

2018 • 2019
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Opwaardering van gerecycleerd betongranulaat door oppervlakkige carbonatatie

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

dr. Ruben SNELLINGS

BEGELEIDER :

De heer Sean KOX

COPROMOTOR :

dr. ir. Maarten EVERAERT

BEGELEIDER :

dr. ir. Asghar GHOLIZADEH-VAYGHAN

Annelie Bellinkx

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

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2018 • 2019

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Opwaardering van gerecycleerd betongranulaat door oppervlakkige carbonatatie

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

dr. Ruben SNELLINGS

BEGELEIDER :

De heer Sean KOX

COPROMOTOR :

dr. ir. Maarten EVERAERT

BEGELEIDER :

dr. ir. Asghar GHOLIZADEH-VAYGHAN

Annelie Bellinkx

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



KU LEUVEN

Voorwoord

Deze thesis onderzoekt het effect van carbonatatie op de kwaliteit van gerecycleerd betongranulaat. Dit onderzoek kadert in het project 'Beton naar Hoogwaardig Beton' waar VITO deel van uitmaakt, en waar ik aan mee heb kunnen werken. De reden waarom ik dit onderwerp wou onderzoeken ligt bij mijn interesse in duurzaamheid en ecologie. Voor mij was het zeer belangrijk om een onderzoek uit te voeren waar ik een bijdrage kon leveren aan een duurzame toekomst. Het hergebruik van betongranulaat kan een belangrijk alternatief vormen om de milieu-impact van de bouwsector te beperken.

De uitvoering van dit onderzoek verliep zeker niet altijd even vlot. Ik heb vaak uren geschreven om daarna terug opnieuw te beginnen. Ook bij het doornemen van bestaande literatuur was het moeilijk voor mij om hier uiteindelijk relevante informatie uit te halen. Daarnaast verliep de start van de labowerk zeer moeizaam door mijn beperkte ervaring in het labo. Na vele uren in het labo groeide mijn vertrouwen waardoor de testen veel vlotter verliepen.

Ten eerste wil ik dr. ir. Asghar Gholizadeh-Vayghan bedanken voor de unieke samenwerking. Door zijn uitgebreide kennis en ervaring kon hij me helpen om mijn onderzoek richting te geven en uit te voeren. Vervolgens wil ik graag prof. dr. ing. Bram Vandoren en dr. Ruben Snellings bedanken voor de begeleiding tijdens de volledige masterproefperiode. Ook ing. Sean Kox en dr. ir. Maarten Everaert wil ik bedanken voor het proeflezen van mijn geschreven teksten. Tijdens de uitvoering van de labotesten heb ik vaak hulp ontvangen van verschillende laboranten van VITO, waarvoor ik hen ook wil bedanken. Tot slot wil ik graag mijn familie bedanken voor hun steun. Tijdens moeilijke momenten konden zij me altijd moed inspreken om deze thesis tot een goed eind te brengen.

Ik wens u veel leesplezier.

Annelie Bellinkx

3 juni 2019, Beringen

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
2 Literatuurstudie	17
2.1 Huidige betonproductie	17
2.2 Huidige betonrecyclage.....	18
2.3 Knelpunten die hoogwaardige of volledige recyclage in de weg staan...20	
2.3.1 Technische knelpunten	20
2.3.2 Niet-technische knelpunten	21
2.4 Standaarden over gerecycleerd betongranulaat	23
2.5 Karakteristieken van gerecycleerd betongranulaat	24
2.6 Recyclagemethoden van betongranulaat.....	25
2.6.1 Huidige recyclagetechnieken	25
2.6.2 Recyclagetechnieken in ontwikkeling.....	26
3 Materiaal en methode	31
3.1 Materialen	31
3.2 Methoden	32
3.2.1 Recyclage	32
3.2.2 Carbonatatie	37
3.2.3 Karakterisatie	41
3.3 Statistische analyse	46

4 Resultaten en discussie	47
4.1 Natuurlijke granulaten.....	47
4.2 Gerecycleerde granulaten	48
4.3 Gecarbonateerde granulaten.....	50
4.4 Extra carbonatatie experimenten	58
4.5 Verbanden tussen eigenschappen	60
5 Conclusie	63
Referentielijst	65
Bijlagenlijst	71
Bijlagen	73
Bijlage A: Lijst van de berekende p-waarden	73
Bijlage B: Gedetailleerde resultatenlijst	74
B.1 Natuurlijke granulaten	74
B.2 Gerecycleerde granulaten.....	75
B.3 Gecarbonateerde granulaten.....	77

Lijst van tabellen

Tabel 1: Lijst van de verschillende beproevingsnormen gericht op gerecycleerd betongranulaat beschreven in EN 12620.....	23
Tabel 2: Lijst van de verschillende eisen van hoogwaardig betongranulaat beschreven in standaardbestek 250.....	23
Tabel 3: Lijst van de exacte granulaattypes.	31
Tabel 4: Mengverhoudingen van het geproduceerde beton.	32
Tabel 5: Lijst van de verschillende carbonatatieparameters tijdens de geplande experimenten.....	38
Tabel 6: Lijst van de verschillende carbonatatieparameters tijdens de extra uitgevoerde experimenten.	39
Tabel 7: Lijst van alle experimentele carbonatatiecondities.	39
Tabel 8: Eigenschappen van de natuurlijke granulaten (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).	47
Tabel 9: Eigenschappen van het gerecycleerd betongranulaat (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).	49
Tabel 10: Eigenschappen van alle gecarbonateerde experimenten (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).....	51
Tabel 11: Eigenschappen van de extra gecarbonateerde experimenten (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).	58
Tabel 12: Lijst van p-waarden voor de bepaling van de significantie van de toe- of afname in de waterabsorptie of de micro-Deval coëfficiënt ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat.....	73
Tabel 13: Lijst van de p-waarden voor de bepaling van de significantie van de toe- of afname in de waterabsorptie of de micro-Deval coëfficiënt tussen twee verschillende carbonatatieparameters.....	73
Tabel 14: Korrelgrootteverdeling voor de drie verschillende groottefracties van het natuurlijk granulaat.	74
Tabel 15: Resultaten van de waterabsorptie- en densiteit test voor de drie verschillende groottefracties van het natuurlijk granulaat.	75
Tabel 16: Resultaten van de micro-Deval test voor het natuurlijk granulaat.	75
Tabel 17: Resultaten van de vorst-dooitest voor het natuurlijk granulaat.....	75
Tabel 18: Korrelgrootteverdeling voor de twee verschillende groottefracties van het gerecycleerd granulaat.	76
Tabel 19: Resultaten van de waterabsorptie- en densiteit test voor het gerecycleerd granulaat.	76
Tabel 20: Resultaten van de micro-Deval test het gerecycleerd granulaat.....	76
Tabel 21: Resultaten van de vorst-dooitest voor het gerecycleerd granulaat.	77
Tabel 22: Resultaten van de waterabsorptie- en densiteit test voor de verschillende experimenten van het gecarbonateerd granulaat.	77

Tabel 23: Resultaten van de micro-Deval test voor de verschillende experimenten van het gecarbonateerd granulaat.	79
Tabel 24: Resultaten van de vorst-dooitest voor het optimale experiment van het gecarbonateerd granulaat.	80

Lijst van figuren

Figuur 1: Schematische voorstelling van het ADR-principe [15].	19
Figuur 2: Schematisch voorbeeld van een mobiele recyclage-installatie (1 – aanvoerbak; 2 – oscillerende transportband; 3 – kaakbreker; 4 - afvoertransportband; 5 – dieselmotor; 6 - mobiel door wielen, rupsbanden of skids [8].	22
Figuur 3: Schematisch voorbeeld van een kaakbreker [8].	26
Figuur 4: Schematische voorbeeld van een impactbreker [8].	26
Figuur 5: Voorbeeld van een microgolf-testapparaat (SAIREM) [59].	27
Figuur 6: Schematische voorstelling van de elektrodynamische verbrijzeling van beton [61].	28
Figuur 7: (a) Prototype van de Smart Crusher; (b) De Smart Crusher in wording [63].	29
Figuur 8: Voorbeeld van een experimentele opstelling voor CO ₂ -behandeling [64].	30
Figuur 9: (a) Rivierzand 0/3; (b) Kalksteen 2/7; (c) Kalksteen 7/14.	31
Figuur 10: De kegel van Abrams gebruikt voor de bepaling van de betonconsistentie.	32
Figuur 11: Hydraulische drukbank gebruikt voor de bepaling van de betondruksterkte.	33
Figuur 12: Hydraulische puntpers gebruikt voor het breken van het beton tot stukken kleiner dan 9 cm.	34
Figuur 13: Gebroken betonpuin met grootte kleiner dan 9 cm.	34
Figuur 14: Industriële kaakbreker gebruikt voor het breken van het beton tot gerecycleerd betongranulaat.	35
Figuur 15: Gerecycleerd betongranulaat na de eerste breekfase in de kaakbreker met opening 14 mm.	35
Figuur 16: Gerecycleerd betongranulaat na de tweede breekfase in de kaakbreker met opening 8,5 mm.	36
Figuur 17: Afzeving van het gerecycleerd betongranulaat op zeefmaat 3 mm.	36
Figuur 18: Betonmixer voor het homogeniseren van het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm.	37
Figuur 19: Schets van een gerecycleerd betongranulaatdeeltje met calciumhydroxide op de granulaatoppervlakte en de chemische reactie van calciumhydroxide tot calciumcarbonaat.	37
Figuur 20: (a) De gebruikte carbonatatiekamer; (b) Een voorbeeldopstelling in de carbonatatiekamer voor een experiment met verhoogde relatieve vochtigheid.	38
Figuur 21: Zeefmethode toegepast op het gerecycleerd betongranulaat kleiner dan 3 mm.	41
Figuur 22: Zeefmethode toegepast op het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm.	41

Figuur 23: Pyknometer gebruikt bij de bepaling van de waterabsorptie en de dichtheid (inhoud 1 l).	42
Figuur 24: Papieren doeken gebruikt voor het drogen van het granulaat groter dan 4 mm tot SSD-conditie.	43
Figuur 25: Materialen gebruikt voor het drogen van het granulaat kleiner dan 4 mm tot SSD-conditie (a) Hete luchtblazer gebruikt voor het drogen; (b) Metalen kegel gebruikt voor bepaling van de SSD-conditie.	43
Figuur 26: Micro-Deval apparaat gebruikt voor de bepaling van de weerstand tegen afslijting van granulaatfractie 10 mm tot 14 mm.	44
Figuur 27: Stalen ballen met diameter $10 \pm 0,5$ mm gebruikt voor de micro-Deval test.	44
Figuur 28: Metalen container gebruikt voor de vorst-dooitest (inhoud 2 l).	45
Figuur 29: Vorst-dooikast gebruikt voor de bepaling van de weerstand tegen vorst-dooicycli van granulaatfractie 8 mm tot 16 mm.	45
Figuur 30: Korrelgrootteverdeling van de drie verschillende types van de natuurlijke granulaten.	47
Figuur 31: Korrelgrootteverdeling van de twee verschillende groottefracties van het gerecycleerd betongranulaat (RCA) in vergelijking met de korrelgrootteverdeling van de natuurlijke granulaten.	48
Figuur 32: (a) Metalen container na uitvoering van de vorst-dooitest op het natuurlijk granulaat; (b) Metalen container na uitvoering van de vorst-dooitest op het gerecycleerd granulaat.	49
Figuur 33: Waterabsorptie coëfficiënten [%] en micro-Deval coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "nat", relatieve vochtigheid "verhoogd" en tijd "1 uur" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).	52
Figuur 34: Schematische voorstelling van een hinderend waterlaagje op de granulaatoppervlakte.	53
Figuur 35: Waterabsorptie coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "nat" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).	54
Figuur 36: Waterabsorptie coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "geacclimatiseerd" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).	55
Figuur 37: Waterabsorptie coëfficiënten [%] en micro-Deval coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "geacclimatiseerd", relatieve vochtigheid "niet-verhoogd" en temperatuur "20 °C" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).	56
Figuur 38: Waterabsorptie coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd in de extra experimenten (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).	59
Figuur 39: Lineair verband tussen de schijnbare dichtheid [kg/m^3] en de SSD-dichtheid [kg/m^3] van alle carbonatie experimenten en het niet-gecarbonateerde granulaat.	60

Figuur 40: Lineair verband tussen de waterabsorptie coëfficiënt [%] en de schijnbare en de SSD-dichtheid [kg/m ³] van alle carbonatatie experimenten en het niet-gecarbonateerde granulaat.....	61
Figuur 41: Lineair verband tussen de micro-Deval coëfficiënt [%] en de schijnbare dichtheid [kg/m ³] van de carbonatatie experimenten waarvan de micro-Deval coëfficiënt bepaald is en het niet-gecarbonateerde granulaat.....	61
Figuur 42: Lineair verband tussen de micro-Deval coëfficiënt [%] en de waterabsorptie coëfficiënt [%] van de carbonatatie experimenten waarvan de micro-Deval coëfficiënt bepaald is en het niet-gecarbonateerde granulaat.	62

Abstract

Overvloedig gebruik van beton veroorzaakt grondstofuitputting en grote hoeveelheden afval. Het hergebruik van betongranulaat kan de milieu-impact van de bouwsector beperken. Echter is de kwaliteit van gerecycleerd betongranulaat beperkt door gehydrateerde cementpasta op de granulaatoppervlakte, wat het gebruik in hoogwaardig beton beperkt. Dit onderzoek bepaalt het effect van carbonatatie op de kwaliteit van gerecycleerd betongranulaat. Carbonatatie is een chemische reactie die calciumhydroxide in het cement omzet tot calciumcarbonaat door opname van CO₂-gas.

