van 2008 geleverde fracties AV-granulaat-2 zijn op dezelfde wijze bewerkt voor het aanvullende betononderzoek.

3.1.3 Karakterisering AV-granulaat

De resultaten van het karakteriseringsonderzoek aan AV-granulaat-1 zijn weergegeven in tabel 3.1.

De weergegeven resultaten liggen in lijn met die verkregen in eerder onderzoek aan AV-granulaten [3], met uitzondering van de waterabsorptie en dichtheid van de fractie 0-2 mm. Die is van het huidige monster beduidend hoger (11,2 versus 5,6 %m/m) respectievelijk lager (1970 versus 2100 kg/m³) dan voor het monster onderzocht in voorgenoemd INTRON-rapport. De beduidend hogere waterabsorptie is geverifieerd aan 2 nieuwe deelmonsters uit de aangeleverde fractie 0-2 mm, met als resultaat: 10,8 en 11,2 %m/m.

De korrelverdelingen van de fracties 0-2 mm en 0-4 mm (= combinatie van 0-2 mm en 2-4 mm) voldoen aan de in NEN-EN 12620 gestelde eisen aan categorie G_F85. De korrelverdelingen van de fracties 4-16 mm en 16-32 mm, evenals de gecombineerde fractie 4-32 mm voldoen aan de in voorgenoemde norm gestelde eisen aan categorie G_C90/15.

Tabel 3.1 Resultaten karakterisering fracties AV-granulaat-1.

Eigenschap	Eenheid	Fractie 0-2 mm	Fractie 2-4 mm	Fractie 4-16 mm	Fractie 16-32 mm
Korrelverdeling zeefrest cum.	% m/m				
C45					0
C31,5					1
C22,4				0	25
C16				2	93
C11,2				21	97
C8				64	98
C5,6				86	100
C4		0	0	97	100
2		3	81	100	100
1		34	93	100	100
500 µm		58	95	100	100
250 µm		81	96	100	100
125 µm		85	97	100	100
Gehalte fijne bestanddelen (<63 µm)	% m/m	2,4	2,8	0,5	0,4
Dichtheid	kg/m ³	1970	2180	2220	2290
Waterabsorptie: na 30 min.	% m/m	8,4	6,4	3,5	2,7
na 24 uur	% m/m	11,2	8,1	4,4	3,8
Gehalte chloriden	% m/m	0,02	0,07	0,04	0,04
Gehalte sulfaten	% m/m	0,89	0,71	0,27	0,17
Gehalte alkaliën	% m/m	0,11	0,10	0,12	0,07
Bindtijdvertraging t.o.v. referentie					
- beginbinding	%	106	107	98	95
- einde binding	%	101	98	96	92
Samenstelling hoofdbestanddelen	%m/m	1-4 mm	4-8 mm	8-16 mm	16-32 mm
- slak/sintels		71	59	58	60
- keramisch		16	11	11	20
- metselwerk+mortel		4	17	6	17
- glas		9	13	24	2
- lichtbeton+gips		0	0	1	1

Het gehalte aan fijne bestanddelen valt voor alle vier de onderzochte fracties in de laagste categorie: $f_{1,5}$ voor de fracties 4-16 mm en 16-32 mm; f_3 voor de fracties 0-2 mm en 2-4 mm. Desondanks wordt in de Nederlandse aanvulling NEN 5905 (op de Europese norm NEN-EN 12620) aangegeven dat bij de gemeten gehalten aan fijne bestanddelen onderzoek moet worden verricht naar sterk zwellende kleimineralen (volgens NEN-EN 933-9 Methyleenblauwbeproeving). Dit is geschied in [3], waarbij is gebleken dat alle onderzochte monsters kunnen worden geclassificeerd als onschadelijk.

Hoewel in NEN-EN 12620 geen eisen worden gesteld aan de waterabsorptie van toeslagmateriaal voor beton, is een waarde van 8 tot 11 %m/m na 24 uur absorptie voor beide fijne fracties aan de hoge kant.

Het gehalte aan chloride in het AV-granulaat-1 leidt zelfs bij 100% vervanging van rivierzand en -grind tot een gehalte van ca. 0,2 %m/m op cement, hetgeen voor gewapend beton ruimschoots aan de eisen voldoet.

Volgens NEN 5905 is toeslagmateriaal met een in zuur oplosbaar sulfaatgehalte gehalte kleiner dan 0,8 %m/m zonder meer toepasbaar en moet boven deze waarde de geschiktheid worden aangetoond.

Het gehalte aan sulfaat is in de beide grove fracties (>4 mm) voldoende laag. Echter in beide fijne fracties is deze aan de hoge kant. Uitloogonderzoek met de kolomproef waarbij het materiaal wordt uitgeloozd met een vloeistof-vast stof verhouding van 10 l/kg heeft aangetoond dat slechts een deel hiervan in water oplosbaar is (< 0,2 %m/m [4, 5]) en dus daadwerkelijk beschikbaar kan komen in het poriewater van het beton. Op basis hiervan mag verwacht worden dat de geschiktheid is aangetoond.

Het gehalte aan alkaliën is fors hoger dan gebruikelijk voor rivierzand en -grind. Bij 100% vervanging van rivierzand en -grind door AV-granulaat-1 betekent dit een gehalte aan alkaliën in het beton van ca. 1,5 kg/m³. Dit is reeds de helft van het criterium genoemd in CUR-Aanbeveling 89 om alkali-silica-reactie (ASR) te voorkomen. Bij lagere vervangingspercentages (bijvoorbeeld 20%) is dit uiteraard van beduidend minder belang.

De invloed van het onderzochte AV-granulaat-1 op de bindtijd blijkt verwaarloosbaar klein te zijn.

Monsters AV-granulaat-2 verkregen na aanpassing van de opwerkingsinstallatie zijn eveneens gekarakteriseerd, waarvan de verkregen resultaten zijn weergegeven in tabel 3.2.

Uit tabel 3.2 blijkt dat de kwaliteit van de fijne fracties beduidend verbeterd is, met name wat betreft de dichtheid en daaraan verbonden waterabsorptie. Het sulfaatgehalte is wel hoger geworden.

Het gloeiverlies voldoet ruimschoots aan de eis geformuleerd in BRL 2307 (< 5 %m/m).

Tabel 3.2 Karakterisering monsters AV-granulaat-2 na aanpassing opwerkingsinstallatie.

Eigenschap	Eenheid	Fractie 0-2 mm	Fractie 2-12 mm	Fractie 12-40 mm
Korrelverdeling zeefrest cum.	% m/m			
C31,5				0
C22,4			0	4
C16			1	34
C11,2			12	70
C8			35	92
C5,6			58	96
C4		0	75	98
2		2	91	99
1		14	96	99
500 µm		34	97	99
250 µm		72	98	99
125 µm		85	98	100
Gehalte fijne bestanddelen (<63 µm)	% m/m	3,2	1,0	0,3
Dichtheid	kg/m ³	2230	2290	2260
Waterabsorptie: na 24 uur	% m/m	5,7	4,8	5,4
Gehalte chloriden	% m/m	0,05	0,03	0,03
Gehalte sulfaten	% m/m	1,37	0,53	0,34
Gloeiverlies 500 °C	%m/m	1,90	0,82	0,52

3.2 Karakterisering monsters INASHCO en Boskalis Dolman

3.2.1 Monsters INASHCO

In de periode juli t/m oktober 2009 en februari 2010 heeft INTRON een aantal monsters geproduceerd door INASHCO (droog proces) gekarakteriseerd. De verkregen resultaten zijn weergegeven in tabel 3.3.

Uit tabel 3.3 blijkt dat, inherent aan het droge proces, het gloeiverlies en de gehalten aan chloriden, sulfaten en alkaliën hoger is dan die voor gewassen AVI-bodemas (vergelijk tabel 3.2). Dit is eveneens duidelijk zichtbaar door vergelijking van beide monsters in de laatste 2 kolommen van tabel 3.3 (week 4 2010), waarbij het monster van de laatste kolom aanvullend een wasstap heeft ondergaan ten opzichte van het monster van de voorlaatste kolom. Door de wasstap is tevens het gehalte aan zeer fijne bestanddelen (<63 µm) beduidend verlaagd en bijgevolg de wateropname.

Niet duidelijk is waarom het gehalte aan metallisch Al+Zn hoger is in het gewassen monster bewerkte AVI-bodemas. Mogelijk is dit gerelateerd aan de representativiteit van de onderzochte deelmonsters.

Tabel 3.3 Resultaten karakterisering monsters INASHCO.

Eigenschap	Eenheid	28-07-09	<19-08-09	week 41 '09	week 41 '09 (serie 2)	week 43 '09	week 4 '10
Fractie	mm	0-2 2-8	0-2 >2	0-2 >2	0-2 2-12 0-12	0-2 2-12 0-12	2-12 2-12*
Dichtheid	kg/m ³	- -	223 194	209 220	230 207 201	210 210 203	212 2210
			0 0	0 0	0 0 0	0 0 0	0
Wateropname:							
na 30 min	%m/m	- -	6,3 13,0	11,6 8,5	8,5 9,2 9,7	9,5 8,1 9,9	7,4 5,9
na 24 uur	%m/m	- -	7,1 14,9	- -	9,6 10,0 10,4	11,1 8,3 10,1	7,4 5,9
Gloeiverlies 500 °C	%m/m	- -	4,77 3,37	5,58 2,32	5,39 2,71 3,14	5,08 2,89 3,63	3,65 1,82
Chloride (Cl)	%m/m	0,43 0,21	0,39 0,23	0,53 0,19	0,53 0,25 0,28	0,46 0,28 0,34	0,26 0,10
Sulfaat (SO ₃)	%m/m	2,37 1,42	1,75 1,18	1,96 0,94	2,15 1,37 1,37	2,33 1,43 1,40	1,56 0,76
Kaliumoxide (K ₂ O)	%m/m	0,12 0,08	0,08 0,07	0,11 0,07	0,08 0,06 0,07	0,10 0,09 0,10	0,10 0,048
		9 7	7 2	0 1	7 5 1	6 8 1	4
Natriumoxide (Na ₂ O)	%m/m	0,36 0,23	0,39 0,32	0,70 0,39	0,61 0,38 0,37	0,44 0,37 0,42	0,43 0,201
		0 9	8 7	3 9	4 4 9	6 6 2	5
Na ₂ O-equivalent	%m/m	0,44 0,29	0,45 0,37	0,77 0,44	0,67 0,42 0,42	0,51 0,44 0,48	0,50 0,232
		5 7	5 4	6 6	1 7 6	6 1 8	4
Metallisch Al+Zn	%m/m	0,38 1,35	- -	- -	0,32 1,30 1,10	0,52 1,04 0,68	0,64 1,00
Gehalte <63 µm	%m/m	- -	- -	- -	- - -	- - -	8,1 1,3

* Aanvullende wasstap bij Boskalis Dolman

3.2.2 Monsters Boskalis Dolman

De resultaten van het karakteriseringsonderzoek [6] aan de monsters aangeleverd door Boskalis Dolman op 12 november 2009 zijn getoond in tabel 3.4.

Inherent aan het vergelijkbare wasproces als voor de productie van het AV-granulaat-2 door AEB, leveren de karakteristieken eenzelfde beeld op (vergelijk tabel 3.4 met tabel 3.2).

Opvallend is de lagere dichtheid van de fracties 4/16 mm en 4/40 mm. Dit wordt veroorzaakt door een zichtbaar lager gehalte aan glasdeeltjes.

Tabel 3.4 Resultaten karakterisering monsters Boskalis Dolman.

Eigenschap	Eenheid	Fractie 0/4 mm	Fractie 4/16 mm	Fractie 4/40 mm
Gloeiverlies	%m/m	2,43	1,34	1,66
Chloride (Cl)	%m/m	0,044	0,028	0,060
Sulfaat (SO ₃)	%m/m	1,38	0,45	0,54
Kaliumoxide (K ₂ O)	%m/m	0,030	0,023	0,033
Natriumoxide (Na ₂ O)	%m/m	0,071	0,068	0,099
Na ₂ O-equivalent	%m/m	0,092	0,083	0,121
Metallisch Al+Zn	%m/m	0,67	0,58	0,67
Gehalte <63µm	%m/m	2,8	0,7	1,5
Dichtheid	kg/m ³	2430	2130	2110
Waterabsorptie (24h)	%m/m	4,4	6,0	6,8
Bindtijd: begin	% van ref	102	103	99
einde	% van ref	100	101	98

3.2.3 Druksterkte bij 20% vervanging zand en grind

Voor een indicatie van de invloed van 20% vervanging van zand en grind door bewerkt AVI-bodemas zijn druksterkteproeven uitgevoerd aan betonmengsels met voornoemd vervan-

gingspercentage. Als uitgangspunt is genomen de betonsamenstelling getoond in de laatste kolom van tabel 4.1. Omdat de maximale korrelgrootte van de bewerkte AVI-bodemas van INASHCO (12 mm) kleiner is dan die van AEB en Boskalis Dolman (32 mm) is de samenstelling zowel van het referentiebeton als het beton met bewerkte AVI-bodemas aangepast (zie bijlage E).

In tabel 3.5 zijn de relatieve druksterkten t.o.v. het referentiebeton weergegeven.

Tabel 3.5 Invloed 20% vervanging op druksterkte (relatief t.o.v. referentiebeton).

Rel. druksterkte (%)	AEB AV-granulaat-2	Boskalis Dolman	INASHCO	
			droog gereinigd	gewassen
1 dag	95	-	116	111
3 dagen	78	85	-	-
7 dagen	-	76	83	94
28 dagen	80	71	69	76

Uit de verkregen resultaten blijkt dat de invloed op de druksterkte na 28 dagen ongeveer vergelijkbaar is (ca. 20 à 30% afname). Gewassen AVI-bodemas lijkt te resulteren in een enigszins geringere afname van de druksterkte dan de droog gereinigde AVI-bodemas.

De relatief hoge druksterkte na 1 dag verharden is waarschijnlijk het gevolg van het aanwezige chloride in de AVI-bodemas.

3.3 Vooronderzoek betonsterkte

3.3.1 Samenstelling betonmengsels

De samenstelling van de onderzochte betonmengsels zijn weergegeven in tabel 3.6. Dit betreft de monsters AV-granulaat-1 met de eigenschappen getoond in tabel 3.1.

De korrelopbouw van het toeslagmateriaal in de betonmengsels is grafisch weergegeven in bijlage A.

Tabel 3.6 Samenstelling onderzochte betonmengsels (kg/m³).

Mengselnr.	1	2	3	4	5	6	7
Rivierzand 0-4 mm (% (V/V))	100	50	0	100	100	50	0
AV-granulaat-1 0-4 mm (% (V/V))	0	50	100	0	0	50	100
Riviergrind 4-32 mm (%(V/V))	100	100	100	50	0	50	0
AV-granulaat-1 4-32 mm (%(V/V))	0	0	0	50	100	50	100
Cement CEM I 42,5N	320	320	320	320	320	320	320
Water (totaal)	173	198	225	190	205	215	259
Superplastificeerder*	0,94	0,42	0,70	1,5	3,9	1,3	2,2
Rivierzand 0-4	723	361	0	742	742	361	0
Riviergrind 4-32	1153	1153	1153	576	0	576	0
AV-granulaat-1 0-4	0	285	586	0	0	285	586
AV-granulaat-1 4-32	0	0	0	502	989	502	989
Vol. massa (berekend)**	2370	2317	2285	2332	2260	2260	2156

* Superplastificeerder Cugla HR40, vaste stofgehalte 20% m/m

** Gebaseerd op 2 % (V/V) lucht

De fractie 0-4 mm van het AV-granulaat-1 is opgebouwd uit 60 % (V/V) van fractie 0-2 mm en 40 % (V/V) van fractie 2-4 mm.

De fractie 4-32 mm van het AV-granulaat-1 bestaat uit 70 % (V/V) van fractie 4-16 mm en 30 % (V/V) van fractie 16-32 mm. Deze verhouding is afgestemd op een korrelopbouw volgens de Fuller-curve.

Het gehalte aan fijne bestanddelen ($< 250 \mu\text{m}$) bedraagt ongeveer 140 l/m^3 voor de onderzochte betonmengsels. Hiermee wordt ruimschoots voldaan aan de gestelde eis in NEN 8005: minimaal 115 l/m^3 bij een maximale korrelgrootte van 31,5 mm.

Het totale watergehalte is de som van het effectieve gehalte ($= 160 \text{ kg/m}^3$) en het geabsorbeerde water door het toeslagmateriaal.

In tabel 3.3 valt op dat de beide betonmengsels (nr. 2 en 3) waarin het rivierzand (gedeeltelijk) is vervangen door AV-granulaat-1 een lagere dosering aan superplastificeerder nodig hebben dan het referentiebeton (100% rivierzand). Normaal heeft een hoekige korrel meer plastificeerder nodig (bij gelijk effectief watergehalte) dan een ronde korrel. Waarschijnlijk is het toegevoegde 'absorptiewater' nog niet volledig in het AV-granulaat-1 opgenomen, of is een deel terug in de pasta gekomen, met als resultaat een hoger effectief watergehalte en dus ook een hogere effectieve wcf.

Het gehalte aan superplastificeerder in mengsel 5 is daarentegen erg hoog. Een duidelijke verklaring hiervoor is niet gevonden.

Er zijn geen aanwijzingen dat inhomogeniteit in de toegepaste monsters een rol heeft gespeeld.

3.3.2 Betonspecie-eigenschappen

De gemeten specie-eigenschappen van bovenomschreven betonmengsels zijn weergegeven in tabel 3.7.

Bij (gedeeltelijke) vervanging van rivierzand door AV-granulaat-1 0-4 mm neemt het luchtgehalte beduidend toe. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de hoge porositeit van deze fijne fractie. Het luchtgehalte in betonmengsel nr. 7 is bijzonder hoog, vanwege volledige vervanging van rivierzand en -grind door AV-granulaat-1.

Tabel 3.7 Specie-eigenschappen onderzochte betonmengsels.

Mengsel nr.	1	2	3	4	5	6	7
Rivierzand 0-4 mm	100	50	0	100	100	50	0
AV-granulaat-1 0-4mm	0	50	100	0	0	50	100
Rivier grind 4-32 mm	100	100	100	50	0	50	0
AV-granulaat-1 4-32mm	0	0	0	50	100	50	100
Zetmaat (mm)	135	150	130	120	140	125	140
Schudmaat (mm)	480	500	480	480	480	470	460
Luchtgehalte (% (V/V))	2,0	5,0	5,7	2,3	5,8	6,1	9,0
Vol. massa (kg/m^3)	2380	2240	2210	2310	2190	2180	1980

Indien rekening wordt gehouden met het gemeten luchtgehalte dan is de berekende volumieke massa (tabel 3.6) in overeenstemming met de gemeten volumieke massa (tabel 3.7).

3.3.3 Eigenschappen verhard beton

De gemiddelde resultaten van de druk- en splijttreksterkte metingen zijn weergegeven in tabel 3.8. De individuele meetresultaten zijn opgenomen in bijlage B.

Gehele of gedeeltelijke vervanging van rivierzand en/of riviergrind door AV-granulaat-1 blijkt de druksterkte zowel na 3 als 28 dagen beduidend te verlagen. Het effect is bij de zandfractie sterker dan bij de grindfractie.

