

2016•2017
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Bepaling van het aandeel ongehydrateerd cement in betongranulaten door meting van hydratatie- en sterkte-eigenschappen

Promotor :
Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

Copromotor :
De heer Sean KOX

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

Jan Kerkhofs

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

2016•2017

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Bepaling van het aandeel ongehydrateerd cement in
betongranulaten door meting van hydratatie- en
sterkte-eigenschappen

Promotor :
Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

Copromotor :
De heer Sean KOX

Jan Kerkhofs

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: bouwkunde*

Voorwoord

Graag zou ik iedereen willen bedanken die geholpen om dit onderzoek vorm en kwaliteit te geven. Ten eerste wil ik Prof. Dr. Ing. Bram Vandoren willen bedanken voor zijn hulp, zijn begeleiding en voor alle opmerkingen die hij gaf om de scriptie tot een goed einde te brengen. Ten tweede wil ik alle medewerkers van het TETRA-project 'Hoogwaardig betongranulaat voor duurzame wegenbouw' bedanken voor hun hulp. Vervolgens wil ik Wim Noblesse bedanken voor de hulp in het labo. Als allerlaatste wil ik mijn familie bedanken voor de steun tijdens het jaar.

Inhoudsopgave

Lijst van Tabellen.....	5
Lijst van figuren	7
Abstract	9
Abstract in English	9
1 Inleiding.....	11
1.1 Probleemstelling.....	11
1.2 Het belang van het recycleren van beton	12
1.3 Betongranulaat.....	12
1.4 Hoogwaardige betongranulaat.....	12
1.5 België versus buitenland.....	13
1.6 Invloed van betongranulaten op beton.....	14
1.6.1 De herkomst van de betongranulaten	14
1.6.2 De mechanische eigenschappen van het beton	14
1.6.3 Behandeling van grove betongranulaten.....	15
1.6.4 Invloed van het vervangingspercentage	16
1.7 Betongranulaten versus natuurlijke granulaten	17
1.8 Hydratatiegraad.....	17
1.9 Besluit	19
2 Onderzoeksaanpak en methodes	21
2.1 De geteste betongranulaten.....	21
Onderzoeksmethodes	23
2.2	23
2.2.1 Sterkte-eigenschappen bepalen	24
2.2.2 Hydratatie-eigenschappen bepalen	27
2.3 Oncontroleerbare factoren	28
2.4 Besluit	28
3 Resultaten	29
3.1 De sterkte-eigenschappen.....	29
3.2 Hydratatiewarmte	45
3.3 Correlatie tussen de 2 onderzoeksmethodes.....	52
3.4 Besluit	52
4 Besluit.....	53

5	Literatuurlijst.....	55
6	Bijlagen.....	57
	Bijlage A: Productfiche CEM III/A (deel 1/2).....	59
	Bijlage B: Productfiche CEM III/A (deel 2/2).....	60
	Bijlage C: Prestatiefiche van CEM III/A 42,5 N LA.....	61
	Bijlage D: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 0 % cement.....	63
	Bijlage E: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 25 % cement.....	64
	Bijlage F: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 50 % cement.....	65
	Bijlage G: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 75 % cement.....	66
	Bijlage H: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 0 % cement.....	67
	Bijlage I: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 25 % cement.....	68
	Bijlage J: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 50 % cement.....	69
	Bijlage K: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 75 % cement.....	70

Lijst van Tabellen

Tabel 1: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke buigspanning op 7 dagen.	32
Tabel 2: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke drukspanning op 7 dagen.....	36
Tabel 3: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke buigspanning op 28 dagen.	40
Tabel 4: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke drukspanning op 28 dagen.	44
Tabel 5: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat is gehydrateerd volgens de maximum geproduceerd temperatuurverschil.....	51

Lijst van figuren

Figuur 1: De relatie tussen de druksterkte en de doordringbaarheid [17].....	16
Figuur 2: Structuur en verloop van de hydratatie reacties in cement [21]	18
Figuur 3: De hydratatiegraad [20, 22].....	18
Figuur 4: De samenstelling van het beton in functie van de hydratatiegraad met een w/c-factor van 0,6 [20, 22]	19
Figuur 5: Batch 1, betongranulaten (foto: Jan Kerkhofs).....	21
Figuur 6: Batch 2, betongranulaten (foto: Jan Kerkhofs).....	21
Figuur 7: Batch 3, betongranulaten (foto: Jan Kerkhofs).....	22
Figuur 8: De opbouw van de Los Angeles proef (foto: Jan Kerkhofs)	22
Figuur 9: De opvangschaal voor het legen van de Los Angeles trommel (foto: Jan Kerkhofs)	23
Figuur 10: De gebruikte zeeftoeren voor het uitzeven van het fijnstof (foto: Jan Kerkhofs)..	23
Figuur 11: De automatische mortelmenger (foto: Jan Kerkhofs)	25
Figuur 12: De kom en de menger van de mortelmenger (foto: Jan Kerkhofs)	25
Figuur 13: Het schokapparaat voor te verdichten (foto: Jan Kerkhofs).....	25
Figuur 14: De buigsterkte bepalen van een mortelprisma (foto's: Jan Kerkhofs)	26
Figuur 15: het resultaat na de drukproef (foto: Jan Kerkhofs)	27
Figuur 16: De opstelling om de hydratatiwarmte te bepalen (foto: Jan Kerkhofs)	27
Figuur 17: De vergelijking tussen de resultaten van de karakteristieke buigspanning op een ouderdom van 7 dagen.	29
Figuur 18: Een lineaire verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.....	30
Figuur 19: Een tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.....	30
Figuur 20: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.....	31
Figuur 21: De vergelijking tussen de resultaten van de karakteristieke drukspanning op een ouderdom van 7 dagen.	33
Figuur 22: Een lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.	34
Figuur 23: Een tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid cement (%) aanwezig en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.	34
Figuur 24: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.	35
Figuur 25: De vergelijking tussen de resultaten van de karakteristieke buigspanning op een ouderdom van 28 dagen.	37
Figuur 26: Een lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.....	38
Figuur 27: Een polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.....	38
Figuur 28: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.....	39

Figuur 29: De vergelijking tussen de resultaten van de drukspanning op een ouderdom van 28 dagen.	41
Figuur 30: Een lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.	42
Figuur 31: Een polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.	42
Figuur 32: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.	43
Figuur 33: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 20g cement met een maximale toename van 1,65 °C.	45
Figuur 34: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 30g cement met een maximale toename van 2,27 °C.	45
Figuur 35: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 40g cement met een maximale toename van 3.65 °C.	46
Figuur 36: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 50g cement met een maximale toename van 6,02 °C.	46
Figuur 37: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 22°C voor 20g cement en 30g batch 1 met een maximale toename van 1,80 °C.	47
Figuur 38: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 22°C voor 20g cement en 30g batch 2 met een maximale toename van 2,13 °C.	47
Figuur 39: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 22°C voor 20g cement en 30g batch 3 met een maximale toename van 2,49°C.	48
Figuur 40: Het lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het maximum geproduceerde temperatuurverschil (°C).	48
Figuur 41: Het tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het maximum geproduceerde temperatuurverschil (°C).	49
Figuur 42: Het lineaire verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het logaritmisch maximum geproduceerde temperatuurtoename.	49
Figuur 43: Het tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het logaritmische maximum geproduceerde temperatuurtoename.	50

Abstract

Deze masterthesis situeert zich binnen het TETRA-onderzoeksproject “Hoogwaardig betongranulaat voor duurzame wegenbouw”. In dit werkstuk wordt een antwoord gezocht op de vraag of betongranulaten nog ongehydrateerd cement bevatten en of dit cement actief gaat meewerken aan de mechanische eigenschappen van het nieuw beton.

Er worden twee methodes gebruikt om dit te onderzoeken. Al de onderzoeken zijn uitgevoerd op fijnstof afkomstig van betongranulaten. De eerste onderzoeksmethode bestaat erin om de buig- en druksterkte te bepalen van mortelprisma's en deze resultaten te vergelijken met een referentiereeks. Aan de hand hiervan kan de hoeveelheid cement dat actief meewerkt bepaald worden. De tweede methode bestaat uit het bepalen van de hydratatiewarmte die het cement vrijgeeft. Deze resultaten worden vergeleken met een referentiereeks die de hydratatiewarmte van verschillende hoeveelheden cement bevat.

Uit de resultaten van de hydratatie-eigenschappen kan geconcludeerd worden dat de betongranulaten nog ongehydrateerd cement bevatten. De hoeveelheid ongehydrateerd cement is afhankelijk van de toepassing van het moederbeton en van het breektijdstip. Bij het onderzoek naar de sterkte-eigenschappen is vastgesteld dat de reactiviteit van het ongehydrateerd cement afhankelijk is van het vervangingspercentage van het cement.

Abstract in English

This master's thesis is situated within the TETRA research project “High quality concrete aggregate for sustainable road construction”. In this thesis an answer is searched on the questions “do concrete aggregates still contain unhydrated cement “ and “will this unhydrated cement actively influence the mechanical properties of new concrete”.

Two methods are being used to examine this. All tests are done on fine particles coming from concrete aggregates. The first examination method will determine flexural and pressure strength from mortar prisms and compare the results to a reference series. With this comparison, the amount of cement that actively cooperates can be determined. The second method will determine the hydration heat that cement releases. These results will be compared with a reference series that contains the hydration warmth of different quantities of concrete.

The results from the hydration properties allow to conclude that concrete aggregates still contain unhydrated cement. The amount of this unhydrated cement depends on the application of the source concrete and of the time of breaking. The research of strength properties show that the reactivity of unhydrated cement depends on the replacement percentage of the cement.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Het algemeen probleem in de hedendaagse wereld op gebied van de betonindustrie is de eindigheid van de primaire grondstoffen van beton (zand en grind). Hierdoor stijgt de interesse steeds meer in het gebruik van secundaire granulaten in beton, namelijk gerecycleerde betongranulaten. Tot nu toe is het gebruik van secundaire granulaten in de wegebouw beperkt tot 20% volgens het standaardbestek 250. Daar het gebruik van gerecycleerde betongranulaten niet is toegestaan in de toplaag van de weg doet men aan downcycling. Dit verbod bestaat omdat de secundaire granulaten vocht uit het betonmengsel opnemen en dit heeft nadelige gevolgen op de duurzaamheid. Door dit nadelig effect worden nog grote hoeveelheden primaire grondstoffen gebruikt in de betonindustrie. De PXL en de UHasselt hebben het TETRA-project 'Hoogwaardig betongranulaat voor duurzame wegebouw' opgericht om de voor- en nadelen van het gebruik van gerecycleerde betongranulaten in beton in kaart te brengen. Via dit project willen de PXL en de UHasselt de focus leggen op upcycling in plaats van downcycling. Bij upcycling krijgen de gerecycleerde betongranulaten een nieuwe, duurzamere toepassing. Bovendien heeft het gebruik van gerecycleerde betongranulaten een voordeel, namelijk de aanwezigheid van ongehydrateerd cement. Dit cement kan mee hydrateren tijdens het uitharden van het nieuwe beton en ervoor zorgen dat de mechanische eigenschappen toenemen. De grote vraag blijft of het voordeel opweegt tegen het nadeel. [1] [2] [3]

Tijdens dit werkstuk wordt gezocht naar een antwoord op de vraag: 'Is er ongehydrateerd cement aanwezig in gerecycleerde betongranulaten en gaat deze cement ook actief meewerken?' Het bekomen van dit antwoord bestaat uit het ondernemen van verschillende stappen. Bij de eerste stap wordt gekeken of de gebruikte batches gerecycleerde betongranulaten representatief zijn met de vorige resultaten uit de bachelor thesis 'De aanwezigheid van ongehydrateerd cement in betongranulaat'. Dit wordt getest via dezelfde methode. Deze bestaat uit het bepalen van de buigsterkte en de druksterkte van mortelprisma's. In de volgende stap wordt de hydratatiwarmte getest in een geïsoleerd vat om de hoeveelheid ongehydrateerd cement te kunnen bepalen. [2] [4]

Voor het uitvoeren van dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van verschillende technieken. Tijdens de eerste reeks proeven wordt gebruik gemaakt van de Los Angeles test om het fijnstof te verkrijgen. Dit gebeurt door verbrijzeling van de uitgeharde mortel rond de betongranulaten. Met behulp van het verkregen fijnstof worden mortelprisma's gemaakt. Op de gewenste ouderdom van de mortelprisma's worden de buigsterkte en de druksterkte bepaald. Deze testen worden bepaald via een driepuntsbuigproef en drukproef op een hydraulische drukpers. Tijdens de tweede soort testen wordt gebruik gemaakt van de temperatuurontwikkeling die de hydratatiereacties (water + cement) teweegbrengen. Dit wordt onderzocht via een geïsoleerd vat, hierbij wordt de warmte van de monsters vergeleken met een referentiewaarde (bv 20, 30, 40, 50 gram cement). De eerste reeks testen zijn doorgegaan in het labo van CERG, de tweede reeks in het Labo van de PXL. Voor het uitvoeren van deze proeven zijn verschillende toestellen en materialen nodig, zoals het

Los Angeles toestel, drukpers, geïsoleerd vat, referentie cement en gebroken betonpuin. [2]
[4]

1.2 Het belang van het recyclen van beton

Het recyclen van oud beton kan op verschillende manieren. Zo kan het oud beton gebroken worden en onderverdeeld in 2 fracties, namelijk grove en fijne betongranulaten. Deze fracties kunnen dan hergebruikt worden. De grove fractie kan gebruikt worden als onderfundering voor wegen. Bovendien kunnen deze toegepast worden in vers beton als vervanging van de natuurlijke granulaten. Betongranulaten toevoegen aan vers beton brengt enkele milieuvoordelen teweeg: [5] [6]

- Recyclen van betongranulaten vermindert het gebruik van primaire grondstoffen;
- Het toevoegen veroorzaakt een vermindering van de overschotten van bouw- en sloopafval;
- Dit zorgt ervoor dat de materialenkringloop zich beter sluit. Dit heeft als gevolg dat minder primaire grondstoffen ontgonnen en ingevoerd moeten worden;
- Door het hergebruik van betongranulaten in beton ontstaat minder CO₂-uitstoot en minder transport nodig omdat minder aanvoer nodig is van primaire grondstoffen.

1.3 Betongranulaat

Er zijn verschillende definities beschikbaar van een betongranulaat. Zo wordt de definitie door het standaardbestek 250 versie 3.1 omschreven als:

“Betongranulaat is afkomstig van het breken van betonpuin van cementbetonverhardingen, schraal betonfundering, lineaire elementen, gebouwen en kunstwerken.” [3]

1.4 Hoogwaardige betongranulaat

Een hoogwaardig betongranulaat wordt beschreven als “een betongranulaat afkomstig van het breken van betonpuin met een hoge drukweerstand afkomstig van cementbetonverhardingen, lineaire elementen en andere gelijkwaardige constructieve elementen afkomstig van gebouwen en kunstwerken” in het standaardbestek 250 versie 3.1. [3]

Niet elk betongranulaat dat voldoet aan de definitie van hoogwaardig is automatisch een hoogwaardig betongranulaat. Hiervoor moet het betongranulaat voldoen aan een aantal eisen. Zo dient de volumemassa minimum 2200kg/m³ bedragen. Verder moeten de kleinste en de grootste korrelmaat ook voldoen aan bepaalde eisen. Zo moet d (de kleinste) ≥ 4 mm en D (de grootste) ≤ 10 mm. De waterabsorptie mag maximaal 10% verschillen ten opzichte van een aangegeven waarde met een afwijkingmarge van $\pm 2\%$. Verder legt de NBN EN 12620 extra eisen op voor betongranulaat. Deze gelden voor enkele intrinsieke kenmerken. Zo moet het minimaal voldoen aan een vlakheidindex die maximaal 20 is. Verder mag het gehalte aan fijne deeltjes niet groter zijn 1.5%. Ook moet de Los Angeles waarde kleiner zijn dan 35 en moet het gehalte aan oplosbaar sulfaat minder dan 0.2 bedragen. Vervolgens dient het hoogwaardig betongranulaat aan verschillende samenstellingscategorieën te voldoen. Verder zijn nog samenstellingscategorieën waaraan het hoogwaardig betongranulaat minimaal moet voldoen. Zo moet het bestaan uit minimaal 90% beton- en

mortelachtige materialen en uit minstens 95% betonachtige materialen, ongebonden of hydraulisch gebonden materiaal en natuursteen. Het gehalte van volgende materialen mag niet overschreden worden: glas 0,5%, bitumineus materiaal 1% en drijvende deeltjes 2%. Zodra de betongranulaten aan alle vereiste voorwaarden van een hoogwaardig betongranulaat voldoen, mag het beschouwd worden als een hoogwaardig betongranulaat. Dit heeft als resultaat dat 20% van de grove granulaten in een nieuw betonmengsel vervangen mogen worden door hoogwaardig betongranulaten zolang dit mengsel dient voor de productie van lineaire elementen en gebruikt wordt in de onderlaag van een tweelaags uitgevoerde wegverharding. [2] [3] [7] [8] [9]

1.5 België versus buitenland

In verscheidene landen van de Europese Unie zijn verschillende landelijke voorschriften rond het gebruik van betongranulaten opgesteld. Deze voorschriften geven precies weer in welke toepassingsgebieden het gebruik van betongranulaten uitdrukkelijk is toegestaan of niet. Zo leggen deze normen eisen op aan de betongranulaten die dienen om gebruikt te worden in beton. [10]

In Duitsland zijn 2 normen van toepassing in 8 verschillende toepassingsgebieden. Deze gebieden zijn afhankelijk van de omgevingsklasse. De vervangingspercentages gaan van maximaal 25% tot en met maximaal 45% afhankelijk van het toepassingsgebied. De maximale sterkte waarbij een vervanging toepasbaar is, is tot een sterkteklasse van C30/37. Twee types van granulaat zijn toegelaten bij deze berekeningen, namelijk type 1 en 2. Type 1 is betonpuinbrekerzand en betonpuingranulaat en type 2 is puinbrekerzand van gebouwen en puingranulaten [10]

De Nederlandse normen en technische regelgevingen laten toe dat maximaal 20% grove granulaten vervangen mogen worden door betongranulaten. Dit is geldig voor alle toepassingen die vermeld staan in de norm en voor beton met een sterkteklasse van C12/15 tot en met C53/65. Verder zijn ook grotere vervangingspercentages toegelaten als CUR-aanbeveling 112 gevolgd wordt. Maximaal 50% is toegestaan zonder de rekenregels voor beton aan te passen voor alle milieuklassen conform met deze norm. Als de aangepaste rekenregels voor beton gebruikt worden, is een vervangingspercentage van 50% tot en met 100% toelaatbaar. Deze vervangingspercentages zijn van toepassing bij de milieuklassen die gegeven zijn in CUR-aanbeveling 112. Enkel voor de milieuklassen XD en XS zijn deze percentages niet relevant. Bij al deze berekeningen zijn enkel betonpuin en mengpuin toegelaten. [10]

Volgens de Europese norm EN 206-1 en Noorse norm NS 3473 zijn er 2 verschillende toepassingsgebieden voor het gebruik van betongranulaat. Afhankelijk van de toepassing schommelt het vervangingspercentage tussen de 10% en 30 %. Bij elk vervangingspercentage is een andere Noorse norm geldig. De sterkteklassen van het toepasbaar beton zijn beperkt tot C20/25 en C45/55. Er zijn maar 2 types van gerecycleerde granulaten toegestaan nl. een type I en II. Type I bevat meer dan 95% natuursteen, beton, bakstenen en/of metselwerk. Type II bestaat uit meer dan 99% beton en/of natuursteen. [10]

1.6 Invloed van betongranulaten op beton

1.6.1 De herkomst van de betongranulaten

D. Pedro en anderen hebben enkele conclusies getrokken uit hun onderzoek. Deze zijn bepaald voor beton met een beoogde sterkteklasse van 20 MPa, 45 MPa en 65 MPa. De druksterkte van het nieuw beton is afhankelijk van de sterkteklasse van het oorspronkelijke beton. De druksterkte nam met 8% af voor de beoogde sterkteklasse van 45 MPa en 65 MPa. Voor 20 MPa nam deze af met 20%. De invloeden die de productieplaats met zich meebrengt zijn niet significant om de druksterkte te wijzigen/beïnvloeden. De elasticiteitsmodulus van beton daalt met 22%, 18% tot 15% bij toenemende sterkteklasse gaande van 20 MPa tot 65MPa. Het gebruik van betongranulaten met zeer lage mechanische eigenschappen heeft een extra vergrotend effect op de reeds aanwezige verlaging van de elasticiteitsmodulus van het beton. Een ander nadelig effect van het gebruik van betongranulaten is dat de waterabsorptie bij onderdompeling verhoogt met 23% tot 49% ten opzichte van het referentiebeton. Verder wordt de waterabsorptie van het beton beïnvloed door de waterabsorptiewaarde van de gebruikte betongranulaten. [11]

1.6.2 De mechanische eigenschappen van het beton

Het onderzoek van Sami W. Tabsh en anderen wijst uit dat het gebruik van grove betongranulaten invloed heeft op de mechanische eigenschappen van het beton. De druksterkte en treksterkte vermindert door het gebruik van betongranulaten. Een onderscheid tussen de beoogde sterkteklassen is waarneembaar. Zo is de vermindering groter bij het gebruik van betongranulaten met een lage sterkteklasse dan bij een hogere sterkteklasse. Een andere conclusie is dat de moederbeton voor de winning van de betongranulaten minstens de beoogde sterkteklasse moet bezitten om een druk- en treksterkte te verkrijgen die vergelijkbaar is met het gebruik van natuurlijke granulaten. Het onderzoek heeft uitgewezen dat de water-cementfactor moet toenemen om dezelfde verwerkbaarheid te hebben dan bij het gebruik van natuurlijke granulaten. Wat verklaarbaar is door de grotere waterbehoefte van de betongranulaten. [12]