Ten eerste vormt de karakterisering van natuurlijk kalksteengranulaat referentiewaarden voor de waterabsorptie, de weerstand tegen afslijting en vorst-dooicycli. Vervolgens ontstaat gerecycleerd betongranulaat door het breken van geproduceerd beton. Hierna is de invloed van verschillende carbonatatieparameters getest voor twee vochtigheidscondities, namelijk nat of geacclimatiseerd. De andere parameters zijn CO₂-druk, temperatuur, duur en relatieve vochtigheid in de carbonatatiekamer.

Het onderzoek toont aan dat carbonatatie in natte condities geen kwaliteitsverbetering veroorzaakt. Echter geven de resultaten van geacclimatiseerde granulaten aan dat carbonatatie in een niet-vochtige omgeving wel leidt tot een verbetering van de eigenschappen. Hieruit volgt ook dat een hogere CO₂-druk een positief effect heeft op carbonatatie. Bij de optimale carbonatatieparameters van 5 bar, 20 °C en 4 uur, daalt de waterabsorptie 20 % ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat.

Kernwoorden: Beton, Dichtheid, Gecarbonateerd granulaat, Gerecycleerd betongranulaat, Waterabsorptie

Abstract in English

Abundant use of concrete causes resource depletion and massive amounts of waste. The reuse of concrete aggregates can reduce the environmental impact of the construction industry. However, the quality of recycled concrete aggregates (RCA) decreases due to hydrated cement residues on the aggregates surface and thus limits the use in high-grade concrete. This Master's thesis investigates the effects of crust carbonation on the surface properties of RCA. Carbonation is a chemical reaction that converts calcium hydroxide from the cement to calcium carbonate by absorption of CO₂ gas.

First, the characterisation of natural limestone aggregates composes reference values for the water absorption, the resistance to wear and freeze-thaw cycles. Subsequently, concrete is produced, hardened and crushed to create RCA samples. After this, the influence of various carbonation conditions is tested for two moisture conditions, namely wet or seasoned. The other parameters are CO₂ pressure, temperature, time and relative humidity in the carbonation chamber.

The research shows that carbonation under wet conditions provokes no quality improvement. However, the results of seasoned RCA indicate that carbonation in a non-humid environment induces an improvement of the RCA properties. It also shows that a higher CO₂ pressure has a positive effect on the carbonation outcome. A carbonation process at the optimal conditions of 5 bar, 20 °C and 4 hours decreases the water absorption with 20 % compared to untreated RCA.

Keywords: Carbonated aggregates, Concrete, Density, Recycled concrete aggregates, Water absorption

1 Inleiding

Het overvloedig gebruik van het constructiemateriaal beton veroorzaakt uitputting van natuurlijke grondstoffen en leidt tot enorme hoeveelheden bouw- en sloopafval. Om de milieu-impact van de bouwsector te beperken is toenemende recycling nodig. Specifiek kan het hergebruik van betongranulaat een belangrijk alternatief vormen. In het onderzoek binnen de consortiumovereenkomst 'Beton naar Hoogwaardig Beton' waar VITO een deel van uitmaakt, worden testen uitgevoerd op natuurlijke en gerecycleerde betongranulaten. Om hoogwaardig beton te produceren zijn granulaten van een bepaalde kwaliteit noodzakelijk. De kwaliteit van gerecycleerd betongranulaat reduceert echter door de aanwezigheid van gehydrateerde cementpasta op de granulaatoppervlakte. Zo leidt dat resterende cement tot een lagere dichtheid, een hogere waterabsorptie coëfficiënt, een lagere weerstand tegen afslijting en een lagere weerstand tegen vorst-dooicycli.

Deze thesis onderzoekt het effect van oppervlakkige carbonatatie op de waterabsorptie, de weerstand tegen afslijting en de weerstand tegen vorst-dooicycli van gerecycleerd betongranulaat. Carbonatatie is een chemische reactie die calciumhydroxide in het cement omzet tot calciumcarbonaat door opname van CO₂-gas. Calciumcarbonaat heeft een hogere molaire massa en dus een hogere dichtheid dan calciumhydroxide. Als gevolg van die chemische omzetting zal de waterabsorptie afnemen en de sterkte toenemen.

Ten eerste vormt de karakterisering van natuurlijke kalksteengranulaten referentiewaarden voor de waterabsorptie, de weerstand tegen afslijting en de weerstand tegen vorst-dooicycli. Vervolgens wordt beton geproduceerd, uitgehard en gebroken tot gerecycleerd betongranulaat met een korrelgrootteverdeling benaderend aan die van het oorspronkelijke granulaat. Het breekproces bestaat uit drie opeenvolgende stappen. Eerst wordt het geproduceerde beton gebroken met de hydraulische Jenny-pers tot stukken die in de kaakbreker passen. Vervolgens doorloopt het gebroken beton twee breekfasen in de kaakbreker, eerst met een opening van 14 mm en daarna met een opening van 8,5 mm. Na het breken zijn er twee materiaalstromen ontstaan, namelijk de matrix- en de granulaatstroom. Dit onderzoek focust enkel op de resulterende granulaatstroom met een korrelgroottediameter groter dan 3 mm. De karakterisatieproeven worden herhaald op het bekomen gerecycleerd betongranulaat. Daarna volgt carbonatatie van dat granulaat volgens verschillende condities om de optimale parameters te achterhalen. De testen gebeuren voor twee vochtigheidscondities, namelijk (1) nat: stalen behandeld in water voor 1 week, of (2) geacclimatiseerd: stalen geplaatst in een relatieve vochtigheid van 95 % voor 48 uur. De andere parameters zijn CO₂-druk, temperatuur, duur en relatieve vochtigheid in de carbonatatiekamer.

Eerst geeft deze thesis in hoofdstuk twee een literatuurstudie om inzicht te creëren in de recyclage van betongranulaat. Die omvat een omschrijving van de huidige betonproductie in Vlaanderen en de reden waarom betonrecyclage noodzakelijk is. Ook gegeven zijn de knelpunten voor hoogwaardige of volledige recyclage, de huidige beperking van de standaarden en een overzicht van verschillende karakterisatie- en recyclagemethoden. Hoofdstuk drie beschrijft de gebruikte materialen en het verloop van het onderzoek. Daarna worden in hoofdstuk vier de resultaten weergegeven. Dat hoofdstuk bevat ook analyses en verklaringen van die resultaten. Tot slot volgt een samenvattende conclusie in hoofdstuk vijf.

2 Literatuurstudie

2.1 Huidige betonproductie

Het gebruik van beton speelt een belangrijke rol in de huidige stedelijke ontwikkeling [1], maar zorgt ook voor grote milieueffecten en -problemen. De uitgestoten hoeveelheid koolstofdioxide door de cementindustrie bedraagt ongeveer 5 % van de wereldwijde koolstofdioxide-emissies [2] en creëert de voornaamste invloed op het milieu [3]. Daarnaast stijgt de consumptie van betongranulaten sterk door snelle infrastructuurontwikkeling in China, India, Indonesië en in mindere mate Midden- en Zuid-Amerika, Oost-Europa en Afrika. De groeiende economieën in die werelddelen brengen de toegankelijkheid van granulaten in westelijke regio's in gevaar [4]. Doorgedreven ontginning van grondstoffen kan het regeneratievermogen van de natuur overstijgen [5] en de lokale fauna en flora beïnvloeden [6]. Ook de enorme resulterende hoeveelheid van bouw- en sloopafval (BSA) zorgt voor problemen [7]. De herkomst hiervan ligt niet enkel in de constructiefase van bouwstructuren, maar ook de sloop van die structuren creëert grote hoeveelheden afval [8].

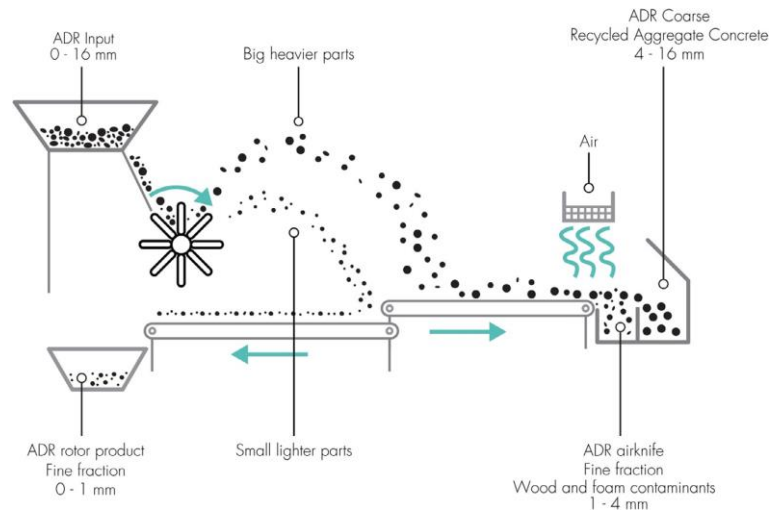
Wereldwijd wordt er jaarlijks ongeveer 11,5 miljard ton beton geproduceerd waarvoor 1,5 miljard ton cement, 9 miljard ton betongranulaat en 1 miljard ton water nodig is. Er wordt verwacht dat die wereldvraag naar beton zal stijgen tot 16 miljard ton per jaar in 2050 [9]. Binnen de Europese Unie bedraagt de jaarlijks geproduceerde hoeveelheid beton ongeveer 1,35 miljard ton. Daarnaast wordt er geschat dat de hoeveelheid BSA in de Europese Unie 320 tot 380 ton per jaar zou bedragen [10]. De productiehoeveelheden van verschillende bedrijfsafvalstoffen in Vlaanderen worden verzameld in het Integraal Milieuvorslag. Hieruit volgt dat de totale afvalstroom van BSA in Vlaanderen ongeveer 5,2 miljoen ton bedroeg in de periode van 2004 tot 2016 [11].

Er zijn al verschillende landen die streven naar het opnieuw inbrengen van de hoeveelheden BSA in de levenscyclus van de bouw. Tot dusver is het voornaamste antwoord de gedeeltelijke vervanging van natuurlijke grondstoffen door gerecycleerde betongranulaten in bouwtoepassingen [12]. Het gebruik van gerecycleerde granulaten zorgt voor een kringloopbenadering [6]. Het invoeren van duurzame beheersystemen zorgt voor meer trend betrokken, flexibele en aanpasbare bouwbedrijven [13]. Daarnaast is de recyclage van betongranulaten noodzakelijk op verschillende milieutechnische vlakken. Het gebruik van gerecycleerd granulaat zorgt voor twee voordelen op vlak van duurzaamheid, namelijk (i) de beperking van ontginning van natuurlijke grondstoffen en (ii) de beperking van gestort bouw- en sloopafval [14].

Mogelijke alternatieven voor gebruik van gerecycleerd granulaat gaan vaak verloren door de beperkte kennis over de kwaliteit, de kost, de types en de samenstelling van het granulaat. Daarnaast is de recyclagemarkt weinig aantrekkelijk door de vereiste tijd, ervaring en samenwerking om een degelijk en duurzaam afvalmanagementsysteem te creëren. Hierdoor biedt de recyclage van BSA nog geen duurzaam alternatief op ecologisch en economisch vlak [8]. De bouw- en sloopindustrie moet gemotiveerd worden door de recyclage van betongranulaat economisch interessant en technisch haalbaar te maken. Een mogelijke oplossing bestaat eruit om heffingen en belastingen in te voeren voor het storten van recycleerbare grondstoffen [12]. Er ontstaat een economisch voordeel doordat bouw- en sloopbedrijven BSA gratis kunnen storten bij recyclagebedrijven. In tegenstelling tot de recyclagebedrijven, kost dat op stortplaatsen 15 tot 30 euro per ton voor zuiver betonpuin [6]. Daarnaast wordt grondstoffenrecyclage interessanter door verstrenging van de milieuvoorschriften [6].