De afname in sterkte is bij de splijttreksterkte minder dan bij de druksterkte; bij de (gedeeltelijke) vervanging van rivierzand/grind door AV-granulaat-1 neemt de verhouding splijttrek/druksterkte toe.

De in dit vooronderzoek waargenomen druksterkten zijn vergelijkbaar met de druksterkten die zijn gemeten in het onderzoek van CUR-commissie B38 [1, 2].

Tabel 3.8 Gemiddelde druk- en splijttreksterkte onderzochte betonmengsels.

Mengsel nr.	1	2	3	4	5	6	7
Rivierzand 0-4 mm	100	50	0	100	100	50	0
AV-granulaat-1 0-4mm	0	50	100	0	0	50	100
Rivier grind 4-32 mm	100	100	100	50	0	50	0
AV-granulaat-1 4-32mm	0	0	0	50	100	50	100
3 daagse druksterkte (MPa)	25,4	13,3	11,6	21,5	14,7	10,8	7,0
% t.o.v. referentie (mengsel 1)	-	52	46	85	58	43	28
28 daagse druksterkte (MPa)	53,1	29,3	25,7	37,5	24,2	21,9	17,6
% t.o.v. referentie (mengsel 1)	-	55	48	71	46	41	33
'betonsterkteklasse'	B45	B20	B17,5	B30	B15	B15	B10
28 daagse splijttreksterkte (MPa)	4,4	2,9	2,5	3,4	2,5	2,5	1,9
% t.o.v. referentie (mengsel 1)	-	66	57	77	57	57	43

3.4 Betononderzoek aan verbeterd AV-granulaat

Zoals reeds beschreven in 3.1.1 heeft AEB de opwerkingsinstallatie aangepast om de kwaliteit van het AV-granulaat, met name die van de fijne fracties, te verbeteren. Met de daarmee verkregen monsters AV-granulaat-2 is betononderzoek uitgevoerd bij vervangingspercentages van 20 % (V/V) en 50 % (V/V) van zowel fijne en grove fractie als enkel de fijne fractie (0-4 mm). De samenstelling van betonmengsels 8 en 10 zijn identiek aan respectievelijk betonmengsels 6 en 2. De verkregen resultaten zijn getoond in tabel 3.9.

De betonmengsels met de verbeterde monsters AV-granulaat-2 hebben in tegenstelling tot de mengsels beschreven in 3.3.1 geen superplastificeerder nodig om de gewenste verwerkbaarheid (en soms zelfs nog beter) te verkrijgen. Dit betekent dat de wateropname door AV-granulaat-2 trager verloopt en dus in de speciefase minder bedraagt dan de berekende hoeveelheid absorptiewater op basis van de gemeten waarde na 30 minuten in het karakteriseringsonderzoek.

De waterabsorptie is voor de verschillende fracties AV-granulaat-2 gemeten als functie van de tijd. De resultaten zijn opgenomen in bijlage C. Hieruit blijkt dat de waterabsorptie (met uitzondering van de grofste fractie 16-32 mm) slechts geleidelijk plaatsvindt: eerder lineair dan wortel-tijd verband.

Dit betekent dat de effectieve water-cementfactor hoger is dan de ontwerpwaarde en bijgevolg de hoeveelheid aanmaakwater nog lager zou kunnen worden ingesteld. Dit heeft tot gevolg dat een nog hoger druksterkteniveau kan worden bereikt, met als keerzijde dat

wel weer een (super)plastificeerder moet worden gebruikt. Toevoeging van de hoeveelheid superplastificeerder die is gebruikt in fase 1 (ca. 0,5 à 1,5 kg/m³) zou naar verwachting resulteren in een verlaging van de wcf van 0,05 à 0,09, hetgeen een extra druksterkte van ca. 3 MPa na 3 dagen en ca. 6 MPa na 28 dagen zou opleveren.

Tabel 3.9 Resultaten betononderzoek aan verbeterd AV-granulaat-2.

Mengsel nr.	8	9	10	11
Rivierzand 0-4 mm	50	80	50	80
AV-granulaat-2 0-4 mm	50	20	50	20
Riviergrind 4-32 mm	50	80	100	100
AV-granulaat-2 4-32 mm	50	20	0	0
Samenstelling (kg/m ³):				
cement CEM I 42,5N	320	320	320	320
water (totaal)	209	187	186	178
zand 0-4	333	532	333	532
grind 4-8	164	262	327	327
grind 8-16	186	298	372	372
grind 16-32	233	373	466	466
AV-granulaat-2 0-2	137	55	137	55
AV-granulaat-2 2-4	149	60	149	60
AV-granulaat-2 4-12	166	66	0	0
AV-granulaat-2 12-16	164	65	0	0
AV-granulaat-2 16-32	204	82	0	0
Specie-eigenschappen:				
luchtgehalte (% (V/V))	3,5	2,3	3,0	2,0
vol. massa (kg/m ³)	2260	2330	2320	2360
zetmaat (mm)	175	160	150	150
schudmaat (mm)	530	500	540	510
Druksterkte na: 3 dagen (MPa)	10,6	14,7	12,1	13,7
28 dagen (MPa)	30,7	37,6	33,3	36,3
Splijttreksterkte na 28d. (MPa)	2,77	3,43	2,97	3,58

De druksterkte van mengsel 11 is lager dan verwacht; immers deze dient hoger te liggen dan die van mengsel 9 (invloed 20% vervanging grind door AV-granulaat-2 4-32 mm). Een duidelijke verklaring hiervoor is niet gevonden.

De splijttreksterkte van het beton met AV-granulaat-2 ligt hoger dan die van de vergelijkbare mengsels beschreven in 3.3.3.

3.5 Betononderzoek uitgevoerd door Korrelbeton

Bij Korrelbeton zijn betonmengsels onderzocht met lagere vervangingspercentages AV-zand en -granulaat (tot 30 %m/m). In dat onderzoek zijn monsters AV-granulaat gebruikt afkomstig van dezelfde partij als AV-granulaat-1 in het INTRON-onderzoek en worden in het vervolg ook als zodanig aangeduid. De verkregen informatie is weergegeven in bijlage D [7].

In de mengsels is zand vervangen door AV-granulaat-1 0-2 mm. De grindfractie is vervangen door AV-granulaat-1 2-32 mm dat is samengesteld uit de fracties 2-6 mm, 6-20 mm en 20-32 mm die bij Korrelbeton zijn aangeleverd door AEB. De gegevens van korrelverde-

ling en waterabsorptie van de toegepaste fracties AV-granulaat-1 zijn getoond in tabel 3.10.

Tabel 3.10 Korrelverdeling en waterabsorptie toegepaste fracties AV-granulaat-1.

Eigenschap	Fractie 0-2 mm	Fractie 2-32 mm
Cum. zeefdoorval (%m/m):		
C31,5		100
C22,4		98
C16		84
C11,2		68
C8		51
C5,6	100	31
C4	99	17
2	98	5
1	76	0
500 µm	53	0
250 µm	26	0
125 µm	5	0
Waterabsorptie na 24 uur (%m/m)	11,2	5,3

In tabel 3.11 zijn van de verschillende betonmengsels de samenstelling weergegeven. De aangegeven vervangingspercentages in %m/m komen overeen met (afgerond) respectievelijk 10 % (V/V), 19 % (V/V) en 33 % (V/V). De specie-eigenschappen van de onderzochte mengsels zijn weergegeven in tabel 3.12.

Van de mengsels is de betonsterkte en de splijttreksterkte na 28 dagen bepaald. Tevens is van een aantal mengsels het sterkteverloop bepaald. De resultaten zijn weergegeven in tabel 3.13. De metingen zijn uitgevoerd in enkelvoud.

Tabel 3.11 Samenstelling onderzochte betonmengsels Korrelbeton.

Mengselnr.	1A	2A	3A	3B	3C
Zand 0-4 mm (% m/m)	92	83	70	100	70
AV-granulaat-1 0-2 mm (% m/m)	8	17	30	0	30
Grind 4-32 mm (% m/m)	92	83	71	71	100
AV-granulaat-1 4-32 mm (% m/m)	8	17	29	29	0
Samenstelling (kg/m ³):					
CEM III/B 42,5 LH/HS	290	290	290	290	290
Water (totaal)	207	178	179	148	149
Water (effectief)**	195	154	141	135	124
Effectieve wcf (-)	0,67	0,53	0,49	0,47	0,43
Superplastificeerder*	5,9	2,8	3,5	3,5	3,5
Zand 0-4 mm	803	726	537	766	537
Grind 4-32 mm	881	799	595	595	850
AV-granulaat-1 0-2 mm	72	145	227	0	227
AV-granulaat-1 2-32 mm	79	158	244	244	0
Vol. massa (berekend)	2338	2299	2075	2047	2057

* Betamix 455

** Toegevoegd water gecorrigeerd voor de waterabsorptie van de toeslagmaterialen

Tabel 3.12 Specie-eigenschappen betonmengsels Korrelbeton.

Mengselnr.	1A	2A	3A	3B	3C
Zand 0-4 mm (% m/m)	92	83	70	100	70
AV-granulaat-1 0-2 mm (% m/m)	8	17	30	0	30
Grind 4-32 mm (% m/m)	92	83	71	71	100
AV-granulaat-1 4-32 mm (% m/m)	8	17	29	29	0
Zetmaat (mm)	230	160	110	180	110
Vol. massa (gemeten, kg/m ³)	2317	2323	2262	2364	2301

Tabel 3.13 Sterkte-eigenschappen onderzochte mengsels Korrelbeton.

Mengselnr.	1A	2A	3A	3B	3C
Zand 0-4 mm (% m/m)	92	83	70	100	70
AV-granulaat-1 0-2 (% m/m)	8	17	30	0	30
Grind 4-32 (% m/m)	92	83	71	71	100
AV-granulaat-1 4-32 (% m/m)	8	17	29	29	0
Druksterkte (MPa):					
2-daagse	6,8	7,0	14,5	nb	nb
4-daagse	11,8	19,2	17,9	nb	nb
6-daagse	15,2	20,7	21,8	nb	nb
8-daagse	17,7	24,8	22,9	30,1	36,2
28-daagse	27,7	36,1	35,4	39,6	48,6
Splijttreksterkte (MPa)	2,0	2,4	3,0	2,7	3,5

nb = niet bepaald

De vervaardigde betonspecies waren goed verwerkbaar en vertoonden geen tekenen van ontmenging. Op basis van de gemeten waterabsorptie van het AV-granulaat-1 is de effectieve water-cementfactor berekend. Omdat het toeslagmateriaal voor aanmaak van de specie niet volledig verzadigd is geweest en door verschil in waterabsorptie van de 0-2 mm fractie t.o.v. de 2-32 mm fractie is het niet gelukt om voor alle mengsels dezelfde effectieve water-cementfactor in te stellen.

De resultaten zijn vanwege het verschil in ingestelde water-cementfactor en tevens een verschillende mate van waterabsorptie niet goed onderling vergelijkbaar.

Uit de resultaten van het onderzoek (mengsels 2A, 3A, 3B, 3C) blijkt dat bij 30% vervanging van de zand- en/of grindfractie een betonkwaliteit B30 mogelijk is, mits plastificeerder wordt toegepast om de zetmaat te laten voldoen aan consistentieklasse S3.

3.6 Beschouwing

De invloed van het vervangingspercentage rivierzand en -grind door respectievelijk AV-granulaat 0-4 mm en 4-32 mm op de 28-daagse druksterkte is grafisch weergegeven in onderstaande figuur 3.2 t/m 3.4.

Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten van onderhavig onderzoek, die verkregen zijn in het onderzoek door Korrelbeton [7] en in [1, 2]. In het onderzoek van Korrelbeton is geen referentiebeton opgenomen; aangenomen is dat bij een water-cementfactor van 0,50 een dergelijk referentiebeton eenzelfde druksterkte na 28 dagen bezit als het referentiebeton in onderhavig onderzoek (beide cementen zijn van sterkteklasse 42,5). Eenzelfde aanname is gedaan voor de inbreng van de resultaten uit [1, 2].

In figuur 3.4 zijn 2 lijnen weergegeven: de zwarte lijn op basis van de resultaten van Korrelbeton (par. 3.5) en de eerste serie metingen van fase 1 (3.3); de rode lijn op basis van de aanvullende resultaten van de tweede serie metingen van fase1 (3.4). De onverwacht lagere druksterkte bij 20 % (V/V) vervanging van rivierzand door AV-granulaat-2 0-4 mm (zie tekst 3.4) resulteert in een sterke afname in druksterkte bij geringe vervangingspercentages van deze fractie. Dit is niet consistent met de verkregen resultaten bij vervanging van zowel fijne als grove fractie (zie figuur 3.2).

Fig. 3.2
Invloed % vervanging
rivierzand+grind
door AV-granulaat op relatieve
druksterkte.

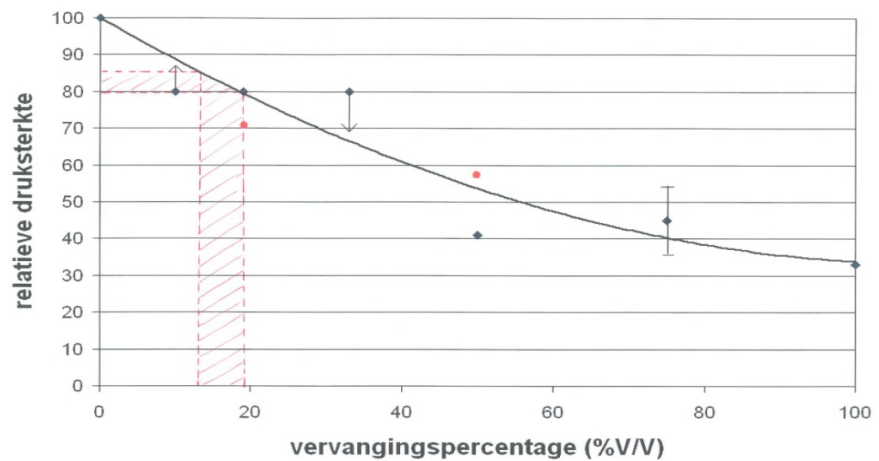


Fig. 3.3
Invloed % vervanging riviergrind
door AV-granulaat 4-32 mm
op relatieve druksterkte.

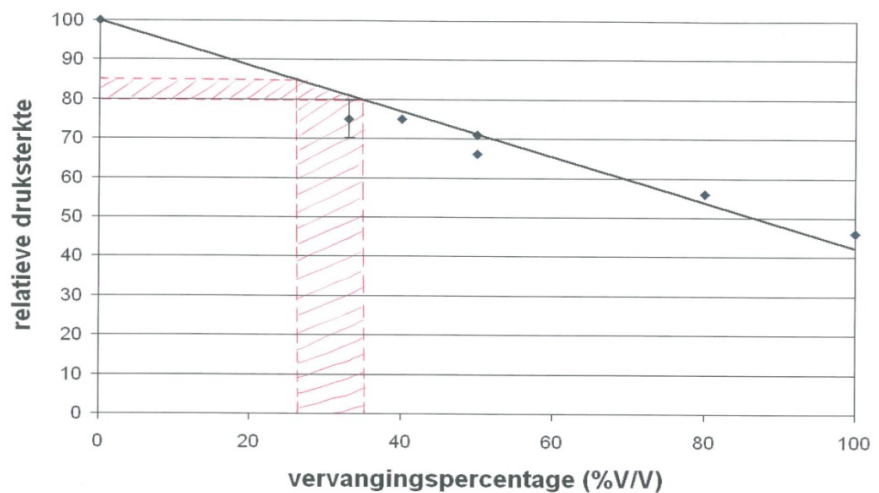
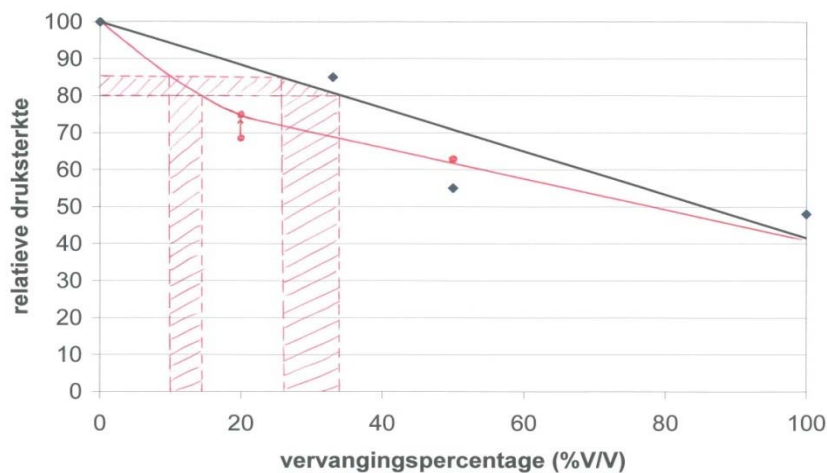


Fig. 3.4
Invloed % vervanging rivierzand
door AV-granulaat 0-4 mm op
relatieve druksterkte.



Uit bovenstaande figuren blijkt dat bij een vervangingspercentage van 15 à 20 % (V/V) rivierzand+grind door AV-granulaat 0-32 mm óf ca. 30 % (V/V) riviergrind door AV-granulaat 4-32 mm, óf ca. 15 % (V/V) dan wel ca. 30 % (V/V) rivierzand door AV-granulaat 0-4 mm de relatieve druksterkte afneemt met 15 à 20%. Een dergelijke afname is te compenseren met gangbare betontechnologische maatregelen (lagere water-cementfactor door hoger cementgehalte en/of lager watergehalte door toepassing van een (super)plastificeerder).

3.7 Conclusies fase 1

De karakterisering van de monsters AVI-bodemas heeft de volgende inzichten opgeleverd:

- De onderzochte fracties voldoen aan de eisen in de Europese norm NEN-EN 12620 met de Nederlandse aanvulling NEN 5905.
- De fracties 0-2 mm en 2-4 mm van AV-granulaat-1 vertonen een uitzonderlijk hoge waterabsorptie c.q. lage dichtheid, hetgeen een negatieve invloed heeft op de eigenschappen van het beton. AV-granulaat-2, verkregen na aanpassing van de opwerkingsinstallatie, was beduidend beter van kwaliteit.
- Het gehalte aan sulfaat is in de grove fracties laag, maar is in beide fijne fracties beduidend hoger. Echter, slechts een deel van het sulfaat is wateroplosbaar, waarbij tevens dient te worden bedacht dat bij gedeeltelijke vervanging slechts een evenredig deel van dit sulfaat in het beton aanwezig is. Dit vormt dus geen belemmering voor toepassing in beton.
- Het gehalte aan chloriden en alkaliën in AV-granulaat is hoger dan in rivierzand/grind, maar vormt (zeker bij gedeeltelijke vervanging) geen belemmering voor de toepassing in beton.