Uit proeven blijkt dat de mechanische eigenschappen afhankelijk zijn van de eigenschappen van het moederbeton van de betongranulaten en van het vervangingspercentage van de grove granulaten in het nieuwe beton. Khaldoun Rahal heeft met zijn experimenteel onderzoek bewezen dat het verloop van de druksterkte ontwikkeling gelijkaardig is voor beton met grove betongranulaten of met natuurlijk grove granulaten. Alleen heeft het beton met natuurlijk grove granulaten een relatief snellere sterkte winst tot een ouderdom van 7

dagen. De oorzaak achter dit fenomeen heeft hij niet verder onderzocht. Verder heeft hij bewezen dat de druksterkte van beton met grove betongranulaten niet beperkt is tot alleen de druksterkte van het moederbeton dat gebruikt is om de betongranulaten te winnen. [13]

Uit de experimentele studie van Safiullah Omary en anderen blijkt dat de porositeit van het beton sterkt beïnvloed wordt door 3 belangrijke factoren. Deze factoren zijn het vervangingspercentage, het volume aan cementpasta en de porositeit van de betongranulaten. Als deze drie factoren toenemen dan zal de porositeit van het beton toenemen. Daarenboven heeft de sterkte van de betongranulaten een effect op de druksterkte van het beton. Wanneer de LA coëfficiënt en de porositeit van de betongranulaten toenemen, zal de druksterkte en de spijjsterkte van het beton verminderen. [14]

Uit de structurele prestatietesten, uitgevoerd door J. de Brito en anderen blijkt dat de wapening de kleine aanwezige effecten van het gebruik van betongranulaten vermindert. De uitvoeringscondities blijken een veel belangrijker aspect te zijn in de definitie van structureel gedrag van gewapend beton dan de verwerking van gerecycleerde betongranulaten in het beton. De gewone/ordinaire berekeningsmethodes en wapeningsdetaillering voorspelt het structurele gedrag goed en laat toe om een voldoende structureel design te gebruiken. Uit de resultaten van de testen kan afgeleid worden dat het gebruik van grove betongranulaten is toegelaten in het beton zonder dat er zich belangrijke nadelige effecten voordoen. [15]

1.6.3 Behandeling van grove betongranulaten

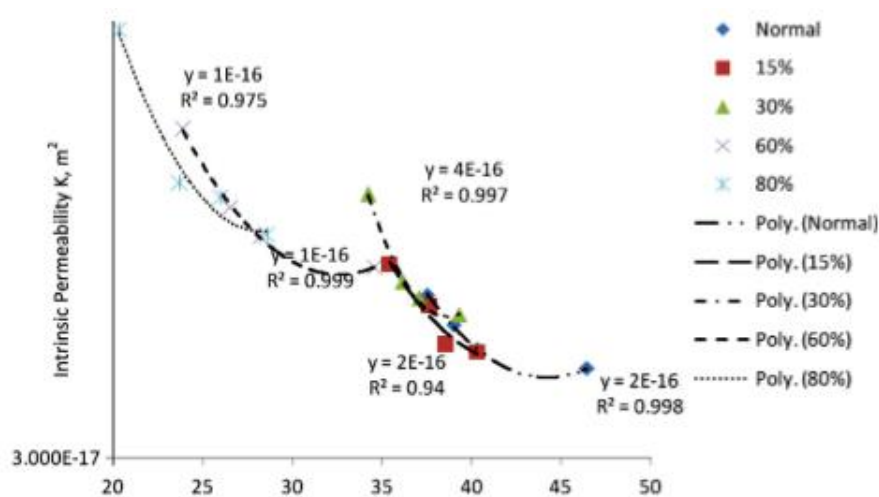
Het is mogelijk om gerecycleerde grove betongranulaten te behandelen om de kwaliteit van de granulaten te verhogen. Deze behandeling bestaat uit twee stappen. De eerste stap is de betongranulaten onder te dompelen in een zuurmilieu om zwak en/of loszittende mortel te verwijderen. In de volgende stap worden de betongranulaten geïmpregneerd met calciumsilicaat (Ca_2SiO_4 of C_2S) om de poriën en de scheuren/breuken op te vullen. Sallehan Ismail en anderen hebben de invloed van deze behandeling bekeken op vlak van mechanische sterkte en krimp bij een vervanging van 60 % van de grove granulaten. Als zuurmilieu werd een waterstofchloride-oplossing gebruikt. Na de test werd vastgesteld dat het chloridegehalte onder de grens van 1% ligt. Hierdoor is deze herbruikbaar in gewapend beton. Door de behandeling werd vastgesteld dat de fysische en mechanische eigenschappen significant verhoogd worden. De vermindering van de druksterkte en buigsterkte van beton is bij onbehandelde betongranulaten het grootst. Het gebruik van behandelde betongranulaten heeft als voordelig effect dat het de verlaging van de druksterkte en buigsterkte en de E-modulus van beton vermindert.

De verbetering van de mechanische eigenschappen van het beton met behandelde betongranulaten ten opzichte van het beton met onbehandelde betongranulaten komt door de behandeling van de betongranulaten. De behandeling verbetert de structuur van het contactoppervlakte rond het betongranulaat, waardoor een betere bindingssterkte tussen het betongranulaat en de cement matrix wordt bereikt. De krimp vermindert door het

gebruik van behandelde granulaten. De waarden van de krimp liggen in dezelfde grootorde als het referentiebeton. Deze waardes zijn gelegen tussen 225 en 350 microspanning. [16]

1.6.4 Invloed van het vervangingspercentage

Uit het experimenteel onderzoek van Wai Hoe Kwan en anderen kunnen enkele bevindingen afgeleid worden. Het vervangen van natuurlijk grove granulaten met grove betongranulaten heeft een nadelig effect op de druksterkte van het beton. Bij een vervangingspercentage van 80% is het nog mogelijk om de gewenste druksterkte te halen als de Britse DOE-methode gebruikt wordt. De waterabsorptie is rechtstreeks afhankelijk van het vervangingspercentage. Dit komt doordat de betongranulaten poreuzer zijn dan de natuurlijke granulaten. De doordringbaarheid van het beton stijgt bij een toenemende hoeveelheid betongranulaten. Het verschil in doordringbaarheid op jonge leeftijd van het beton is groot, zoals te zien is in figuur 1. De doordringbaarheid daalt op een oudere leeftijd als het beton wordt uitgehard terwijl het ondergedompeld is. [17]



Figuur 1: De relatie tussen de druksterkte en de doordringbaarheid [17]

Indien de effectieve water-cementfactor en de hoeveelheid cement constant blijft, zal beton met 100% grove betongranulaten 20 tot 25 % minder druksterkte bezitten dan beton met natuurlijke granulaten. Doordat beton gemaakt met 100% beton granulaten hoge gehalten van cement nodig heeft om hoge druksterktes (45- 60 MPa) te bereiken, is het economisch onverantwoord. Hierdoor is het aangeraden om betongranulaten te gebruiken in lage tot medium druksterktes (20- 45 MPa). Daarenboven is de gebonden mortel lager in sterkte dan de natuurlijke granulaten en de nieuwe pasta. Hieruit volgt dat het zwakste punt bij het toepassen van betongranulaten in beton met hoge druksterkte gelegen is bij de betongranulaten zelf of bij de gebonden mortel. [18]

Bij een gemiddelde druksterkte (30-45MPa) behaalt het beton gemaakt met 25% betongranulaten dezelfde mechanische eigenschappen als een conventioneel beton, maar de hoeveelheid cement en de effectieve water-cementfactor moet constant blijven. Indien beton gemaakt wordt uit 50 of 100% grove betongranulaten, heeft het beton 5 tot 10% meer cement nodig en 4-10% lagere effectieve water cementfactor om de zelfde druksterkte

op 28 dagen te bereiken als een conventioneel beton. Hierbij is de elasticiteitsmodulus kleiner dan bij een conventioneel beton. De opneembare treksterkte kan groter zijn dan bij een traditioneel beton. De standaard afwijking bij een vervanging van 100% natuurlijk grove granulaten stijgt met 50% ten opzichte van traditioneel beton. Dit wordt veroorzaakt door de heterogeniteit van de grove betongranulaten. [18]

1.7 Betongranulaten versus natuurlijke granulaten

Joseph V. Puthussery en anderen hebben uit een experimentele studie een paar conclusies getrokken. De eerste conclusie is dat betongranulaat gelijkaardige fysische en mechanische eigenschappen bezit als de natuurlijke granulaten. Overigens werd vastgesteld dat de verwerkbaarheid van de verschillende betonsamenstellingen daalt bij een toename van gerecycleerde betongranulaten. Eveneens werd vastgesteld dat de druksterkte vergelijkbaar blijft met deze van de referentiebeton. Bij een toenemend gehalte van betongranulaten werd enkel bij de treksterkte een toenemende afname vastgesteld. [19]

Safiullah Omary en anderen hebben ontdekt dat de oude verharde cementpasta in betongranulaten micro-barsten bevatten door het breekproces. Deze barsten zorgen ervoor dat de porositeit van betongranulaten stijgt. Hierdoor gaat de waterabsorptie toenemen. Daarenboven zijn nog enkele gevolgen van de grotere porositeit: een verlaging van de massadichtheid, de slijtvastheid, de schuurvastheid en de vriesweerstand. Deze gevolgen zijn onafhankelijk van de productieplaats van het moederbeton van de betongranulaten. Toch lijkt het erop dat de oude cementpasta rond de natuurlijke granulaten, de natuurlijk granulaten beschermt tegen vorst. Bovendien zijn enkele verbanden tussen belangrijke grootheden vastgesteld. Een lineair verband tussen de waterabsorptie en de drie grootheden porositeit, massadichtheid en afslijtweerstand (LA-waarde) werd beschreven. Indien de waterabsorptie en de porositeit stijgen zal de afslijtweerstand (LA-waarde) stijgen en de massadichtheid dalen. [14]

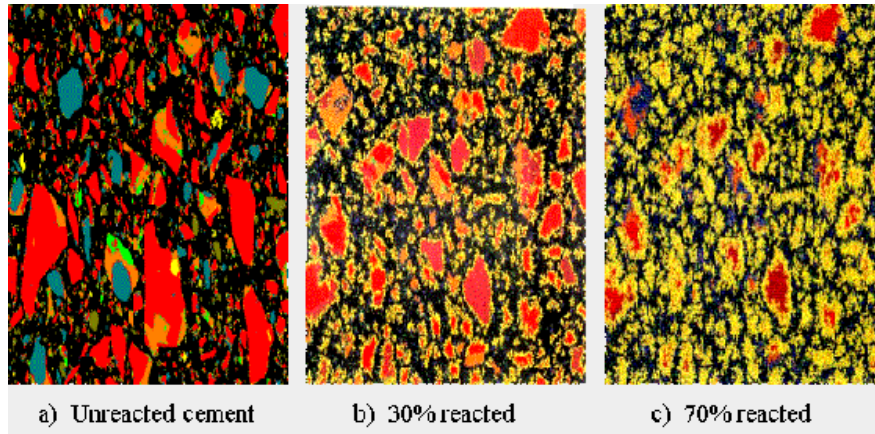
1.8 Hydratatiegraad

“De hydratatiegraad geeft aan hoeveel cement al gereageerd heeft ten opzichte van de oorspronkelijke hoeveelheid cement” [20]

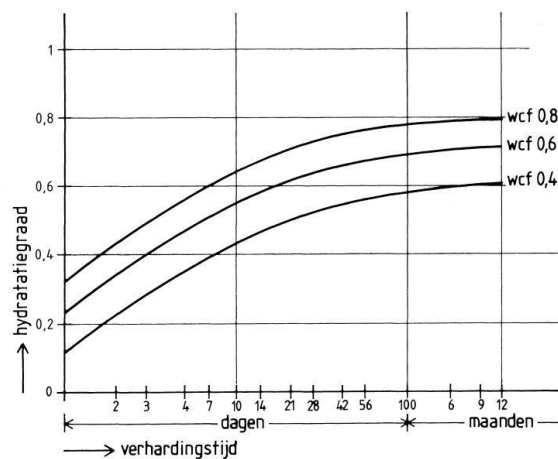
De formulevorm van de definitie is als volgt: $h = \frac{\text{gehydrateerd cement}}{\text{totaal aantal cement}}$ met $0 \leq h \leq 1$ (1)

Een volledige hydratatie komt in de praktijk nooit voor. Hiervoor bestaan enkele redenen. Ten eerste is dat de beschikbare ruimte voor de vorming van nieuwe hydratatieproducten steeds kleiner wordt naargelang de hydratatiegraad toeneemt. Dus op een bepaald moment is geen vrije ruimte meer beschikbaar voor nieuwe hydratatieproducten waardoor de hydratatie stopt. De tweede reden is dat de beschikbaarheid van water daalt in de tijd. Dit fenomeen wordt veroorzaakt doordat het cement hydratatieproducten vormt die ondoordringbare barrières vormen voor het water. Hierdoor zal het water deze barrières moeten overwinnen door er doorheen of er langs te gaan. De hydratatiesnelheid zal als gevolg hiervan afnemen. Figuur 2 geeft de microstructuur van een hydraterende

cementpasta weer. De rode en blauwe kleur staan voor de hoofdbestanddelen van het cement, namelijk C_3S en C_2S . De gele kleur is het hoofdhydratatieproduct C-S-H. In figuur 2 wordt eveneens weergegeven dat de gele fase steeds toeneemt naar mate de tijd vordert. [21] [4]



Figuur 2: Structuur en verloop van de hydratatie reacties in cement [21]



Figuur 3: De hydratatiegraad [20, 22]

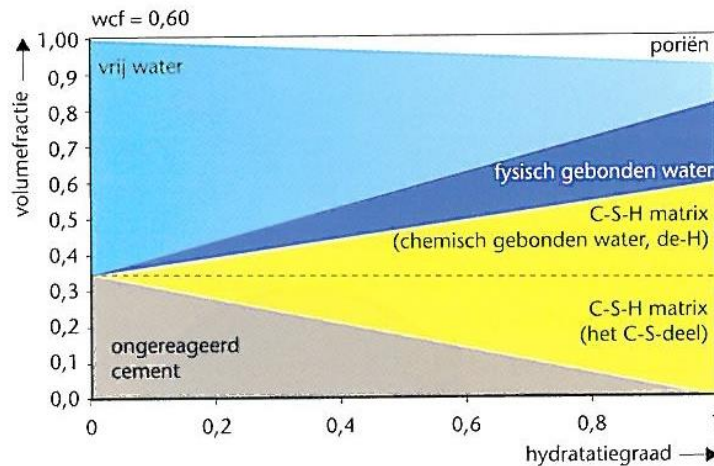
Uit figuur 3 kan afgeleid worden dat een bepaalde water-cementfactor zorgt voor een maximale hydratatiegraad. Zo zorgt een water-cementfactor van 0.6 voor een maximale hydratatiegraad van ± 0.7 na 12 maanden verharden. Dit wil zeggen dat na 12 maanden verharden slechts 80 % van cement gehydrateerd is. Dus 20% van het toegevoegde cement hydrateert niet. De maximale hydratatiegraad kan bepaald worden via formule 2. Vervolgens kan de samenstelling van het beton bepaald worden via figuur 4. Deze geeft de samenstelling van het beton weer in functie van de hydratatiegraad bij een bepaalde water-cementfactor. Dus bij een maximale hydratatiegraad van ± 0.7 bestaat het beton ten opzichte van het totaal volume uit 12% ongehydrateerd cement, 42% C-S-H-matrix (CalciumSilicaatHydraat) , 14% fysisch gebonden water, 27% vrij water en 5% poriën. [22]

$$\alpha_{h,u} = \frac{1,031 * W/C}{0,19 + W/C} \quad (2)$$

met

$\alpha_{h,u}$ is de hydratatiegraad

W/C is de water – cementfactor



Figuur 4: De samenstelling van het beton in functie van de hydratatiegraad met een w/c-factor van 0,6 [20, 22]

1.9 Besluit

De literatuurstudie kan opgedeeld worden in 2 delen, namelijk de invloed van grove betongranulaten en de hydratatiegraad. Dankzij het eerste deel is vastgesteld dat het gebruik van betongranulaten negatieve effecten heeft op de mechanische eigenschappen en duurzaamheid. Om deze effecten te verbeteren is een behandeling van de betongranulaten aangeraden. Voor het tweede deel is het duidelijk dat beton daadwerkelijk ongehydrateerd cement bevat. Om de precieze hoeveelheid te bepalen kan men gebruik maken van formule 2. In het volgende hoofdstuk worden onderzoeksmethodes besproken die de aanwezigheid en de reactiviteit van ongehydrateerd cement kunnen bepalen.

2 Onderzoeksaanpak en methodes

In dit onderdeel van het onderzoeksrapport worden de verschillende gebruikte onderzoeksmethodes uitgebreid toegelicht. De gebruikte onderzoeksstrategie is een experimentele studie. Deze strategie richt zich op één specifieke probleemsituatie. De methodes die hieronder besproken worden, gaan na of er al dan niet ongehydrateerd cement in betongranulaten aanwezig is.

2.1 De geteste betongranulaten

Voor dit onderzoek heeft men zich beperkt tot drie batches, dit zijn de volgende:

- Batch 1: Prefabbeton, PWO-project “Recyclage van hoogwaardig betonpuin, een slimme toekomst.”, figuur 5
- Batch 2: Betongranulaten samengesteld uit 1/3 wegenisbeton , 1/3 buitenverhardingen en 1/3 restbeton, Batch 10 Tetra project, figuur 6
- Batch 3: Wegenisbeton, Batch 13 Tetra project, figuur 7



Figuur 5: Batch 1, betongranulaten (foto: Jan Kerkhofs)



Figuur 6: Batch 2, betongranulaten (foto: Jan Kerkhofs)



Figuur 7: Batch 3, betongranulaten (foto: Jan Kerkhofs)

De Los Angeles proef wordt uitgevoerd op de granulaten om de weerstand tegen verbrijzeling te bepalen. De opbouw van de proef is te zien in figuur 8 Tijdens dit onderzoek wordt deze proef gebruikt om de gebonden mortel aan de natuurlijke granulaten te scheiden van de natuurlijke granulaten. Met het verkregen fijnstof wordt het verder onderzoek uitgevoerd. Daarnaast kon gekozen worden voor de Micro-deval proef. Deze proef houdt in dat men de slijtweerstand van de granulaten bepaalt. Met een droge Micro-Deval proef zou het fijnstof bekomen kunnen worden, maar omdat deze fijnstof genereert via afslijting en afschuring neemt deze proef teveel tijd in beslag om een voldoende hoeveelheid fijnstof te verkrijgen. Daarom is geopteerd voor de Los Angeles proef om het fijnstof te verkrijgen.



Figuur 8: De opbouw van de Los Angeles proef (foto: Jan Kerkhofs)

Volgend stappenplan werd gebruikt:

1. De Los Angeles proef uitvoeren (500 omwentelingen)
 - a. De trommel vullen met:
 - i. 5 kg betongranulaten
 - ii. 10 stalen kogels
 - b. De trommel legen in de voorziene opvangschaal. Dit is te zien in figuur 9.



Figuur 9: De opvangschaal voor het legen van de Los Angeles trommel (foto: Jan Kerkhofs)

2. Het resultaat uitzeven. De gebruikte zeeftoeren voor het uitzeven van het fijnstof is weergegeven in figuur 10.



Figuur 10: De gebruikte zeeftoeren voor het uitzeven van het fijnstof (foto: Jan Kerkhofs)

3. De kleine fractie 0/0,250 mm bewaren om dit materiaal hergebruiken om de mortelprisma's vervaardigen.

2.2 Onderzoeksmethodes

Er zijn verschillende onderzoeksmethodes beschikbaar om de aanwezigheid van ongehydrateerd cement te onderzoeken. In dit onderzoek wordt gekozen om enkel 2 onderzoeksmethodes uit te voeren, namelijk de sterkte-eigenschappen van de mortelprisma's en de hydratatie-eigenschappen van het fijnstof bepalen. Om de sterkte-eigenschappen te bepalen, is gekozen voor een methode die reeds gebruikt is in een voortgaand onderzoek van Xavier Sevenants [2]. Om de hydratatie-eigenschappen te bepalen is voor een methode gekozen die op chemische vlak de aanwezigheid van ongehydrateerd cement bepaalt. Verder werd ervoor gekozen om te kijken of via deze methode de hoeveelheid ongehydrateerd cement bepaald kan worden.

Andere onderzoeksmethodes die overwogen werden om als derde te dienen, waren de Vicat proef en de betongranulaten onder een elektronenmicroscopie onderzoeken. Voor de elektronenmicroscopie is niet gekozen omdat dit een zeer kostelijke methode is. De Vicat proef werd niet uitgevoerd omdat deze proef een globaal resultaat geeft of er al dan niet nog ongehydrateerd cement aanwezig is. Een specifiek resultaat van deze proef is de reageertijd dat het fijnstof nodig heeft om volledig te reageren. Omdat deze proef hetzelfde globaal resultaat geeft als de sterkte-eigenschappen van de mortelprisma's, wordt deze proef niet uitgevoerd.

2.2.1 Sterkte-eigenschappen bepalen

Bij de bepaling van de druksterkte wordt gebruik gemaakt van fijnstof. Dit fijnstof wordt bekomen door het scheiden van de grove betongranulaten. Het scheiden wordt gedaan via een verbrijzelproef (de Los Angeles proef). Daarna worden mortelprisma's aangemaakt met het fijnstof. Vervolgens wordt via een drukpers, de buig- en druksterkte bepaald op deze mortelprisma's. De werkwijze om de buig- en druksterkte van de mortelprisma's te bepalen, is gebaseerd op de werkwijze die staat beschreven in NBN EN 196 –1 [2] [23]

Volgend stappenplan werd toegepast:

1. De samenstelling van de geteste mortelspecies is:
Het gebruikte referentie cement is CEM III/A 42,5 N LA (Bijlage A, Bijlage B, Bijlage C)
 - a. 75% cement en 25% fijnstof: 337,5 g cement, 112,5 g fijnstof, 1350 ±5 g normzand en 225 ±1 g water;
 - b. 50% cement en 50% fijnstof: 225 g cement, 225 g fijnstof, 1350 ±5 g normzand en 225 ±1 g water ;
 - c. 25% cement en 75% fijnstof: 112,5 g cement, 337,5 g fijnstof, 1350 ±5 g normzand en 225 ±1 g water.
2. Het aanmaken van de mortelspecies gebeurt met een automatische mortelmenger. Deze menger is te zien in figuur 11 en in figuur 12. Voor het aanmaken van de mortelspecies moet een aanmaakprocedure gevolgd worden.
 - a. Samenvoegen van het water en het cement in de menger;
 - b. Mengen op lage snelheid (140 toeren/min) gedurende 30s;
 - c. Gelijkmatic toevoegen van normzand tijdens de volgende 30s; (al mappend toevoegen)
 - d. Mengen op hoge snelheid (285 toeren/min) gedurende 30s;
 - e. Stop de mortelmenger voor 30s en meng manueel voor nog eens 30s;
 - f. Mengen op hoge snelheid (285 /min) gedurende 60s.