2.2 Huidige betonrecyclage

Een experimenteel voorbeeld van betonrecyclage is het 'Concrete to Cement and Aggregate' (C2CA) project. De recyclagetechniek bestaat uit een combinatie van selectief slopen, verbrijzeling en een nieuwe classificatietechniek om de fijne fractie te verwijderen. Die combinatie leidt tot een kosteneffectief recyclagesysteem om hoogwaardige granulaten en cement te creëren. Ook wordt het mechanisch recyclageproces uitgevoerd op niet-gedroogde granulaten waardoor het proces vereenvoudigt. Ten eerste leidt het selectief slopen van beton tot gebroken beton met weinig verontreinigingen. Losse cementpasta wordt van de granulaatoppervlakte verwijderd in een autogene molen. Daarna verwijderd de classificatietechniek 'Advanced Dry Recovery' (ADR) de fijne fractie en de overblijvende verontreinigen. Dit principe steunt op verschillende kinetische energie om de materialen te scheiden en wordt getoond in Figuur 1. Tijdens het volledige proces wordt de kwaliteit gecontroleerd met behulp van automatische sensoren. Hierdoor verminderen de kosten en wordt het mogelijk om het gerecycleerd granulaat rechtstreeks naar een betonfabrikant te brengen vanaf het sloopterrein. De resultaten geven aan dat de gekozen betonsamenstelling en het cementtype bepalend zijn voor de kwaliteit van het gerecycleerd granulaat. Daarnaast wordt duidelijk dat de vervanging van natuurlijk granulaat met gerecycleerd granulaat een beperkte invloed heeft op de kwaliteit van het gerecycleerd beton [15].



Figuur 1: Schematische voorstelling van het ADR-principe [15].

Tegenwoordig worden er frequent proeven uitgevoerd op gerecycleerde grondstoffen voor betonproductie om de mechanische, geometrische en fysische eigenschappen te bepalen. In praktijk worden er al betonverhardingen gecreëerd die een beperkt gehalte van 20 % aan gerecycleerd betongranulaat bevatten [16]. Een vervangingspercentage van 20 % van het natuurlijk granulaat kan momenteel een meeropbrengst van bijna twee miljoen euro per jaar opleveren. Daarnaast vermindert dit de CO₂-emissie met 5400 ton per jaar [3]. Voornamelijk wordt betongranulaat hergebruikt in laagwaardige toepassingen van de wegenbouw. Toepassingsmogelijkheden waarvoor gerecycleerd betongranulaat momenteel wordt gebruikt zijn ophogingen, aanvullingen, onderfunderingen, steenslagfunderingen en schraal beton [3]. Daarnaast worden proefprojecten uitgewerkt waarin gerecycleerd betongranulaat gebruikt wordt in hoogwaardige toepassingen. De Oosterzeelse Breek- en Betoncentrale heeft een proefproject uitgevoerd betreffende een toegangsweg tot een landbouwbedrijf [17]. Het cementgehalte had een vervangingspercentage van 30 % en het grove granulaat werd voor 100 % vervangen door gerecycleerd betongranulaat [18]. De omgevingsklassen in dit project zijn EE3 en EE4 waarbij de volledige vervanging van het betongranulaat nog niet is toegelaten in de Belgische wetgeving [17]. Na de uitgevoerde testen werd aangegeven dat de gewenste druksterktes in alle omstandigheden werden gehaald [18]. De gemeten druksterktes na 28 dagen van het beton met gerecycleerde granulaten verschillen amper ten opzichte van die van het beton met natuurlijke granulaten. Ook zorgt het gebruik van gerecycleerd betongranulaat nauwelijks voor een verschil in consistentie. Wel een belangrijk verschil dat ontstaat door de vervanging van het betongranulaat is de stijging van de waterabsorptie coëfficiënt [17].

2.3 Knelpunten die hoogwaardige of volledige recyclage in de weg staan

2.3.1 Technische knelpunten

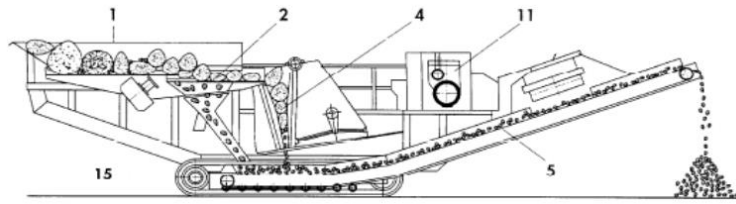
Een belangrijke reden voor klanten en aannemers om gerecycleerde granulaten af te wijzen als een alternatief voor natuurlijke granulaten, is de kans op variabiliteit in de technische eigenschappen [8], [12]. Gerecycleerde granulaten hebben een enorme diversiteit in samenstelling, een hoge kans op verontreiniging en zijn vaak niet gecertificeerd [19], [20]. Hierdoor hebben recyclagebedrijven een gebrek aan nodige kennis om gerecycleerde granulaten te produceren die toepasbaar zijn in hoogwaardige betontoepassingen [8], [12]. Momenteel wordt er vooral aan *downcycling* gedaan en worden gerecycleerde grondstoffen voornamelijk gebruikt in laagwaardige toepassingen. De Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) wil het mogelijk maken om recyclagematerialen te benutten in hoogwaardige toepassingen in de wegenbouw, prefabbeton en structureel beton. De uitbreiding van het toepassingsgebied verloopt echter moeilijk, voornamelijk door een gebrek aan zekerheid van de kwaliteit van het betongranulaat. De voornaamste problemen zijn de kans op verontreinigingen in de granulaten, de verschillende herkomst van de granulaten en een lagere mechanische sterkte van het resulterende beton door aanwezig cement op de granulaten [21]. Daarnaast is er een gebrek aan informatie over het gebruik van gerecycleerde granulaten in de productie van beton. Dit lijkt normaliter tot onzekerheden over de technische kwaliteit van beton geproduceerd met gerecycleerde granulaten.

Om de beschikbare informatie rond betongranulaatrecyclage uit te breiden is er meer onderzoek noodzakelijk. Er is nog geen diepgaand onderzoek uitgevoerd naar het kruipgedrag van beton met gerecycleerd granulaat. De berekening van de kruipvervorming gebeurt met voorspellingsmodellen [22]. Concreet betekent dit dat er nauwkeurige correctiefactoren bepaald moeten worden om het gebruik van gerecycleerde betongranulaten te kunnen verwerken in de huidige standaarden. Daarnaast is er slechts beperkt onderzoek uitgevoerd naar het effect op het macro-structureel gedrag van beton met gerecycleerde granulaten [12]. Uit de eindige-elementenmethode is gebleken dat het falen van een betonstructuur met gerecycleerde betongranulaten begint in het grensvlak van de secundaire granulaten. Daarna treedt er breuk op in de nieuwe overgangszone langst de aangehechte mortel van de gerecycleerde granulaten. Er is bijkomend onderzoek nodig om het verlies aan sterkte door het gebruik van secundaire granulaten te bepalen [23]. Om het gebruik van gerecycleerde betongranulaten mogelijk te maken in hoogwaardige betontoepassingen, moet er een bepaling gebeuren van de noodzakelijke aanpassingen in de structurele codes. De zorggebieden bestaan uit de bepaling van kruip, afschuifsterkte, vermoeiing, ponsweerstand, herverdeling van de krachten en voorgespannen beton [12].

2.3.2 Niet-technische knelpunten

Het diskrediet van gerecycleerd betongranulaat en dus ook het resulterende beton zorgt ervoor dat het huidige Belgische normatieve kader zeer beperkt is. In de voornaamste standaarden over betonproductie, namelijk eurocode 2 [24] en ACI-318 [25], wordt het structureel gedrag van beton met gerecycleerde granulaten niet besproken. Wanneer het gebruik van gerecycleerd granulaat wel is opgenomen in de specificatie, zoals in BRE Digest 433 [26], RILEM 27 [16] en NEN-5905 [27], worden vaak strenge grenzen beschreven [28]. RILEM 27 geeft aan dat de toegelaten betonklasse wordt beperkt tot C50/60 bij volledige vervanging van het natuurlijk betongranulaat. Bij andere betonklassen is het vervangingspercentage beperkt tot 20 % [16]. In de BENOR-reglementen voor stortbeton, namelijk TRA 550 [29], wordt vermeld dat de eisen beschreven in EN 206:2013+A1 [30] en EN N15-001:2018 [31] voldaan moeten worden. Het gebruik van gerecycleerd granulaat wordt beperkt tot maximaal sterkteklasse C30/37. Daarnaast is het maximaal vervangingspercentage voor omgevingsklassen E0, EI en EE1 beperkt tot 50 % voor ongewapend beton en 30 % voor gewapend beton. Voor de omgevingsklassen EE2, EE3, ES1, ES2, ES3 en EA1 is het maximaal vervangingspercentage beperkt tot 20 %. Bij hogere omgevingsklassen is het gebruik van gerecycleerde granulaten niet toegelaten. In het standaardbestek 250 [32] wordt het verboden om gerecycleerd betongranulaat te gebruiken in eenlaagse uitvoeringen voor bouwklassen B1 tot B10. Een vervangingspercentage van 20 % van de grove fractie wordt toegelaten voor een eenlaagse uitvoering voor bouwklasse BF en in de onderlaag van een tweelaagse uitvoering. Door deze beperkte toelatingen zijn de mogelijke toepassingen van gerecycleerde granulaten in beton vrij beperkt [33] en gebeurt er in veel gevallen *downcycling* zoals hierboven vermeld. Ook ontbreken er praktische richtlijnen voor het aanmaken van betonmengsels met gerecycleerde granulaten. Er is onvoldoende informatie beschikbaar over de invloed van het gebruik van gerecycleerde granulaten op de verwerkbaarheid, de mechanische eigenschappen en de duurzaamheid van het geproduceerde beton. Daarom zijn duidelijke richtlijnen nodig die aangeven welke aanpassingen moeten gebeuren in de betonproductie [3].

De ecologische en economische voordelen van het gebruik van gerecycleerd betongranulaat verzwakken naarmate de nood voor wegtransport toeneemt [34]. De afstanden tussen het terrein waar het sloopafval herwonnen wordt en de afvalrecyclage-installatie zijn bepalend voor de ecologische impact en de kost van betongranulaatrecyclage [3], [8]. Ook het transport van de recyclage-installatie naar het terrein waar de betongranulaten hergebruikt zullen worden, moet in rekening worden gebracht [3]. Het is mogelijk om het vervoer van de gerecycleerde grondstoffen te beperken door het gebruik van mobiele recyclage-installaties als alternatief voor stationaire recyclagefabrieken [8], [12]. Een schematisch voorbeeld van zo een mobiele recyclage-installatie is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Schematisch voorbeeld van een mobiele recyclage-installatie (1 – aanvoerbak; 2 – oscillerende transportband; 3 – kaakbreker; 4 – afvoertransportband; 5 – dieselmotor; 6 – mobiel door wielen, rupsbanden of skids [8].

De ecologische impact van de verwerking van bouw- en sloopafval tot herbruikbare granulaten is in sommige gevallen groter in vergelijking met de ontginning van natuurlijke granulaten. Dit is het geval bij het gebruik van een combinatie van mechanische processen en verhitting tot zeer hoge temperaturen om het cement op de granulaatoppervlakte te verwijderen. Wanneer dezelfde procedures worden gebruikt als bij natuurlijke granulaten, is de ecologische voetafdruk van betongranulaatrecyclage relatief lager [34]. Daarnaast zijn ongeveer dezelfde transportafstanden te verwachten bij gerecycleerde of natuurlijke materialen. Het verschil in transport is meestal verwaarloosbaar omdat de voornaamste milieu-impact afkomstig is van de cementproductie. Toch is het effect van betongranulaatrecyclage op de globale milieuscore interessant omdat eventuele lokale uitputting van grondstoffen door ontginning van natuurlijke grondstoffen niet wordt meegerekend in de levenscyclusanalyse [3]. Verder kan gesteld worden dat de transportafstanden zeer belangrijk zijn voor de keuze tussen natuurlijk en gerecycleerd granulaat in gebieden waar veel van de materialen geïmporteerd worden. Dat principe volgt uit het onderzoek van een specifieke levenscyclusanalyse waarin geïmporteerde materialen en lokaal gerecycleerde materialen vergeleken worden [35]. Daarnaast is het verschil in transportafstanden van gerecycleerde granulaten ook zeer belangrijk wanneer een mobiele breekinstallatie gebruikt wordt en het materiaal ter plaatse wordt hergebruikt. Die situatie wordt vaak toegepast in de wegebouw waar de bestaande weg wordt uitgedaasd en het uitgedaasde beton wordt hergebruikt in de onderfundering voor de nieuwe weg. Wanneer ook een betoncentrale ter plaatse van de werf wordt ingericht, zal er dus helemaal geen transport van het gerecycleerd granulaat plaatsvinden.