Uit de resultaten van het vooronderzoek aan de betonmengsels kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Inherent aan het poreuze en hoekige karakter van AV-granulaat vertoont de betonspecie een hogere waterbehoefte c.q. heeft een hogere dosering superplastificeerder nodig voor eenzelfde verwerkbaarheid.
- Vanwege de hogere porositeit van het AV-granulaat bezit de betonspecie een hoger luchtgehalte en een lagere dichtheid.
- Een vervangingspercentage van 15 à 20 % (V/V) rivierzand+grind door AV-granulaat 0-32 mm óf ca. 30 % (V/V) riviergrind door AV-granulaat 4-32 mm, óf ca. 15 % (V/V)

dan wel ca. 30 % (V/V) rivierzand door AV-granulaat 0-4 mm is haalbaar door compensatie van de druksterkte met gangbare betontechnologische maatregelen.

De monsters bewerkte AVI-bodemas aangeleverd door Boskalis Dolman, vervaardigd met een nat proces vergelijkbaar met die van AEB, vertoonden vergelijkbare eigenschappen met die van AV-granulaat-2.

De monsters bewerkte AVI-bodemas aangeleverd door INASHCO, vervaardigd met een droog proces, vertoonden inherent hieraan afwijkende eigenschappen. Vanwege het ontbreken van een wasstap is het gehalte aan $<63 \mu\text{m}$, het gloeiverlies en het gehalte aan chloriden, sulfaten en alkaliën hoger en de dichtheid lager.

3.8 Besluit CUR-commissie

CUR-voorschriftencommissie 89 heeft besloten om in fase 2 onderzoek uit te voeren aan beton waarin 20% (V/V) van het grind is vervangen door AV granulaat 4-32 mm en beton waarin 20% (V/V) van het zand en 20% (V/V) van het grind is vervangen door AV-granulaat 0-32 mm.



Hoofdstuk 4

Fase 2: uitgebreid beton-onderzoek

4.1 Opzet onderzoek

Bij alle mengsels wordt uitgegaan van een cementgehalte van 320 kg/m³ CEM I 42,5 N. Aanvullend is voor de bepaling van de carbonatatie diepte, naast bovenstaand mengsel, ook een mengsel onderzocht op basis van CEM III/B 42,5 N LH HS. Voor de mengsels wordt uitgegaan van een effectieve water-cementfactor van 0,50, wat neerkomt op een effectief watergehalte van 160 l/m³. De consistentie van de mengsels is zo ingesteld dat alle mengsels een verwerkbaarheid in klasse S3 (zetmaat 100-150 mm) hebben.

Als toeslagmateriaal is rivierzand en -grind van dezelfde korrelopbouw als overeenkomstige fractie AV-granulaat gebruikt. Het onderzoek in fase 2 is uitgevoerd met verbeterd AV-granulaat (AV-granulaat-2). De onderzochte aspecten zijn in 2.3 opgesomd.

4.2 Samenstelling betonmengsels

De samenstelling van de betonmengsels voor fase 2 zijn getoond in tabel 4.1. Voor een grafische weergave van de korrelverdeling in de onderzochte mengsels wordt verwezen naar bijlage A.

De mengsels behoeven geen plastificeerder om de beoogde verwerkbaarheid in te stellen.

Tabel 4.1 Betonsamenstelling mengsels fase 2.

Component (kg/m ³)	Referentie	20% (V/V) grind- vervanging	20% (V/V) zand- en grindvervanging
Cement	324	324	322
Watergehalte totaal	173	180	185
Zand 0-4 mm	631	632	500
Grind 4-8 mm	376	302	300
Grind 8-16 mm	377	302	300
Grind 16-32 mm	509	408	404
AV-gran. 0-4 mm	0	0	109
AV-gran. 4-16 mm	0	133	132
AV-gran. 16-32 mm	0	89	88
Vol. massa (herleid)	2390	2370	2340
Effectieve w.c.f.	0,50	0,50	0,50

4.3 Eigenschappen betonspecie

De specie-eigenschappen van de onderzochte betonmengsels zijn weergegeven in tabel 4.2.

Tabel 4.2 Specie-eigenschappen mengsels.

Eigenschap	Eenheid	Referentie	20% (V/V) grind- vervanging	20% (V/V) zand- en grindvervanging
Zetmaat na:				
0 min.	mm	140/120 ¹⁾	150/130 ¹⁾	150/140 ¹⁾
15 min.	mm	135	140	140
30 min.	mm	90	140	120
45 min.	mm	90	135	100
60 min.	mm	80	135	80
Schudmaat na:				
0 min.	mm	500/450 ¹⁾	550/460 ¹⁾	500/490 ¹⁾
15 min.	mm	500	520	490
30 min.	mm	470	510	460
45 min.	mm	460	490	450
60 min.	mm	450	480	440
Temperatuur	°C	21	20	19
Luchtgehalte	%	0,9	1,1	2,3
Beginbinding ³⁾	min.	430	510	630
Einde binding ³⁾	min.	500	570	695
waterafscheiding	% ²⁾	1,6	1,1	0,7

1) Laatste waarde betreft betonspecie van dezelfde samenstelling echter vervaardigd op een andere datum.

2) Percentage van totaal watergehalte in de betonspecie.

3) Methodiek ASTM C403 is sterk afwijkend van die van NEN-EN 196-3 en resulteert in beduidend hogere waarden.

Alle mengsels gaven visueel een homogene en stabiele indruk (goede cohesie).

De zetmaat direct na aanmaak is voor alle mengsels ingesteld op 150 mm. De schudmaat direct na aanmaak varieert tussen 550 en 500 mm.

De absolute afname van de zetmaat in de tijd is ongeveer hetzelfde als die voor de schudmaat (afname bedraagt 50 à 60 mm in 60 minuten) voor het referentiemengsel en het mengsel met 20% (V/V) vervanging van zand en grind. Het mengsel met 20% (V/V) grindvervanging heeft een lagere afname van de zetmaat (15 mm) ten opzichte van de afname van de schudmaat (60 mm). Voor deze geringere afname in zetmaat is geen duidelijke verklaring.

De afname in schudmaat als functie van de tijd is vergelijkbaar voor de onderzochte mengsels (zie figuur 4.1).

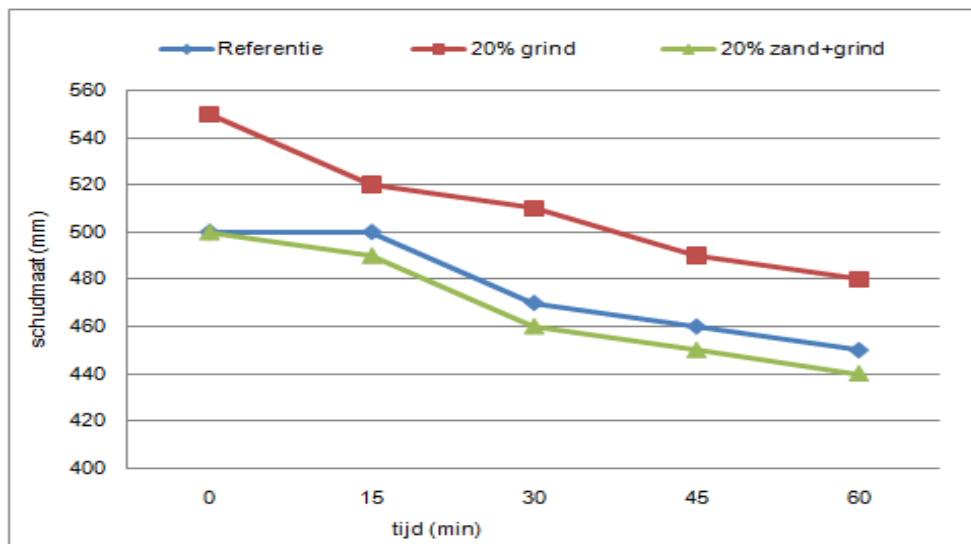
Het gemeten luchtgehalte (inclusief open met lucht gevulde poriën in toeslagmateriaal; gemeten met drukmethode) is hoger naarmate meer AV-granulaat word gedoseerd. Dit is in lijn met het vooronderzoek.

De begin- en eindebinding is gemeten aan de mortelspecie afgezeefd uit de vervaardigde betonmengsels met een penetrometer: Het AV-granulaat heeft een vertragende werking op de bindtijd (ca. 15% hogere bindtijd bij grindvervanging en ca. 40% bij zand- en grindvervanging); echter het verschil tussen begin en einde binding, de meest kwetsbare periode, wordt niet nadelig beïnvloed door het AV-granulaat.

Het afbinden van de afgezeefde mortel is eveneens gevolgd met de meting van de mortel-specietemperatuur. Echter, er is geen relevante temperatuurverhoging waargenomen, waarschijnlijk vanwege het te geringe volume van het proefstuk.

De waterafscheiding (bleeding) is van de mengsels met AV-granulaat lager dan die van het referentiebeton.

Fig. 4.1
Schudmaat als functie
van de tijd.



4.4 Eigenschappen verhard beton

De resultaten van de onderzochte constructieve aspecten zijn samengevat in tabel 4.3. In figuur 4.2 is de druksterkte-ontwikkeling van de betonmengsels weergegeven.

Tabel 4.3 Onderzochte constructieve aspecten.

Eigenschap	Referentie	20% (V/V) grindvervanging	20% (V/V) zand- en grindvervanging
1 daagse druksterkte (MPa)	5,8 (100%)	6,1 (105%)	5,5 (95%)
3 daagse druksterkte (MPa)	22,7 (100%)	19,5 (86%)	17,6 (78%)
28 daagse druksterkte (MPa)	47,3 (100%)	39,3 (83%)	37,7 (80%)
91 daagse druksterkte (MPa)	53,7 (100%)	47,5 (88%)	42,9 (80%)
28 daagse splijttreksterkte (MPa)	4,2 (100%)	3,7 (88%)	3,3 (79%)
t.o.v. 28 daagse druksterkte (%)	8,9	9,4	8,8
28 daagse prismadruksterkte (MPa)	37,7 (100%)	31,4 (83%)	29,2 (78%)
t.o.v. 28 daagse druksterkte (%)	80	80	77
28 daagse E-modulus (GPa)	34,0 (100%)	28,2 (83%)	26,9 (79%)
t.o.v. 28 daagse druksterkte	0,72	0,72	0,71
Max. vervorming na 28 dagen (%)	0,17 (100%)	0,15 (88%)	0,20 (118%)
Uittrekkkracht Φ 12 mm (kN)	58 (100%)	54 (93%)	47 (81%)
Uittrekkkracht/splijttreksterkte (kN/MPa)	13,8 (100%)	14,6 (106%)	14,2 (103%)
Krimp na 51 weken (‰)	0,36 (100%)	0,39 (108%)	0,50 (139%)
Kruip (- krimp) na 48 weken (‰)	0,31 (100%)	0,32 (103%)	0,53 (171%)

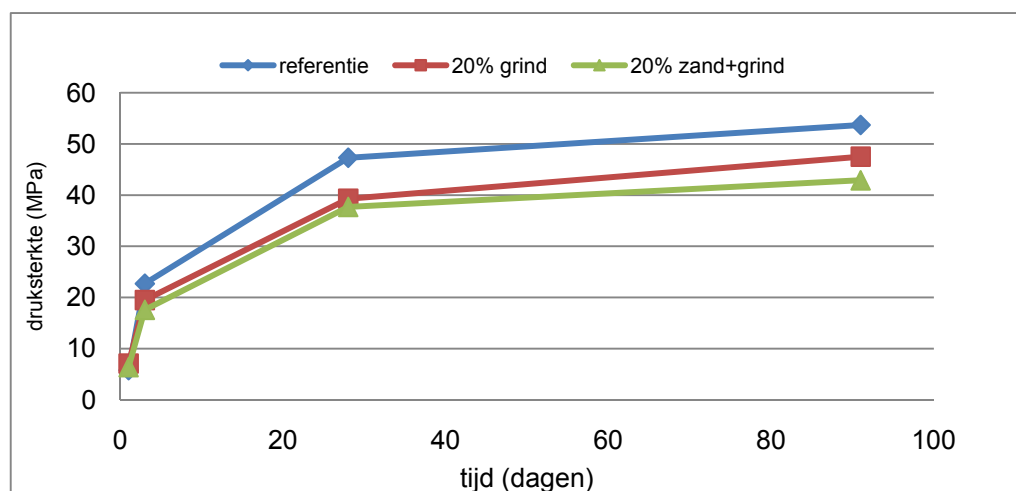
De hogere bindtijd van de mengsels met AV-granulaat resulteert niet in een lagere druksterkte na 1 dag. Met uitzondering van de 1-daagse waarde ligt de druksterkte van meng-

sel 2 (20% (V/V) vervanging grind) 15% en mengsel 3 (20% (V/V) vervanging zand + grind) 20% lager dan die van het referentiebeton (zie figuur 4.2); dit is overeenkomstig de bevindingen in het vooronderzoek.

De verhouding splijttreksterkte/druksterkte (na 28 dagen) is voor de 3 mengsels vergelijkbaar. Dit betekent dat de rekenregels genoemd in NEN 6720 op dit aspect onverkort van toepassing blijven.

Dit geldt ook voor de verhouding E-modulus/druksterkte en prisma/kubusdruksterkte. De maximale vervorming ligt voor de 3 mengsels eveneens op een vergelijkbaar niveau. De uittrekkraft van geribd wapeningsstaal neemt af met toenemend gehalte aan AV-granulaat. Echter de verhouding uittrekkraft en splijttreksterkte (c.q. druksterkte) is ongeveer gelijk. Dit betekent dat bij eenzelfde druksterkte (= eenzelfde splijttreksterkte) de onderzochte mengsels eenzelfde uittrekkraft zullen vertonen.

Fig. 4.2
Ontwikkeling druksterkte.



Het krimp- en kruipgedrag van de onderzochte betonmengsels is grafisch weergegeven in figuur 4.3 respectievelijk figuur 4.4. De krimp- en kruipgrafieken van de individuele proefstukken zijn opgenomen in bijlage F.

Fig. 4.3
Krimp als functie van de tijd.

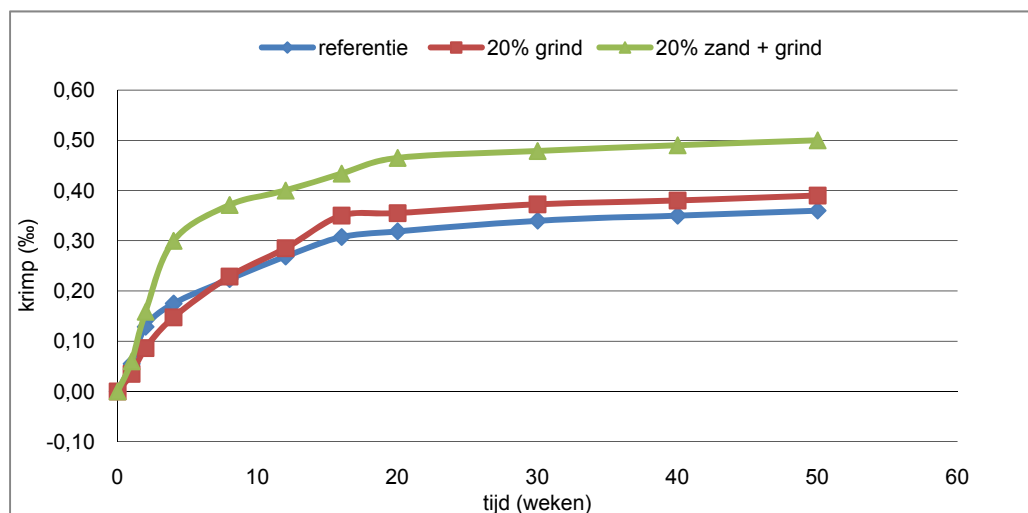
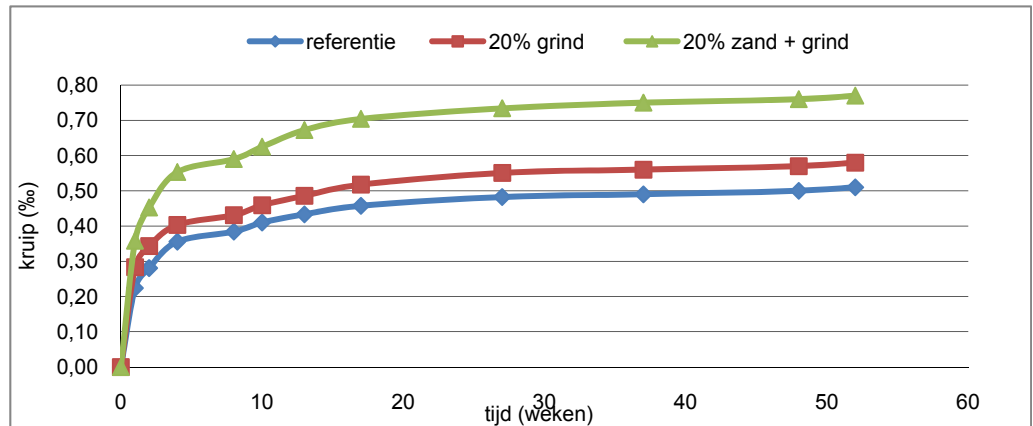


Fig. 4.4
Kruip + krimpvorming als
functie van de tijd.



De kruip van het mengsel met 20% (V/V) grindvervanging is slechts beperkt hoger dan die van het referentiebeton (verschil is < 10%); bij 20% (V/V) vervanging van zand + grind neemt de kruip fors toe (ca. 40% hoger dan referentiebeton). Een dergelijk gedrag is eveneens waargenomen bij gedeeltelijke vervanging van zand + grind door BSA-zanden en -granulaten. De gemeten kruip van het referentiebeton en het beton met 20% (V/V) vervanging van grind door AV-granulaat ligt onder respectievelijk op de rekenwaarde aangegeven in NEN 6720 voor B35-beton ($\epsilon_{\max} = 0,39\%$). De gemeten kruip van het beton met 20% (V/V) zandvervanging + 20% (V/V) grindvervanging ligt daar ruim boven en correspondeert met de rekenwaarde voor een B20-beton ($\epsilon_{\max} = 0,51\%$).

De kruip (gecorrigeerd voor de kruip) na 48 weken is voor het mengsel met 20% (V/V) grindvervanging vergelijkbaar met die van het referentiebeton; bij 20% (V/V) vervanging van zand + grind door AV-granulaat-2 neemt de kruip beduidend toe (ca. 70%).

De proefstukken onderzocht op de lange duur-druksterkte vertonen na 48 weken belasting geen defecten.

4.5 Duurzaamheid

De resultaten van het onderzoek naar de duurzaamheidsaspecten zijn samengevat in tabel 4.4. De individuele resultaten zijn opgenomen in bijlage G.

De carbonatatieweerstand van het beton vervaardigd met AV-granulaat is gelijk of beter dan het referentiebeton. Het hogere vochtgehalte van het beton met AV-granulaat (meer absorptiewater) is waarschijnlijk de verklaring hiervoor.

De chloride-indringing vindt sneller plaats in de betonmengsels met AV-granulaat dan in het referentiebeton; het verschil is echter beperkt van omvang en kan betontechnologisch worden ondervangen door een goede cementkeuze (CEM II/B-V of CEM III/B).

De vorst(dooizout)bestandheid van AV-granulaatbeton is beter dan die van het referentiebeton; opvallend is het zeer lage materiaalverlies gemeten voor het mengsel met 20% (V/V) vervanging van zand + grind door AV-granulaat. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door de visueel zichtbare fijne gasbelletjes (waterstofgasvorming door aluminium + zink?).