Figuur 11: De automatische mortelmenger (foto: Jan Kerkhofs)



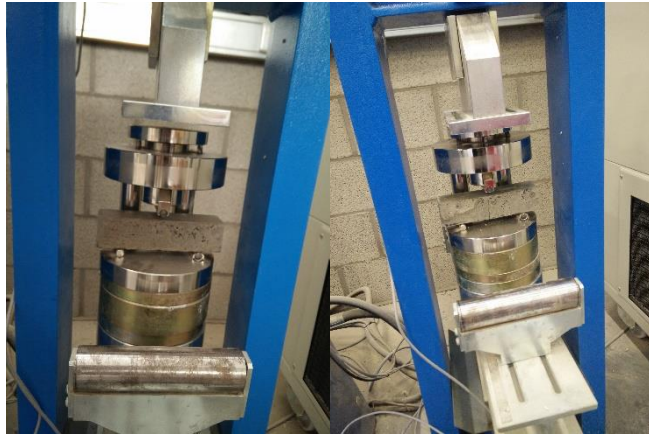
Figuur 12: De kom en de menger van de mortelmenger (foto: Jan Kerkhofs)

3. 3 Mallen van 40 x 40 x 160mm worden voor de helft gevuld met mortelspecie.
4. 60 ± 3 s Verdichten door middel van het schokapparaat, dat getoond wordt in figuur 13. Het verdichten gebeurt aan 60 schokken per minuut.



Figuur 13: Het schokapparaat voor te verdichten (foto: Jan Kerkhofs)

5. De rest van de mal wordt gevuld tot aan de rand en opnieuw verdicht zoals in stap 4.
6. Een plexiglazen plaat wordt aangebracht over de mallen en dit geheel wordt bewaard in een geklimatiseerde omgeving 20°C RV 90% gedurende 24u, eventueel na te meten met een loggertje.
7. De 3 mortelprisma's worden ontkist en worden verder uitgehard terwijl ze volledig zijn ondergedompeld in water.
8. 15 Minuten voor de drukproef worden de mortelprisma's uit het water gehaald.
9. Op de 3 mortelprisma's wordt de buigsterkte bepaald, zoals te zien is op figuur 14.



Figuur 14: De buigsterkte bepalen van een mortelprisma (foto's: Jan Kerkhofs)

Het gemiddelde van de 3 buigsterktes bepalen (drukbank instellen op een toename van 50 ± 10 N/s): $R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{b^3}$

10. Door deze proef ontstaan er 6 halve prisma's waarop de druksterkte bepaald wordt.

Na de drukproef blijft een kubus over die onder een hoek afgebrokkeld is door de trekkrachten die ontstaan in de kubus door axiale druk. Het resultaat is te zien in figuur 15.



Figuur 15: het resultaat na de drukproef (foto: Jan Kerkhofs)

Het gemiddelde van de 6 druksterktes wordt berekend (drukbank instellen op een toename van 2400 ± 200 N/s): $R_c = \frac{F_c}{1600}$

Wanneer 1 van de 6 resultaten meer dan $\pm 10\%$ afwijkt van het gemiddelde, dan wordt dit resultaat ongeldig verklaard. In dit geval wordt het gemiddelde berekend van de resterende 5 resultaten. Als dan van deze 5 resultaten nog 1 resultaat afwijkt met meer dan $\pm 10\%$ van het gemiddelde wordt de beproeving ongeldig verklaard. [23]

2.2.2 Hydratatie-eigenschappen bepalen

De bepaling van de hydratatie-eigenschappen wordt uitgevoerd aan de hand van de vrijgekomen warmte. Er wordt gebruik gemaakt van het bekomen fijnstof. Vervolgens wordt een referentiereeks aangemaakt om de batches mee te vergelijken. De reeks bestaat uit de hydratatiwarmte van 20g, 30g, 40g en 50 g ongehydrateerd cement. Daarna wordt de hydratatiwarmte gemeten in een geïsoleerd vat. De opstelling van de proef is te zien in figuur 16. Doordat de warmtegeleidingscoëfficiënt van het geïsoleerd vat niet bekend is, wordt deze constant geacht doorheen de hele reeks testen.



Figuur 16: De opstelling om de hydratatiwarmte te bepalen (foto: Jan Kerkhofs)

Het volgende stappenplan werd uitgevoerd:

1. Samenstelling van de te onderzoeken stalen.
Het gebruikte referentie cement is CEM III/A 42,5 N LA (Bijlage A, Bijlage B, Bijlage C)

- a. Referentie 1 : 20 g cement en 8 ± 1 g water
 - b. Referentie 2 : 30 g cement en 12 ± 1 g water
 - c. Referentie 3 : 40 g cement en 16 ± 1 g water
 - d. Referentie 4 : 50 g cement en 20 ± 1 g water
 - e. Staal 1: 30 g fijnstof batch 1 en 20 g cement en 20 ± 1 g water
 - f. Staal 2: 30 g fijnstof batch 2 en 20 g cement en 20 ± 1 g water
 - g. Staal 3: 30 g fijnstof batch 3 en 20 g cement en 20 ± 1 g water
2. Het manueel aanmaken van de specie:
 - a. Samenvoegen van het water en het cement in een plastieken beker;
 - b. Mengen tot een suspensie zonder harde brokken cement gedurende ± 30 s;
 3. Het plaatsen van het plastiekenbeker in het geïsoleerd vat;
 4. Het sluiten van het geïsoleerd vat;
 5. Het aanzetten van de elektronische thermometer (meten met een interval van 5 min);
 6. Het stopzetten van de proef wanneer de temperatuur in het geïsoleerd vat gelijk of lager is dan de kamertemperatuur.

2.3 Oncontroleerbare factoren

Deze resultaten werden bekomen onder invloed van een aantal factoren waar geen controle over was. Ten eerste was er een mogelijke invloed van de wisselende vochtigheid op de betongranulaten. Doordat deze enkel onder een afdak gestockeerd waren zonder bescherming zou dit de hoeveelheid ongehydrateerd cement kunnen verminderen. Deze impact kan beperkt worden wanneer de betongranulaten opgeslagen worden in een omgeving met een constante vochtigheid. Doordat het fijnstof een samenstelling is van granulaten, namelijk zand, gehydrateerd cement, fillers en mogelijk ongehydrateerd cement was voor de eerste onderzoeksmethode de invloed van deze andere granulaten niet bekend. Daarnaast kon de kamertemperatuur niet gecontroleerd worden tijdens de onderzoeken naar de hydratatie-eigenschappen.

2.4 Besluit

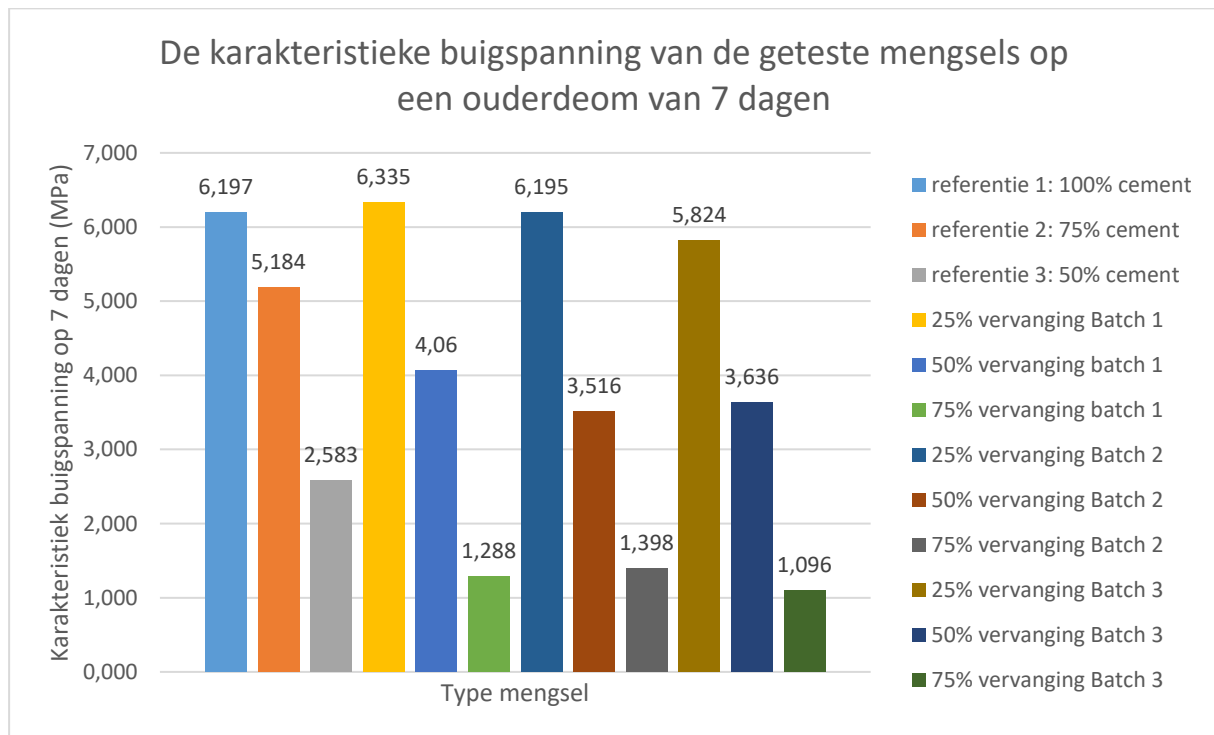
De besproken methodes zijn uitgevoerd volgens de weergegeven stappenplannen. Op basis hiervan werden resultaten voor de sterkte-eigenschappen bekomen over een ouderdom van 7 en 28 dagen. Voor de hydratatie-eigenschappen werden resultaten verkregen om de 5 minuten. Deze resultaten worden in het volgende hoofdstuk uitgebreid beschreven.

3 Resultaten

In dit onderdeel worden de resultaten van beide methodes besproken. Eerst zal dieper ingegaan worden op de sterkte-eigenschappen. Deze worden eerst bekeken bij een ouderdom van de aangemaakte mortel bij 7 dagen, daarna bij een ouderdom van 28 dagen. Ten slotte worden de resultaten van de hydratatie-eigenschappen toegelicht.

3.1 De sterkte-eigenschappen

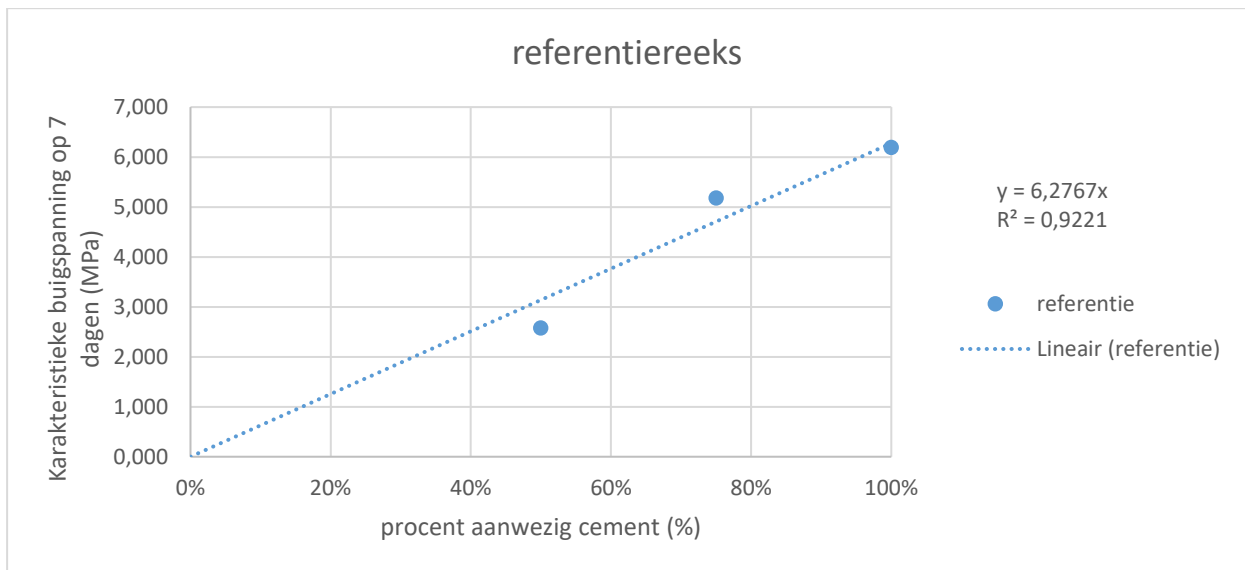
Figuur 17 wordt bekomen door de gegevens uit Bijlage D, Bijlage E, Bijlage F en Bijlage G te gebruiken. Uit de grafiek kunnen enkele conclusies afgeleid worden. Als eerste kan vastgesteld worden dat de referentie voor 25% cement ontbreekt. Vervolgens is te zien dat een vervanging van 25% cement met batch 1 een hogere waarde voor de karakteristieke buigspanning bereikt dan referentie 1, namelijk 6,335 MPa ten opzichte van 6,197 MPa.



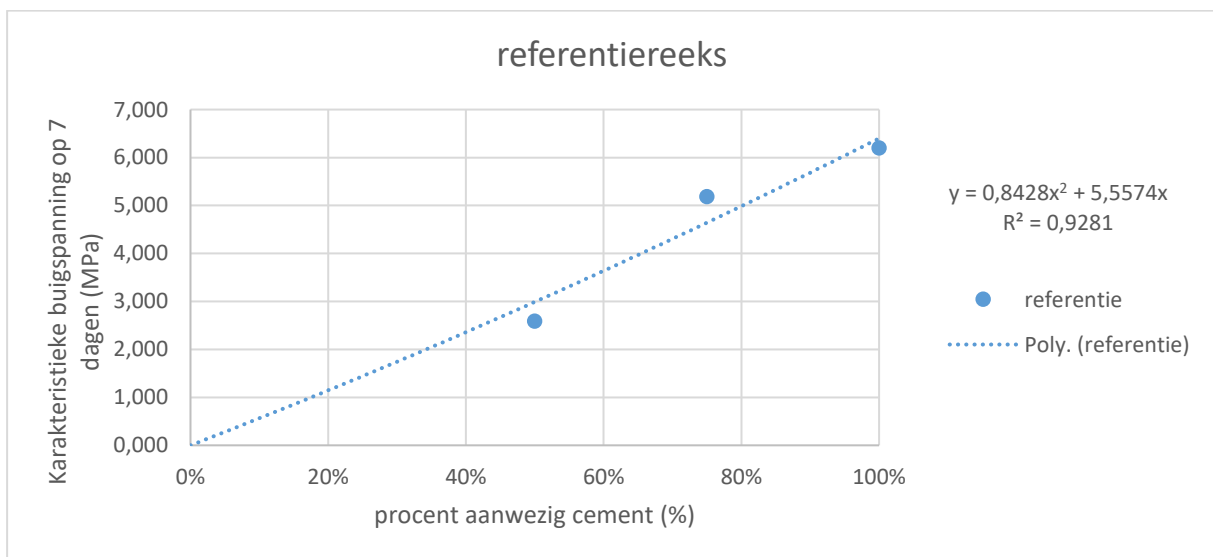
Figuur 17: De vergelijking tussen de resultaten van de karakteristieke buigspanning op een ouderdom van 7 dagen.

Ten derde is de karakteristieke buigspanning met een vervanging van 25% cement met batch 2 equivalent met referentie 1. Als laatste wordt geconcludeerd dat alle vervangingen van 25% cement met batch 1, 2 en 3 een hogere karakteristieke buigspanning hebben van minstens 0,6 MPa ten opzichte van referentie 2. De laatste bevinding is dat de karakteristieke buigspanning met een vervanging van 50% cement met batch 1, 2 en 3 buigspanning van referentie 3 met minstens 0,9 MPa overstijgt. De toenames ten opzichte van referentie 2 en 3 kunnen gelinkt worden aan het feit dat ongehydrateerd cement van het fijnstof actief meewerkt.

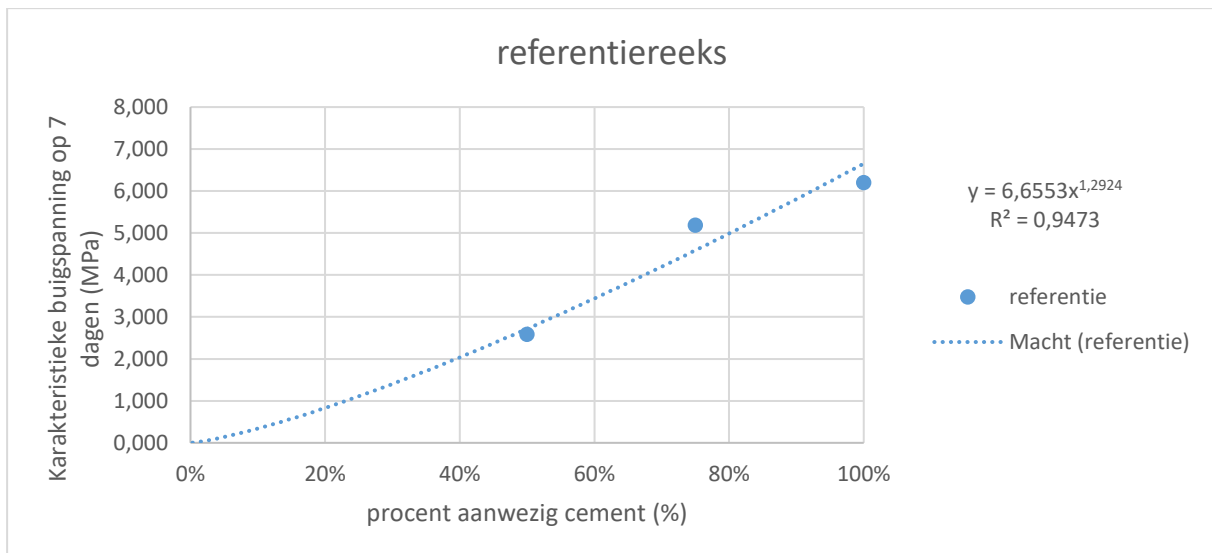
Doordat een referentiereeks gemaakt is, kan men mogelijke verbanden tussen de hoeveelheid aanwezig cement en de resulterende buigspanning onderzoeken. De verschillende toegepaste verbanden kunnen vergeleken worden aan de hand van de determinatiecoëfficiënt. Deze wordt weergegeven op figuur 18, figuur 19 en figuur 20.



Figuur 18: Een lineaire verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.



Figuur 19: Een tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.



Figuur 20: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.

Deze figuren geven het verband tussen de hoeveelheid cement aanwezig en de karakteristieke buigspanningen weer. De onderzochte verbanden zijn het lineair, tweedegraads polynoom en machtsverband. De determinatiecoëfficiënten bedragen respectievelijk 0,9221; 0,9281 en 0,9473. Het verband met de grootste determinatiecoëfficiënt benadert de resultaten het best. Voor het verband tussen de hoeveelheid cement aanwezig en de karakteristieke drukspanningen wordt geopteerd voor het machtsverband en in formulevorm:

$$y = 6,6553 * x^{1,2924} \quad (3)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid cement aanwezig in %

Met behulp van formule 3 kan de karakteristieke buigspanning op een ouderdom van 7 dagen berekend worden indien de hoeveelheid cement aanwezig gekend is. Voor de verkregen resultaten met een vervanging van cement met de te testen batches zijn de karakteristieke drukspanningen gekend, maar de hoeveelheid cement niet. Om deze te kunnen berekenen wordt formule 3 omgevormd tot formule 4.

$$x = \sqrt[1,2924]{\frac{y}{6,6553}} \quad (4)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

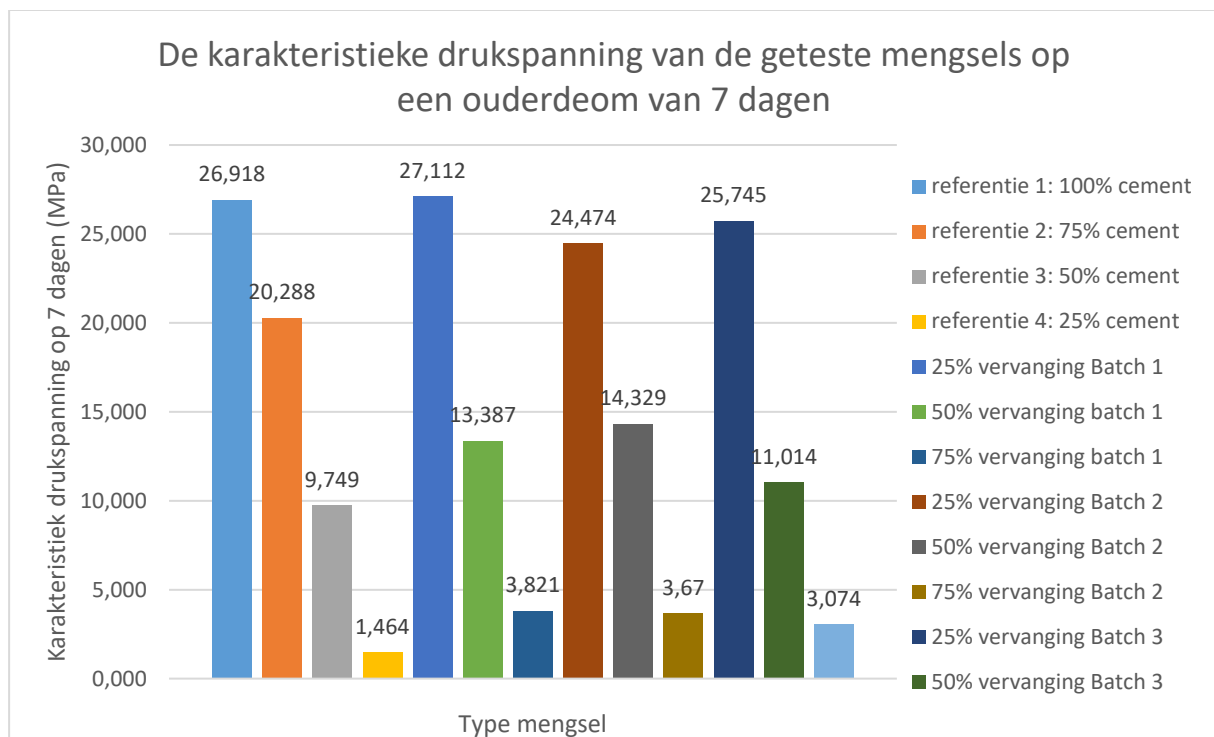
De hoeveelheid aanwezig cement in het mengsel wordt weergegeven in de derde kolom van tabel 1. Deze resultaten zijn bekomen door de karakteristieke buigsterkte in te vullen in formule 4. De resultaten van de vierde kolom zijn bekomen door de berekende hoeveelheid aanwezig cement te verminderen met de gekende hoeveelheid aanwezig cement.