Het belangrijkste knelpunt dat het gebruik van gerecycleerd betongranulaat in de weg staat, is de economische kost. In de meeste landen is het gebruik van natuurlijke betongranulaten nog steeds zeer goedkoop omdat de milieu-impact van de ontginning niet omvat wordt in de grondstofbelasting. Daarnaast blijft het illegaal storten van bouw- en sloopafval aantrekkelijk door eventuele tarieven voor het storten bij recyclagebedrijven [8], [12]. Belastingen op sluikstorten van afval stimuleren bouw- en sloopbedrijven om meer materialen terug te winnen en te hergebruiken. Een onderzoek in Nederland heeft aangetoond dat een afvalstortbelasting doeltreffend de omzetting van afval naar alternatieve bouwmaterialen bevordert [36]. Bijgevolg zullen hoge

afvalstortbelastingen en heffingen leiden tot meer investeringen in duurzame recyclingsystemen [37]. Bijkomend is de economische duurzaamheid van een recyclage-installatie afhankelijk van de beschikbare proceshoeveelheid en de marktvraag naar gerecycleerde grondstoffen [8].

2.4 Standaarden over gerecycleerd betongranulaat

De voornaamste standaarden over het ontwerp en de berekening van betonconstructies zijn ACI-318 [25], EHE-08 [38] en EN-1992-1-1 [24]. Om het gebruik van gerecycleerd granulaat toe te laten en het structureel gedrag van het bekomen beton toe te lichten, zouden deze standaarden moeten hervormen [28], [39], [40]. Om de toepassing van gerecycleerd betongranulaat mogelijk te maken in verschillende situaties, is er een prestatiegerichte aanpak nodig in de normen [28]. De OVAM stelde een globaal beheersysteem op, waarin de voorwaarden en de procedure voor de keuring van gerecycleerde betongranulaten geregeld wordt. Daarnaast bevat dit systeem bepalingen waaraan de grondstoffen moeten voldoen om de kwaliteit van de gerecycleerde granulaten te verbeteren. Enkel het hergebruik van granulaten met een voldoende kwaliteit kunnen de materialenkringloop sluiten. Daarnaast is er noodzaak aan een certificatie om de oorsprong van verontreinigingen te achterhalen en te vermijden in de toekomst [41]. In de Europese norm EN 12620 [42] zijn verschillende beproevingsnormen beschreven die gericht zijn op gerecycleerde granulaten [21]. Die normen kunnen teruggevonden worden in Tabel 1. Het gerecycleerd betongranulaat moet voldoen aan alle eisen die beschreven zijn in EN 12620 [42]. Bijkomend worden extra eisen voor hoogwaardig betongranulaat vermeld in standaardbestek 250 [32]. Deze eisen worden weergegeven in Tabel 2.

Tabel 1: Lijst van de verschillende beproevingsnormen gericht op gerecycleerd betongranulaat beschreven in EN 12620.

Granulaateigenschap	Norm
Chloridgehalte	EN 1744-5
Zwavelhoudende verbindingen	EN 1744-1:1998 Clausule 12
Invloed op de initiële uithardingstijd van cement	EN 1744-6
Bestanddelen van grof gerecycleerd granulaat	prEN 933-11
Deeltjesdichtheid en waterabsorptie	EN 1097-6
Wateroplosbare sulfaten	EN 1744-1

Tabel 2: Lijst van de verschillende eisen van hoogwaardig betongranulaat beschreven in standaardbestek 250.

Granulaateigenschap	Eis
Korrelgroottediameter	$d \geq 4 \text{ mm}$ en $D \geq 10 \text{ mm}$
Samenstellingscategorieën	Minimaal: Rc90 ; Rcu95 ; Ra1- ; XRg0,5- ; FL2- [42]
Categorieën	Minimaal: FI20 ; f1,5 ; LA35 ; SS0,2 ; WA10 [42]
Volumemassa (ρ_{rd})	Minimaal: 2200 kg/m ³
Waterabsorptie	Maximaal: 10 ± 2 %

2.5 Karakteristieken van gerecycleerd betongranulaat

Er bestaat een sterke samenhang tussen de kwaliteit van gerecycleerd betongranulaat en de resulterende betonsterkte. Dit volgt uit een classificatie, ontwikkeld door Silva et al. [43], die het mogelijk maakt om de kwaliteit van het betongranulaat te bepalen op basis van een aantal fysische eigenschappen [44], [45]. Daarnaast is het mogelijk om een gerecycleerd beton te ontwerpen met dezelfde druksterkte, doorbuiging en levensduur als het referentiebeton door de geometrie van de betonconstructie enigszins aan te passen. Ook is de kwaliteit van het geproduceerde bouwmateriaal evenredig met de kwaliteitscontrole tijdens alle fasen van de levenscyclus [12].

De zeefmethode bepaalt de korrelgrootteverdeling van beton zoals beschreven in EN 933-1 [46]. Die verdeling in granulaatclassificaties op basis van korrelgroottediameter gebeurt met behulp van een reeks zeven afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid en de aard van het materiaal. De korrelgrootteverdeling beïnvloedt de bepaling van de mengverhoudingen voor de productie van beton.

De bepaling van de dichtheid en de waterabsorptie is beschreven in EN 1097-6 [47]. De dichtheid wordt bepaald op basis van de massavolumeverhouding van het materialen. Hiervoor wordt de massa van de testportie gewogen in drie toestanden, namelijk volledig verzadigd, verzadigde poriën met een droge granulaatoppervlakte en oven droog. Daarnaast wordt het volume van granulaten met een korrelgroottediameter tussen 31,5 mm en 63 mm getest op basis van de *wire basket* methode. Het volume van granulaten met een kleinere korrelgroottediameter wordt bepaald met de pyknometer methode. In beide gevallen Verder wordt de waterabsorptie na 24 uur bepaald op basis van de massa's bij verzadigde poriën en een droog oppervlak en in oven droge toestand.

De micro-Deval test, beschreven in EN 1097-1 [48], bepaalt de afslijting door wrijving tussen de 10 tot 14 mm groottefractie van het granulaat en een abrasieve toevoegstof. Na het uitvoeren van de test kan de micro-Deval coëfficiënt bepaald worden als het percentage van de initiële massa dat afgesleten is tot een diameter kleiner dan 1,6 mm.

Naast de weerstand tegen afslijting, bepaalt de Los Angeles test de weerstand tegen verbrijzeling van het granulaat. Deze testprocedure is beschreven in EN 1097-2 [49] en test de groottefractie van 10 tot 14 mm van het granulaat gelijkaardig zoals de micro-Deval test. De Los Angeles coëfficiënt geeft het percentage van de initiële massa dat na verbrijzeling een diameter kleiner dan 1,6 mm heeft.

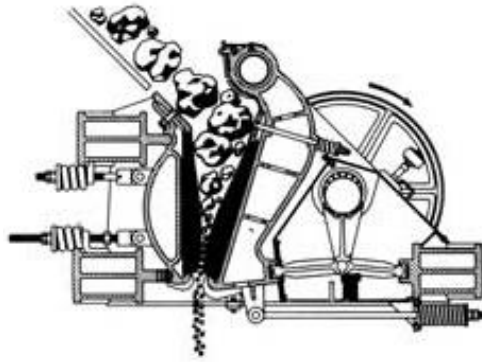
De test om de bestandheid tegen vriezen en dooien van granulaten te bepalen, staat beschreven in EN 1367-1 [50]. De vereiste massa van de testporties is afhankelijk van de korrelgroottediameter van het granulaat. Om de vorst-dooicoëfficiënt te berekenen, moet de testportie na de vorst-dooicycli gezeefd worden op één zeefmaat kleiner dan de kleinste korrelgroottediameter. Daarna geeft de verhouding ten opzichte van de initiële massa de vorst-dooifactor.

2.6 Recyclagemethoden van betongranulaat

2.6.1 Huidige recyclagetechnieken

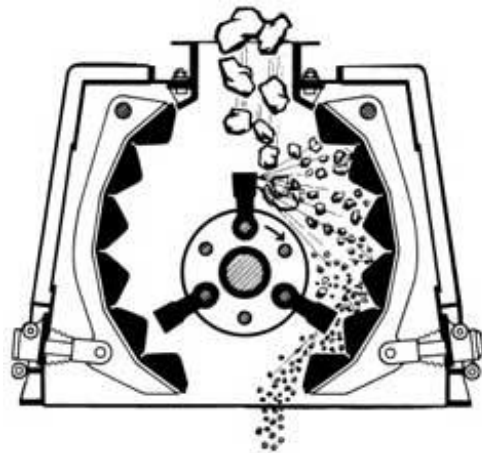
Om de hoeveelheid herbruikbare materialen te maximaliseren is een deconstructieve handelwijze tijdens de sloop van een structuur noodzakelijk [51]. Het gebruik van de herwonnen materialen wordt gestimuleerd wanneer de standaard sloopprocedure bestaat uit selectieve deconstructie [8]. Door selectief te slopen kan gerecycleerd betongranulaat van hoge kwaliteit geproduceerd worden. Vervolgens moeten de materialen tijdens de volledige levenscyclus ingedeeld en gesorteerd worden op basis van hun type en kenmerken. Hierdoor ontstaat een ruim en certificeerbaar gamma aan gerecycleerde grondstoffen met verschillende kwaliteit [52]. Verder wordt de kwaliteit van het gerecycleerd granulaat in beperkte mate bepaald door de keuze van de recyclage-installatie [53]. Huidige breektechnieken van gerecycleerd betongranulaat leiden niet tot cementvrije granulaten. De aanwezigheid van cement op het granulaat beïnvloedt de verwerkbaarheid en de mechanische eigenschappen van het resulterende beton [54], [55]. Om cementvrije granulaten met een optimale vorm te bekomen, zijn twee of meerdere breekfasen noodzakelijk [56].

Een eerste frequent toegepaste installatie is de kaakbreker, waarvan een schematisch voorbeeld gegeven is in Figuur 3. Het werkingsprincipe van deze breker is de breking van het materiaal door samendrukking tussen twee stijve platen. Het breekoppervlak bestaat uit een vaste plaat waarop het materiaal gebroken wordt door de kracht van een beweegbare plaat. Dit systeem wordt vaak gebruikt als primaire breker door zijn geschiktheid om grote fragmenten te breken. Een ander voordeel bestaat uit de lage onderhoudskosten door de bestendigheid tegen slijtage. Anderzijds is de aankoopprijs van de kaakbreker zeer hoog. Tenslotte bestaan er twee soorten kaakbrekers, namelijk een rechte- en een kniekaakbreker. Deze laatste werkt op een hoger toerental waardoor het puin efficiënter verkleind. De gebroken granulaten verlaten de breker pas wanneer hun diameter kleiner is dan de opening onderaan. Hierbij wordt opgemerkt dat platte elementen wel ongebroken door de opening zullen gaan [57].



Figuur 3: Schematisch voorbeeld van een kaakbreker [8].

Daarnaast kan de breking ook gebeuren door een impactbreker, zoals getoond in Figuur 4. De breking gebeurt hier doordat de fragmenten aan een hoge snelheid tegen de binnenwand worden geslingerd. Het voornaamste voordeel van dit systeem zijn de regelbare slagplaten om zo de diameter van de eindgranulaten te bepalen. Bovendien is deze breker inzetbaar als primaire en secundaire breker waarbij kubusvormige granulaten met een goede korrelgrootteverdeling worden gevormd. De nadelen van deze breektechniek zijn een hoger energieverbruik en hogere onderhoudskosten [57].



Figuur 4: Schematische voorbeeld van een impactbreker [8].