De resultaten van de expansie metingen (CPT) zijn weergegeven in figuur 4.5. De expansie van de mengsels met AV-granulaat is slechts beperkt hoger dan die van het referentiebeton. Opvallend is de relatief hoge expansie van het referentiebeton. Niet duidelijk is of dit

het gevolg is van de meetmethode. Alle 3 onderzochte betonmengsels voldoen aan het toetsingscriterium ($<0,040\%$ na 1 jaar).

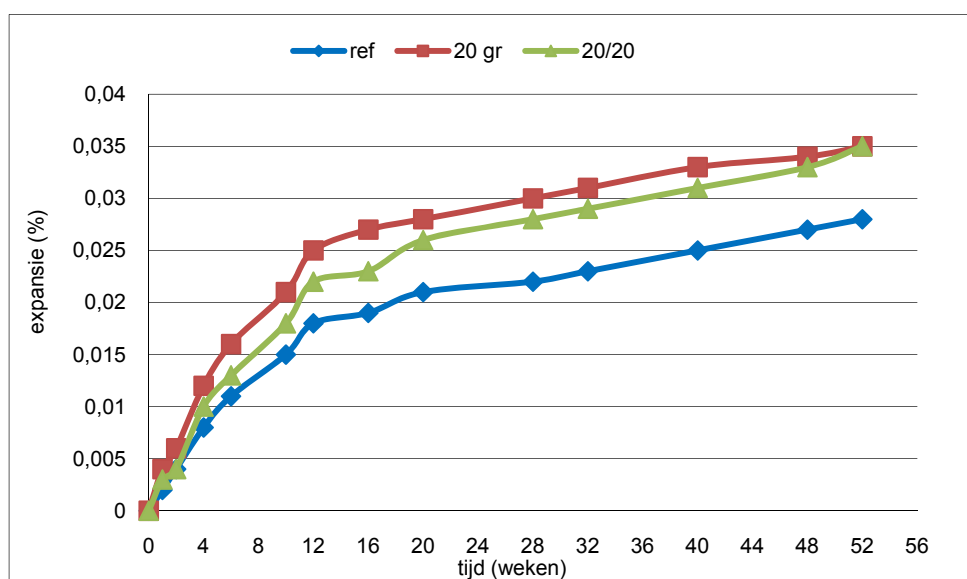
Onderzoek naar de expansie (CPT) aan beton met volledige vervanging van het zand en grind door bewerkte AVI-bodemas van AEB resulteerde in vergelijkbare resultaten (zie bijlage H).

Uit dit onderzoek is tevens gebleken dat betreffende AVI-bodemas, dat een gemiddeld gehalte aan metallisch Al bevatte van $0,9\text{ }\mu\text{m/m}$ (varieerde van $0,7$ tot $1,0\text{ }\mu\text{m/m}$ voor de verschillende fracties), geen relevante hoeveelheid waterstofgasvorming in de speciefase vertoont ($<1\%$ (V/V)).

Tabel 4.4 Resultaten duurzaamheidsonderzoek (gemiddelde waarden).

Eigenschap	Eenheid	Referentie	20% (V/V) grind- vervanging	20% (V/V) zand en grind- vervanging
Carbonatatiediepte na:				
CEM I 28 dagen	mm	1,0	1,0	1,0
91 dagen	mm	2,9	2,0	2,0
182 dagen	mm	3,3	2,4	2,3
365 dagen	mm	3,5	2,6	2,6
CEM III 28 dagen	mm	2,2	2,1	2,0
91 dagen	mm	4,1	4,1	3,0
182 dagen	mm	5,0	4,7	3,5
365 dagen	mm	5,4	5,2	3,9
Chloridediffusiecoëfficiënt	$10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$	13,6 (100%)	18,0 (132%)	18,9 (139%)
Vorst-dooizoutbestandheid (CDF)				
14 cycli	kg/m^2	3,6 (100%)	3,0 (83%)	0,2 (6%)
28 cycli	kg/m^2	7,8 (100%)	5,5 (71%)	0,4 (5%)
Vorst-dooibestandheid (CIF)				
14 cycli	kg/m^2	3,4 (100%)	2,8 (82%)	0,2 (6%)
28 cycli	kg/m^2	7,4 (100%)	4,5 (61%)	0,3 (4%)
CPT na 52 weken	%	0,028	0,035	0,035

Fig. 4.5
Expansie (CPT) als functie
van de tijd.



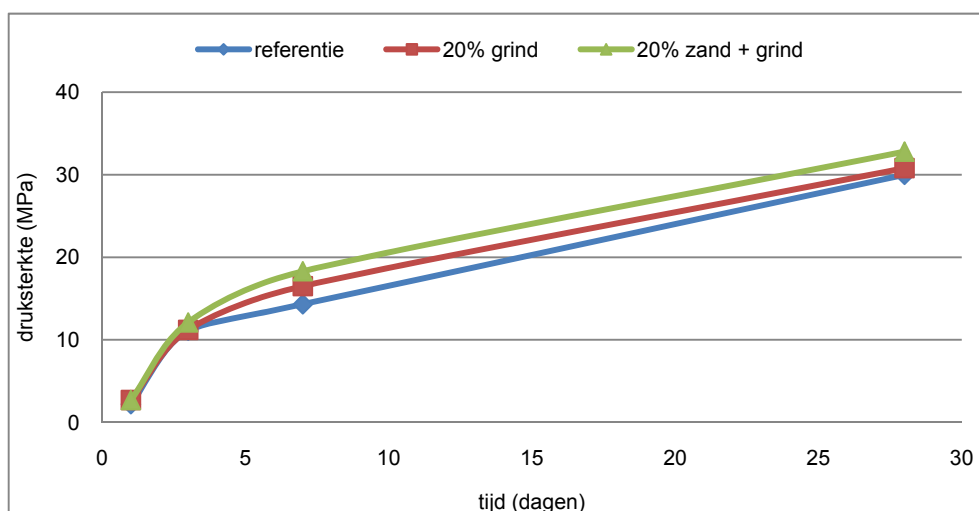
4.6 Hergebruik granulaat AVI-beton

Van 2 betonsamenstellingen (20% (V/V) vervanging grind en 20% (V/V) vervanging zand + grind) zijn vervaardigde betonkuben na ongeveer driekwart jaar verhard en gebroken (voorbreker + kaakbreker) tot korrelgrootte kleiner dan 32 mm. Van het gebroken en opgewerkte (wassen + zeven fractie 4-32 mm) granulaat is opnieuw beton vervaardigd. Als referentie dient beton vervaardigd met betongranulaat (BG ref) verkregen uit de reguliere productie van brekers. De resultaten van dit onderzoek naar het hergebruik van AVI-beton zijn weergegeven in tabel 4.5. De druksterkte-ontwikkeling van de 3 betonmengsels is grafisch weergegeven in figuur 4.6.

Tabel 4.5 Resultaten onderzoek hergebruik AVI-beton.

Mengsel	BG ref	20%G	20%Z+G
Samenstelling (kg/m ³):			
cement	320	320	320
water (effectief)	160	160	160
waterabsorptie	76	45	51
zand 0/4	661	661	661
granulaat 4/32	1044	1058	1045
Specie-eigenschappen:			
zetmaat (mm)	140	150	150
schudmaat (mm)	480	520	530
luchtgehalte (% (V/V))	1,8	1,5	1,8
vol. massa (kg/m ³)	2254	2251	2237
Sterkte verhard beton (MPa):			
druksterkte na: 1 dag	2,2	2,7	2,7
3 dagen	11,1	11,2	12,1
7 dagen	14,3	16,5	18,2
28 dagen	30,0	30,8	32,8
splijttreksterkte na 28 dagen	2,9	2,9	3,3

Fig. 4.6
Ontwikkeling druksterkte
betonmengsels bij hergebruik
granulaten.



Uit de verkregen resultaten blijkt dat beton vervaardigd met granulaten (4-32 mm) verkregen door het breken/wassen van beton waarin 20% (V/V) van het grind respectievelijk 20% (V/V) van het zand + 20% (V/V) van het grind is vervangen door overeenkomstige fracties bewerkte/gewassen AVI-bodemas vergelijkbare specie-eigenschappen en sterkte bezit als die van eenzelfde beton vervaardigd met regulier betongranulaat.

4.7 Conclusies fase 2

Op basis van de resultaten verkregen in fase 2 van dit onderzoek kunnen, wat betreft de onderzochte mengsamenstellingen, onderstaande conclusies worden getrokken.

Met betrekking tot betonspecie:

- Met AVI-bodemas zijn homogene en stabiele mengsels te vervaardigen die een geringere neiging tot waterafscheiding vertonen.
- De verwerkbaarheid (zetmaat, schudmaat) is vergelijkbaar met die van het referentiebeton.
- AVI-bodemas veroorzaakt een vertraging van de afbinding, echter niet in de periode tussen begin en einde binding. Er is geen invloed op de 1-daagse druksterkte waargenomen.
- Inherent aan het poreuze karakter van AVI-bodemas en beperkte gasvorming (door metallisch aluminium en zink) heeft AVI-bodemasbeton een hoger luchtgehalte en bijgevolg een lagere volumieke massa dan het referentiebeton. Bij een gehalte aan metallisch Al <1% m/m is de toename van het luchtgehalte in de speciefase minder dan 1% (V/V).

Met betrekking tot constructieve eigenschappen:

- Vervanging van 20% (V/V) grind respectievelijk 20% (V/V) zand + 20% (V/V) grind door gewassen AVI-bodemas (dichtheid korrels $\geq 2200 \text{ kg/m}^3$) neemt bij verder gelijke betonsamenstelling de druksterkte af met 15% respectievelijk 20%. Bij toepassing van droog bewerkte AVI-bodemas (dichtheid korrels $\geq 2100 \text{ kg/m}^3$) kan de druksterkte met ca. 10% extra afnemen.
- Bij eenzelfde druksterkte als het referentiebeton bezit beton vervaardigd met gewassen AVI-bodemas (dichtheid korrels $\geq 2200 \text{ kg/m}^3$ en $\leq 20\%$ (V/V) vervanging zand en/of grind) eenzelfde splijttreksterkte, E-modulus en vervormingscapaciteit; de uittrekkkracht van ingestort geribd wapeningsstaal is bij eenzelfde druksterkte eveneens gelijkwaardig.
- De krimp en kruip bij 20% (V/V) grindvervanging door AVI-bodemas (dichtheid korrels $\geq 2200 \text{ kg/m}^3$) zijn vergelijkbaar met of beperkt hoger dan die van het referentiebeton; bij 20% (V/V) zand + 20% (V/V) grindvervanging neemt zowel de krimp als de kruip fors toe.

Met betrekking tot de duurzaamheid:

- De carbonatatieweerstand van beton vervaardigd met gewassen AVI-bodemas (dichtheid korrels $\geq 2200 \text{ kg/m}^3$ en $\leq 20\%$ (V/V) vervanging zand en/of grind) is tenminste gelijkwaardig aan die van het referentiebeton.
- Dit geldt ook voor de vorstdooi- en vorstdooizoutweerstand.

- Daarentegen is de weerstand tegen chloride-indringing geringer dan bij het referentiebeton; dit kan worden ondervangen door een juiste cementkeuze.
- De expansiemetingen en microscopisch onderzoek geven geen indicatie dat *destructieve* expansie (bijvoorbeeld als gevolg van ASR of vorming van aluminiumhydroxide-gel) optreedt.

Met betrekking tot hergebruik granulaat van AVI-bodemasbeton:

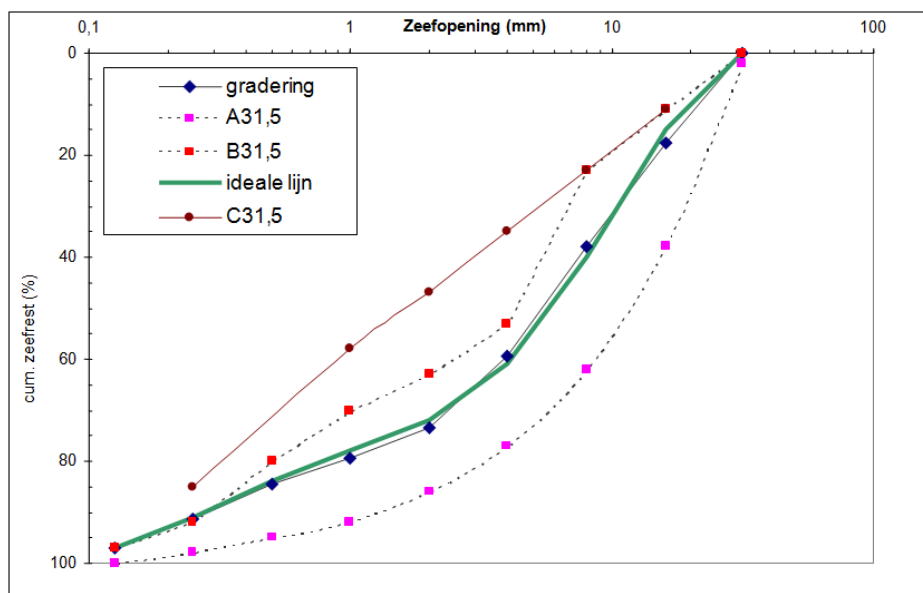
- Met granulaat van AVI-bodemasbeton ($\leq 20\%$ (V/V) vervanging zand en/of grind) is eenzelfde kwaliteit beton te vervaardigen als met de reguliere kwaliteit betongranulaat.



Literatuur

1. Secundaire toeslagmaterialen in beton, CUR-rapport 185. Stichting CUR, Gouda, 1996.
2. Onderzoek AVI-beton, G. van der Wegen en O. Kliphuis, INTRON-rapport 88094, INTRON, Sittard., 1988.
3. Eigenschappen AEB-granulaten en AEB-zand, B. van Bree, INTRON-rapport 20070009, INTRON, Sittard, januari 2007.
4. Evaluatie-onderzoek van de ophoging met AVI-bodemas in Rijksweg A15, TAUW-rapport in opdracht van DWW-RWS, TAUW, Deventer., maart 2002.
5. Uitloogonderzoek beton met AEB granulaat, U. Hofstra, INTRON-rapport 20080062, maart 2008, INTRON, Sittard, maart 2008.
6. Gewassen AVI-bodemas als toeslagmateriaal voor beton, G. van der Wegen, INTRON-rapport 20100016, INTRON, Sittard, januari 2010.
7. Onderzoek toepassing AEB-granulaat bij Korrelbeton, bijlage email 11 januari 2008.

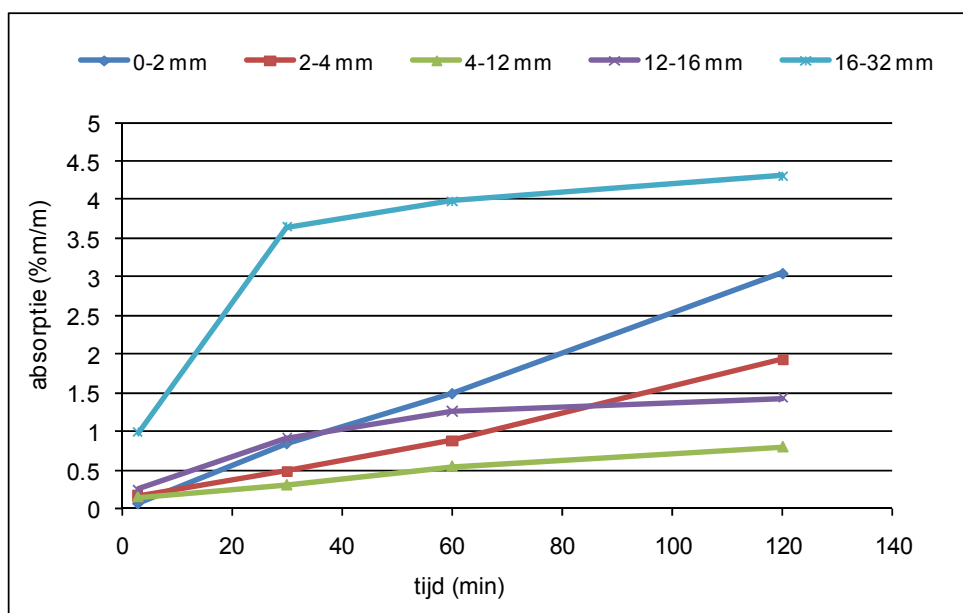
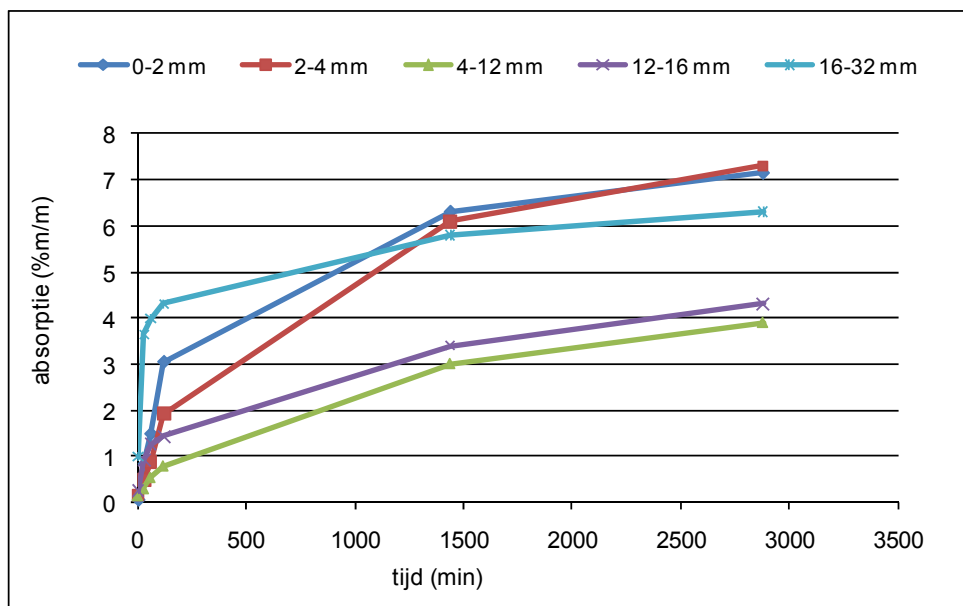
Bijlage A. Korrelverdeling toeslagmaterialenmengsel



Bijlage B. Individuele meetresultaten

Mengsel nr.	1	2	3	4	5	6	7
Rivierzand 0-4 m	100	50	0	100	100	50	0
AV-granulaat 0-4 mm	0	50	100	0	0	50	100
Riviergrind 4-32 m	100	100	100	50	0	50	0
AV-granulaat 4-32 mm	0	0	0	50	100	50	100
3d druksterkte (MPa)	25,9	13,1	11,5	21,7	14,8	10,9	6,8
	26,1	13,5	11,5	21,1	14,8	10,6	6,9
	24,2	13,4	11,7	21,6	14,5	10,9	7,3
Gem.	25,4	13,3	11,6	21,5	14,7	10,8	7,0
3d vol. massa (kg/m³)	2350	2200	2120	2260	2130	2050	1890
	2380	2190	2160	2290	2110	2050	1900
	2370	2180	2130	2250	2100	2040	1900
Gem.	2370	2190	2150	2270	2110	2050	1900
28d druksterkte (MPa)	52,6	29,8	25,4	35,9	24,0	22,4	17,9
	52,4	28,0	26,0	38,2	24,5	22,1	18,2
	54,3	30,2	25,6	38,3	24,1	21,1	16,6
Gem.	53,1	29,3	25,7	37,5	24,2	21,9	17,6
28d vol. massa (kg/m³)	2370	2230	2120	2280	2130	2100	1900
	2380	2200	2130	2260	2110	2090	1950
	2390	2190	2150	2300	2130	2080	1900
Gem.	2380	2230	2130	2280	2120	2090	1920
28d splijttreksterkte (MPa)	4,4	3,0	2,5	3,7	2,5	2,4	1,8
	4,4	2,7	2,5	3,2	2,6	2,5	1,9
	4,5	3,1	2,5	3,4	2,5	2,6	1,9
Gem.	4,4	2,9	2,5	3,4	2,5	2,5	1,9
28d vol. massa (kg/m³)	2380	2190	2120	2280	2100	2080	1900
	2380	2190	2120	2260	2120	2090	1910
	2390	2190	2160	2260	2110	2120	1910
Gem.	2380	2190	2130	2270	2110	2100	1910

Bijlage C. Waterabsorptie als functie van de tijd



Bijlage D. Rapport onderzoek Korrelbeton

Onderzoek toepassing AEB-granulaat bij Korrelbeton

Doel:

Bepaling van de eigenschappen van beton- en specie geproduceerd met variërend gehalte aan AEB-zand en granulaat met CEM III/B 42,5 LH.HS, het gangbare cement dat door Korrelbeton wordt gebruikt.