Tabel 1: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke buigspanning op 7 dagen.

Type mengsel	Karakteristieke buigspanning (MPa)	Hoeveelheid aanwezig cement (%)	Gekende hoeveelheid cement (%)	Hoeveelheid aanwezig cement in fijnstof (%)
75% cement en 25% batch 1	6,335	96,255	75	21,255
50% cement en 50% batch 1	4,060	68,221	50	18,221
25% cement en 75% batch 1	1,288	28,062	25	3,062
75% cement en 25% batch 2	6,195	94,605	75	19,605
50% cement en 50% batch 2	3,516	61,035	50	11,035
25% cement en 75% batch 2	1,398	29,899	25	4,899
75% cement en 25% batch 3	5,824	90,191	75	15,191
50% cement en 50% batch 3	3,636	62,640	50	12,640
25% cement en 75% batch 3	1,096	24,767	25	-0,233

Uit tabel 1 kunnen enkele bevindingen geconstateerd worden. Naarmate het vervangingspercentage van het cement toeneemt, neemt het percentage van ongehydrateerd cement, dat actief meewerkt om de buigsterkte te vergroten, af. Voor batch 1 neemt het percentage van het actief meewerkend cement in het fijnstof af van 21,255% tot 3,062%. Het actief meewerkend percentage cement zakt van 19,605% tot 4,899% als de vervanging gebeurt met batch 2. Bij een toenemende vervanging van batch 3 daalt het actief meewerkend percentage cement van 15,191% tot -0,233%.

Figuur 21 vergelijkt de drukspanning van de verschillende mengsels op een ouderdom van 7 dagen. Uit Bijlage D, Bijlage E, Bijlage F en Bijlage G worden de gegevens voor de grafiek gehaald.



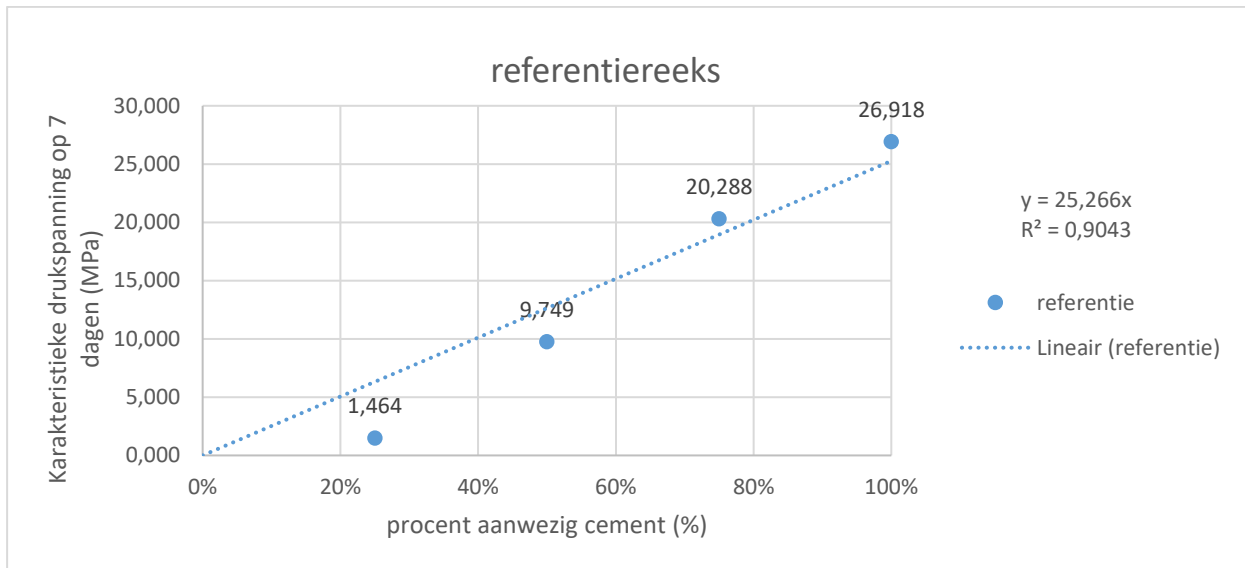
Figuur 21: De vergelijking tussen de resultaten van de karakteristieke drukspanning op een ouderdom van 7 dagen.

Ten eerste kan vastgesteld worden dat de drukspanning van het mengsel met 25% vervanging met batch 1 een grotere waarde behaalt dan referentie 1, namelijk 27,112 MPa tegenover 26,918 MPa. Een andere conclusie is dat de mengsels met een vervanging van 25% minstens 20,6% en maximum 33,6% meer drukspanning op kan nemen voor falen tegenover referentie 1. Verder kan vastgesteld worden dat de mengsels met een vervanging van 50% met batch1 37,3% , met batch 2 47,0% en met batch 3 12,9% meer drukkracht kan opnemen ten opzichte van de referentie 2 met een constante oppervlakte. Hetzelfde wordt ook vastgesteld bij de mengsels met een vervanging van 75%, deze hebben uitgehard een maximale drukspanning die 161,0%; 150,7% en 110,0% hoger is dan referentie 3.

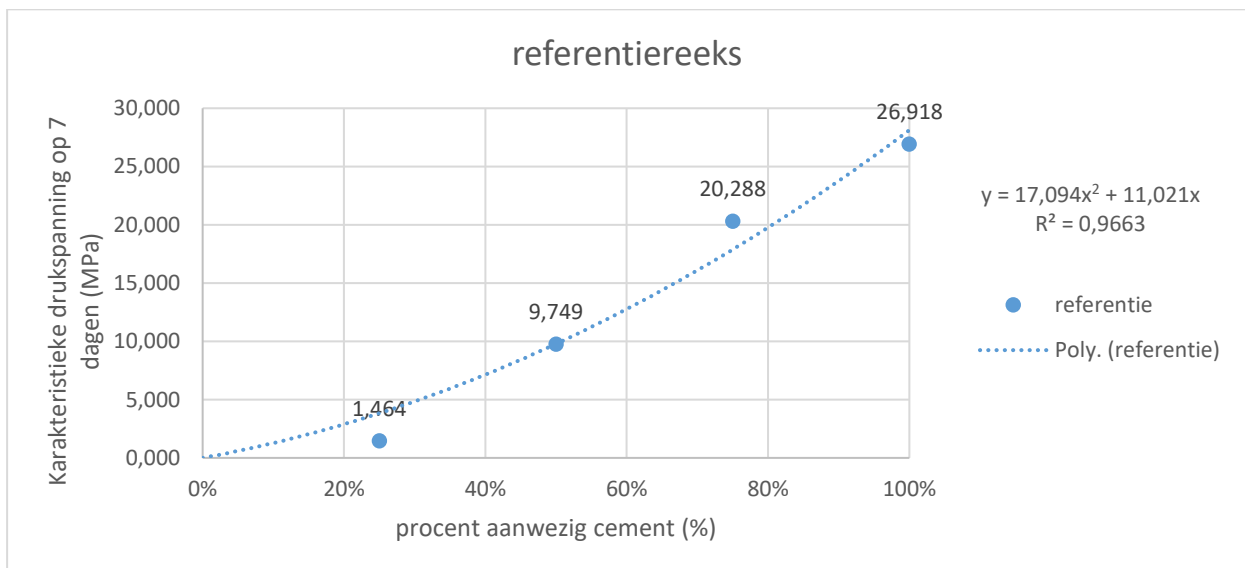
Deze bevindingen kunnen in relatie gebracht worden met de literatuur. Het feit dat de karakteristieke druksterkte met een vervanging van 25% met batch 1 de waarde van de referentie overstijgt kan gelinkt worden aan de sterkteklasse van het moederbeton. Batch 1 is afkomstig van de prefab industrie, deze produceert beton met een hogere sterkteklasse, namelijk 40 MPa en hoger. Batch 2 is een samenstelling van beton dat afkomstig is van prefab, wegeis en buitenverhardingen. Batch 3 bestaat uit wegeisbeton. Zoals in de literatuur moet de sterkte van het moederbeton minimum dezelfde sterkte hebben als de beoogde sterkte van het nieuw beton om gelijkaardige mechanische eigenschappen te bereiken als met natuurlijke granulaten. Door de toenames van de karakteristieke

drukspanning ten opzichte van referentie 2, 3 en 4 kan geconcludeerd worden dat ongehydrateerd cement aanwezig is in het fijnstof.

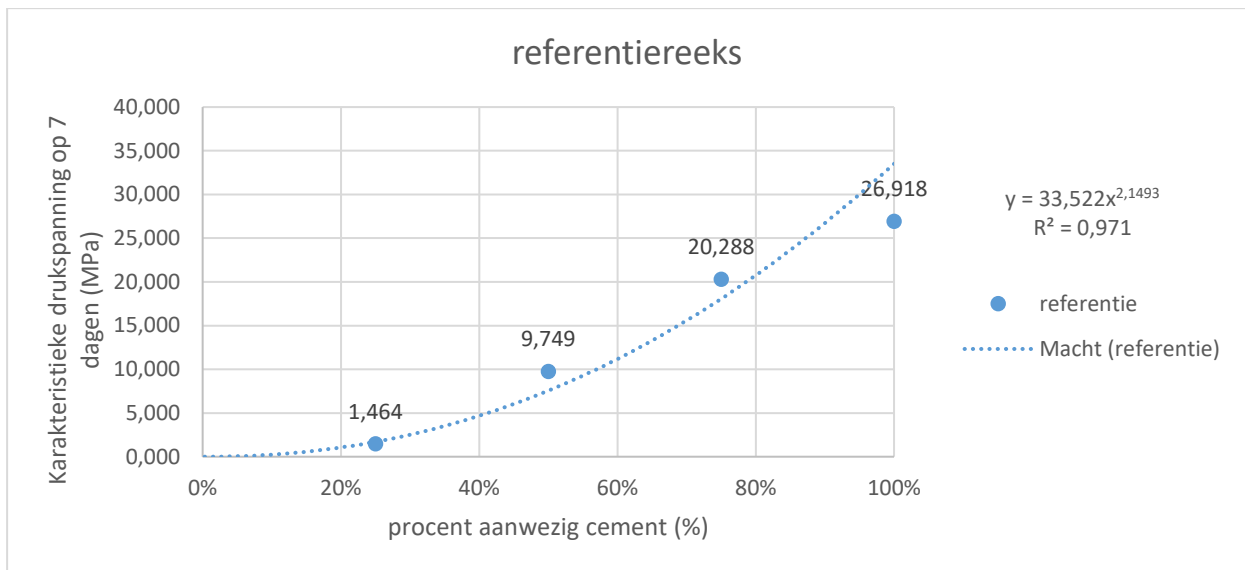
Aan de hand van de gemaakte referentiereeks is het mogelijk om verbanden tussen de hoeveelheid aanwezig cement en de resulterende drukspanning te bestuderen. Dankzij figuur 22, figuur 23 en figuur 24 kunnen de verschillende mogelijke verbanden vergeleken worden op basis van de determinatiecoëfficiënt.



Figuur 22: Een lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.



Figuur 23: Een tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid cement (%) aanwezig en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.



Figuur 24: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.

Bij het lineair verband tussen de 2 grootheden bedraagt de determinatiecoëfficiënt 0,9043. De determinatiecoëfficiënt bij het polynoom verband bedraagt 0,9663 en voor het machtsverband 0,9710. Het verband met de grootste determinatiecoëfficiënt benadert de resultaten het best. Voor het verband tussen de hoeveelheid cement aanwezig en de karakteristieke drukspanningen wordt geopteerd voor het machtsverband. Het verband is in formulevorm:

$$y = 33,522 * x^{2,1493} \quad (5)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

Aan de hand van formule 5 kan de karakteristieke drukspanning op een ouderdom van 7 dagen berekend worden als de hoeveelheid aanwezig cement gekend is. Voor de verkregen resultaten met een vervanging van cement zijn de karakteristieke drukspanningen gekend, maar de hoeveelheid cement niet. Om deze te kunnen berekenen wordt formule 5 omgevormd tot formule 6.

$$x = \sqrt[2,1493]{\frac{y}{33,522}} \quad (6)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

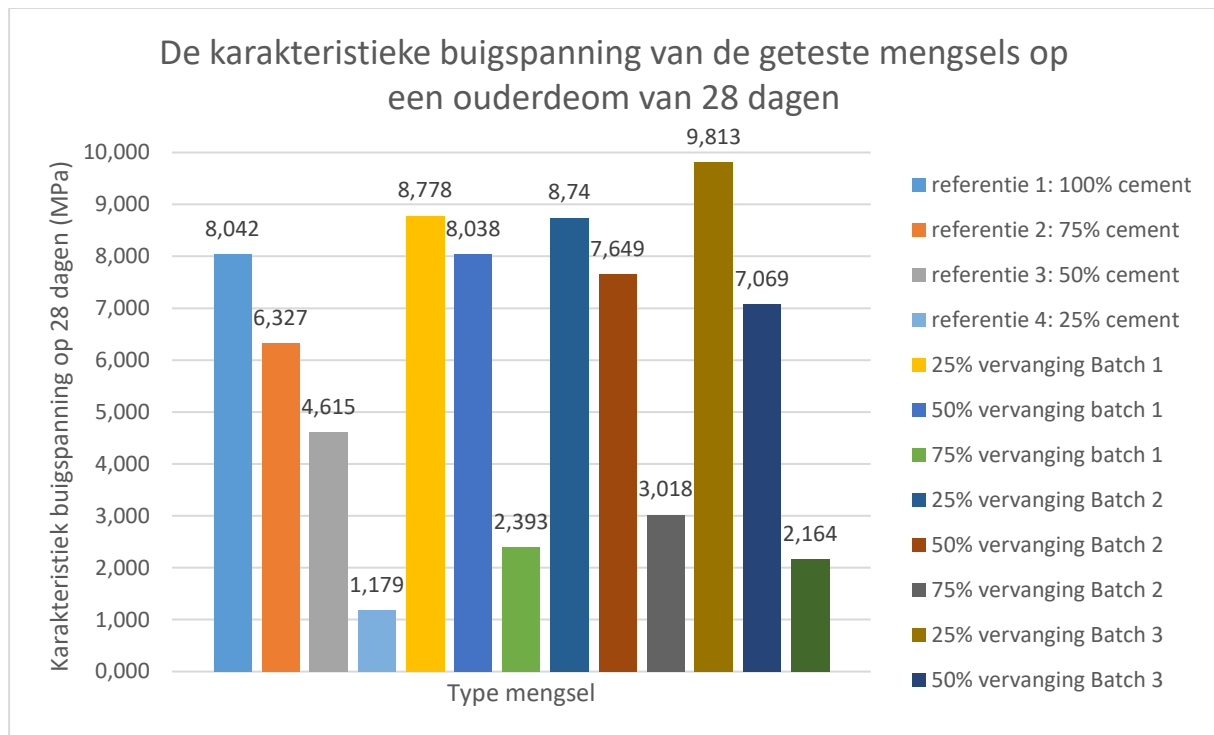
De hoeveelheid aanwezig cement (%) in het mengsel wordt weergegeven in de derde kolom van tabel 2. Deze resultaten zijn bekomen door de karakteristieke druksterkte in te vullen in formule 6. De resultaten van de vierde kolom zijn bekomen door de berekende hoeveelheid aanwezig cement te verminderen met de gekende hoeveelheid aanwezig cement.

Tabel 2: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke drukspanning op 7 dagen.

Type mengsel	Karakteristieke drukspanning (MPa)	Hoeveelheid aanwezig cement (%)	Gekende hoeveelheid cement (%)	Hoeveelheid aanwezig cement in fijnstof (%)
75% cement en 25% batch 1	27,112	90,598	75	15,598
50% cement en 50% batch 1	12,387	65,241	50	15,241
25% cement en 75% batch 1	3,821	36,407	25	11,407
75% cement en 25% batch 2	24,474	86,384	75	11,384
50% cement en 50% batch 2	14,329	67,338	50	17,338
25% cement en 75% batch 2	3,670	35,730	25	10,730
75% cement en 25% batch 3	25,745	88,443	75	13,443
50% cement en 50% batch 3	11,014	59,579	50	9,579
25% cement en 75% batch 3	3,074	32,902	25	7,902

Uit tabel 2 kunnen enkele bevindingen geconstateerd worden. Naarmate het vervangingspercentage van het cement toeneemt, neemt het percentage van ongehydrateerd cement dat actief meewerkt om de druksterkte te vergroten af. Voor batch 1 en 3 is dit het geval, maar batch 2 heeft een ander verloop. Bij batch 1 neemt het percentage van de actief meewerkend cement in het fijnstof af van 15,598% tot 11,407%. Het actief meewerkend percentage cement zakt bij een vervanging met batch 3 van 13,443% tot 7,902% . Bij een toenemende vervanging van 25% tot 50% van batch 2 stijgt het actief meewerkend cement in het fijnstof van 11,384% tot 17,338% . Bij een verdere verhoging van het vervangingspercentage van 50% naar 75% , neemt het actief meewerkend percentage cement af van 17,338% tot 10,730%.

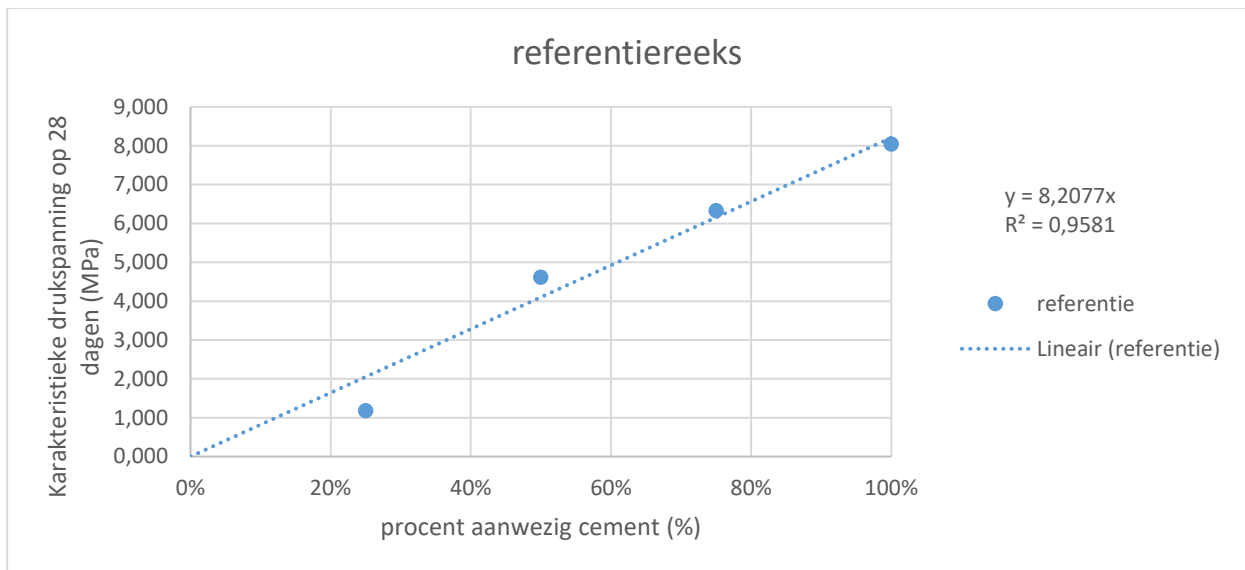
Figuur 25 geeft de karakteristieke buigspanning weer voor de verschillende geteste mengsels op een ouderdom van 28 dagen. De gegevens voor deze grafiek zijn terug te vinden in Bijlage H, Bijlage I, Bijlage J en Bijlage K.