2.6.2 Recyclagetechnieken in ontwikkeling

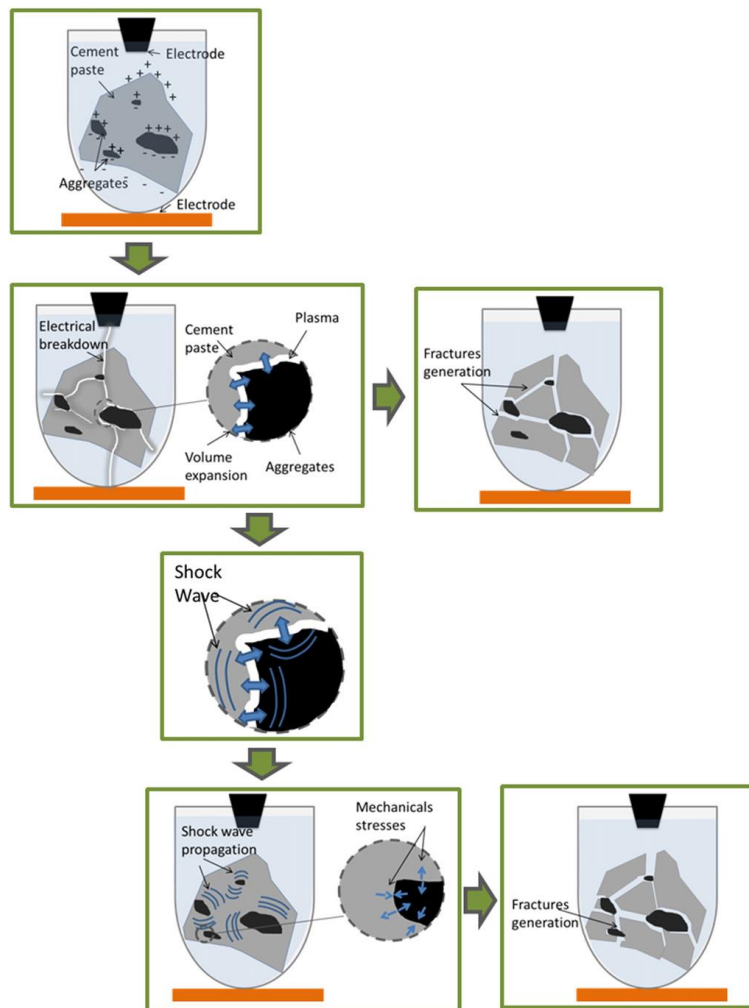
De *upcycling* van betonafval kan gebeuren door het toepassen van microgolven voor de breekfase. Een voorbeeld van die opstelling wordt gegeven in Figuur 5. Na verwarming door microgolven wordt het beton brosser, wat leidt tot vermindering van de breukenergie, toename van de verbrijzeling en verwijdering van het cement rond de granulaten [58]. Door de verschillende differentiële thermische uitzetting van de materialen tijdens de inwendige opwarming en door de ontwikkeling van stoom in verzadigde poriën zullen er spanningen ontstaan. Deze inwendige spanningen leiden tot barsten in de

overgangszone tussen het granulaat en het cement waardoor het materiaal verzwakt [59]. De overgangszone heeft een hogere porositeit en water-cementverhouding waardoor de geabsorbeerde energie hoger is en de temperatuur sneller stijgt. Omdat de barsten vooral ontstaan in deze zone, wordt de verwijdering van het cement rond de granulaten efficiënter [60]. Uit onderzoek op betonproefstukken geproduceerd in het laboratorium blijkt dat een voorbehandeling met microgolven voordeliger is bij grove granulaten in vergelijking met fijne granulaten. Ook is deze techniek efficiënter bij de verwijdering van cement rond kalksteengranulaten (59,0 %) dan bij de verwijdering van cement rond silicaatgranulaten (18,7 %). Dit verschil kan verklaard worden door de chemische reactie tussen kalk en cement. Daarnaast toont het onderzoek op proefstukken geproduceerd met betonafval aan dat er een grenswaarde (7,1 kWh/t) bestaat voor het nodige vermogen van de microgolven. Wanneer deze grenswaarde overschrijdt, wordt er geen extra cement meer vrijgemaakt en neemt de verbrijzeling van het beton toe. Wanneer de voorbehandeling bestaat uit verwarming door toepassing van lage energie microgolven en daarna breking in een optimaal proces, ontstaan gerecycleerde granulaten van hoogwaardige kwaliteit [58].



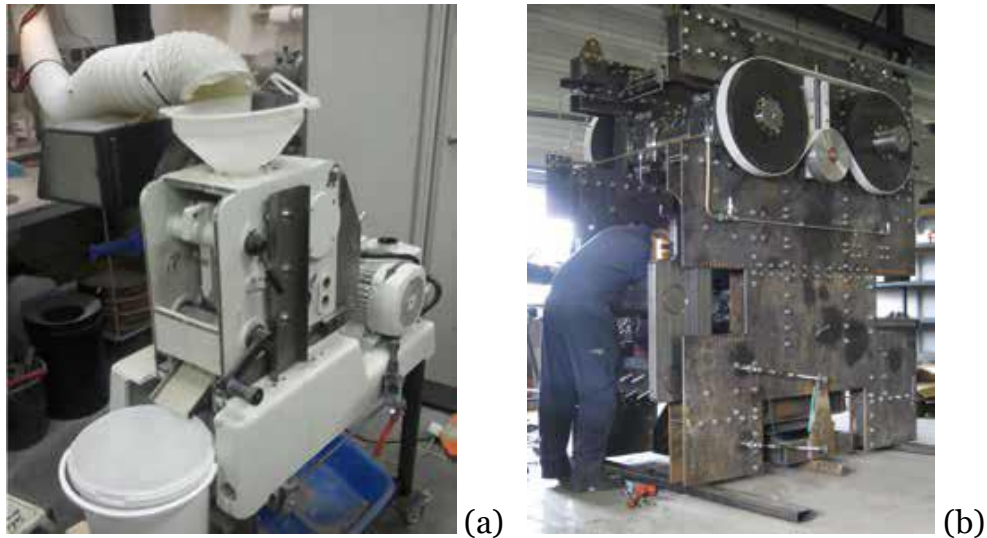
Figuur 5: Voorbeeld van een microgolf-testapparaat (SAIREM) [59].

Een tweede innovatieve recyclagemethode van beton is elektrodynamische verbrijzeling. Deze methode is zeer effectief om beton selectief te breken en kan dus gebruikt worden om hoogwaardige gerecycleerde granulaten te verkrijgen. Daarnaast creëert deze techniek de mogelijkheid om de matrix op zo een manier te scheiden dat beide delen, granulaten en gehydrateerd cement, gerecycleerd worden na één recyclagefase. Het principe van elektrodynamische verbrijzeling steunt op de verschillende elektrische eigenschappen van de materialen en wordt schematische getoond in Figuur 6. Het beton is onderworpen aan een hoog elektrisch veld waarin de verschillende materialen polariseren. Een onevenwicht van elektrische ladingen ontstaat in de overgangszone. Dit verschil in ladingen creëert een plasma, wat leidt tot thermische uitzettingen in de overgangszone en bijkomend een schokgolf doorheen het volledige materiaal. Hierdoor zullen er breuken optreden in de overgangszone en worden de verschillende materialen van elkaar gescheiden [61].



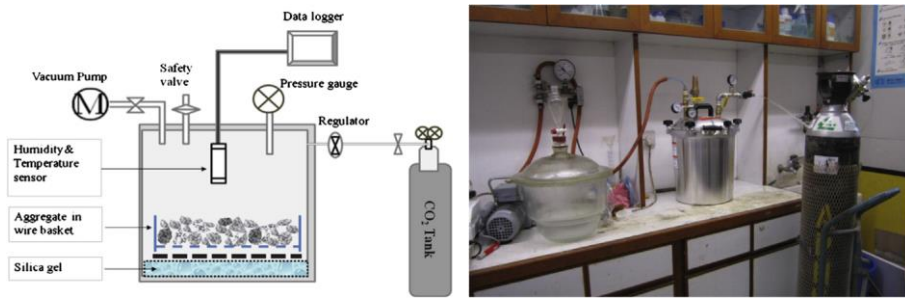
Figuur 6: Schematische voorstelling van de elektrodynamische verbrijzeling van beton [61].

Een breekmethode die hoogwaardige toepassing van gerecycleerd betongranulaat ook mogelijk maakt is *smart crushing*. Deze methode kan het beton op een efficiënte manier scheiden in zand, grind en cement. De gepatenteerde Smart Crusher [62] past een combinatie van malen en breken toe op het sloopbeton en wordt getoond in Figuur 7. Omdat deze innovatieve machine een beperkte grootte heeft, is het noodzakelijk om een voorbreking uit te voeren door een conventionele breker. Om de beschadiging van de granulaten tijdens het breekproces te beperken, wordt de breekkracht aangepast aan de sterkte van de granulaten en het cement. Na onderzoek van gebroken betonproefstukken wordt vastgesteld dat de korrelgrootteverdeling van beton voorgebroken door een kaakbreker en daarna gebroken door de Smart Crusher bijna overeenkomt met de korrelgrootteverdeling van het oorspronkelijk beton. Hieruit volgt dat deze innovatieve machine in staat is om de granulaatmatrix te scheiden van de cementmatrix. Daarnaast wordt de mate van beschadiging van het granulaat bepaald op basis van het gehalte α -kwarts als kwaliteitscriterium. De hoeveelheid α -kwarts wordt bepaald door middel van een thermische analyse. Hieruit blijkt dat de verdeling van het α -kwartsgehalte optimaal is na de breekmethode met de Smart Crusher [63].



Figuur 7: (a) Prototype van de Smart Crusher; (b) De Smart Crusher in wording [63].

Voorgaande recyclagemethoden focussen op het verwijderen van cementpasta op de granulaatoppervlakte om de kwaliteit van gerecycleerd betongranulaat te verbeteren. Daarnaast kan deze kwaliteitsverbetering gebeuren door de slechte eigenschappen van het resterende cement te verbeteren [64]. Carbonatatie verbetert de eigenschappen van gerecycleerd betongranulaat op een efficiënte en milieuvriendelijke wijze. CO₂-gas kan de poriën in het cement binnendringen en daar calciumhydroxide omzetten tot calciumcarbonaat. Deze chemische omzetting verhoogt het reëel volume van het gerecycleerd granulaat met 11,5 % waardoor de porositeit van het cement reduceert [65]. Door deze reactie verhoogt de schijnbare dichtheid en verlaagt de waterabsorptie van het gerecycleerd materiaal. Een voorbeeld van een experimentele opstelling voor dat proces is getoond in Figuur 8. Daarnaast is het effect van carbonatatie op de kwaliteitsverbetering afhankelijk van de carbonatatiecondities. De mate van carbonatatie is weergegeven op basis van het carbonatatiepercentage van het gerecycleerd granulaat. Dat percentage geeft de verhouding van de experimenteel bepaalde en de theoretisch bepaalde massawinst van het granulaat na carbonatatie. Experimenteel onderzoek toont aan dat het carbonatatiepercentage toeneemt bij een langere carbonatateduur. Na 2 uur carbonatatie, is het percentage gestegen tot 25 %, waarna dit percentage nog maar gering stijgt. Daarnaast toont het onderzoek de invloed van de vochtigheidsconditie van de granulaten op het effect van het carbonatatieproces. Drie testporties worden gecarbonateerd met elk een andere vochtigheidsconditie, namelijk (i) gedroogd in een oven op 105 °C gedurende 2 uur, (ii) opgeslagen zonder specifieke behandeling, en (iii) behandeld in water gedurende 2 uur. Deze condities geven na carbonatatie respectievelijk waterabsorptie coëfficiënten van 0,08 %, 3,37 % en 5,03 %. Het materiaal met 3,37 % waterabsorptie leidt tot het hoogste carbonatatiepercentage. Dit geeft aan dat de vochtigheidsconditie van het gerecycleerd betongranulaat bepalend is voor het carbonatatieproces en dus de veroorzaakte kwaliteitsverbetering van het gerecycleerd granulaat [64].



Figuur 8: Voorbeeld van een experimentele opstelling voor CO₂-behandeling [64].

3 Materiaal en methode

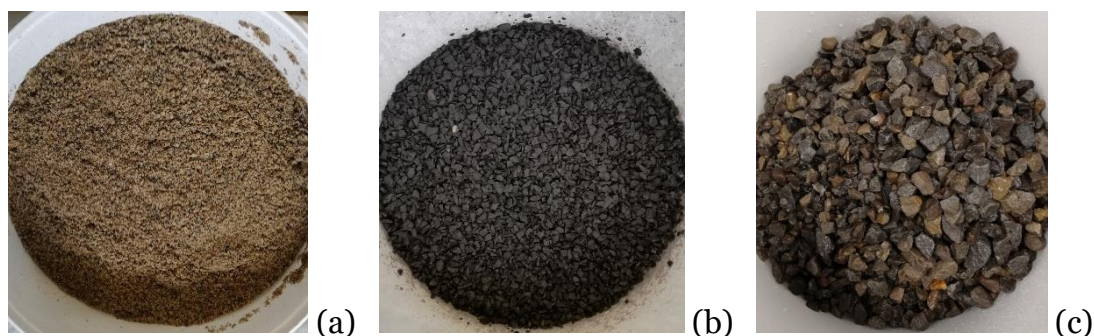
Het onderzoek omvat de recyclage, de carbonatatie en de karakterisatie van (gerecycleerd) betongranulaat. Ten eerste zijn de dichtheid, de waterabsorptie, de weerstand tegen afslijting en de weerstand tegen vorst-dooicycli van het natuurlijk granulaat bepaald. Na de bepaling van deze referentiewaarden volgde de productie, de uitharding en het breekproces van het beton om gerecycleerd betongranulaat te creëren. Dat beton is in verschillende stappen gebroken met behulp van een hydraulische pers en een kaakbreker. Op deze manier ontstond gerecycleerd betongranulaat met een korrelgrootteverdeling vergelijkbaar met die van de oorspronkelijke granulaten. Vervolgens is de granulaatfractie groter dan 3 mm afgezeefd. Alle verdere testen van de materiaaleigenschappen gebeurden op het gerecycleerd materiaal groter dan 3 mm. Daarna volgden verschillende experimenten waarbij de carbonatatiecondities onderzocht werden volgens een experimentele opzet die veranderde afhankelijk van de resultaten. Op die manier werd gezocht naar de optimale carbonatatieparameters.