1. Mengsels

De volgende mengsels zijn beproefd (zie tabel 1). In alle mengsels is het primaire zand vervangen door het AEB-zand 0-2. De grindfractie is vervangen door een mengsel AEB-granulaat dat is opgebouwd uit 35% 2-6, 35% 6-20 en 30% 20+. Hierbij is de 20+ eerst handmatig ontdaan van metaaldelen.

Om de invloed op de betondruksterkte en de verwerkbaarheid van het aandeel AEB-zand en AEB-granulaat vast te stellen is in de mengsels 1A, 2A en 3A een oplopend gehalte aan AEB-zand en granulaat toegepast.

In de mengsels 3 is gekeken naar de invloed op de sterkte van het AEB-zand resp. het AEB-granulaat. Hiertoe is in mengsel 3A zowel de zand- als de grindfractie door 30% AEB-zand en 30% AEB-granulaat vervangen. In mengsel 3B is alleen de grindfractie door 30% AEB-granulaat vervangen en heeft er geen vervanging plaatsgevonden van de zandfractie. In mengsels 3C is alleen de zandfractie door 30% AEB-zand vervangen.

Tabel 1. Beproefde mengsels.

	CEM III/B 42,5 LH.HS (kg/m ³)	AEB-zand (gejigd) (%)	AEB-granulaat ¹	Primair zand/grind
Mengsel 1A	290	8	8	84
Mengsel 2 A	290	17	17	66
Mengsel 3 A	290	30	29	41
Mengsel 3 B	290	0	29	71
Mengsel 3C	290	30	0	70

2. Metingen

a. Eigenschappen AEB-zand en granulaat:

Voordat de betonspecie en kubussen worden aangemaakt worden eerst de korrelverdeling, het vochtgehalte en de waterabsorptie van de grondstoffen bepaald.

b. Verwerkbaarheid

De verwerkbaarheid wordt visueel beoordeeld. Gestreefd wordt naar een vergelijkbare consistentie als bij het CUR-onderzoek (zetmaat 100-150 mm)

c. Eigenschappen betonkubussen

Per mengsel zijn 5 kubussen geproduceerd.

Van de A-mengsels worden de volgende eigenschappen bepaald:

- Rijpheid na 2, 4, 6 en 8 dagen m.b.v. de rijpheidcomputer
- Druksterkte na 2, 4, 6, 8 en 28 dagen

3. Resultaten

3.1. Eigenschappen AEB-granulaat

Van de aangeleverde fracties is de korrelverdeling en het vochtgehalte bepaald. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2 Korrelverdeling en vochtgehalte aangeleverde fracties.

Cum. door zeef	AEB 0-2 (%)	AEB 2-6 (%)	AEB 6-20 (%)	AEB 20-40 (%)
31.5				100
22.4			100	91.8
16			99.8	45.9
11.2		99	82.1	14.4
8		95	42	9.4
5.6	99.7	75.7	7.1	7.6
C4	99.3	41.2	2.9	6.5
2mm	97.7	8.4	2.1	5.6
1mm	76.2			
500µm	53.4			
250µm	26.2			
125µm	5.4			
Vocht (%)	19,6	9,2	9,0	6,0

3.2 Resultaten betonspecie

Voordat de mengsels zijn aangemaakt zijn de vochtgehalten van de grondstoffen opnieuw bepaald. Het AEB-zand en granulaat zijn niet voorbevochtigd voordat de mengsels zijn aangemaakt.

Mengselnr.	1A	2A	3A	3B	3C
CEM III/B 42,5 LH/HS (kg/m ³)	290	290	290	290	290
Zand 0-4 (kg/m ³)	803	726	537	766	537
AEB-zand (kg/m ³)	72	145	227	0	227
Grind 4-32 (kg/m ³)	881	799	595	595	850
AEB-granulaat 4-32 (kg/m ³)	79	158	244	244	0
Water uit toeslagmaterialen (kg/m ³)	81	88	69	66	57
Toegevoegd water (kg/m ³)	126	90	110	82	92
Betamix 455 (kg/m ³)	5.9	2.8	3.5	3.5	3.5
Zetmaat (mm)	230	160	110	180	110
Vol. massa (kg/m ³)	2317	2323	2262	2364	2301
% zandvervanging	8	17	30	0	30
% grindvervanging	8	17	29	29	0

3.3 Verwerkbaarheid

Mengsels 1

Het mengselontwerp van 1A was gebaseerd op een wcf van 0,6 (4,3 liter water toevoegen). Het mengsel bleek echter te droog (bleef plakken aan molen). In stappen 2 liter water extra bijgevoegd. 250 ml water SP toegevoegd. Dit verbeterde de verwerkbaarheid aanmerkelijk.

Zetmaat van de specie is 230, mengsel vertoonde bleeding maar was stabiel) ontmengde niet. Te veel aan water.

Mengsels 2

Voor beide mengsels was de volgorde van dosering: grind, zand, vervolgens het water en daarna het AEB-granulaat en zand. Tenslotte is de superplastificeerder toegevoegd. Mengsels zijn gedurende ca. 5 minuten gemengd in de molen, specie kwam los van de trommel Mengsel 1A was goed verwerkbaarheid en vertoonde geen bleeding.

Mengsels 3

Voor beide mengsels was de volgorde van dosering: grind, zand, vervolgens het water en daarna het AEB-granulaat en zand. Tenslotte is de superplastificeerder toegevoegd. Het wateraandeel blijkt zeer sterk van invloed te zijn op de verwerkbaarheid. Bij mengsel 3A was aanvankelijk 120 liter/m³ water toegevoegd wat resulteerde in een mengsel met een vloeimaat van 340. Een dosering van 110 liter leverde een specie met een zetmaat van 110. De zetmaat van dit mengsel bedroeg na een kwartier 70 en was dus duidelijk teruggelopen mogelijk als gevolg van de wateradsorptie van AEB-zand en granulaten. Mengsel 3B had een zetmaat van 180. na 15 minuten was de zetmaat gelijk. Aangezien in dit mengsel geen AEB-zand is toegepast lijkt de waterabsorptie van het AEB-zand behoorlijk van invloed op de verwerkbaarheid van de specie. Alle aangemaakte mengsels vertoonden geen bleeding en ontmenging.

3.4 Resultaten rijpheid

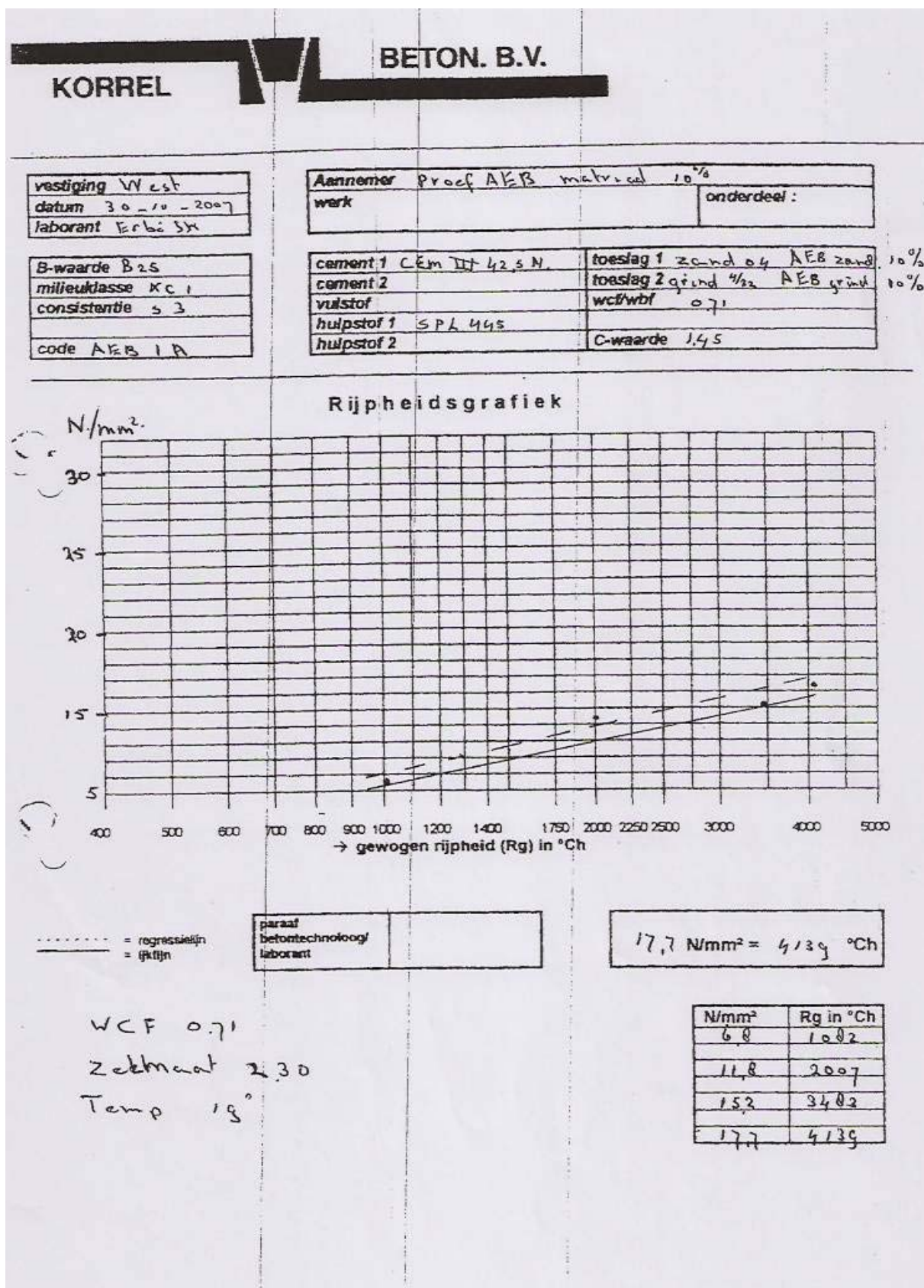
De rijpheidsgrafieken zijn hierna weergegeven.

3.5 Resultaten druksterkte en splijtsterkte

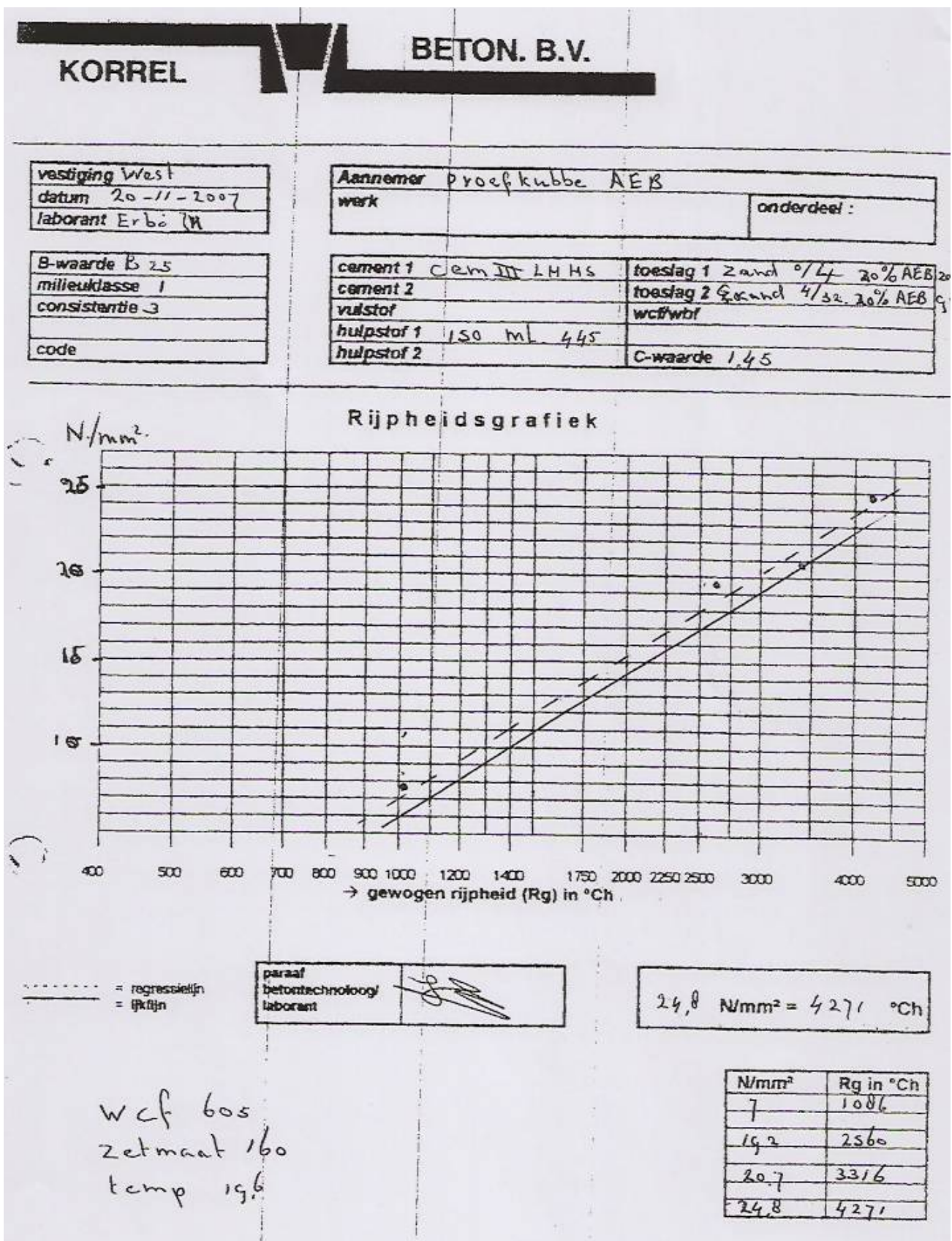
Mengselnr.	1A	2A	3A	3B	3C
2-daagse	6,8	7	14,5		
4-daagse	11,8	19,2	17,9		
6-daagse	15,2	20,7	21,8		
8-daagse	17,7	24,8	22,9		
28-daagse	27,7	36,1	35,4	39,6	48,6
Splijtsterkte	2,0	2,4	2,5	2,7	3,5



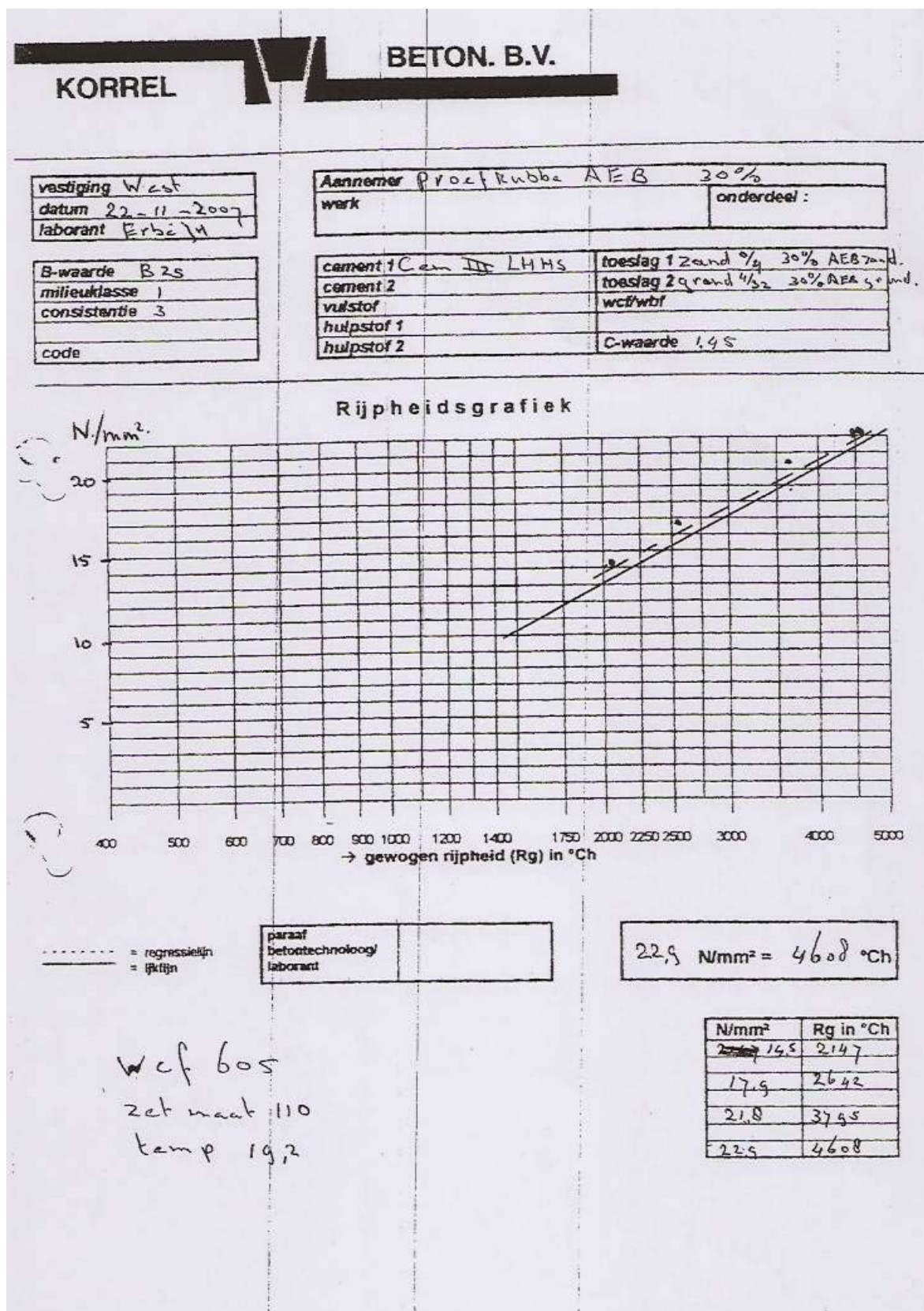
Rijpheidsgrafiek 10% vervanging



Rijpheidsgrafiek 20% vervanging



Rijpheidsgrafiek 30% vervanging



Bijlage E. Betononderzoek TU-Delft INASHCO

Memo

t.b.v.: leden CUR-Commissie VC 89 AVI-granulaten in beton
van: H.H.M. Soen - Inashco
Betreft: Samenvatting resultaten betononderzoek TU-Delft aan AVI-granulaten
dd. 23 augustus 2010 (inclusief aanvullingen zoals afgesproken tijdens CUR-vergadering 27 mei 2010)

Dit memo geeft een beknopte samenvatting van betononderzoek aan AVI-granulaat, uitgevoerd bij TU-Delft, Stevinlaboratorium.