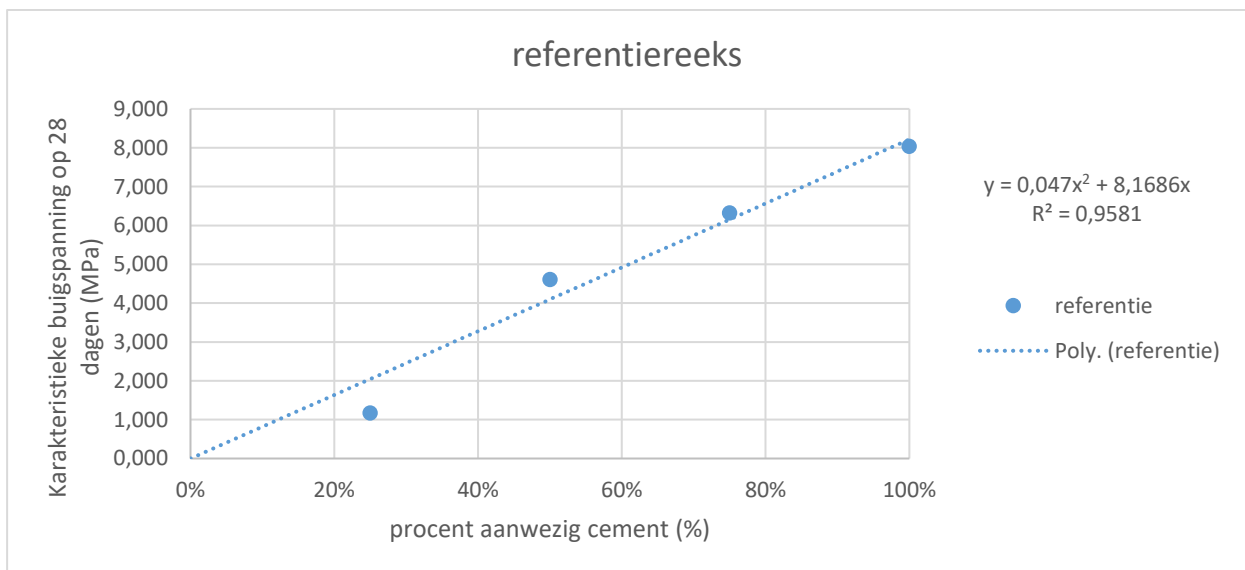
Figuur 25: De vergelijking tussen de resultaten van de karakteristieke buigspanning op een ouderdom van 28 dagen.

Uit de grafiek kunnen enkele conclusies getrokken worden. Ten eerste kan de karakteristieke buigspanning van referentie 1 overtroffen worden door de mengsels met een vervanging van 25 % cement. Het mengsel met batch 1 heeft een karakteristieke drukspanning die 9,1 % groter is dan referentie 1, batch 2 8,7 % en batch 3 22,0 %. De volgende bevinding is dat de karakteristieke drukspanning van het mengsel met vervanging van 50 % cement met batch 1 gelijkwaardig is aan referentie 1. Daarnaast kunnen de mengsels met een vervanging van 50 % cement de karakteristieke drukspanning van referentie 2 en 3 overstijgen. Het mengsel met batch 1 heeft een hogere waarde van 27,0 % voor de karakteristieke druksterkte dan referentie 2 en een 74,2 % hogere waarde dan referentie 3. Voor batch 2 is de waarde 20,9 % hoger dan referentie 2 en 65,7 % hoger dan referentie 3. Ten opzichte van referentie 2 is de karakteristieke drukspanning 11,7 % hoger voor batch 3 en ten opzichte van referentie 3 53,2 % hoger. Voor de mengsels met een vervanging van 75 % bedraagt het verschil in karakteristieke drukspanning ten opzichte van referentie 4 voor batch 1 103,0 % , voor batch 2 156,0 % en voor batch 3 83,5 %.

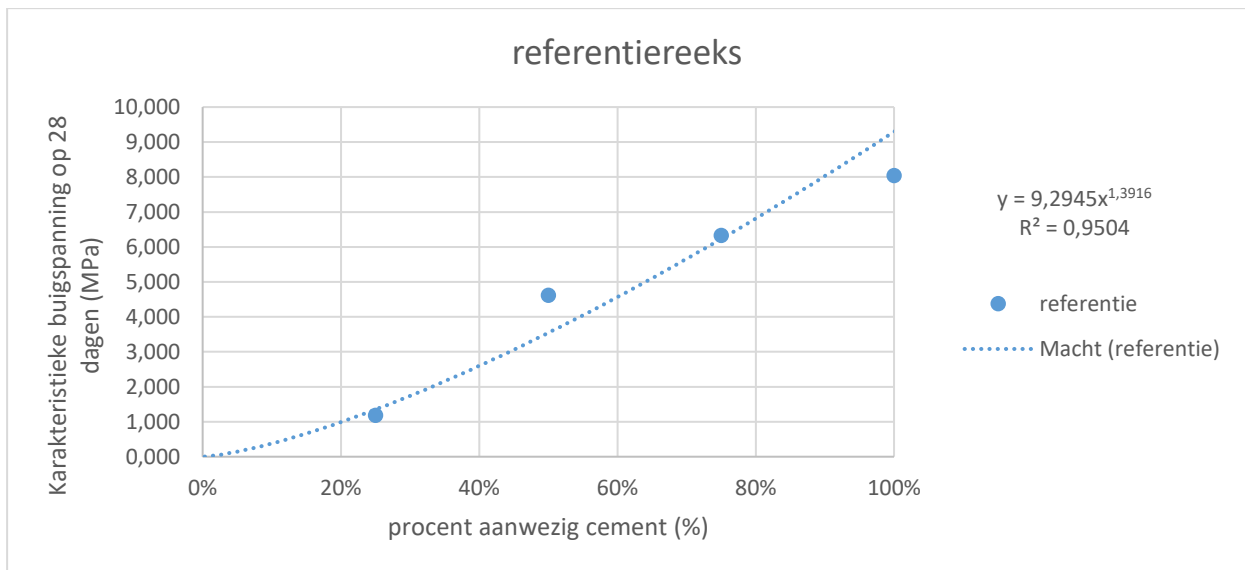
De mogelijke verbanden tussen de hoeveelheid aanwezig cement en de karakteristieke buigspanning worden weergegeven in figuur 26 tot en met figuur 28. Deze figuren zijn opgesteld aan de hand van de resultaten van de referentiereeks.



Figuur 26: Een lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 7 dagen.



Figuur 27: Een polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.



Figuur 28: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke buigspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.

Aan de hand van de determinatiecoëfficiënt van de verschillende geteste verbanden wordt het verband gekozen met de hoogste waarde van de determinatiecoëfficiënt. De verbanden zijn getest voor de hoeveelheid aanwezig cement en de karakteristieke buigspanning op een ouderdom van 28 dagen. De determinatiecoëfficiënt voor het lineair verband bedraagt 0,9581 en wordt weergegeven in figuur 26. De determinatiecoëfficiënt van het tweedegraads polynoom verband is 0,9581 zoals te zien in figuur 27. Daarnaast kan uit figuur 28 afgeleid worden dat voor het machtsverband de determinatiecoëfficiënt 0,9504 bedraagt. Aan de hand van de coëfficiënten wordt geopteerd voor derdegraads verband. Het derdegraads verband wordt weergegeven in formule 7.

$$y = 0,047 * x^2 + 8,1686 * x \quad (7)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

Met behulp van de gekende hoeveelheid aanwezig cement kan via formule 7 de karakteristieke drukspanning op een ouderdom van 28 dagen berekend worden. Doordat de karakteristieke buigspanningen gekend zijn en niet de hoeveelheid aanwezig cement wordt formule 7 omgevormd. Door het omvormen van formule 7 wordt formule 8 bekomen, met deze formule kan de hoeveelheid cement aanwezig berekend worden.

$$x = 4,61266 * (\sqrt{y + 354,926} - 18,8395) \quad (8)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

De hoeveelheid aanwezig cement (%) in het mengsel wordt weergegeven in de derde kolom van tabel 3. Deze resultaten zijn bekomen door de karakteristieke buigsterkte in te vullen in formule 8. De resultaten van de vierde kolom zijn verkregen door de berekende hoeveelheid aanwezig cement te verminderen met de gekende hoeveelheid aanwezig cement.

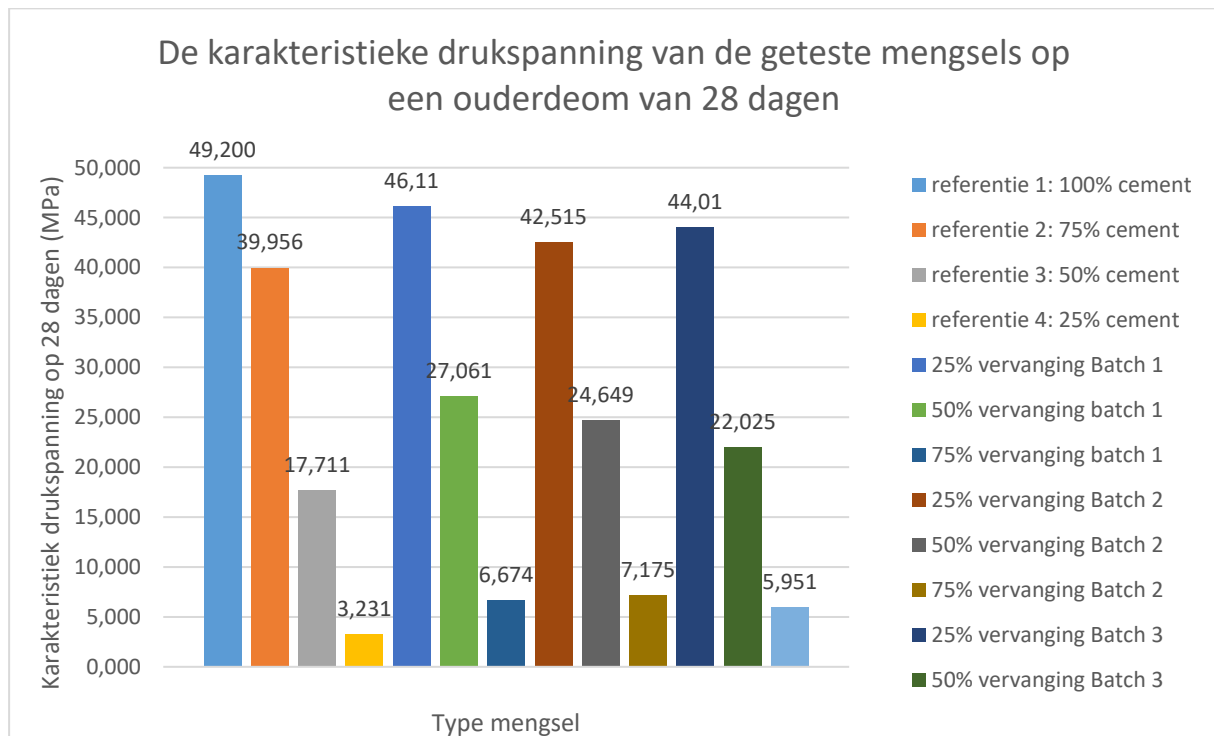
Tabel 3: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke buigspanning op 28 dagen.

Type mengsel	Karakteristieke buigspanning (MPa)	Hoeveelheid aanwezig cement (%)	Gekende hoeveelheid cement (%)	Hoeveelheid aanwezig cement in fijnstof (%)
75% cement en 25% batch 1	8,778	106,795	75	31,795
50% cement en 50% batch 1	8,038	97,841	50	47,841
25% cement en 75% batch 1	2,393	29,237	25	4,237
75% cement en 25% batch 2	8,740	106,335	75	31,335
50% cement en 50% batch 2	7,649	93,131	50	43,131
25% cement en 75% batch 2	3,018	36,859	25	11,859
75% cement en 25% batch 3	9,813	119,302	75	44,302
50% cement en 50% batch 3	7,069	86,103	50	36,103
25% cement en 75% batch 3	2,164	26,442	25	1,442

Uit tabel 3 kunnen enkele bevindingen geconstateerd worden. Naarmate het vervangingspercentage van het cement toeneemt, neemt het percentage van ongehydrateerd cement dat actief meewerkt om de druksterkte te vergroten eerst toe en daarna af. Dit geldt enkel voor batch 1 en 2. Batch 3 kent een ander verloop. Bij batch 1 neemt het percentage van de actief meewerkend cement in het fijnstof eerst toe van 31,795 % tot 47,841 % voor een vervangingspercentage van 25 % tot 50 %. Vervolgens neemt het actief meewerkend percentage af van 47,841 % tot 4,237 % bij een vervanging van 75 % van het cement. Het actief meewerkend percentage cement stijgt bij een vervanging van 25 % tot 50 % met batch 2 respectievelijk van 31,335 % tot 43,131 % . Bij een verdere toenemende vervanging van 50 % tot 75 % van batch 2 daalt het actief meewerkend cement

in het fijnstof van 43,131 % tot 11,859 % . Een vervanging van het cement met batch 3 zorgt ervoor dat het actief meewerkend percentage cement afneemt van 44,302 % tot 1,442 %.

Om tot figuur 29 te komen worden de nodige gegevens uit Bijlage H, Bijlage I, Bijlage J en Bijlage K gehaald. Uit de grafiek kunnen enkele conclusies getrokken worden. De eerste conclusie is dat de mengsels met een vervanging van 25 % de karakteristieke drukspanning niet overschrijden. Het mengsel met 25 % batch 1 heeft een karakteristieke drukspanning van 46,110 MPa, deze waarde is 6,3 % lager dan referentie 1's karakteristieke drukspanning. Bij het mengsel met 25 % batch 2 is de karakteristieke drukspanning 13,6 % lager dan de referentie 1 en voor het mengsel met batch 3 10,5 % lager.

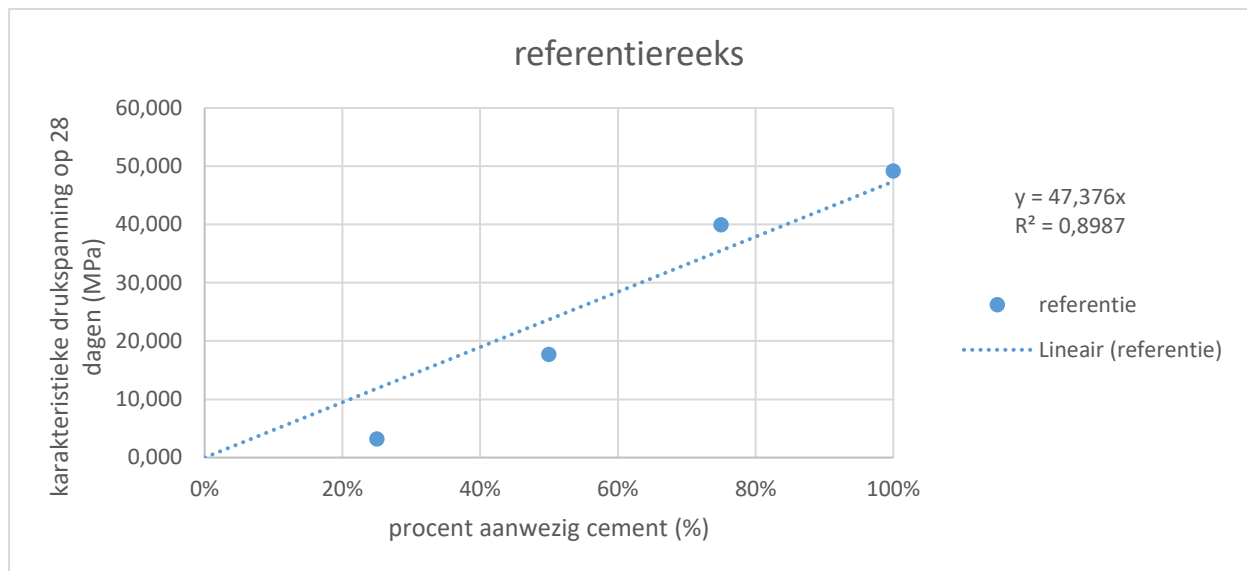


Figuur 29: De vergelijking tussen de resultaten van de drukspanning op een ouderdom van 28 dagen.

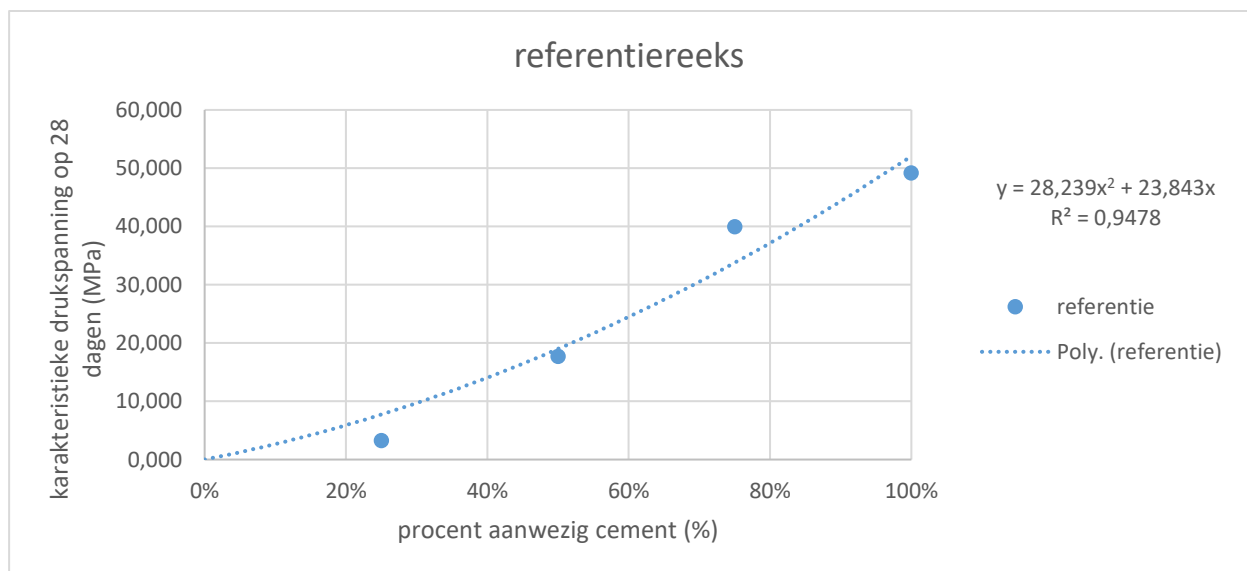
Ten opzichte van referentie 2 behalen de mengsels met 25 % vervanging een karakteristieke drukspanning die groter is. Voor het mengsel met batch 1 is deze waarde 15,4 % groter, voor batch 2 is de drukspanning 6,4 % groter en voor het mengsel met batch 3 is de karakteristieke drukspanning 10,1 % groter. De mengsels met een vervanging van 50 % cement bereiken een grotere karakteristieke drukspanning dan referentie 3. Het mengsel met 50 % batch1 behaalt een karakteristieke drukspanning die 52,8 % hoger is dan de karakteristieke drukspanning van referentie 3, die 17,711 MPa bedraagt. Het mengsel met 50 % batch 2 behaalt een drukspanning die 39,2 % hoger is dan referentie 3. De karakteristieke drukspanning van het mengsel met 50 % batch 3 is 24,4 % hoger dan referentie 3. De karakteristieke drukspanning van referentie 4 bedraagt 3,231 MPa en wordt overschreden door de karakteristieke drukspanningen van de mengsels met een vervanging van 75 %. De karakteristieke drukspanning van het mengsel met 75 % batch 1 behaalt een waarde voor de drukspanning die 106,6 % hoger is dan referentie 4's drukspanning. Voor

batch 2 is de waarde 122,1 % groter dan de drukspanning van referentie 4 en voor batch 3 bedraagt de toename 84,2 %.

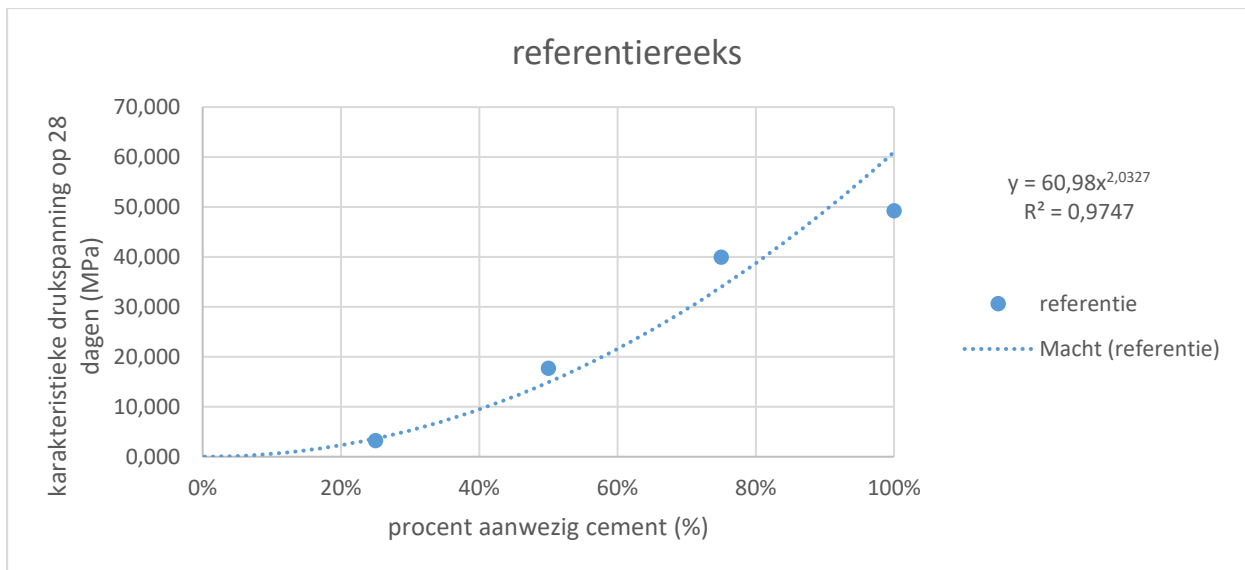
Dankzij de gekende hoeveelheid aanwezig cement en de karakteristieke drukspanning van de referentiereeks kan men de mogelijke verbanden tussen de hoeveelheid aanwezig cement en de karakteristieke drukspanning bekijken. Met behulp van figuur 30, figuur 31 en figuur 32 worden de verschillende mogelijke verbanden op een ouderdom van 28 dagen met elkaar vergeleken.



Figuur 30: Een lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.



Figuur 31: Een polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.



Figuur 32: Een machtsverband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (%) en de karakteristieke drukspanning (MPa) op een ouderdom van 28 dagen.