3.1 Materialen

De natuurlijke granulaten bestaan uit rivierzand en twee verschillende groottefracties van kalksteen. Tabel 3 geeft de exacte types en Figuur 9 geeft een visueel beeld van die materialen. Het betonmengsel bevat granulaten, cement en water. Het toegevoegde cement in het mengsel is portlandcement type CEM I 52,5 N. De mengverhoudingen zijn bepaald op basis van de gewenste korrelgrootteverdeling en zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 3: Lijst van de exacte granulaattypes.

Naam	Code
Silicaatrivierzand 0/3	0/3 G _F 85
Kalksteen 2/7	2/7 G _c 90/15
Kalksteen 7/14	7/14 G _c 85/20



Figuur 9: (a) Rivierzand 0/3; (b) Kalksteen 2/7; (c) Kalksteen 7/14.

Tabel 4: Mengverhoudingen van het geproduceerde beton.

Cement [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	Rivierzand 0/3 [kg/m ³]	Kalksteen 2/7 [kg/m ³]	Kalksteen 7/14 [kg/m ³]
360	205	535	535	710

De gekozen mengverhoudingen geven een watercementfactor van 0,57, wat intentioneel een grote waarde is. De reden hiervoor is om een hoge waterabsorptie te veroorzaken van het gerecycleerd betongranulaat. Op deze manier creëert het onderzoek een ruime toepasbaarheid zelfs in extreme situaties wanneer extra water is toegevoegd aan het mengsel om de mengbaarheid te verbeteren. Het toegevoegd vast materiaal bestaat uit 30 % rivierzand, 30 % kalksteen 2/7 en 40 % kalksteen 7/14.

3.2 Methoden

3.2.1 Recyclage

Ten eerste is de zetmaat van het betonmengsel getest met behulp van de kegel van Abrams volgens EN 12350-2 [66]. Deze eigenschap geeft een goede inschatting van de consistentie en de verwerkbaarheid van het mengsel. De kegel van Abrams, getoond in Figuur 10, is in ongeveer drie gelijke lagen gevuld met nat beton. Elke laag werd vijftientig keer verdicht met een aanstampstok. Daarna is de kegel verticaal omhooggetild en is het hoogteverschil tussen de kegel en het betonmengsel gemeten. Vervolgens is het betonmengsel verdeeld over verschillende containers, die uitgehard zijn gedurende vier weken. Na de uithardingsperiode is de druksterkte bepaald op drie betonkubussen van 15 cm x 15 cm x 15 cm volgens EN 12390-3 [67]. Dat gebeurde door het proefstuk te belasten op een hydraulische drukbank, zoals getoond in Figuur 11. De belasting bij bezwijken van het proefstuk geeft dan de betondruksterkte.



Figuur 10: De kegel van Abrams gebruikt voor de bepaling van de betonconsistentie.



Figuur 11: Hydraulische drukbank gebruikt voor de bepaling van de betondruksterkte.

Vervolgens ontstond gerecycleerd betongranulaat door het breken van het beton. De eerste stap bestond uit het manueel breken met behulp van een hydraulische puntpers, getoond in Figuur 12, tot gebroken betonpuin kleiner dan 9 cm. Het verkregen materiaal ziet er dan uit zoals getoond in Figuur 13. Daarna werd dit betonpuin gebroken in een kaakbreker met een ingestelde opening op 14 mm. De kaakbreker is getoond in Figuur 14 en het gerecycleerd betongranulaat na de eerste breekfase is getoond in Figuur 15. Om een korrelgrootteverdeling te verkrijgen vergelijkbaar met deze van het natuurlijk granulaat, volgde er een tweede breekfase. De volledige hoeveelheid van het gerecycleerd betongranulaat is een tweede keer gebroken in de kaakbreker met de opening ingesteld op 8,5 mm. Door het breken in twee fasen ontstond gerecycleerd betongranulaat met betere mechanische en fysische eigenschappen en weinig naaldvormige elementen, zoals getoond in Figuur 16. Maar door het beton twee keer te breken ontstaat een kleinere hoeveelheid gerecycleerd betongranulaat binnen een bepaalde groottefractie. Hierdoor is initieel een grotere hoeveelheid beton nodig om uiteindelijk dezelfde hoeveelheid herbruikbaar gerecycleerd granulaat te bekomen in de groottefractie van 4 mm tot 20 mm.



Figuur 12: Hydraulische puntpers gebruikt voor het breken van het beton tot stukken kleiner dan 9 cm.



Figuur 13: Gebroken betonpuin met grootte kleiner dan 9 cm.



Figuur 14: Industriële kaakbreker gebruikt voor het breken van het beton tot gerecycleerd betongranulaat.



Figuur 15: Gerecycleerd betongranulaat na de eerste breekfase in de kaakbreker met opening 14 mm.



Figuur 16: Gerecycleerd betongranulaat na de tweede breekfase in de kaakbreker met opening 8,5 mm.

Omdat de fijne fractie van gerecycleerd betongranulaat erg rijk is aan cement, is de kwaliteit hiervan sterk beïnvloed. Daarom focust dit onderzoek zich enkel op het effect van carbonatatie op het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm. Na het breekproces werden de twee fracties gescheiden van elkaar door afzeving op zeefmaat 3 mm zoals getoond in Figuur 17. Het overgebleven gerecycleerd granulaat met een korrelgrootte groter dan 3 mm dat verdeeld is in verschillende emmers, werd daarna gehomogeniseerd in een betonmixer, getoond in Figuur 18. Die grote massa is daarna gewassen, gedroogd op 80 °C en verdeeld in testporties voor verschillende carbonatatie experimenten.



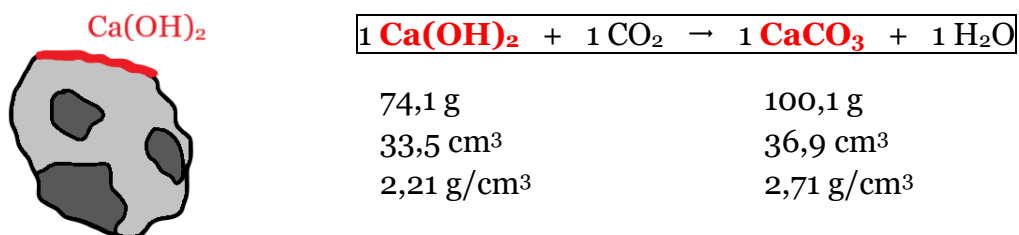
Figuur 17: Afzeving van het gerecycleerd betongranulaat op zeefmaat 3 mm.



Figuur 18: Betonmixer voor het homogeniseren van het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm.

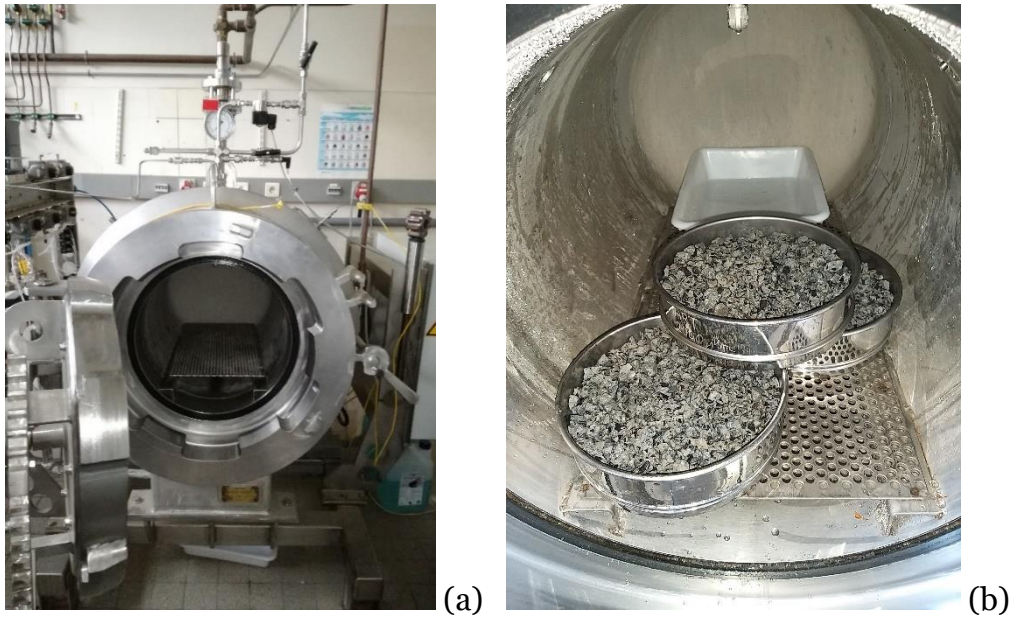
3.2.2 Carbonatatie

Gerecycleerd betongranulaat bestaat uit granulaten omhuld met gehydrateerde cementresten. Dat cement zorgt voor een kwaliteitsverlaging van het gerecycleerd granulaat. Carbonatatie is een chemische reactie die calciumhydroxide in het cement omzet tot calciumcarbonaat door opname van CO₂-gas. Deze reactie en een schematische voorstelling van een gerecycleerd granulaatdeeltje kan gevonden worden in Figuur 19. De molaire massa van calciumhydroxide bedraagt 74,1 g, en die van calciumcarbonaat bedraagt 100,1 g. Ook het molair volume van calciumhydroxide stijgt van 33,4 cm³ naar 36,9 cm³ voor calciumcarbonaat. Vervolgens kan besloten worden dat de dichtheid van het materiaal zal stijgen door carbonatatie. De dichtheid van calciumhydroxide bedraagt 2,21 g/cm³ en de dichtheid van calciumcarbonaat bedraagt 2,71 g/cm³. Een stijging in dichtheid zal leiden tot een daling in waterabsorptie coëfficiënt en micro-Deval coëfficiënt. Hierdoor wordt verwacht dat de kwaliteit van het gerecycleerd granulaat zal toenemen door het te carbonateren.



Figuur 19: Schets van een gerecycleerd betongranulaatdeeltje met calciumhydroxide op de granulaatoppervlakte en de chemische reactie van calciumhydroxide tot calciumcarbonaat.

De uitvoering van elk carbonatatieproces is afhankelijk van de toegepaste condities. De verschillende mogelijke condities tijdens de carbonatatie experimenten zijn weergegeven in Tabel 5. Na de uitvoering van die 12 geplande experimenten, werden nog vijf extra experimenten uitgevoerd met variërende carbonatatiecondities. Deze extra condities zijn weergegeven in Tabel 6. Figuur 20 toont de gebruikte carbonatatiekamer en een voorbeeldopstelling tijdens de uitvoering van een experiment.



Figuur 20: (a) De gebruikte carbonatatiekamer; (b) Een voorbeeldopstelling in de carbonatatiekamer voor een experiment met verhoogde relatieve vochtigheid.

Tabel 5: Lijst van de verschillende carbonatieparameters tijdens de geplande experimenten.

Vochtigheds- conditie VC [-]	Relatieve vochtigheid Φ [-]	CO ₂ -druk p _{CO₂} [bar]	Temperatuur T [°C]	Duur t [uur]
Nat, geacclimatiseerd	Verhoogd, niet-verhoogd	1,	20,	1,
		5	60	4, 24

Eerst werd elke testportie voorbereid volgens een gekozen vochtigheidsconditie. Bij een natte conditie is het carbonatieproces voorafgegaan door de testportie gedurende ongeveer een week onder te dompelen in water. Wanneer de testporties geacclimatiseerd zijn, werden deze 48 uur in een klimaatkamer met een relatieve vochtigheid van 95 % geplaatst. De testportie en de carbonatatiekamer zijn 2 uur voor de start van de carbonatie op gewenste temperatuur gebracht, 20 °C of 60 °C. De relatieve vochtigheid werd eventueel verhoogd tijdens het proces door een polyamide bak gevuld met 500 ml water te plaatsen in de carbonatatiekamer. Het carbonatieproces startte door het injecteren van CO₂ in de kamer tot de gewenste druk van 1 bar of 5 bar bereikt was. Daarna werd die CO₂-druk behouden voor een specifieke tijd. De experimenten zijn uitgevoerd voor 1 uur, 4 uur of 24 uur. Wanneer de gewenste carbonatateduur is afgelopen, werd de carbonatatiekamer gedurende 2 minuten gespoeld met stikstofgas. Vervolgens werd de testportie gedurende 24 uur gedroogd op 80 °C om het resterende of het tijdens carbonatie gevormde water te verdampen.

Tabel 6: Lijst van de verschillende carbonatatieparameters tijdens de extra uitgevoerde experimenten.