Doel/opzet van het onderzoek

In de periode november 2009 – maart 2010 zijn in het Stevinlaboratorium van de TU-Delft betonproefmengsels aangemaakt met AVI-granulaat. Hierbij wordt een referentiebeton vergeleken met een beton met dezelfde samenstelling, waarin 20 % van het toeslagmateriaal is vervangen door AVI-granulaat. Beoordeeld worden de eigenschappen van de betonspecie en de invloed op de druksterkte en splijttreksterkte met controleproefkubussen, ribbe 150mm.

Referentiebeton: 350 kg CEM I 42,5N per m³; grind nom. 16 mm, consistentieklasse: S2/3 (zetmaat ca. 100 mm); watercementfactor ca. 0,53 (bij effectief watergehalte ca 185 ltr/m,3).

Beton met 20% AVI-granulaat: basis: gelijke samenstelling, echter nu 20% van het toeslagmateriaal vervangen door AVI-granulaat. Bij de vervanging is er naar gestreefd de gradering van het toeslagmaterialenmengsel gelijk te houden.

Bij aanvang van het onderzoek is de specie aangemaakt in de, in het TU-laboratorium aanwezige, Eirich-dwangmenger en zijn de daar beschikbare fracties toeslagmaterialen gebruikt. De resultaten van dit onderzoek waren teleurstellend. Zo bleek de mengtijd grote invloed te hebben op de gemeten verwerkbaarheid. Bovendien moest worden “ingespeeld” op de eigenschappen van het AVI-granulaat, met name ten aanzien van het omgaan met absorptie- en aanhangend water.

Op basis van deze ervaringen bij de proeven in november/december 2009 zijn voor de 2^e serie proeven(maart 2010) een aantal randvoorwaarden gewijzigd. Zo is gekozen voor het gebruik van “normaal” fijn zand en grof zand en grind 4-16 mm. Deze grondstoffen zijn betrokken van de bulkvoorraad van een lokale betoncentrale. Verder is de betonspecie gemengd in een vrije val menger.

Samenvatting resultaten

Gebruikte grondstoffen en betonsamenstelling

AVI-granulaat

Het droog gereinigde AVI-granulaat, dat is gebruikt in deze onderzoeken, is geproduceerd met de Pilot-installatie van Inashco te Sluiskil. Deze installatie wordt gedurende de zomer 2010 vervangen door een geoptimaliseerde en vergrote installatie. In deze installatie zal de recovery van metalen en de scheiding van de verschillende korrelgroepen en lichte delen sterk zijn verbeterd. Verwacht wordt dat hiermee ook de eigenschappen en daarmee

de prestatie in beton van het AVI-granulaat nog zal verbeteren. Op dit moment wordt door de pilotinstallatie een AVI-granulaat 2/12 mm geproduceerd. Na de aanpassing van de installatie zal er meer flexibiliteit zijn om fijnere en grovere fracties te produceren.

In februari 2010 is als proef ca. 20 ton door Inashco droog gereinigd AVI-granulaat bij Boskalis Dolman aanvullend gewassen.

Hiermee was uit één partij zowel het droog gereinigde product als het aanvullend gewassen granulaat beschikbaar. Met monsters uit deze partijen is het betononderzoek uitgevoerd. Door Intron zijn de kenmerkende eigenschappen van beide granulaten bepaald. De resultaten van dat onderzoek zijn aan dit verslag toegevoegd.

Aan beide partijen is bovendien het gehalte metallisch aluminium en zink door zowel door Intron als de TU-Delft bepaald om misverstanden over de bepalingmethode en interpretatie van resultaten weg te nemen.

Zand en grind

Er is gebruik gemaakt van fijn zand 0/2, grof zand 0/4 en grind 4-16 mm. Deze grondstoffen zijn betrokken van de bulkvoorraad van een lokale betoncentrale. Het toeslagmateriaal is vochtig verwerkt.

Zie voor de korrelverdeling van de verschillende toeslagmaterialen de tabel hieronder.

Cement

Het voor de proeven gebruikte portlandcement (CEM I 42,5 N) is betrokken uit de voorraad van het Stevin betonlaboratorium.

Korrelopbouw toeslagmaterialen (zeefanalyse Stevin-lab.).

Zeef	Fijn zand 0/2	Grof zand 0/4	Grind 4/16	AVI granulaat 2/12 droog ger	AVI granulaat 2/12 aanv. gewassen
16 mm	0%	0%	1%	0%	1%
11,2 mm	0%	0%	20%	2%	5%
8 mm	0%	0%	49%	11%	22%
4 mm	0%	11%	91%	40%	67%
2 mm	2%	23%	98%	66%	92%
1 mm	9%	32%	99%	85%	97%
500 µm	31%	53%	99%	91%	98%
259 µm	90%	94%	100%	95%	99%
125 µm	99%	100%	100%	97%	99%
63 µm	100%	100%	100%	99%	100%
Rest	100%	100%	100%	100%	100%

Samenstelling mengsels:

1. Referentie

	Rekenwaarden grondstoffen		Betonsamenstelling	
	vol. massa ρ_{ssd} kg/m ³	vochtgehalte t.o.v. droog	% van totaal volume toeslagmat	Dosering grond- stoffen/m ³
CEM I 42,5N	3100			350
zand 0/2	2650	4,44	0	0
zand 0/4	2650	4,02	44	834
grind 4/16	2650	3,46	56	1055
water				130

2. Mengsel met droog gereinigd AVI-granulaat

	Rekenwaarden grondstoffen		Betonsamenstelling	
	vol. massa ρ_{ssd} kg/m ³	vochtgehalte t.o.v. droog	% van totaal volume toeslagmat.	Dosering grond- stoffen/m ³
CEM I 42,5N	3100			350
zand 0/2	2650	4,44	8	145
zand 0/4	2650	4,02	24	462
grind 4/16	2650	3,46	48	904
AVI granulaat 2/12*	2200	8,98	20	302
water				143

* droog gereinigd AVI-granulaat: voor berekening: geen adsorptievocht; 1% nog te absorberen vocht

3. Mengsel met droog gereinigd + aanvullend gewassen AVI-granulaat

	Rekenwaarden grondstoffen		Betonsamenstelling	
	vol. massa ρ_{ssd} kg/m ³	vochtgehalte t.o.v. droog	% van totaal volume toeslagmat	Dosering grond- stoffen/m ³
CEM I 42,5N	3100			350
zand 0/2	2650	4,44	13	244
zand 0/4	2650	4,02	24	452
grind 4/16	2650	3,46	43	816
AVI granulaat 2/12**	2300	10,2	20	319
Water				139

** gewassen AVI-granulaat: voor berekening: geen adsorptievocht; geen nog te absorberen vocht

Bij het zand en grind is voor de berekening van het te doseren water rekening gehouden met 0,7% absorptievocht; bij het AVI-granulaat is uitgegaan van totaal 10,0% te absorberen vocht. Het totaal effectief watergehalte is steeds 185 ltr (wcf 0,53)

Mengprocedure (vrije val menger).

Op basis van de eerder opgedane ervaringen is gestart met het kort voormengen van het AVI-granulaat met het aanmaakwater. Op deze manier kan het granulaat eventueel nog te absorberen water opnemen en is de terugloop van de consistentie na mengselaanmaak minimaal.

AVI-granulaat + Water in menger:	30 sec mengen
Helpt toeslag	30 sec mengen
Cement	30 sec mengen
Rest toeslag	5 min mengen

Bepalingen / aanmaak proefstukken

Aansluitend aan de mengselaanmaak is de consistentie, de volumieke massa en het luchtgehalte van de betonspecie gemeten.

Specie-eigenschappen.

Betonspecie, direct na aanmaak:	Referentie	20% AVI droog gereinigd.	20% AVI droog gereinigd + gewassen
zetmaat, mm	50	30	100
schudmaat, mm.	370	280	380
volumieke massa, kg/m ³	2324	2307	2321
luchtgehalte % ((V/V))	2,8	4,1	2,5

Uit iedere charge zijn 18 proefkubussen, ribbe 150 mm. vervaardigd. Na resp. 1, 7 en 28 dagen verharden wordt steeds aan 3 proefstukken de druksterkte en aan drie proefstukken de splijttreksterkte gemeten. Bovendien wordt de volumieke massa van de proefstukken bepaald.

Druk-, splijttreksterkte en volumieke massa van de proefstukken.

	Referentie			20% AVI-granulaat droog gereinigd			20% AVI-granulaat gewas- sen		
Aantal dgn verharding :	1	7	28	1	7	28	1	7	28
druksterkte [N/mm ²]	9,8	30,3	45,2	11,2	22,4	X	10,0	26,2	33,8
	8,8	29,1	44,2	9,9	25,2	30,7	10,0	27,7	32,8
	8,5	26,8	42,0	10,1	23,8	29,5	10,0	27,2	33,8
splijttreksterkte [N/mm ²]	0,9	2,7	3,3	1,0	1,9	2,4	1,0	1,3	2,6
	0,9	2,5	3,3	0,0	1,9	2,4	1,1	2,2	2,7
	0,9	2,5	3,4	1,0	2,0	2,3	1,1	2,3	2,9
druksterkte (Gemiddeld)	9,0	28,7	43,8	10,4	23,8	30,1	10,0	27,0	33,5
treksterkte (Gemiddeld)	0,9	2,6	3,3	0,7	1,9	2,3	1,0	1,9	2,7
volumieke massa (gem.)	2330	2350	2350	2255	2265	2270	2280	2295	2300

X = proefstuk beschadigd: gemeten druksterkte: (21,5 N/mm²) niet verwerkt.

Conclusies

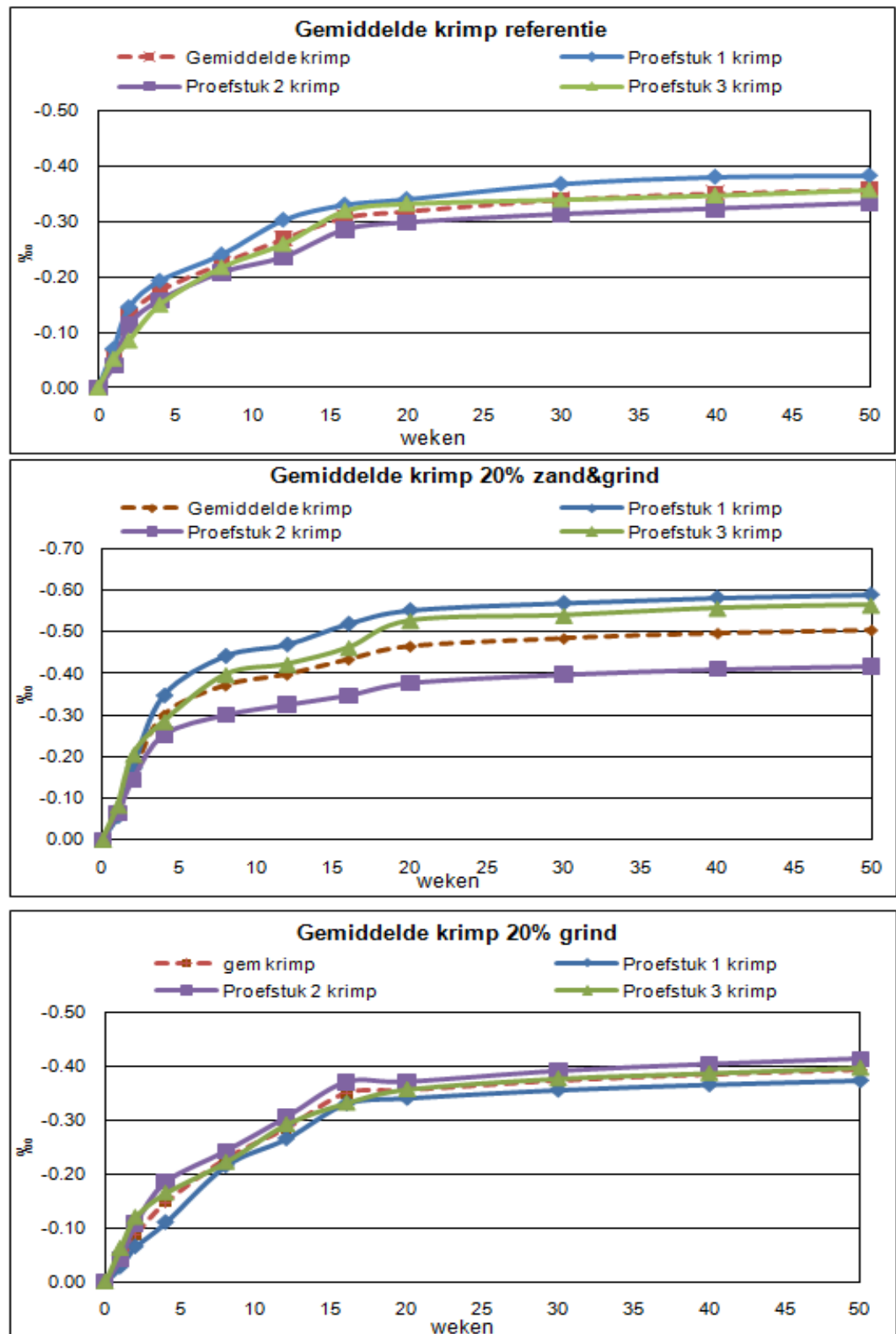
De gemiddelde druksterkte na één dag verharden is voor zowel het droog bewerkte als het gewassen granulaat licht hoger dan het referentiemengsel. Dit is mogelijk het gevolg van het wat hogere chloridegehalte van het AVI-granulaat.

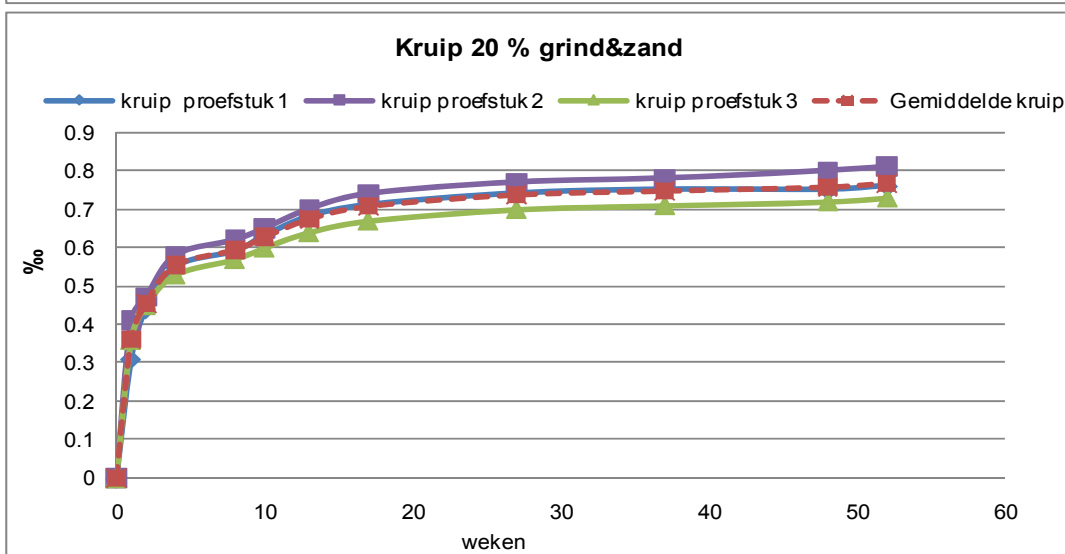
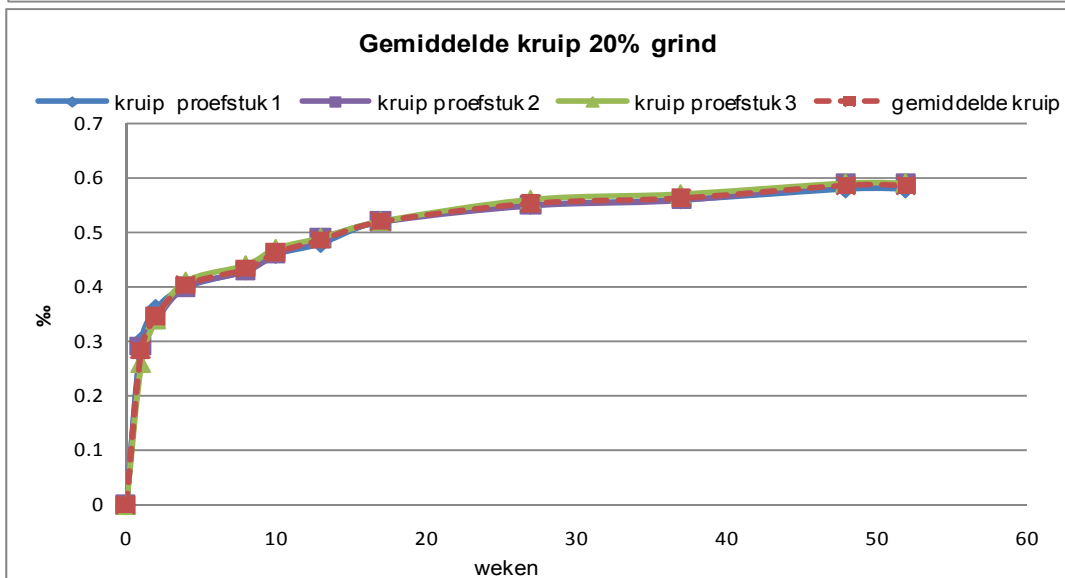
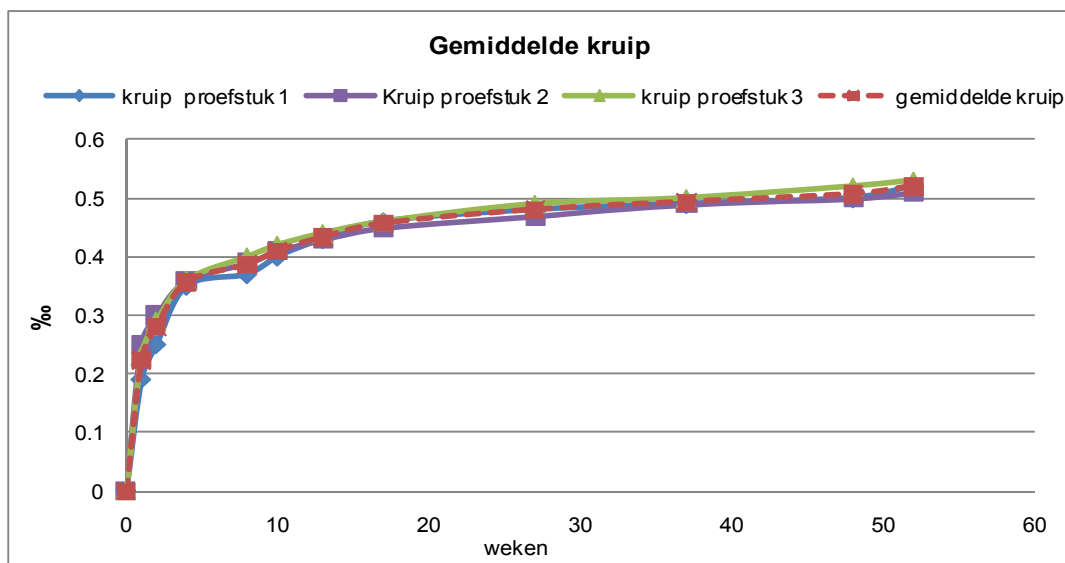
Na 7 dagen heeft het mengsel met 20% droog bewerkte AVI-granulaat een sterkte die ca. 17% lager is dan het referentiemengsel. De druksterkte van het gewassen granulaat is na 7 dagen ca. 6% lager dan de referentie.