Dit gebeurt op basis van de determinatiecoëfficiënt van elk verband. Het lineair verband tussen de 2 grootheden heeft een determinatiecoëfficiënt van 0,8987. De determinatiecoëfficiënt bij het polynoom verband bedraagt 0,9478 en voor het machtsverband 0,9747. Het verband met de grootste determinatiecoëfficiënt benadert de resultaten het best. Voor het verband tussen de hoeveelheid cement aanwezig en de karakteristieke drukspanningen wordt geopteerd voor het machtsverband. Het verband is in formulevorm:

$$y = 60,9800 * x^{2,0327} \quad (9)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

Aan de hand van formule 9 kan met behulp van de gekende hoeveelheid aanwezig cement de karakteristieke drukspanning op een ouderdom van 28 dagen berekend worden. Voor de verkregen resultaten met een vervanging van cement met de te testen batches zijn de karakteristieke drukspanningen gekend, maar de hoeveelheid cement niet. Door formule 9 om te vormen tot formule 10, kan de hoeveelheid cement berekend worden.

$$x = \sqrt[2.1493]{\frac{y}{33,522}} \quad (10)$$

met

y is de karakteristieke drukspanning

x is de hoeveelheid aanwezig cement in %

De hoeveelheid aanwezig cement (%) in het mengsel wordt weergegeven in de derde kolom van tabel 4. Deze resultaten zijn bekomen door de karakteristieke druksterkte in te vullen in formule 10. De resultaten van de vierde kolom zijn bekomen door de berekende hoeveelheid aanwezig cement te verminderen met de gekende hoeveelheid aanwezig cement.

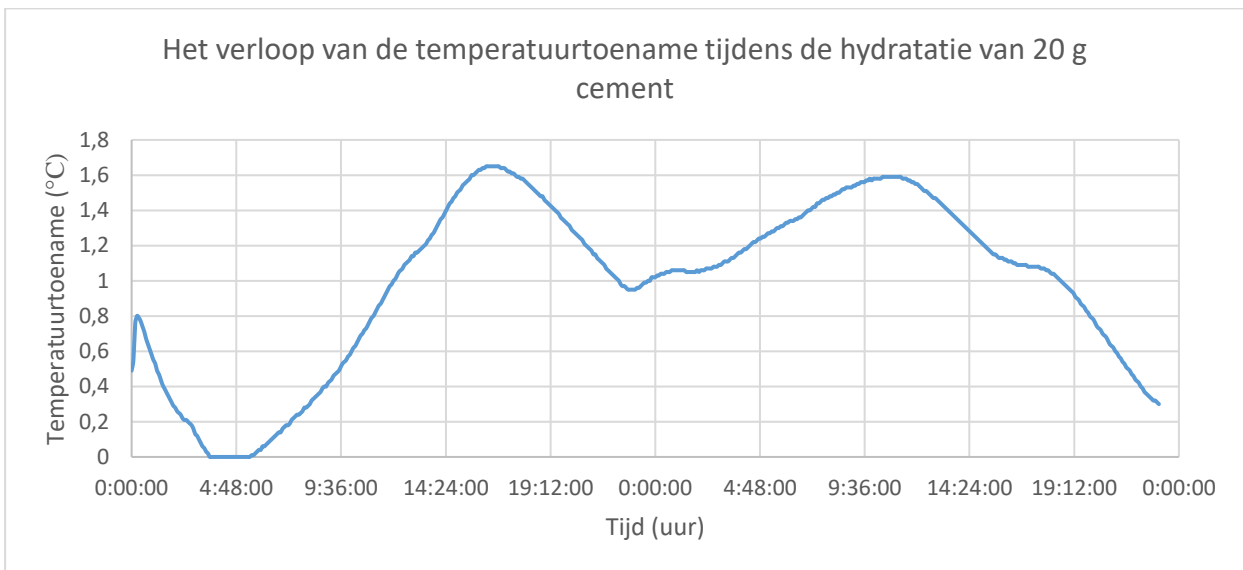
Tabel 4: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat actief heeft meegewerkt volgens de karakteristieke drukspanning op 28 dagen.

Type mengsel	Karakteristieke drukspanning (MPa)	Hoeveelheid aanwezig cement (%)	Gekende hoeveelheid cement (%)	Hoeveelheid aanwezig cement in fijnstof (%)
75% cement en 25% batch 1	46,110	87,153	75	12,153
50% cement en 50% batch 1	27,061	67,053	50	17,053
25% cement en 75% batch 1	6,674	33,677	25	8,677
75% cement en 25% batch 2	42,515	83,741	75	8,741
50% cement en 50% batch 2	24,649	64,043	50	14,043
25% cement en 75% batch 2	7,175	34,897	25	9,897
75% cement en 25% batch 3	44,010	85,177	75	10,177
50% cement en 50% batch 3	22,025	60,593	50	10,593
25% cement en 75% batch 3	5,951	31,830	25	6,830

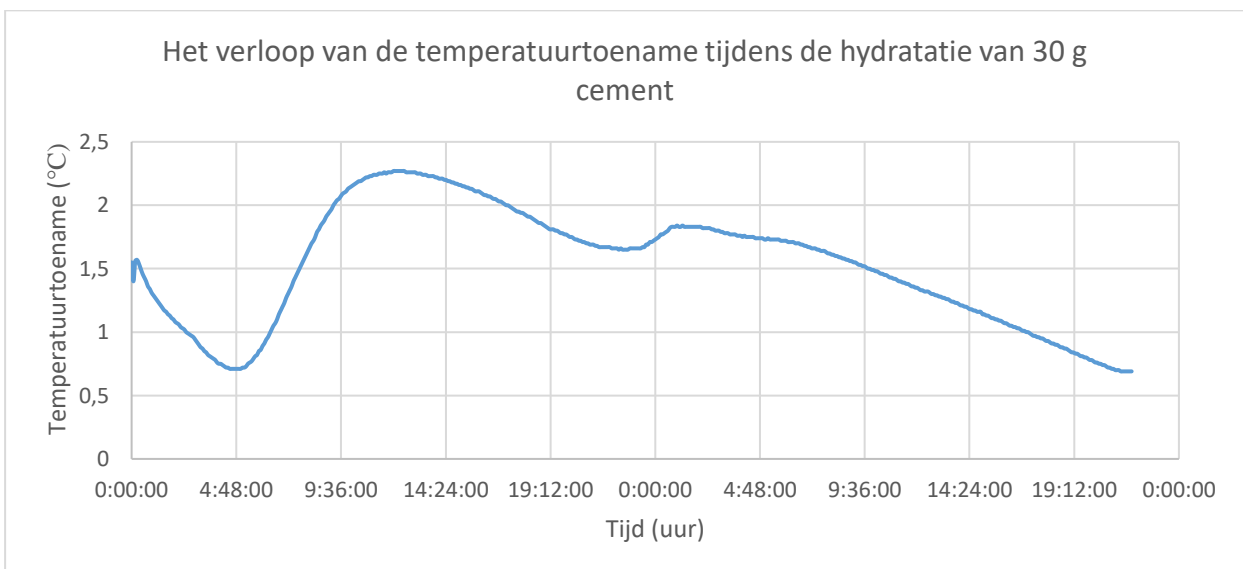
Uit tabel 4 kunnen enkele bevindingen geconstateerd worden. Wanneer het vervangingspercentage van het cement toeneemt, neemt het percentage van ongehydrateerd cement dat actief meewerkt om de druksterkte te vergroten eerst toe en dan af. Bij batch 1 neemt het percentage van het actief meewerkend cement in het fijnstof eerst toe van 12,153 % tot 17,053 % en neemt vervolgens af tot 8,677 %. Het actief meewerkend percentage cement stijgt van 8,741 % tot 14,043 % bij een vervanging van 25 % tot 50 % met batch 2. Een toenemende vervanging van batch 2 tot 75 % leidt tot een afname in het percentage actief meewerkend cement. Deze daalt van 14,043 % tot 9,897 %. Bij een toenemende vervanging van 25 % tot 50 % van batch 3 stijgt het actief meewerkend cement in het fijnstof van 10,177 % tot 10,593 % . Bij een verdere verhoging van het vervangingspercentage van 50 % naar 75 % , neemt het actief meewerkend percentage cement af van 10,593 % tot 6,830 %.

3.2 Hydratatiewarmte

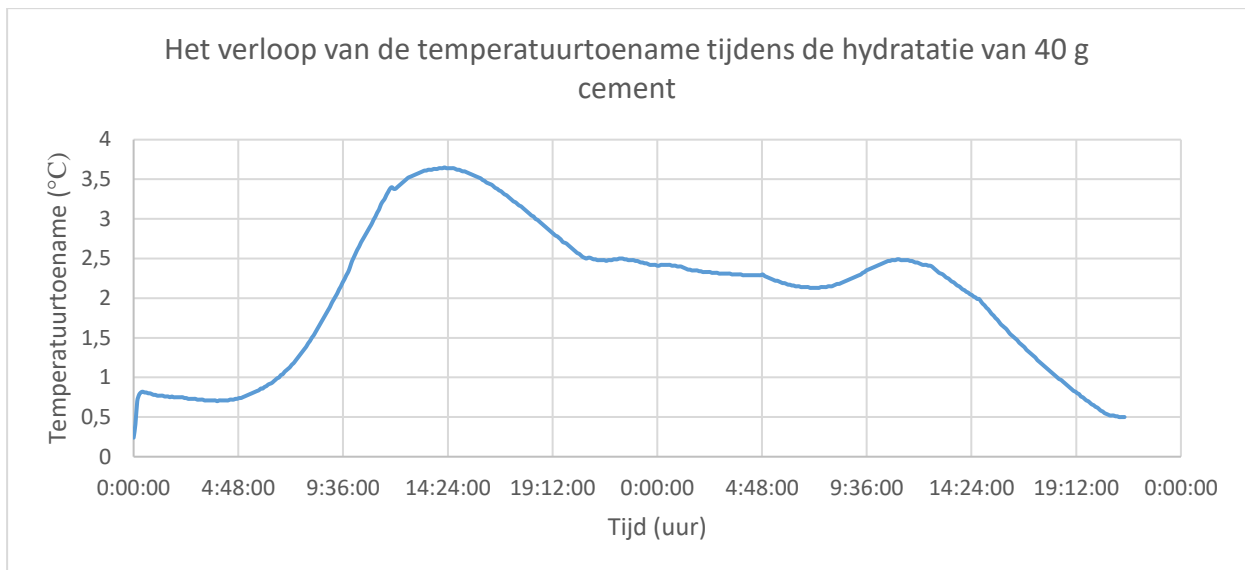
Voor de bepaling van de vrijgekomen hydratatiewarmte van de te onderzoeken batches, is eerst een referentiereeks opgesteld. Deze reeks bestaat uit de bepaling van de hydratatiewarmte van 20g, 30g, 40g en 50g cement. Het verloop van de temperatuurtoename voor deze reeks wordt weergegeven in figuur 33 tot en met figuur 36. Vervolgens zijn de batches getest. Dit gebeurde in de aanwezigheid van 20g cement en 30 g van de desbetreffende batch. Het verloop van de temperatuurtoename wordt weergegeven in figuur 37 tot en met figuur 39.



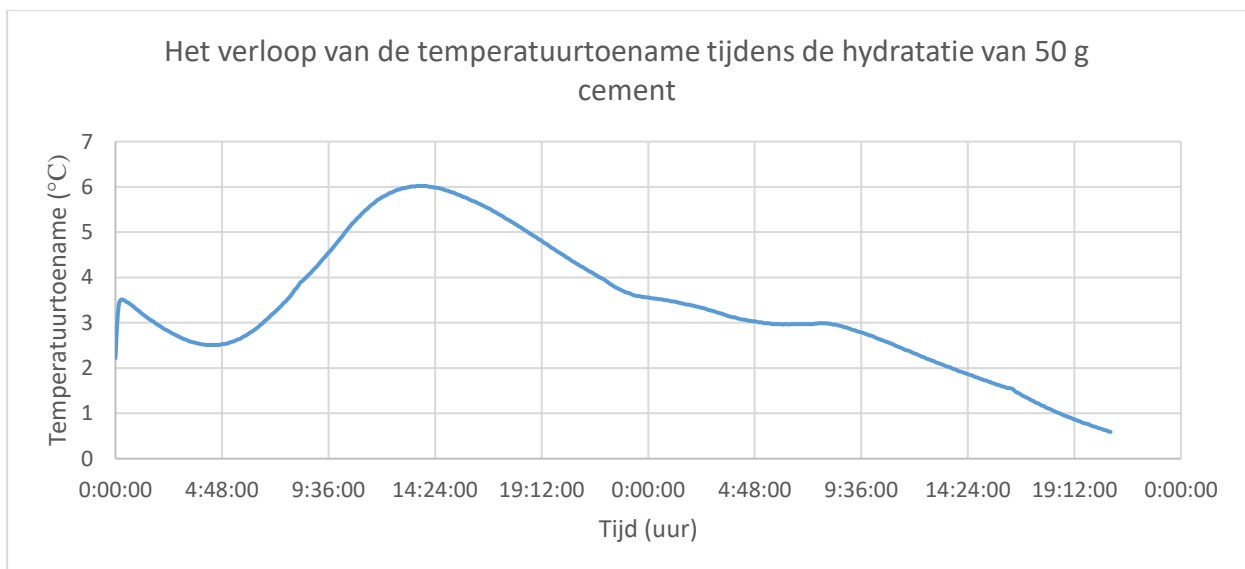
Figuur 33: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 20g cement met een maximale toename van 1,65 °C.



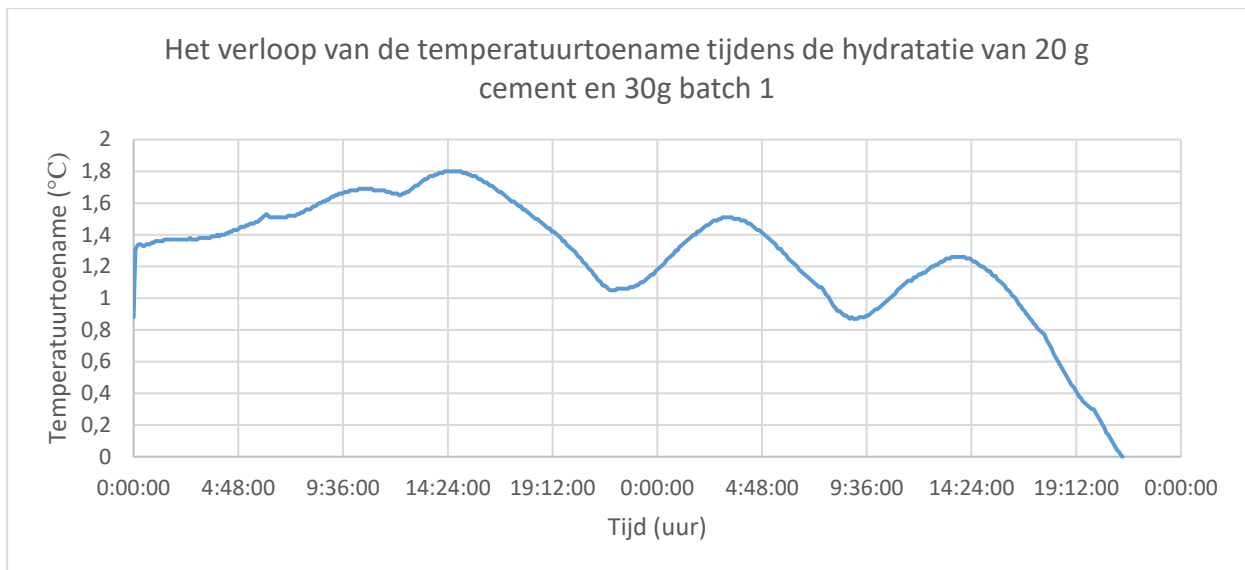
Figuur 34: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 30g cement met een maximale toename van 2,27 °C.



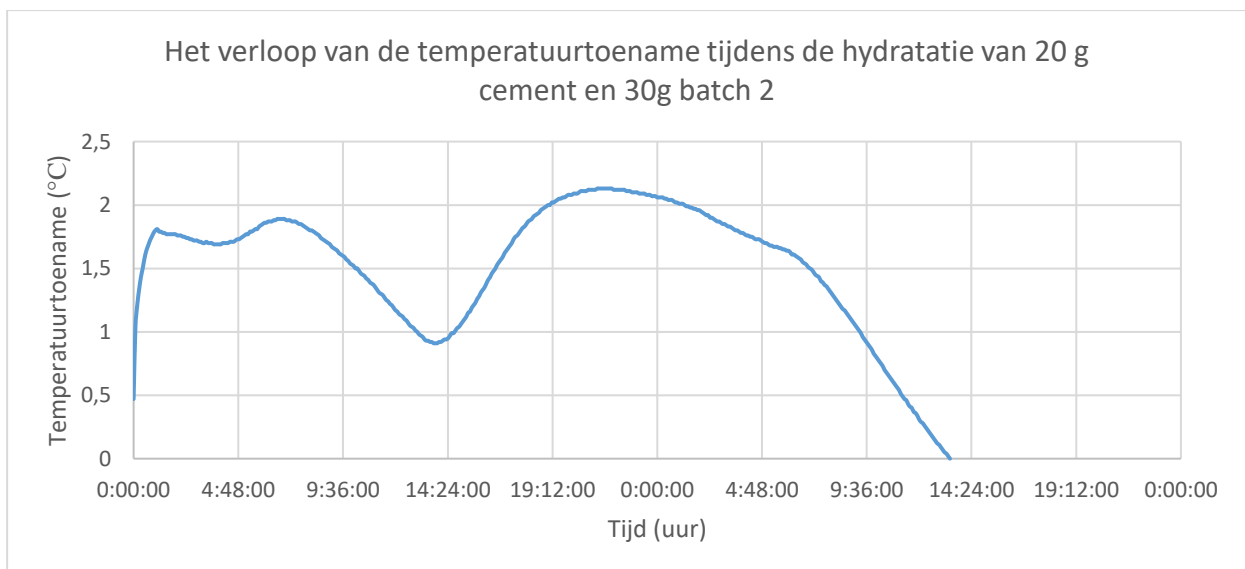
Figuur 35: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 40g cement met een maximale toename van 3.65 °C.



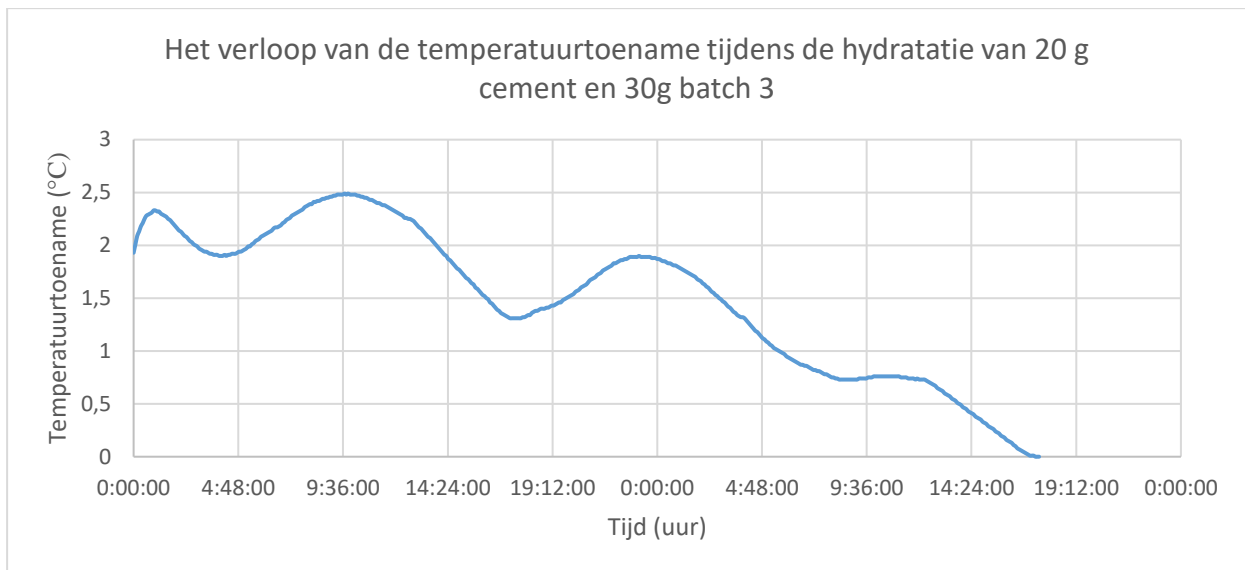
Figuur 36: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 20°C voor 50g cement met een maximale toename van 6,02 °C.



Figuur 37: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 22°C voor 20g cement en 30g batch 1 met een maximale toename van 1,80 °C.

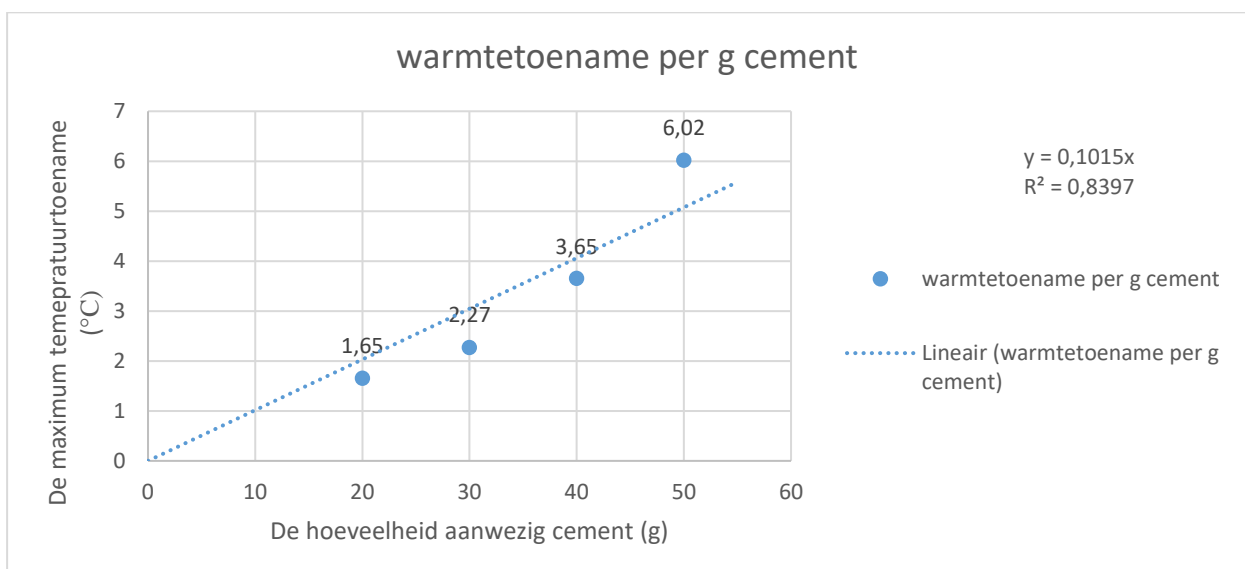


Figuur 38: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 22°C voor 20g cement en 30g batch 2 met een maximale toename van 2,13 °C.