Vochtigheids- conditie VC [-]	Relatieve vochtigheid Φ [-]	CO ₂ -druk p _{CO₂} [bar]	Temperatuur T [°C]	Duur t [uur]
Geacclimatiseerd, SSD, oven droog, lucht droog	Verhoogd, niet-verhoogd	1, 5, 20	20, 45	4, 24

De geacclimatiseerde conditie wordt op dezelfde manier voorbereid zoals hierboven beschreven, namelijk bij een relatieve vochtigheid van 95 %. Bij de SSD-vochtigheidsconditie is het carbonatatieproces uitgevoerd op gerecycleerd granulaat met verzadigde poriën met een droog oppervlak (saturated surface dry). Daarnaast wordt de oven droge toestand van de granulaten verkregen door het materiaal in een oven te drogen tot constante massa bereikt is. De lucht droge conditie kan vergeleken worden met een geacclimatiseerde conditie zonder kennis van de specifieke luchtvochtigheid. Vervolgens worden deze granulaatporties gecarbonateerd onder een verhoogde of een niet-verhoogde relatieve vochtigheid en onder een CO₂-druk van 1 bar, 5 bar of 20 bar. Daarnaast worden de testen uitgevoerd bij een temperatuur van 20 °C of 45 °C. Tenslotte wordt het carbonatatieproces uitgevoerd gedurende 4 uur of 24 uur.

De toegepaste carbonatatiecondities zijn afhankelijk van een experimentele opzet die verandert volgens de verkregen resultaten. Na elk carbonatatieproces is het effect van de toegepaste condities bepaald door het testen van de dichtheid, de waterabsorptie en eventueel de micro-Deval en vorst-dooi coëfficiënt. Op basis van die resultaten werden de volgende toegepaste carbonatatiecondities bepaald. Tabel 7 geeft een overzicht van de uitgevoerde experimenten en de toegepaste condities.

Tabel 7: Lijst van alle experimentele carbonatatiecondities.

Experiment	VC [-]	Φ [-]	p _{CO₂} [bar]	T [°C]	t [uur]
1	Nat	Verhoogd	1	20	1
2	Nat	Verhoogd	5	20	1
3	Nat	Verhoogd	1	60	1
4	Nat	Verhoogd	5	60	1
5	Nat	Niet-verhoogd	1	20	4
6	Nat	Niet-verhoogd	5	20	4
7	Nat	Niet-verhoogd	1	20	24
8	Geacclimatiseerd	Verhoogd	1	20	1
9	Geacclimatiseerd	Verhoogd	5	20	1
10	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	1	20	1
11	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	5	20	1
12	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	5	20	4
13	Geacclimatiseerd	Verhoogd	1	20	24
14	SSD	Niet-verhoogd	20	45	24
15	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	20	45	24
16	Oven droog	Niet-verhoogd	5	20	4
17	Lucht droog	Niet-verhoogd	5	20	4

De eerste vier carbonatatie experimenten zijn uitgevoerd op nat gerecycleerd betongranulaat in een omgeving met verhoogde relatieve vochtigheid. Er is gestart met een CO₂-druk van 1 bar, een temperatuur van 20 °C en een carbonatatie duur van 1 uur. Het tweede experiment is uitgevoerd onder 5 bar om het effect van de CO₂-druk te bepalen. Vervolgens is het effect van de temperatuur bepaald door tijdens experiment 3 en 4 de temperatuur te verhogen tot 60 °C. Wegens tegenvallende resultaten van voorgaande experimenten, werd beslist om de temperatuur terug te brengen naar 20 °C en de relatieve vochtigheid niet te versterken tijdens het carbonatatieproces. De experimenten zijn opnieuw uitgevoerd voor een verlengde carbonatatie duur van 4 uur onder 1 bar en 5 bar, respectievelijk weergegeven in experiment 5 en 6. Onder de condities van experiment 5 werd nog een test uitgevoerd voor een carbonatatie duur van 24 uur. Dat wordt weergegeven als experiment 7 en controleert of het proces meer tijd nodig had om de testportie volledig te carbonateren. Al de voorgaande experimenten hadden tegenvallende resultaten waardoor de micro-Deval testen tijdelijk achterwege gelaten werden om de focus te leggen op het verbeteren van de waterabsorptie.

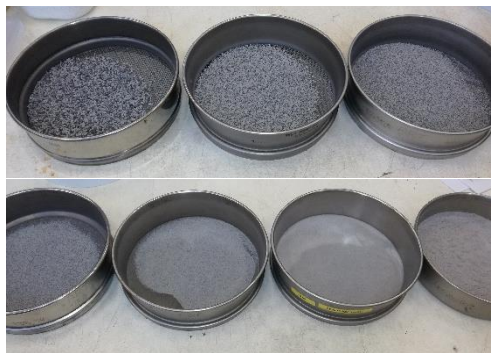
Vervolgens is beslist om het gerecycleerd granulaat te acclimatiseren bij 95 % relatieve vochtigheid gedurende 48 uur. Daarna is dit granulaat gedurende 1 uur gecarbonateerd onder een verhoogde relatieve vochtigheid en bij 20 °C in de carbonatatiekamer. Dat proces gebeurde onder 1 bar en 5 bar, respectievelijk in experiment 8 en 9. Die twee experimenten zijn daarna herhaald bij niet-verhoogde relatieve vochtigheid, respectievelijk experiment 10 en 11 genoemd. Deze carbonatatiecondities verbeteren de resultaten aanzienlijk. De invloed van de carbonatatie duur werd bepaald in experiment 12 bij dezelfde condities als experiment 11 waarbij de duur is verlengd van 1 uur tot 4 uur.

De parameters van de extra experimenten werden gekozen zonder een logische redenering. Experiment 13 is een herhaling van experiment 8 maar de carbonatatie duur werd verhoogd van 1 uur tot 24 uur. Vervolgens zijn experiment 14 en experiment 15 uitgevoerd bij extreme condities. De CO₂-druk bedraagt bij beide experimenten 20 bar en de temperatuur in de carbonatatiekamer werd ingesteld op 45 °C. Daarnaast zijn die twee processen uitgevoerd gedurende 24 uur. De twee laatste experimenten werden terug uitgevoerd bij een lagere CO₂-druk van 5 bar, een temperatuur van 20 °C en de carbonatatie duur werd terug verlaagd tot 4 uur. De bijzonderheden van experiment 16 en experiment 17 zijn de vochtigheidscondities van het granulaat voor carbonatatie. Respectievelijk zijn deze condities oven droog en lucht droog.

3.2.3 Karakterisatie

De korrelgrootteverdeling van het natuurlijk granulaat en het gerecycleerd granulaat werd bepaald op basis van de zeefmethode [46]. Voor het natuurlijk granulaat gebeurt deze bepaling apart voor de drie verschillende groottefracties in het geproduceerde beton, namelijk rivierzand 0/3, kalksteen 2/7 en kalksteen 7/14. De granulaattypes zijn gewassen op een zeef van 0,063 mm en daarna gedroogd op 80 °C. Voor de korrelgrootteverdeling van fractie 0/3 bestaat de zeefkolom uit zeefmaten tussen 0,063 mm en 4 mm. De zeefkolom voor de bepaling bij fractie 2/7 bestaat uit zeefmaten tussen 0,5 mm en 10 mm. Daarnaast bevinden de zeefmaten voor fractie 7/14 zich tussen 0,5 mm en 16 mm. Na het mechanisch schudden van de kolom, werd de massa per zeef gewogen. Het percentage van doorgelaten deeltjes per zeefmaat geeft de korrelgrootteverdeling.

De bepaling van de korrelgrootteverdeling na recyclage gebeurde voor twee verschillende fracties, namelijk die kleiner dan 3 mm en die groter dan 3 mm. De fijne fractie werd niet gewassen voor het bepalen van de korrelgrootteverdeling omdat die rijk is aan cement. De fractie van 3 mm tot 14 mm is gewassen op een zeef van 2 mm en daarna gedroogd op 80 °C. De zeefkolom voor de fijne fractie bestaat uit zeefmaten tussen 0,063 mm en 4 mm. Daarnaast bevinden de zeefmaten voor de fractie groter dan 3 mm zich tussen 2 mm en 20 mm. De kolom werd mechanisch geschud waarna de massa per zeef is gewogen. Het percentage van doorgelaten deeltjes per zeefmaat geeft de korrelgrootteverdeling. Een visueel beeld van de korrelgrootteverdeling van de fractie kleiner en groter dan 3 mm van het gerecycleerd betongranulaat wordt getoond in respectievelijk Figuur 21 en Figuur 22.



Figuur 21: Zeefmethode toegepast op het gerecycleerd betongranulaat kleiner dan 3 mm.



Figuur 22: Zeefmethode toegepast op het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm.

Het natuurlijk granulaat, het gerecycleerd granulaat en elk gecarbonateerd experiment werden getest op de dichtheid en de waterabsorptie na 24 uur volgens EN 1097-6 [47]. Wanneer voldoende materiaal beschikbaar was, zijn deze testen in duplicaat uitgevoerd. Elke testportie is eerst behandeld in water gedurende ongeveer 24 uur. Daarna werd de pyknometer gevuld met water en gewogen. Vervolgens werd de pyknometer gevuld met de testportie en water en opnieuw gewogen zoals weergegeven in Figuur 23. Tijdens deze gewichtsmetingen met behulp van de pyknometer werd ook telkens de watertemperatuur gemeten. De volgende stappen zijn afhankelijk van de grootte van de te testen granulaten. In het geval van een korrelgrootte tussen 4 mm en 31,5 mm is het materiaal overgebracht op papieren doeken, getoond in Figuur 24, en gedroogd tot SSD-conditie. Er werd beslist dat de SSD-conditie bereikt is wanneer er visueel geen waterrestanten op de granulaatoppervlakte overblijven maar de granulaten wel nog een vochtig uitzicht hebben. Bij granulaten met een korrelgrootte tussen 0,063 mm en 4 mm werd het materiaal overgebracht naar een bak waarin het gedroogd werd met behulp van een warme luchtstroom. De SSD-conditie werd tijdens het drogen regelmatig gecontroleerd met behulp van een metalen kegel. Dat principe voor het drogen van fijn granulaat is weergegeven in Figuur 25. In beide gevallen werd de massa van de testportie gewogen in SSD-conditie en na het drogen in een oven tot constante massa. Daarna zijn de schijnbare dichtheid, de SSD-dichtheid en de waterabsorptie berekend op basis van de vier gemeten massa's en de waterdichtheid die afhankelijk is van de watertemperatuur.



Figuur 23: Pyknometer gebruikt bij de bepaling van de waterabsorptie en de dichtheid (inhoud 1 l).



Figuur 24: Papieren doeken gebruikt voor het drogen van het granulaat groter dan 4 mm tot SSD-conditie.



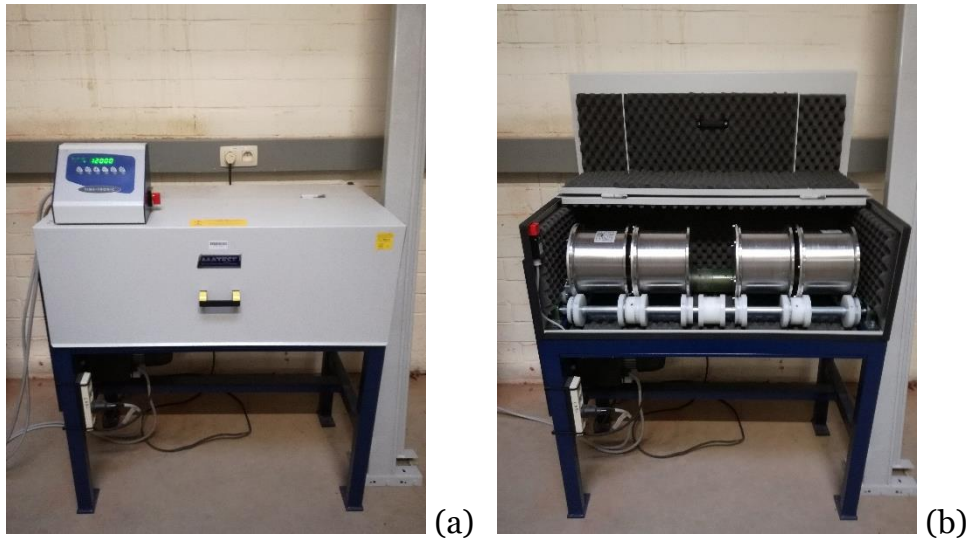
(a)



(b)

Figuur 25: Materialen gebruikt voor het drogen van het granulaat kleiner dan 4 mm tot SSD-conditie (a) Hete luchtblazer gebruikt voor het drogen; (b) Metalen kegel gebruikt voor bepaling van de SSD-conditie.