Na 28 dagen heeft het mengsel met 20% droog bewerkte AVI-granulaat een sterkte die ca. 31% lager is dan het referentiemengsel. De druksterkte van het gewassen granulaat is na 28 dagen ca. 24% lager dan de referentie.

Schagen, 25 mei 2010, H.H.M. Soen

Bijlage F. Krimp- en kruipgrafieken individuele proefstukken





Bijlage G. Individuele meetresultaten duurzaamheidsproeven

Carbonatatie

28d					91d			182d			365d		
Cem I	Proefstuk	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Cem I	1.0	0.8	1.1	1.1	2.8	2.0	2.0	3.2	2.5	2.4	3.3	2.6	2.5
	2.0	0.9	1.0	1.1	2.9	2.1	1.9	3.3	2.5	2.2	3.7	2.6	2.6
	3.0	1.0	1.0	0.9	3.1	1.9	2.0	3.4	2.3	2.3	3.5	2.6	2.6
Cem III	1.0	2.3	1.9	0.9	4.0	3.8	2.8	5.1	4.7	3.5	5.3	5.1	3.9
	2.0	2.1	2.1	1.2	4.0	4.2	2.9	5.0	4.7	3.4	5.3	5.3	3.8
	3.0	2.2	2.2	0.9	4.3	4.2	3.2	5.0	4.7	3.6	5.4	5.2	3.9

Chloride-indringing (RCM), vorstdooizout (CDF) en vorstdooi (CIF) bestandheid

		Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv
RCM	1.0	13.0	19.1	20.9
	2.0	14.3	19.6	19.7
	3.0	13.6	16.0	19.4
	4.0	14.3	17.7	15.4
	5.0	14.3	17.7	19.2
CDF	14 cycli	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv
	1.0	3.5	3.0	0.4
	2.0	6.6	3.0	0.2
	3.0	1.7	3.4	0.2
	4.0	2.9	2.7	0.2
	28 cycli	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv
	1.0	7.5	5.1	0.8
	2.0	13.0	5.4	0.4
	3.0	5.0	5.6	0.4
	4.0	6.1	5.9	0.4
	14 cycli	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv
	1.0	3.3	2.6	0.2
	2.0	3.4	2.7	0.2
	3.0	3.5	2.7	0.2
	4.0	3.5	2.9	0.2
	28 cycli	Ref	20% grind vv	20%gr/20%z vv
	1.0	7.5	4.5	0.3
	2.0	7.5	4.4	0.4
	3.0	7.3	4.5	0.3
	4.0	7.6	4.5	0.4

Bijlage H. Onderzoek vormvastheid AV-granulaatbeton

**VORMVASTHEID VAN BETON VERVAARDIGD
MET AVI-BODEMAS AFKOMSTIG VAN PILOTINSTALLATIE AEB**

eindrapport

Gemeente Amsterdam Afval Energie Bedrijf
t.a.v. de heer P. Giezeman
Postbus 58292
1040 HG AMSTERDAM

A838980/R20090003/JSp/GWe

dr. ir. G. van der Wegen

17 december 2009

J.C.P. Speerstra



Inhoudsopgave

Samenvatting	57
1. Inleiding.....	58
2. Doelstelling	58
3. Opzet onderzoek	58
4. Resultaten onderzoek	59
4.1 Gasvorming AVI-bodemas	59
4.2 Invloed op betonspecie	61
4.3 Expansiemetingen	61
4.4 Petrografisch onderzoek	62
5. Conclusies	63
Bijlage A. Foto's petrografisch onderzoek	64

Samenvatting

Het Afval Energie Bedrijf (AEB) van Gemeente Amsterdam heeft proeven uitgevoerd met een pilot opwerkingsinstallatie (inclusief een wasinstallatie) waarmee hoogwaardig AVI-bodemas kan worden verwerkt tot een zand- en granulaatfractie. Beoogd wordt dit zand en granulaat onder meer in beton toe te passen.

De doelstelling van het uitgevoerde onderzoek is na te gaan welke hoeveelheid AVI-bodemas met een bepaald gehalte aan metallisch aluminium en zink toelaatbaar is in beton, zodat bij toepassing geen onacceptabele betontechnologische effecten optreden. Dit houdt in dat in de speciefase geen overmatige hoeveelheid waterstofgas mag worden gevormd (= geen onacceptabele verhoging van het luchtgehalte) en in de verharde fase geen overmatige expansie mag optreden.

Uit dit onderzoek blijkt dat de aangeleverde fracties AVI-bodemas een gehalte aan metallisch Aluminium en Zink bezitten variërend tussen 0,7 en 1,0 %m/m Al-equivalenten.

De betonspecie vervaardigd met deze fracties AVI-bodemas (100% vervanging zand en grind) vertoont slechts een beperkte toename in luchtgehalte (0,6 % (V/V)) als gevolg van de waterstofgasvorming.

De expansie van het verharde beton bedraagt na 52 weken minder dan 0,04 %, waardoor de onderzochte AVI-bodemas volgens CUR-aanbeveling kan worden geclassificeerd als niet-ASR-gevoelig.

Petrografisch onderzoek geeft aan dat metallische deeltjes in sterke mate worden aange-tast, terwijl nauwelijks tekenen van ASR zichtbaar zijn.

Trefwoorden: AVI-bodemas, metallisch aluminium en zink, gasvorming, expansie

1. Inleiding

Het Afval Energie Bedrijf (AEB) van Gemeente Amsterdam heeft proeven uitgevoerd met een pilot opwerkingsinstallatie (inclusief een wasinstallatie) waarmee hoogwaardig AVI-bodemas kan worden verwerkt tot een zand- en granulaatfractie. Beoogd wordt dit zand en granulaat onder meer in beton toe te passen.

AVI-bodemas opgewerkt in de 2^e helft van 2007 bevatte nog 1 à 2 % deeltjes metallisch aluminium en zink (Al + Zn). Een te hoog gehalte aan deze metalen in AVI-bodemas kan problematisch zijn bij toepassing in beton. Daarom heeft AEB aan INTRON gevraagd een onderzoek hiernaar uit te voeren.

2. Doelstelling

De doelstelling van het uitgevoerde onderzoek is na te gaan welke hoeveelheid AVI-bodemas met een bepaald gehalte aan metallisch aluminium en zink toelaatbaar is in beton, zodat bij toepassing geen onacceptabele betontechnologische effecten optreden. Dit houdt in dat in de speciefase geen overmatige hoeveelheid waterstofgas mag worden gevormd (= geen onacceptabele verhoging van het luchtgehalte) en in de verharde fase geen overmatige expansie mag optreden.

3. Opzet onderzoek

Van de door AEB aangeleverde fracties AVI-bodemas is het gehalte aan metallisch aluminium en zink gemeten door volumetrische bepaling van de hoeveelheid waterstofgas(H₂)-ontwikkeling in een natriumhydroxide(NaOH)-oplossing met een pH van 14.

Met de aangeleverde fracties AVI-bodemas is eveneens een betonspeciemengsel vervaardigd, waarvan het luchtgehalte is gemeten als functie van de tijd.

Indien de **toename** van het luchtgehalte binnen 4 uur na aanmaak minder dan 1% (V/V) bedraagt, worden van het betonmengsel de volgende eigenschappen bepaald:

- expansie van AVI-bodemasbeton als functie van de tijd conform de CPT-methode zoals beschreven in CUR-aanbeveling 89 (tweede, herziene uitgave) 'Maatregelen ter voorkoming van betonschade door alkali-silicareactie (ASR)'. Met deze test wordt nagegaan of er gevaar bestaat voor destructieve expansieve reacties in het alkalisch milieu van beton;
- PFM-microscopie met betrekking tot reactieve aluminiumdeeltjes en andere expansieve reacties aan één proefstuk op een ouderdom van 3 maanden.

Indien de **toename** van het luchtgehalte meer dan 1% (V/V) bedraagt dan wordt het gehalte aan AVI-bodemas in betonmengsel verlaagd tot een rekenkundige verhoging van het luchtgehalte van 1% (V/V) (dus bijvoorbeeld bij een verhoogd luchtgehalte van 2% (V/V) wordt de hoeveelheid AVI-bodemas gehalveerd). Het verlaagde gehalte aan AVI-bodemas wordt volumetrisch vervangen door rivierzand en -grind van dezelfde korrelopbouw. Van dit betonmengsel zullen dan de beide bovenomschreven eigenschappen worden bepaald.

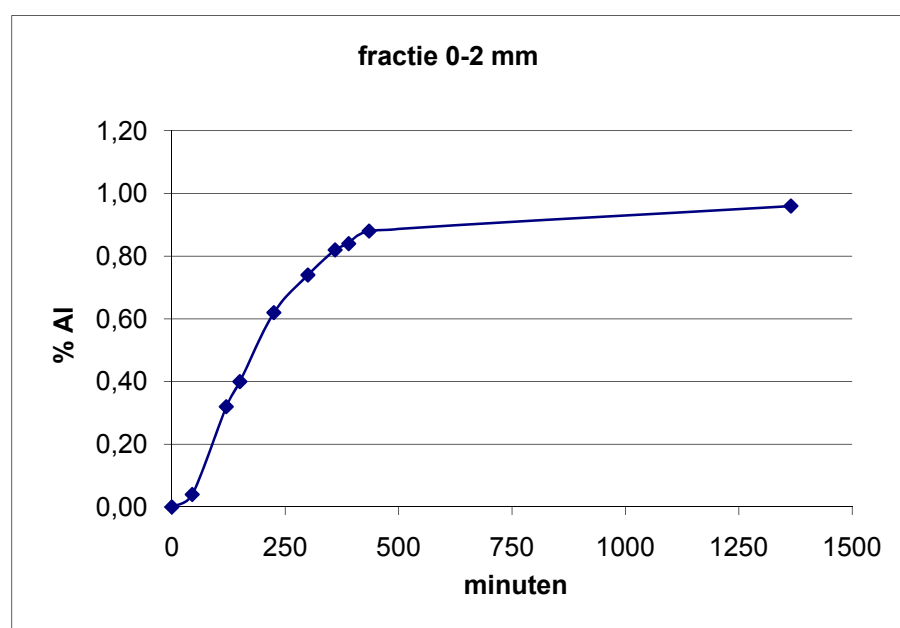
4. Resultaten onderzoek

4.1 Gasvorming AVI-bodemas

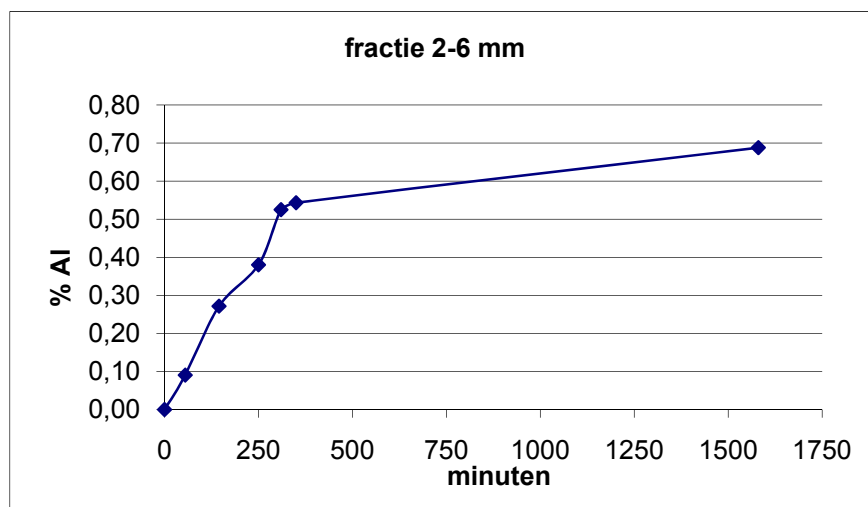
Van de fracties 2-6 mm, 6-20 mm en 20-32 mm is een representatief deelmonster gebroken tot een fijnheid < 4 mm. Aan deze 3 gebroken fracties en aan een representatief monster van de aangeleverde fractie 0-2 mm AVI-bodemas is een overmaat van een 1M NaOH-oplossing toegediend. Hierdoor komt er een reactie met het aanwezige aluminium en zink tot stand waardoor waterstofgas (H_2) wordt gevormd. Deze gasvorming, omgerekend naar de hoeveelheid aluminium (Al), als functie van de tijd is per fractie weergegeven in figuren 1 t/m 4.

Uit onderstaande figuren blijkt dat het gehalte aan (equivalenten) metallisch Aluminium in de onderzochte fracties AVI-bodemas varieert tussen 0,7 en 1,0 %m/m. De reactie heeft na ca. 8 uur nagenoeg volledig plaatsgevonden bij betreffende omstandigheden (fijnheid < 4 mm; pH = 14).

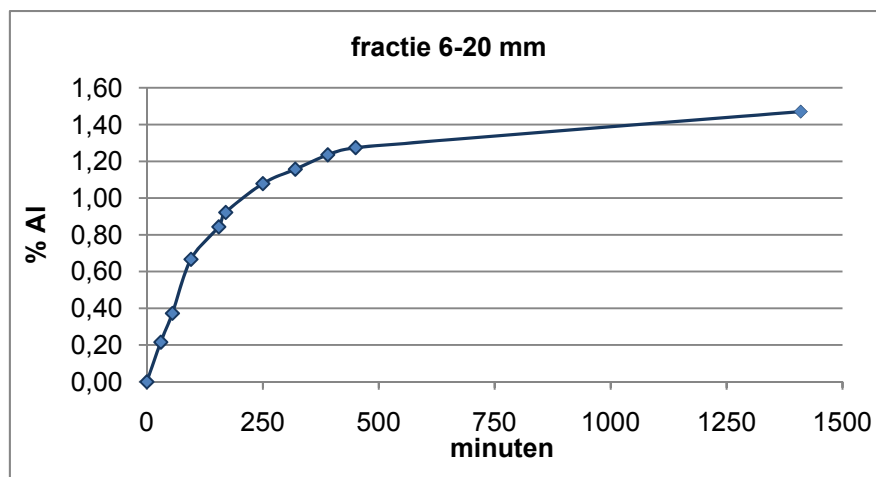
In betonspecie zal vanwege de lagere pH van het poriewater, het lagere specifieke oppervlak van de AVI-bodemas en de afbinding van het cement de omzetting niet zo snel en volledig optreden.



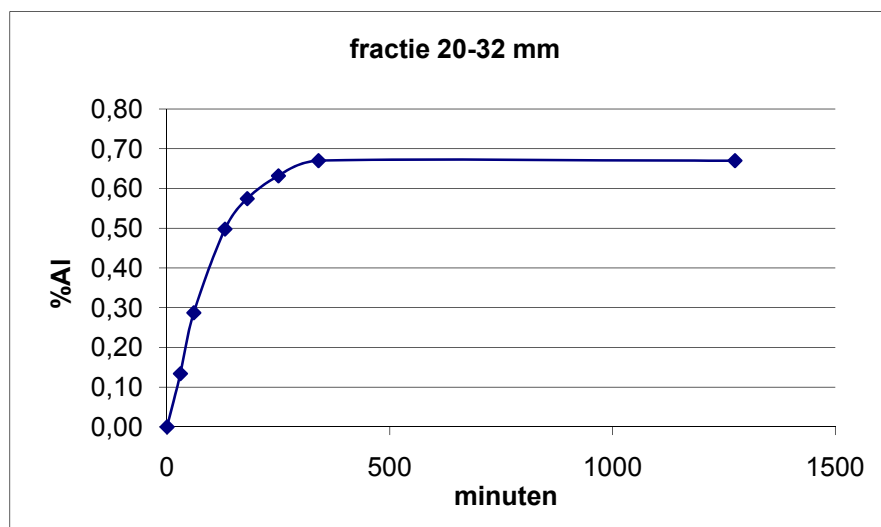
Figuur 1. Gasvorming fractie 0-2 mm (in %Al-equivalenten).



Figuur 2. Gasvorming fractie 2-6 mm (in %Al-equivalenten).



Figuur 3. Gasvorming fractie 6-20 mm (in %Al-equivalenten).



Figuur 4. Gasvorming fractie 20-32 mm (in %Al-equivalenten).

4.2 Invloed op betonspecie

Met de fracties AVI-bodemas 0-2 mm, 2-6 mm, 6-20 mm en 20-32 mm is beton vervaardigd met de samenstelling zoals weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Onderzochte betonsamenstelling.

component	gehalte (kg/m ³)
cement CEM I 42,5N	440
water (effectief)	200
absorptiewater	108
AVI-bodemas 20-32 mm	321
AVI-bodemas 6-20 mm	353
AVI-bodemas 2-6 mm	359
AVI-bodemas 0-2 mm	317

De verwerkbaarheid is ingesteld met een superplastificeerder om een zetmaat van 150 mm (+/- 20 mm) te krijgen. De betonspecie-eigenschappen als functie van de tijd zijn getoond in tabel 2.

Tabel 2. Eigenschappen betonspecie.