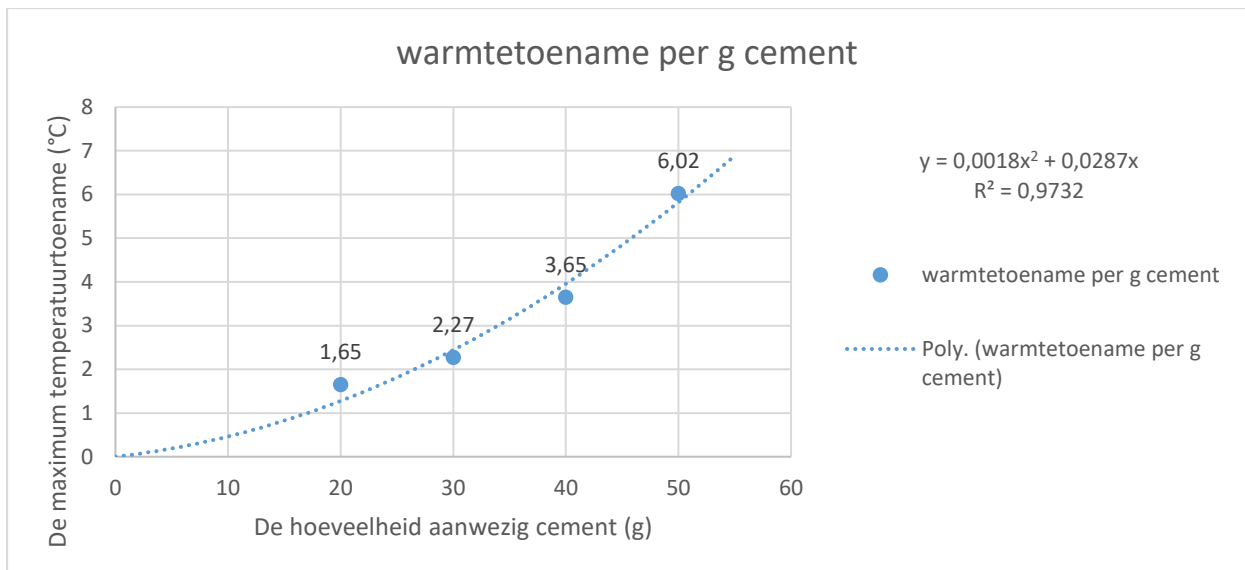


Figuur 39: Het verloop van het temperatuurtoename ten opzichte van een referentietemperatuur van 22°C voor 20g cement en 30g batch 3 met een maximale toename van 2,49°C.

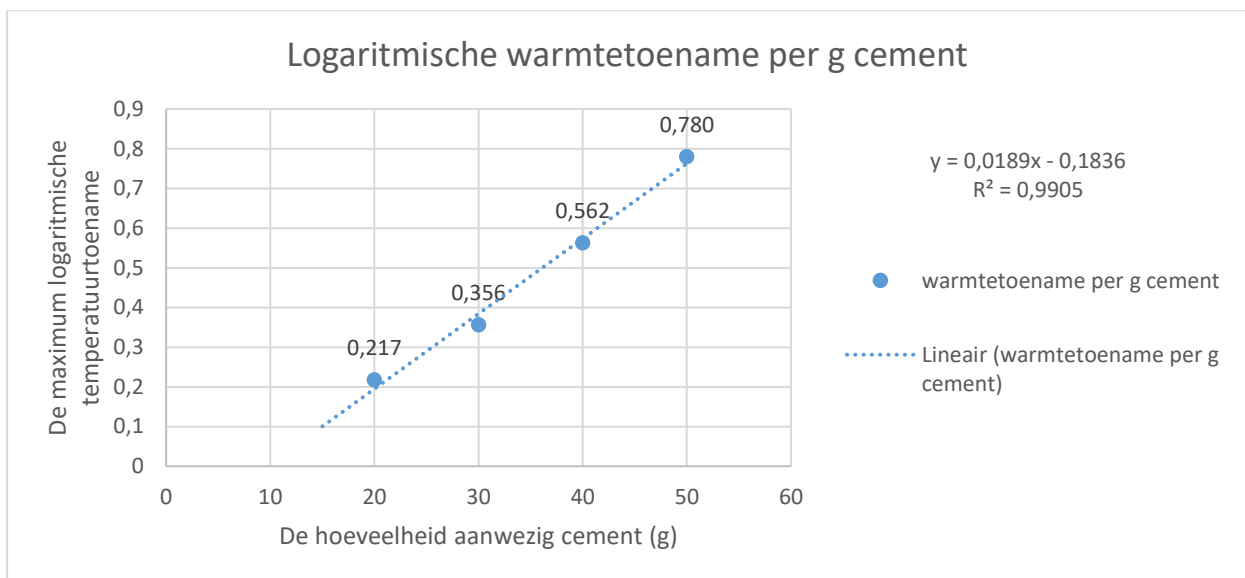
Met behulp van figuur 33 tot en met figuur 39 zijn figuur 40 tot en met figuur 43 opgesteld. Hiervoor is de maximum temperatuurtoename per geteste hoeveelheid cement (20g, 30g, 40g en 50g) gebruikt. Figuur 40 en figuur 41 zijn grafieken die op de x-as de hoeveelheid aanwezig cement in gram en op de y-as de temperatuurtoename in graden Celsius weergeven. Aan de hand van deze figuren zijn vier mogelijke verbanden getoetst. Deze geven de relatie tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en de maximum temperatuurtoename of de maximum logaritmische temperatuurtoename weer. De getoetste verbanden zijn het lineair en het tweedegraads polynoom verband.



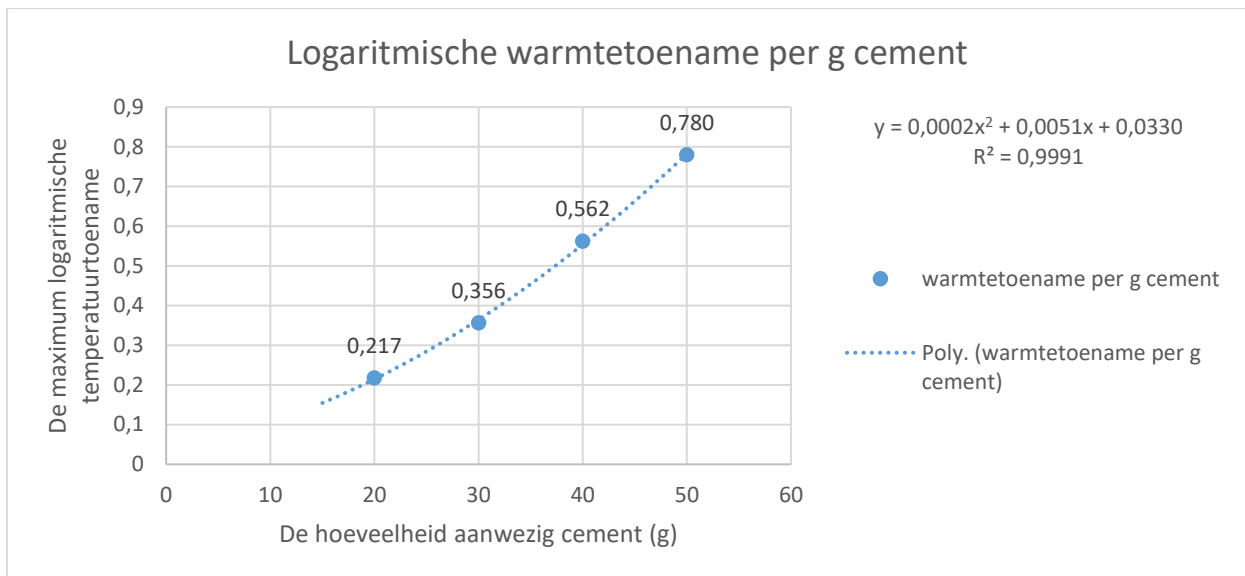
Figuur 40: Het lineair verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het maximum geproduceerde temperatuurverschil (°C).



Figuur 41: Het tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het maximum geproduceerde temperatuurverschil (°C).



Figuur 42: Het lineaire verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het logaritmisch maximum geproduceerde temperatuuroename.



Figuur 43: Het tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het logaritmische maximum geproduceerde temperatuurtoename.

Figuur 40 geeft het lineaire verband weer tussen deze twee grootheden. Het tweedegraads polynoom verband tussen de twee grootheden wordt weergegeven door figuur 41. Het lineair en tweedegraads polynoom verband tussen de hoeveelheid aanwezig cement (g) en het maximum logaritmische temperatuurtoename worden weergegeven in respectievelijk figuur 42 en figuur 43. Voor elk verband is de trendlijn weergegeven met de bijhorende vergelijking en determinatiecoëfficiënt. Op basis van de determinatiecoëfficiënt wordt het meest passende verband gekozen. Voor het lineaire verband is de determinatiecoëfficiënt 0,9397 en voor het tweedegraads polynoom verband 0,9732. Voor de verbanden met de logaritmische temperatuurtoename bedraagt de determinatiecoëfficiënt voor lineair 0,9905 en voor het tweedegraads polynoom verband 0,9991. Op basis van deze 4 getallen is geopteerd voor het tweedegraads polynoom verband met het logaritmische temperatuurtoename. Het verband wordt beschreven door formule 11.

$$y = 0,0002 * x^2 + 0,0051 * x + 0,0330 \quad (11)$$

met

y is de maximum logaritmische temperatuurtoename ($^{\circ}\text{C}$)

x is de hoeveelheid aanwezig cement (g)

Aan de hand van formule 11 en de gekende hoeveelheid aanwezig cement kan het maximum geproduceerde temperatuurverschil tijdens de hydratatie berekend worden. Doordat het maximum geproduceerde temperatuurverschil gekend is voor de geteste stalen en niet de hoeveelheid aanwezig cement, moet formule 11 omgevormd worden naar formule 12. Dankzij deze formule kan de hoeveelheid aanwezig cement berekend worden.

$$x = 70,7107 * (\sqrt{y - 0,000488} - 0,180312) \quad (12)$$

met

y is de maximum logaritmische temperatuurtoename (°C)

x is de hoeveelheid aanwezig cement (g)

In de tweede kolom van tabel 5 wordt de maximum logaritmische temperatuurtoename weergegeven. Deze wordt berekend door het logaritme te nemen van de maximum temperatuurtoename De hoeveelheid aanwezig cement (g) in het mengsel wordt weergegeven in de derde kolom van dezelfde tabel. Deze resultaten zijn bekomen door het maximum logaritmische temperatuurtoename in te vullen in formule 12. De resultaten, die zijn weergegeven in de vijfde kolom, zijn verkregen door de berekende hoeveelheid aanwezig cement (g) te verminderen met de gekende hoeveelheid aanwezig cement (g). De resultaten in de zesde kolom zijn berekend door de hoeveelheid aanwezig cement in het fijnstof te delen door de totale massa van het fijnstof.

Tabel 5: De berekende hoeveelheid cement in het fijnstof dat is gehydrateerd volgens de maximum geproduceerd temperatuurverschil.

Type mengsel	Maximum logaritmische temperatuurtoename	Hoeveelheid aanwezig cement (g)	Gekende hoeveelheid aanwezig cement (g)	Hoeveelheid aanwezig cement fijnstof (g)	Hoeveelheid aanwezig cement fijnstof (%)
20g cement + 30g batch 1	0,2553	22,94	20,00	2,94	9,80
20g cement + 30g batch 2	0,3284	27,74	20,00	7,74	25,80
20g cement + 30g batch 3	0,3962	31,73	20,00	11,73	39,10

Uit tabel 5 kunnen enkele conclusies getrokken worden. Bij 20g cement met 30g batch 1 bedraagt de maximum temperatuurtoename 1,80 °C. De maximum logaritmische temperatuurtoename bedraagt 0,2553. Volgens het gekozen verband komt dit overeen met 2,94g ongehydrateerd cement. Het mengsel met 20g cement en 30g batch 2 produceert een maximaal temperatuurverschil van 2,13 °C. De overeenkomstige logaritmische temperatuurtoename is 0,3284. Wat overeenkomt met een totale hoeveelheid cement van 27,74 g. Voor het mengsel met 20g cement en 30g batch 3 bedraagt de maximum temperatuurtoename 2,49°C. Hieruit volgt dat de waarde van de logaritmische temperatuurtoename 0,3962 bedraagt. Dit komt overeen met 31,73g cement. Doordat 20g cement reeds toegevoegd is, bevat het fijnstof van de batches respectievelijk 2,94g; 7,74g en 11,73g ongehydrateerd cement. Dit komt overeen met het feit dat batch 1 9,80 % ongehydrateerd cement bevat. Het gehalte aan ongehydrateerd cement bedraagt 25,80 % voor batch 2. Het fijnstof van batch 3 bestaat uit 39,10 % ongehydrateerd cement.

Dit verschil in de hoeveelheid ongehydrateerd cement dat aanwezig is in de batches is verklaarbaar door de herkomst van de betongranulaten. Aan de hand van het berekende gehalte ongehydrateerd cement kan via formule 1 uit de literatuurstudie de water-cementfactor berekend worden. Voor een gehalte van 9,80 % komt dit neer op een water-cementfactor van 1,33. Dit is een onlogische waarde voor de water-cementfactor. Deze waarde kan verklaard worden op 2 manieren. Het is mogelijk dat een verkeerde referentiecement is gebruikt om de referentiereeks op te stellen. De tweede reden is het feit dat deze betongranulaten al meer dan 1 jaar geleden gebroken zijn en door het gestockeerd te liggen enkel onder een afdak, kunnen deze betongranulaten vocht uit de lucht opgenomen hebben. Daardoor is het ongehydrateerd cement beginnen te hydrateren. Waardoor het gehalte aan ongehydrateerd cement daalt.

Batch 3 bestaat uit betongranulaten die afkomstig zijn van wegenisbeton. Bij het aanleggen van wegen worden water-cementfactoren gebruikt die kleiner zijn dan 0,50. Volgens de theorie is dan de minimum percentage ongehydrateerd cement 25,28 %. Volgens de test bevat batch 3 39,10 % ongehydrateerd cement, dit komt erop neer dat het oud beton een water-cementfactor had van 0,27. Dit is uiterst laag waardoor het verkeerde referentiecement is gebruikt voor de referentiereeks. Een cement dat meer warmte vrijgeeft tijdens de hydratatie was geschikter geweest, namelijk hetzelfde cement als de betongranulaten bevatten. Batch 2 is een samenstelling van verschillende soorten beton, namelijk wegenisbeton, restbeton en buitenverhardingen. Doordat deze betonsoorten over een water-cementfactor bezitten die lager is dan 0,5, komt dit overeen met een minimum gehalte van 25,28 % aan ongehydrateerd cement. Doordat batch 2 een gehalte heeft van 25,80 % komt dit overeen met een water-cementfactor van 0,48.

3.3 Correlatie tussen de 2 onderzoeksmethodes

Een verband tussen de twee onderzoeksmethodes is er niet. Hiervoor zijn meerdere redenen. De eerste reden is dat de reactiviteit afhankelijk is van het vervangingspercentage van het cement. Dus naarmate de gekende hoeveelheid cement daalt, verandert de reactiviteit ook. De tweede reden is dat de extra sterkte niet enkel afkomstig is van ongehydrateerd cement maar mogelijk ook van het zand, gehydrateerd cement en de fillers die toegevoegd worden. Deze materialen bevinden zich in het fijnstof.

3.4 Besluit

Voor de eerste reeks testen kunnen enkele bevindingen afgeleid worden. De reactiviteit van het ongehydrateerd cement is afhankelijk van het vervangingspercentage van het cement. Uit de tweede reeks testen is af te leiden dat de betongranulaten wel daadwerkelijk nog ongehydrateerd cement bevatten. Er is geen correlatie tussen de twee onderzoeksmethodes. In het volgende hoofdstuk wordt het besluit uitgebreid besproken en worden er aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek.

4 Besluit

Aan de hand van de resultaten uit de eerste reeks van testen zijn enkele besluiten getrokken. De reactiviteit van het ongehydrateerd cement is afhankelijk van het vervangingspercentage van het cement. Zo is de reactiviteit van het ongehydrateerd cement bij de buigsterkte op 7 dagen het grootst bij een vervanging van 25 %. Deze daalt verder naarmate het vervangingspercentage stijgt. Dit geldt voor batch 1, 2 en 3. Bij de druksterkte op een ouderdom van 7 dagen geldt dat voor batch 1 en 3 de reactiviteit het grootst is bij een vervanging van 25 % en daalt naarmate de vervanging stijgt. Voor batch 2 is de reactiviteit het grootst bij een vervanging van 50 %. Voor de buigsterkte op 28 dagen is de reactiviteit het grootst bij 50 % vervanging met batch 1 en 2. Voor batch 3 is de reactiviteit het grootste bij een vervanging van 25 %. Voor batch 1 tot en met 3 heeft een vervanging van 50 % de grootste reactiviteit bij de druksterkte op 28 dagen.

Uit de resultaten van de tweede reeks testen kunnen enkele besluiten getrokken worden. Het eerste besluit is dat nog daadwerkelijk ongehydrateerd cement aanwezig is in betongranulaten. Een volgend besluit is dat de hoeveelheid ongehydrateerd cement verschilt van de herkomst. Zo bevat batch 1 (prefab) een gehalte aan ongehydrateerd cement dat 9,80 % bedraagt. Het gehalte aan ongehydrateerd cement van batch 2 (mengeling) is 25,80 % en voor batch 3 (wegenis) bedraagt het gehalte aan ongehydrateerd cement 39,10 %. De referentiereeks is opgebouwd met één type cement. Hierdoor kan het zijn dat de verkeerde referentiecement is gebruikt per onderzochte batch. Het is dus aangeraden dat de referentiereeks is opgebouwd met hetzelfde cement dat de betongranulaten ook bevatten om een optimaal resultaat te bekomen.

Deze resultaten werden bekomen onder invloed van een aantal factoren waar geen controle over was. Ten eerste was er een mogelijke invloed van de wisselende vochtigheid op de betongranulaten. Doordat deze enkel onder een afdak gestockeerd waren zonder bescherming zou dit de hoeveelheid ongehydrateerd cement kunnen verminderen. Deze impact kan beperkt worden wanneer de betongranulaten opgeslagen worden in een omgeving met een constante vochtigheid. Doordat het fijnstof een samenstelling is van granulaten, namelijk zand, gehydrateerd cement, fillers en mogelijk ongehydrateerd cement was voor de eerste onderzoeksmethode de invloed van deze andere granulaten niet bekend. Daarnaast was er geen controle over de kamertemperatuur tijdens de onderzoeken naar de hydratatie-eigenschappen. Dit kan vermeden worden door de proeven uit te voeren onder een constante temperatuur.

Aan de hand van de verkregen resultaten uit beide onderzoeksmethodes is het duidelijk dat grootschalig onderzoek moet worden uitgevoerd om de reactiviteit van ongehydrateerd cement in betongranulaten beter te begrijpen en in rekening te brengen. Uit de tweede reeks testen blijkt dat een diepgaander onderzoek nodig is om de hoeveelheid ongehydrateerd cement exact te bepalen aan de hand van fijnstof. Zo moet een referentiereeks gemaakt worden van verschillende soorten cement, omdat de warmteafgifte per type cement verschilt. Verder is het belangrijk om onderzoek te doen naar de invloed van betongranulaten op vers beton. Zo is het noodzakelijk om de invloed van de grove betongranulaten te kennen op de sterkte-eigenschappen en de duurzaamheid van het beton.

5 Literatuurlijst

- [1] IWT, „Hoogwaardig betongranulaat voor duurzame wegenbouw,” IWT, 2015.
- [2] X. Sevenants, „De aanwezigheid ongehydrateerd cement in betongranulaat,” PXL, 2015.
- [3] AWW, „Standaardbestek 250 versie 3.1,” Brussel, 2015.
- [4] S. Raf, „Voorspellen van de vroege sterkte van beton aan de hand van de hydratatie warmte van cement,” U Hasselt.
- [5] Emis, „Emis energie- en milieu-informatiesysteem voor het vlaamse gewest,” Vlaams gewest, 2015. [Online]. Available: <https://emis.vito.be/nl>. [Geopend November 2016].
- [6] „Granulaatbeton,” 2016. [Online]. Available: <http://www.granulaatbeton.nl>. [Geopend November 2016].
- [7] Certipro, „Certipro certificaat HGB 8-20mm,” Certipro, 2016.
- [8] J. Denutte, „Certificatie hoogwaardige gerecycleerde granulaten,” Copro, 2015.
- [9] NBN EN 126200:2008, Aggregates for concrete.
- [10] L. Boehme, A. V. Gysel, J. Vrijders, M. Joseph en J. Claes, „ValReCon 20,” ACCO, Leuven, 2012.
- [11] D. Pedro, J. de Brito en L. Evangelista, „Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete,” *Construction and Building Materials*, pp. 141-151, 2014.
- [12] S. W. Tabsh en A. S. Abdelfatah, „Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete,” *Construction and Building Materials*, pp. 1163-1167, 2009.
- [13] K. Rahal, „Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate,” *Building and Environment*, pp. 407-415, 2007.
- [14] S. Omary, E. Ghorbel en G. Wardeh, „Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concrete properties,” *Construction and Building Materials*, pp. 163-174, 2016.
- [15] J. de Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares en M. Guerreiro, „Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete,” *Journal of Building Engineering*, pp. 1-16, 2016.