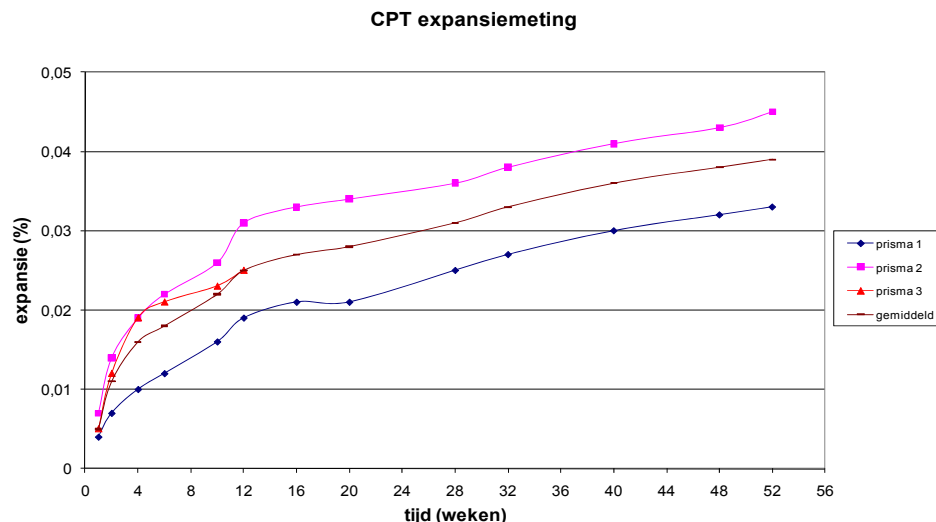
eigenschap	na aanmaak tijdstip 0	na 30 min.	na 60 min
zetmaat (mm)	150	20	0
schudmaat (mm)	450	350	300
luchtgehalte (%(V/V))	4,6	5,0	5,2
vol. massa (kg/m ³)	2084	2094	2097

Het luchtgehalte blijkt in 1 uur tijd slechts met 0,6 % (V/V) toe te nemen. Dit betekent dat de hoeveelheid gevormde waterstof(H₂)gas maar beperkt van omvang is. Het vervaardigde beton is dan ook gebruikt voor het onderzoek naar de expansie in de verharde fase. Opvallend is de snelle afname van de verwerkbaarheid. Dit is waarschijnlijk toe te schrijven aan de absorptie van het water door de AVI-bodemas.

4.3 Expansiemetingen

De resultaten van de expansiemetingen conform de CPT-methode zoals beschreven in CUR-aanbeveling 89 zijn weergegeven in figuur 5.

De gemiddelde expansie na 52 weken bedraagt 0,039 %, hetgeen lager is dan de eis gesteld in CUR-aanbeveling 89: ≤ 0,04 %. Op grond van deze test wordt het onderzochte AVI-bodemas als niet ASR-gevoelig beschouwd.



Figuur 5. Expansie als functie van de tijd.

4.4 Petrografisch onderzoek

Het expansieonderzoek (zie par. 4.3) is uitgevoerd aan 3 betonprisma's. De prisma met de middelste waarde voor de expansie na 3 maanden (prisma 3 in figuur 5) is gebruikt voor petrografisch onderzoek. Uit dit prisma zijn 2 slijpplaatjes geprepareerd voor microscopisch onderzoek naar de oorzaak van de waargenomen expansie.

De slijpplaatjes zijn eerst onderzocht met doorvallend lichtmicroscopie in combinatie met diverse filters: polarisatie microscopie en fluorescentie microscopie. Tot slot zijn de monsters in opvallend licht onderzocht met binoculair microscopie.

In het kader van onderzoek naar expansie is in de mortel gelet op de volgende aspecten:

1. aanwezigheid van alkali silica (ASR) gel
2. aanwezigheid van reactieve (mineraal)korrels
3. aanwezigheid van reactieve slibkorrels
4. aanwezigheid van reactief glas

Uit de waarnemingen blijkt dat in de onderzochte monsters geen significante hoeveelheid ASR gel aanwezig is. Aangetroffen glaskorrels blijken niet reactief.

Beide monsters blijken wel reactieve korrels te bevatten. Het betreft telkens donker gekleurde en opake (ondoorzichtige) korrels die een grote mate van reactiviteit vertonen. Onderzoek met de binoculair microscoop laat zien dat in deze korrels vaak metaaldeeltjes – waarschijnlijk aluminium – aanwezig zijn. Het oppervlak en ook vaak het inwendige van de korrels is aangetast en opgelost. Vaak ontstaan in deze korrels holtes. In en naast de korrels is een kristallijn reactieproduct afgezet. De samenstelling van deze kristallen kan uit dit onderzoek niet worden afgeleid.

Bij het microscopisch onderzoek is één korrel aangetroffen die waarschijnlijk een reactieve slibkorrel betreft. Deze korrel bevat fijne kwartskorreltjes en is door expansie opengebarsten. De buitenzijde van deze korrel vertoont heel waarschijnlijk geëxpandeerde kleimineralen. Omdat in de onderzochte monsters een dergelijke korrel slechts één keer is waargenomen lijkt het niet waarschijnlijk dat dit expansiemechanisme een belangrijke rol speelt.

De fotografische waarnemingen zijn opgenomen in bijlage A.

5. Conclusies

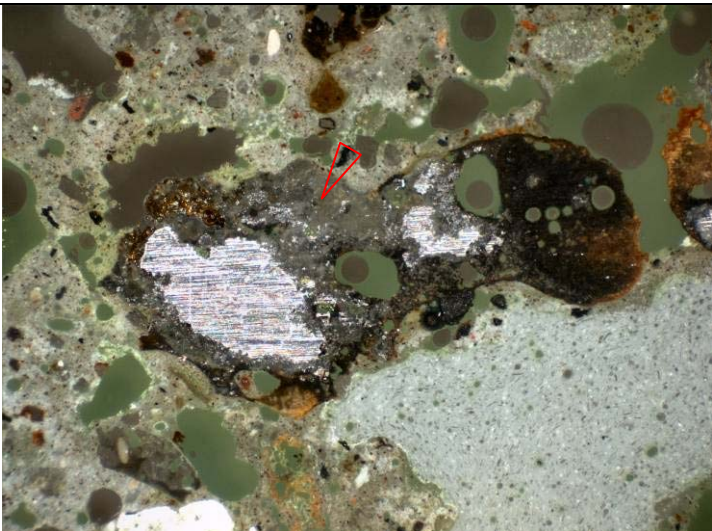
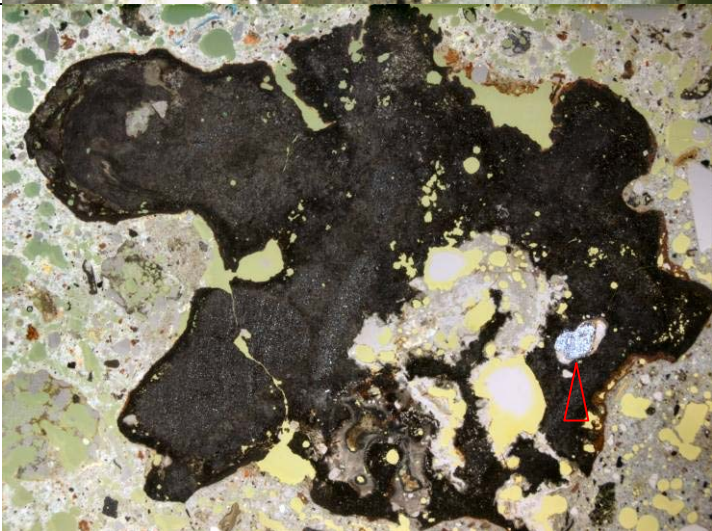
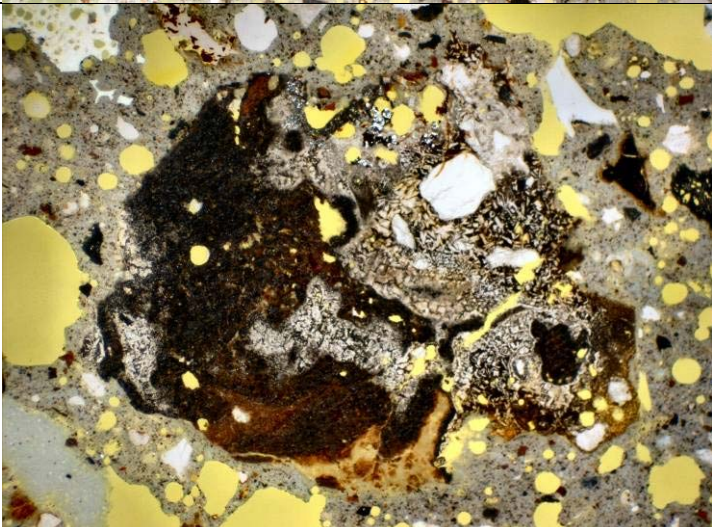
Uit dit onderzoek blijkt dat de aangeleverde fracties AVI-bodemas een gehalte aan metallisch Aluminium en Zink bezitten variërend tussen 0,7 en 1,0 %m/m Al-equivalenten.

De betonspecie vervaardigd met deze fracties AVI-bodemas (100% vervanging zand en grind) vertoont slechts een beperkte toename in luchtgehalte (0,6 % (V/V)) als gevolg van de waterstofgasvorming.

De expansie van het verharde beton bedraagt na 52 weken minder dan 0,04 %, waardoor de onderzochte AVI-bodemas volgens CUR-aanbeveling kan worden geclassificeerd als niet-ASR-gevoelig.

Petrografisch onderzoek geeft aan dat metallische deeltjes in sterke mate worden aange-tast, terwijl nauwelijks tekenen van ASR zichtbaar zijn.

Bijlage A. Foto's petrografisch onderzoek

	Foto 1. Binoculair opname van een reactieve korrel in monster 08-049-1 met daarin metaaldeeltjes. Ook de metaaldeeltjes zijn duidelijk aangetast en vertonen oplosverschijnselen. De kristallijne reactieproducten zijn in deze foto slecht zichtbaar maar zijn uitgebreid aanwezig. Het betreft de grijze enigszins doorzichtige gebieden in de korrel (met pijl aangeduid). De werkelijke beeldbreedte is 5,5mm.
	Foto 2. Binoculair opname van een reactieve korrel in monster 08-049-2. Ook in deze grote korrel bevindt zich een metaaldeeltje (met pijl aangeduid). Linksboven zijn diverse reactiezones herkenbaar met daarin kristallijn reactieproduct. De werkelijke beeldbreedte is 18mm.
	Foto 3. Binoculair opname van reactieve korrel in monster 08-049-1. In deze korrel is geen metaaldeeltje (meer) herkenbaar. De lichtgekleurde reactieproducten bevinden zich als lichtgekleurde kristallen hoofdzakelijk aan de rechterzijde van de korrel. De lichtgroen gekleurde gebieden betreffen holle ruimtes in de mortel die gevuld zijn met een fluorescerende kunsthars. De onderzochte monsters zijn sterk poreus. De werkelijke beeldbreedte is 5,5mm. Deze korrel is verder afgebeeld in foto 6.

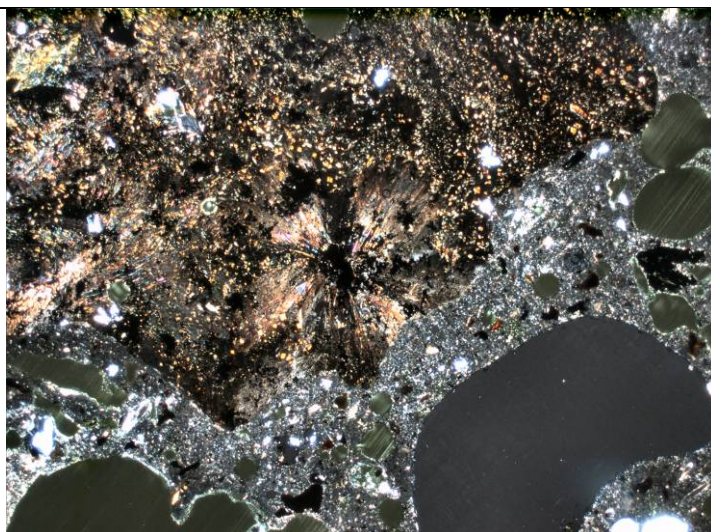


Foto 4. Opname door polarisatie microscoop. Een reactieve korrel uit monster 08-049-1 bevindt zich linksboven in deze opname. Vrijwel de gehele donkere korrel is omgezet in kristallijn reactieproduct dat met roodachtige interferentiekleuren oplicht. De opake gebieden betreft nog niet gereageerd materiaal. Opake korrels betreffen in slijpplaatjes vaak deeltjes met een metaalsamenstelling of een samenstelling die hiermee in verband staat zoals metaalsulfiden of metaaloxiden. De werkelijke beeldbreedte van deze afbeelding is 4,5mm.

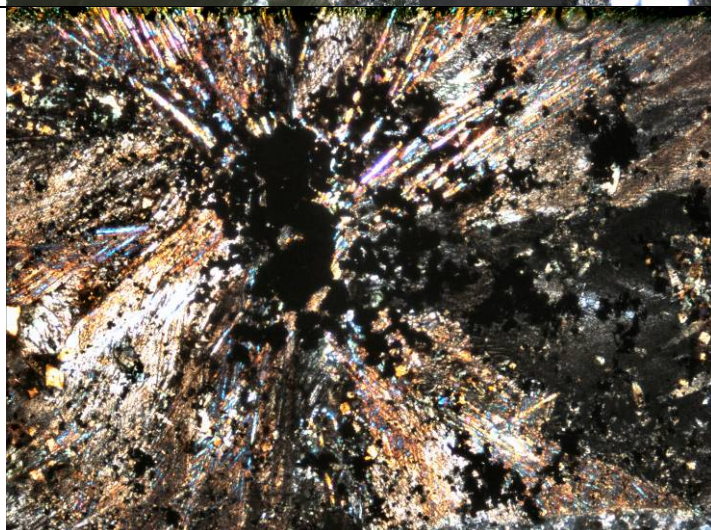


Foto 5. Opname door polarisatie microscoop. Detail van foto 4. De werkelijke beeldbreedte is 1,1mm.

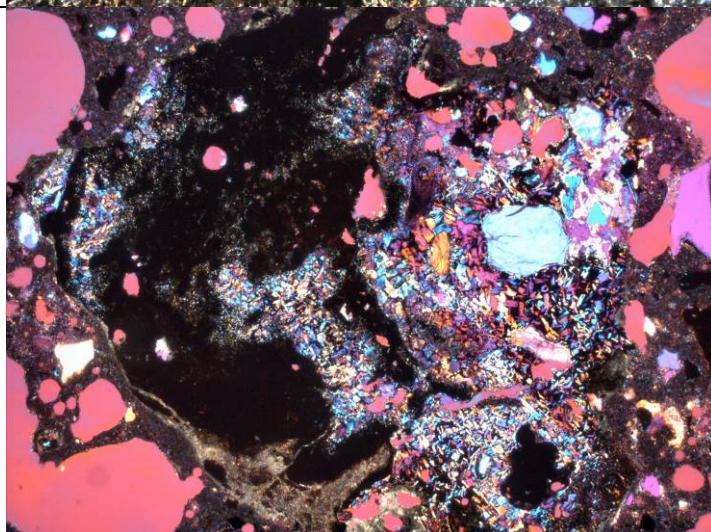
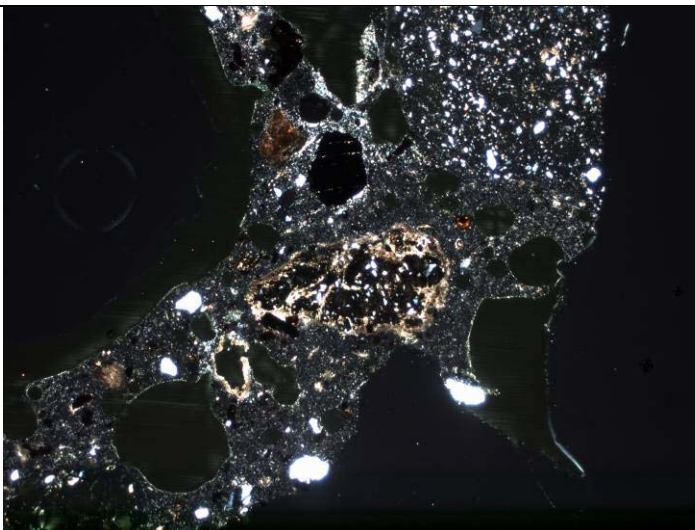
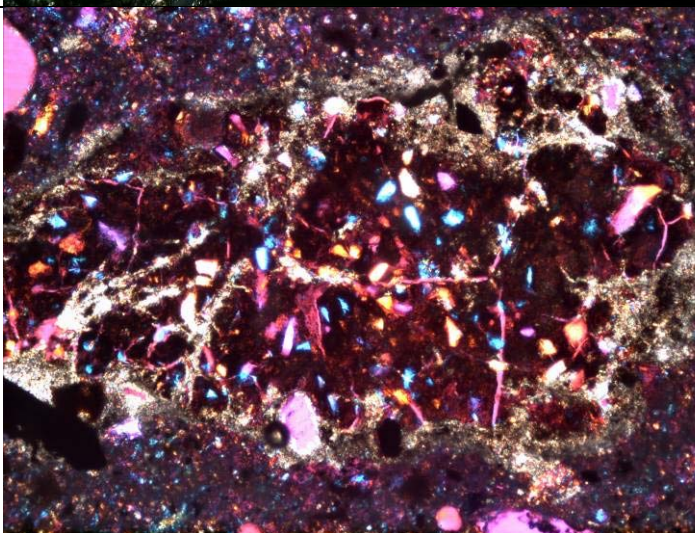
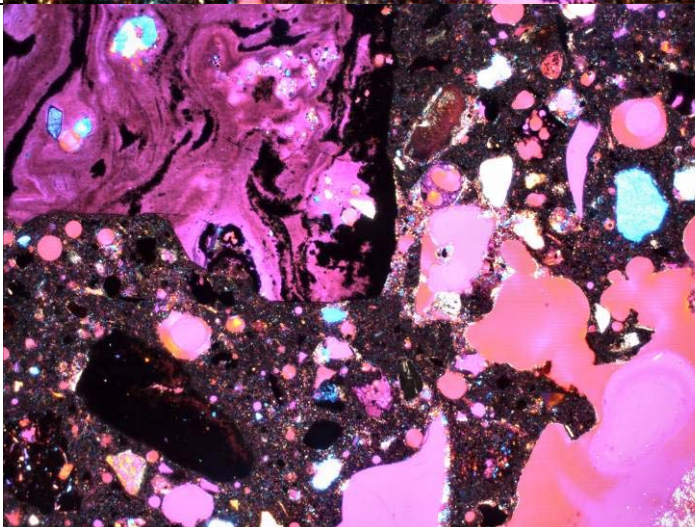


Foto 6. Opname door polarisatie microscoop in combinatie met een gipsplaatje. Het betreft een reactieve korrel uit monster 08-049-1. Met deze techniek is herkenbaar dat de reactieproducten uit de korrel naar rechts zijn uitgestulpt. De werkelijke beeldbreedte is 5,5mm.

	Foto 7. Opname door polarisatie microscoop. Het betreft hoogstwaarschijnlijk een reactieve slibkorrel die in het centrum van de foto herkenbaar is. Afbeelding 7 toont deze korrel in detail. De werkelijke beeldbreedte is 4,5mm.
	Foto 8. Opname door polarisatie microscoop met gipsplaatje. Detail van foto 7. Het is duidelijk herkenbaar dat de korrel door expansie is opengebarsten. In de korrel zijn fijne hoekige kwartskorreltjes uit het slib herkenbaar. De buitenzijde van de korrel vertoont heel waarschijnlijk beige gekleurde fijne deeltjes geëxpandeerde klei. De werkelijke beeldbreedte is 1,5mm.
	Foto 9. Opname door polarisatie microscoop met gipsplaatje. Linksboven op deze foto is een glaskorrel zichtbaar. De scherpe randen aan deze korrel laten zien dat er geen reactie optreedt tussen het glas en de mortel. De werkelijke beeldbreedte is 4,5mm.



Groningenweg 10
Postbus 420
2800 AK Gouda

T 0182 540 620
F 0182 540 621

secretariaat@curbouweninfra.nl
www.curbouweninfra.nl