- [16] S. Ismail en M. Ramli, „Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, pp. 726-739, 2014.
- [17] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam en M. Z. Sulieman, „Influence of the amount of coarse aggregate in concrete design and durability prperties,” *Construction and Building Materials*, pp. 565-573, 2012.
- [18] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí en M. Barra, „Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on prperties of recycled aggregate concrete,” *Cement ans Concrete Research*, pp. 735-742, 2007.
- [19] J. V. Puthussery, R. Kumar en A. Garg, „Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: an experimental study,” *Waste Management*, pp. 1-7, 2016.
- [20] Vertegenwoordigers van de brancheverenigingen, „Beton Lexicon,” Aeneas Media., [Online]. Available: <http://betonlexicon.nl/>. [Geopend November 2016].
- [21] D. J. Thomas en D. H. Jennings, „The science of concrete,” [Online]. Available: <http://iti.northwestern.edu/cement/>. [Geopend 23 Oktober 2016].
- [22] Belgische BetonGroepering, Betontechnologie.
- [23] NBN EN 196-1: 2015, Methods of testing cement - part1: Determination of strength, 2015.

6 Bijlagen

Bijlage A: Productfiche CEM III/A (deel 1/2)	59
Bijlage B: Productfiche CEM III/A (deel 2/2)	60
Bijlage C: Prestatiefiche van CEM III/A 42,5 N LA	61
Bijlage D: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 0 % cement	63
Bijlage E: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 25 % cement	64
Bijlage F: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 50 % cement	65
Bijlage G: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 75 % cement	66
Bijlage H: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 0 % cement	67
Bijlage I: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 25 % cement	68
Bijlage J: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 50 % cement	69
Bijlage K: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 75 % cement	70

Hoogovencement

CEM III/A



CEM III/A 32,5 N

CEM III/A 32,5 N LA

CEM III/A 42,5 N LA

CEM III/A 42,5 N

CEM III/A 52,5 N

ENCI
Technische Voorlichting
Postbus 3233
5203 DE 's-Hertogenbosch
Tel: 073 640 12 20
Fax: 073 640 12 18
tv@enci.nl
www.enci.nl

CBR Cementbedrijven
Afdeling Technische Voorlichting
Terhulpesteenweg 185
1170 Brussel
Tel: 02 678 35 10
Fax: 02 675 23 91
communication@cbr.be
www.cbr.be

Productomschrijving

Hoogovencement CEM III/A is een lichtgrijs cement dat verkregen wordt door het gezamenlijk malen van de hoofdcomponenten portlandcementklinker en gegraneleerde hoogovenslak. Door de juiste verhouding tussen de samenstellende bestanddelen wordt, in combinatie met een bepaalde maalfijnheid, een cement vervaardigd in de sterkteklasse 32,5, 42,5 of 52,5. Alle cementen worden binnen hun sterkteklasse gekenmerkt als een cement met een normale beginsterkte. Hoogovencement CEM III/A voldoet aan de eisen zoals gesteld in de Europese cementnorm EN 197-1, inclusief wijzigingsblad A1. Deze norm geeft eisen ten aanzien van de samenstelling op bestanddelen, chemische eisen, mechanische en fysische eisen.

Samenstelling

De eisen aan de samenstelling zijn uitgedrukt in procenten ten opzichte van de som van alle hoofd- en nevenbestanddelen. Dit totaal wordt nog vermeerderd met het nodige calciumsulfaat om het bindingsgedrag te regelen.

Cementsoort	Hoofdbestanddelen (in massa %)		Nevenbestanddelen (in massa %)
	Portlandcementklinker (K)	Hoogovenslak (S)	
CEM III/A	35 - 64	36 - 65	0 - 5

Mechanische en fysische eisen

De sterkteklasse van een cement bepaalt de minimale druksterkte gemeten na 28 dagen op normprisma's. Binnen zijn normsterkteklasse heeft dit cement een normale beginsterkte, aangeduid met N.

Het begin van de binding is een maat voor het opstijfgedrag van een cementpasta. Aan de eis van vormhoudendheid moet worden voldaan om aan te tonen dat een cementpasta niet gevoelig is voor expansie.

Sterkteklasse	Druksterkte in MPa				Begin van de binding (min.)	Vormhoudendheid (mm)
	Beginsterkte		Normsterkte			
	3 dagen	7 dagen	28 dagen			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	-
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 42,5	-	≥ 45	-

Speciale eigenschappen

Cement dat voldoet aan de in EN 197-1 gestelde eisen is voorzien van een CE-markering. Daarnaast kan cement gecertificeerd worden op een aantal andere specifieke eigenschappen. Deze eigenschappen komen tot uiting in de naamgeving van het cement. De naamgeving is



Bijlage B: Productfiche CEM III/A (deel 2/2)

afhankelijk van de norm op basis waarvan de speciale eigenschap is gecertificeerd. CBR en ENCI brengen de volgende typen hoogoven-cement CEM III/A op de markt:

- CEM III/A 32,5 N;
- CEM III/A 32,5 N LA;
- CEM III/A 42,5 N LA;
- CEM III/A 42,5 N;
- CEM III/A 52,5 N.

Hoogoven-cement CEM III/A is leverbaar met de volgende certificaten :

Type cement	Certificaat		
	CE	KOMO	BEVOR
	EN 197-1	NBN 3090	PTV 602
CEM III/A 32,5 N	*	*	
CEM III/A 32,5 N LA	*		*
CEM III/A 42,5 N LA	*		*
CEM III/A 42,5 N	*	*	
CEM III/A 52,5 N	*	*	



Aanvullende informatie

De in dit productblad gegeven informatie is zeer algemeen en bevat de minimale eisen waaraan het cement volgens de relevante normen moet voldoen. CBR en ENCI produceren de in dit productblad beschreven cementen op verschillende locaties. Op aanvraag zijn er, per cementtype en per fabriek, aanvullende informatiebladen beschikbaar bij de vermelde adressen.

Betekenis van de naamgeving:

Naamgeving	Betekenis	Eis	Norm
LA	Begrensd alkaligehalte	Gehalte aan alkaliën uitgedrukt als $\text{Na}_2\text{O-eq} \leq 0,90$ (in massa %)	NBN B 12 - 109

Toepassingsgebied

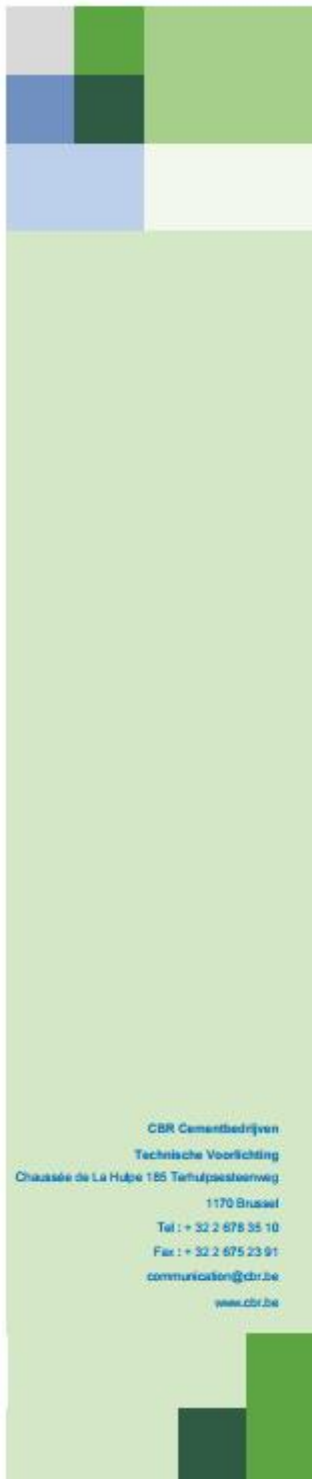
CEM III/A in de sterkteklasse 32,5 N is aangewezen in die toepassingen waarin geen hoge aanvangsterkte en geen snelle ontkisting vereist is. Door het toevoeren van warmte kan de aanvangsterkte worden verhoogd. Dit cement wordt sterk gewaardeerd voor massabeton, schraal beton en gestabiliseerd zand. Door het begrensd alkaligehalte (LA), is dit cement geschikt voor gebruik met alle traditionele granulaten zonder risico voor een reactie tussen de alkaliën van het cement en de granulaten (ASR).

CEM III/A in de sterkteklasse 42,5 N is veelzijdig inzetbaar en bijzonder geschikt voor toepassingen waarvoor een hoge druksterkte vereist is op 28 dagen. Het cement is uitstekend geschikt voor toepassingen in de wegenbouw. Door een zeer bewust gekozen slakgehalte combineert dit cement de gunstige eigenschap van een hoge splijttreksterkte met een zeer goede bestandheid tegen vorst en dooizouten. Cement met een begrensd alkaligehalte (LA) is geschikt voor gebruik met alle traditionele granulaten zonder risico voor een reactie tussen de alkaliën van het cement en de granulaten (ASR).

CEM III/A 52,5 N is een cement dat voornamelijk wordt toegepast voor de fabricage van betonproducten waarvoor een verhoogde duurzaamheid gewenst is. De snelle sterkteontwikkeling in combinatie met de warmtegevoeligheid maakt het voor dit doel tot een ideaal cement. Het cement werkt goed samen met alle gangbare hulpstoffen en is een uitermate goed toepasbaar in zelfverdichtend beton. Voor betonelementen met een bijkomende esthetische functie is de egaal lichtgrijze betonkleur attractief.

Voor een optimaal resultaat bij het gebruik van dit cement in mortel of beton, moeten de gangbare regels voor de vervaardiging, het verwerken en de nazorg in acht worden genomen.

Bijlage C: Prestatiefiche van CEM III/A 42,5 N LA



1. Unieke identificatie :

Hoogovencement NBN EN 197-1 - CEM III/A 42,5 N

2. Aanduiding :

Zie 1.

3. Toepassing :

Bereiding van beton, mortel, injectiemortel en andere mengsels bestemd voor de bouw en de vervaardiging van bouwproducten.

4. Naam en contact adres fabrikant :

S.A. Cimenteries CBR Cementbedrijven N.V., Chaussée de la Hulpe 185 Terhulpesteenweg, B-1170 Brussels

5. Naam en contact adres gemachtigde :

Niet van toepassing

6. Systeem voor de beoordeling en verificatie van de prestatiebestendigheid :

Systeem 1+

7. Activiteit van de aangemelde certificatie-instantie zoals vereist in de geharmoniseerde norm :

De aangemelde certificatie-instantie BE-CERT (identificatie-nummer 0965) heeft onder systeem 1+ de bepaling van het producttype op grond van typeonderzoek en de initiale inspectie van de productie-installatie en van de productiecontrole in de fabriek uitgevoerd en zal tevens de permanente bewaking, beoordeling en evaluatie van de productiecontrole in de fabriek op zich nemen waarbij steekproefsgewijs controles van monsters plaatsvinden voordat het product in de handel is gebracht. Op basis daarvan is het certificaat van prestatiebestendigheid verstrekt.

8. Aangeven prestatie :

Essentiële kenmerken	Prestaties	Europees beoordelingsdocument
Gewone cementen (cementtype, bestanddelen en samenstelling) :	CEM III/A 42,5 N	EN 197-1:2011
Druksterkte (begin- en normsterkte) :	42,5 N	
Begin binding :	Voldoet	
Onoplosbare rest :	Voldoet	
Gloeverlies :	Voldoet	
Vormhoudendheid :		
- expansie :	Voldoet	
- gehalte SO ₃ :	Voldoet	
Chloridegehalte :	Voldoet	

9. De prestaties van het in de punten 1 en 2 omschreven product zijn conform de in punt 9 aangegeven prestaties. Deze prestatieverklaring wordt verstrekt onder de exclusieve verantwoordelijkheid van de in punt 4 vermelde fabrikant.

Brussel, 31/01/2015

Getekend :

Ir. T. Pluijmen

Technical Director Cement Operations CBR

Versie : 2 - Datum : 31/01/2015

Bijlage D: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 0 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 100% CEM III A 42,5 N LA	18/04/2016	2,907	6,813	6,738/ 0,330/6,197	57,273	35,796	31,066 / 2,530/26,918
					54,177	33,861	
	18/04/2016	2,997	7,024		51,189	31,993	
					47,440	29,650	
	18/04/2016	2,721	6,377		48,036	30,022	
					47,688	29,805	

Bijlage E: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 25 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 75% CEM III A 42,5 N LA	16/05/2016	2,292	5,372	5,301/ 0,072/5,184	34,427	21,517	22,146/1,133/20,288
					37,864	23,665	
	16/05/2016	2,231	5,229		33,477	20,923	
					35,699	22,312	
	16/05/2016	2,262	5,302		33,897	21,186	
					37,235	23,272	
75% CEM III A 42,5 N LA 25% Prefab, PWO- project	13/02/2017	3,192	7,481	7,123/ 0,480/ 6,335	44,484	27,803	28,492/0,842/27,112
					46,989	29,368	
	13/02/2017	3,119	7,310		45,653	28,533	
					43,496	27,185	
	13/02/2017	2,806	6,577		44,221	29,093	
			46,352	28,970			
75% CEM III A 42,5 N LA 25% Batch 10	13/02/2017	2,793	6,546	6,737/ 0,330/ 6,195	42,357	26,473	25,537/0,648/24,474
					40,659	25,412	
	13/02/2017	3,037	7,118		39,455	24,659	
					40,037	25,023	
	13/02/2017	2,793	6,546		41,232	25,770	
			41,417	25,886			
75% CEM III A 42,5 N LA 25% batch 13	14/02/2017	2,748	6,440	6,255/ 0,262/ 5,824	43,400	27,125	26,509/0,466/28,745
					41,265	26,795	
	14/02/2017	2,590	6,069		41,857	26,161	
					41,576	26,651	
	14/02/2017	/	/		40,270	25,814	
			42,416	26,510			

Bijlage F: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 50 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 50% CEM III A 42,5 N LA	16/05/2016	1,219	2,857	2,777/ 0,119/ 2,583	16,142	10,089	10,220/0,288/9,749
	16/05/2016	1,209	2,834		16,253	10,158	
	16/05/2016	1,127	2,641		15,991	9,994	
					16,443	10,277	
					16,052	10,033	
					17,233	10,771	
50% CEM III A 42,5 N LA 50% Prefab, PWO- project	13/02/2017	<u>1,042</u>	<u>2,443</u>	4,131/ 0,043/ 4,060	22,708	14,193	14,073/0,418/13,387
	13/02/2017	1,775	4,161		22,282	13,926	
	13/02/2017	1,749	4,100		20,809	13,339	
					22,497	14,061	
					22,756	14,439	
50% CEM III A 42,5 N LA 50% Batch 10	13/02/2017	<u>0,684</u>	<u>1,603</u>	4,328/ 0,495/ 3,516	23,543	14,714	14,718/1,237/14,329
	13/02/2017	1,697	3,978		24,114	15,071	
	13/02/2017	1,996	4,678		23,265	14,541	
					23,046	14,404	
					23,521	14,701	
					23,803	14,877	
50% CEM III A 42,5 N LA 50% batch 13	14/02/2017	1,567	3,672	3,702/ 0,040/ 3,636	19,141	11,963	11,756/0,542/11,015
	14/02/2017	1,599	3,748		19,389	12,118	
	14/02/2017	1,573	3,687		17,583	10,989	
					18,693	11,683	
					19,556	12,222	
				18,493	11,558		

Bijlage G: De resultaten van de buig- en drukproeven op 7 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 75 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 25% CEM III A 42,5 N LA	16/05/2016	/	/	/	3,014	1,884	1,587/0,047/1,464
					3,116	1,948	
	16/05/2016	/	/		2,942	1,839	
					2,942	1,839	
	16/05/2016	/	/		3,217	2,011	
					<u>3,561</u>	<u>2,226</u>	
25% CEM III A 42,5 N LA 75% Prefab, PWO- project	13/02/2017	0,593	1,389	0,540/ 0,043/ 1,288	6,371	3,982	4,157/0,204/3,821
					6,607	4,129	
	13/02/2017	0,459	1,076		6,378	3,986	
					6,541	4,088	
	13/02/2017	0,567	1,328		6,759	4,224	
					7,248	4,530	
25% CEM III A 42,5 N LA 75% Batch 10	13/02/2017	0,704	1,649	1,555/ 0,096/ 1,398	6,252	3,908	4,053/0,233/3,670
					6,263	3,914	
	13/02/2017	0,662	1,458		7,081	4,426	
					6,830	4,269	
	13/02/2017	0,664	1,557		6,245	3,903	
					6,237	3,898	
25% CEM III A 42,5 N LA 75% batch 13	14/02/2017	0,502	1,176	1,237/ 0,086/ 1,096	4,838	3,101	3,219/0,088/3,074
					5,256	3,327	
	14/02/2017	0,554	1,298		5,042	3,274	
					4,968	3,144	
	14/02/2017	<u>0,495</u>	<u>1,160</u>		4,986	3,280	
					4,971	3,186	

Bijlage H: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 0 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 100% CEM III A 42,5 N LA	09/05/2016	3,576	8,381	8,935/ 0,544/ 8,042	79,173	49,483	52,619/2,085/49,200
					88,236	55,148	
	09/05/2016	3,821	8,955		83,983	52,489	
					82,399	51,499	
	09/05/2016	4,040	9,469		83,882	52,426	
					87,47	54,669	

Bijlage I: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 25 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 75% CEM III A 42,5 N LA	06/06/2016	2,772	6,497	6,492/ 0,101/ 6,327	65,118	40,699	40,972/0,619/39,956
					64,961	40,601	
	06/06/2016	2,812	6,591		67,388	42,118	
					64,781	40,488	
	06/06/2016	2,726	6,389		65,992	41,245	
					65,089	40,681	
75% CEM III A 42,5 N LA 25% Prefab, PWO- project	07/02/2017	4,216	9,882	10,089/ 0,799/ 8,778	75,548	47,218	47,016/0,553/46,110
					76,001	47,501	
	07/02/2017	4,017	9,414		75,829	47,393	
					74,241	46,401	
	07/02/2017	4,682	10,972		73,970	46,231	
					75,768	47,355	
75% CEM III A 42,5 N LA 25% Batch 10	07/02/2017	4,210	9,868	9,434/ 0,423/ 8,740	70,222	43,889	43,345/0,506/42,515
					69,628	43,518	
	07/02/2017	3,850	9,023		68,208	42,630	
					68,903	43,064	
	07/02/2017	4,015	9,410		70,223	43,889	
					68,932	43,083	
75% CEM III A 42,5 N LA 25% batch 13	08/02/2017	<u>5,088</u>	<u>11,926</u>	10,285/ 0,288/ 9,813	71,112	44,445	45,780/1,079/44,011
					72,112	45,070	
	08/02/2017	4,475	10,488		72,019	45,012	
					73,180	46,910	
	08/02/2017	4,301	10,081		73,282	46,976	
					74,027	46,267	

Bijlage J: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 50 % cement

Samenstelling	Datum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 50% CEM III A 42,5 N LA	06/06/2016	<u>1,127</u>	<u>2,641</u>	4,615/ 0,000/ 4,615	29,677	18,548	19,035/0,807/17,711
	06/06/2016	1,969	4,615		31,217	19,511	
		31,615	19,759				
		31,966	19,979				
		29,172	18,233				
		29,085	18,178				
50% CEM III A 42,5 N LA 50% Prefab, PWO- project	07/02/2017	3,564	8,353	8,399/ 0,220/ 8,038	45,779	28,612	28,195/0,691/27,061
	07/02/2017	3,686	8,638		44,155	27,597	
		44,506	27,816				
		43,811	27,382				
		45,838	28,649				
		45,585	29,116				
50% CEM III A 42,5 N LA 50% Batch 10	07/02/2017	3,323	7,787	7,766/ 0,071/ 7,649	40,966	25,604	25,361/0,434/24,649
	07/02/2017	3,280	7,687		41,632	26,020	
		40,514	25,321				
		39,610	24,756				
		40,625	25,391				
		40,122	25,076				
50% CEM III A 42,5 N LA 50% batch 13	08/02/2017	3,123	7,319	7,216/ 0,090/ 7,069	37,036	23,148	23,484/0,889/22,025
	08/02/2017	3,060	7,172		39,510	24,694	
		36,279	22,674				
		39,221	24,513				
		36,416	22,760				
		36,980	23,113				

Bijlage K: De resultaten van de buig- en drukproeven op 28 dagen van de mortelprisma's met een vervangingspercentage van 75 % cement

Samenstelling	Dutum van aanmaak	Buigsterkte			Druksterkte		
		Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)	Lading (kN)	Spanning (MPa)	Gemiddelde spanning (MPa)/ Standaarddeviatie (MPa)/ Karakteristieke spanning (MPa)
Referentie: 25% CEM III A 42,5 N LA	06/06/2016	0,581	1,362	1,385/ 0,126/ 1,179	<u>4,757</u>	<u>2,973</u>	4,231/0,610/3,231
					6,989	4,368	
	06/06/2016	0,543	1,273		6,025	3,766	
					7,165	4,478	
	06/06/2016	0,649	1,521		6,276	3,923	
				7,389	4,618		
25% CEM III A 42,5 N LA 75% Prefab, PWO- project	07/02/2017	1,235	2,893	2,769/ 0,229/ 2,392	12,001	7,501	7,199/0,320/6,674
					11,183	6,989	
	07/02/2017	1,068	2,504		10,542	6,758	
					10,968	7,031	
	07/02/2017	1,241	2,909		12,093	7,558	
				11,768	7,355		
25% CEM III A 42,5 N LA 75% Batch 10	07/02/2017	1,300	3,046	3,061/ 0,027/ 3,018	11,601	7,251	7,752/0,352/7,175
					12,034	7,521	
	07/02/2017	1,300	3,046		12,208	7,630	
					13,104	8,190	
	07/02/2017	1,319	3,092		12,570	7,856	
				12,904	8,065		
25% CEM III A 42,5 N LA 75% batch 13	08/02/2017	1,026	2,405	2,219/ 0,103/ 2,164	9,820	6,138	6,363/0,251/5,951
					10,105	6,316	
	08/02/2017	<u>0,850</u>	<u>1,993</u>		9,669	6,043	
					10,587	6,617	
	08/02/2017	0,964	2,260		10,231	6,394	
				10,672	6,670		

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Bepaling van het aandeel ongehydrateerd cement in betongranulaten door meting van hydratatie- en sterkte-eigenschappen

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**
Jaar: **2017**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Kerkhofs, Jan

Datum: **6/06/2017**