De weerstand tegen afslijting is bepaald volgens EN 1097-1 [48] voor fractie 7/14 van het natuurlijk granulaat en voor de fractie groter dan 3 mm van het gerecycleerd granulaat. De micro-Deval coëfficiënten van de gecarbonateerde testporties zijn ook getest voor enkele experimenten, namelijk experiment 1 tot en met 4 en experiment 10 tot en met 12. Die testen werden in duplicaat uitgevoerd behalve bij experiment 1 door een tekort aan materiaal binnen de noodzakelijke groottefractie. Het materiaal is eerst gewassen en gedroogd en heeft een korrelgrootte tussen 10 mm en 14 mm. Om de testportie samen te stellen volgens de juiste massa's van groottefracties, is eerst een zieving op een zeefkolom van 10 mm, 12,5 mm en 14 mm noodzakelijk. 65 % van de testportie van (500 ± 2) g moet zeefmaat 12,5 mm passeren. Vervolgens zijn de trommels van het micro-Deval apparaat, getoond in Figuur 26, gevuld met de testportie, de abrasieve toevoegstof en $(2,5 \pm 0,05)$ l water. Het abrasief materiaal bestaat per testportie uit (5.000 ± 5) g stalen ballen met diameter $(10 \pm 0,5)$ mm zoals te zien in Figuur 27. Na het afsluiten en plaatsens van de trommels in het apparaat, ondergaan die (12.000 ± 10) rotaties aan een snelheid van (100 ± 5) min⁻¹. Wanneer de testporties het aantal rotaties hebben ondergaan, werden de stalen ballen verwijderd en de testportie gezeefd op een zeef van 1,6 mm. Die zeefrest werd gewassen, gedroogd en gewogen waarna de micro-Deval coëfficiënt bepaald is als de massaverhouding voor en na de test.



Figuur 26: Micro-Deval apparaat gebruikt voor de bepaling van de weerstand tegen afslijting van granulaatfractie 10 mm tot 14 mm.



Figuur 27: Stalen ballen met diameter $10 \pm 0,5$ mm gebruikt voor de micro-Deval test.

De vorst-dooicoëfficiënt werd bepaald voor drie verschillende granulaattypes, namelijk kalksteen 7/14, gerecycleerd granulaat groter dan 3 mm en gecarbonateerd granulaat uit experiment 12. Voor elk granulaatype zijn drie testporties noodzakelijk in de groottefractie van 8 mm tot 16 mm. Uit de procedure volgt dat elke testportie bestaat uit (2000 ± 100) g materiaal. Vervolgens werden metalen containers, zoals getoond in Figuur 28, gevuld met de verschillende testporties en werd water toegevoegd 24 uur voor de start van de test. Daarna zijn alle testporties in een vorst-dooikast geplaatst en onderworpen aan tien vorst-dooicycli volgens EN 1367-1 [50]. De vorst-dooikast is getoond in Figuur 29. Hierbij moet vermeld worden dat de dooifasen vermoedelijk niet volledig voltooid werden omdat de testporties nog een bevroren kern hadden na de tiende cyclus. Door afwezigheid van een verbonden computer kon de doorlopen temperatuurcurve in de testporties niet gecontroleerd worden. Desondanks de onzekerheid van de correcte vorst-dooicycli zijn de resultaten wel representatief omdat alle testporties dezelfde cycli doorlopen hebben. Na voltooiing van de tiende cyclus is elke testportie gewassen en gezeefd op een

zeefmaat die de helft is van de kleinste korrelgroottediameter. Bij de gebruikte groottefractie van 8 mm tot 16 mm betekent dit een zeefmaat van 4 mm. Na droging van het materiaal is elke testportie gewogen waarna de vorst-dooicoëfficiënt bepaald is als de massaverhouding voor en na de test.



Figuur 28: Metalen container gebruikt voor de vorst-dooitest (inhoud 2 l).



Figuur 29: Vorst-dooikast gebruikt voor de bepaling van de weerstand tegen vorst-dooicycli van granulaatfractie 8 mm tot 16 mm.

3.3 Statistische analyse

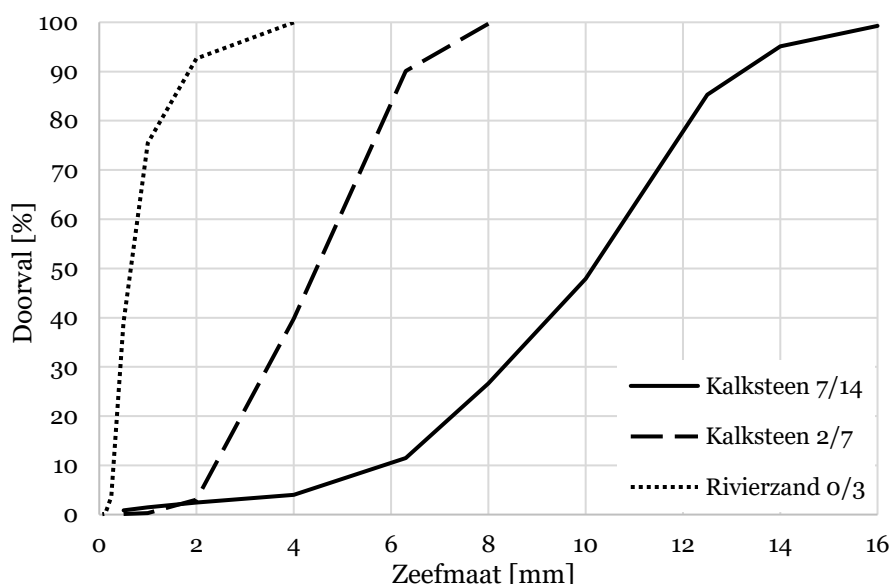
Verschillende testen zijn in duplicaat uitgevoerd waardoor er een gemiddelde waarde wordt gegeven van de twee resultaten. Bij elke gemiddelde waarde is een foutmarge gegeven die het 90 % betrouwbaarheidsinterval aanduidt. Wanneer een test niet in duplicaat is uitgevoerd, wordt enkel dat resultaat weergegeven in de tabellen. In de grafieken is de gemiddelde waarde van de andere foutmarges bepaald om een foutbalk te creëren voor het resultaat dat maar één waarde heeft.

Daarnaast worden de resultaten geanalyseerd met behulp van de p-waarden om te bepalen of een verandering significant is. Die p-waarden worden berekend door de t-test van twee gepaarde steekproeven met gelijke varianties uit te voeren op de te vergelijken resultaten. Wanneer de p-waarde kleiner dan 0,1 is, kan het verschil als significant beschouwd worden. Een p-waarde groter dan 0,1 geeft aan dat er geen significant verschil tussen de waarden bestaat. In Bijlage A: Lijst van de berekende p-waarden kan een lijst met alle berekende p-waarden gevonden worden.

4 Resultaten en discussie

4.1 Natuurlijke granulaten

De geometrische, mechanische en fysische eigenschappen van de natuurlijke granulaten zijn bepaald als referentiewaarden voor deze na recyclage van dit granulaat. Figuur 30 toont de korrelgrootteverdeling van de drie verschillende granulaattypes. De SSD en schijnbare dichtheid, waterabsorptiecoëfficiënt, micro-Deval coëfficiënt en vorst-dooicoëfficiënt zijn weergegeven in Tabel 8. De gedetailleerde resultaten van de testen op het natuurlijk granulaat kunnen teruggevonden worden in Bijlage B.1 Natuurlijke granulaten.



Figuur 30: Korrelgrootteverdeling van de drie verschillende types van de natuurlijke granulaten.

Tabel 8: Eigenschappen van de natuurlijke granulaten (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).

	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]	Micro-Deval coëfficiënt [%]	Vorst-dooi coëfficiënt [%]
Kalksteen 7/14	2687	2716	0,64	15,98 ± 0,52	0,33 ± 0,12
Kalksteen 2/7	2665	2702	0,82	-	-
Rivierzand 0/3	2644 ± 3,20	2660 ± 3,20	0,37 ± 0,11	-	-

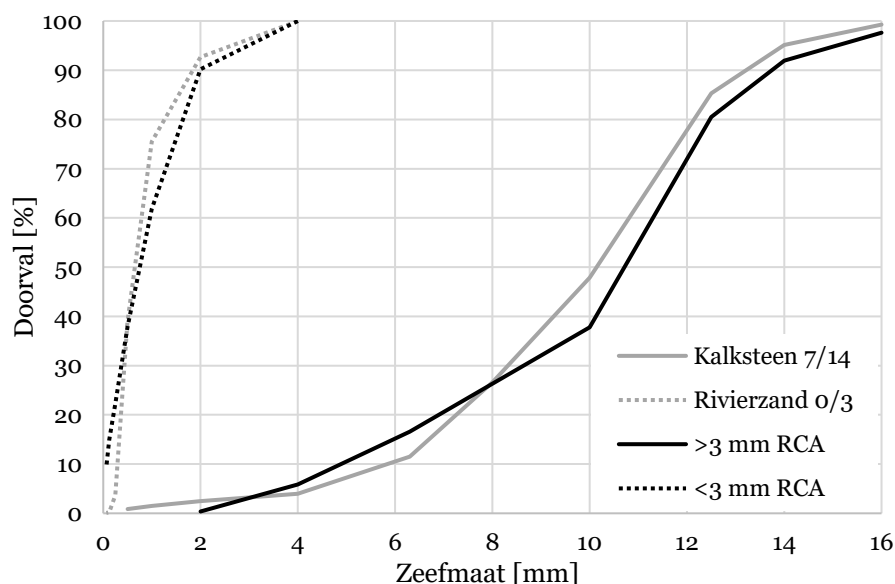
De waterabsorptie voor de drie granulaattypes is lager dan 1,0 %. De micro-Deval en vorst-dooifactoren zijn niet bepaald voor kalksteen fractie 2/7 en rivierzand 0/3 omdat deze waarden enkel van toepassing zijn in groottefractie 7/14. De micro-Deval coëfficiënt heeft een waarde van 15,98 ± 0,52 % en de vorst-dooi coëfficiënt heeft een waarde van 0,33 ± 0,12 %.

Daarnaast is de zetmaat van het betonmengsel samengesteld met de verschillende granulaattypes getest met de kegel van Abrams en die bedraagt 180 mm. Die waarde geeft aan dat het beton behoort tot consistentieklasse S4. Na de uithardingstijd is ook de druksterkte van dit beton getest. Hieruit volgt dat het beton een druksterkte heeft van 57,6 MPa. Uit die resultaten kan besloten worden dat het gebruikte beton in dit onderzoek een hoge sterkte en een zeer hoge plasticiteit heeft. De vloeibaarheid is intentioneel hoog gekozen zodat dit onderzoek ruim toepasbaar is, zelfs in situaties waar extra water toegevoegd wordt om de mengbaarheid te verbeteren. Daarnaast wordt sterk gerecycleerd betongranulaat gecreëerd door een sterk beton te breken. Praktisch moet hier al aandacht aan besteed worden bij het sloopproces. Wanneer sterk gerecycleerd granulaat gewenst is, zal er selectief gesloopt moeten worden om het recyclageproces te starten met sterk beton.

4.2 Gerecycleerde granulaten

De korrelgrootteverdeling van de groottefracties kleiner en groter dan 3 mm van het gerecycleerd betongranulaat zijn weergegeven in Figuur 31. Ook de korrelgrootteverdeling van de overeenkomende groottefracties van het natuurlijk granulaat zijn hier getoond. Tabel 9 geeft de SSD en de schijnbare dichtheid, de waterabsorptiecoëfficiënt, de micro-Deval coëfficiënt en de vorst-dooicoëfficiënt van het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm. In Bijlage B.2

Gerecycleerde granulaten kunnen alle gedetailleerde resultaten gevonden worden.

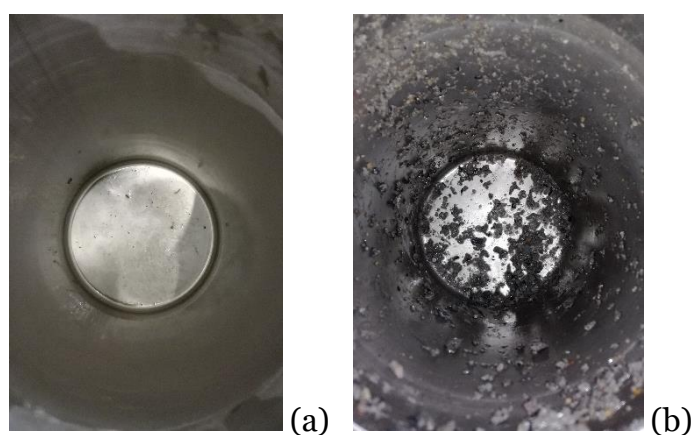


Figuur 31: Korrelgrootteverdeling van de twee verschillende groottefracties van het gerecycleerd betongranulaat (RCA) in vergelijking met de korrelgrootteverdeling van de natuurlijke granulaten.

Tabel 9: Eigenschappen van het gerecycleerd betongranulaat (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).

	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]	Micro-Deval coëfficiënt [%]	Vorst-dooi coëfficiënt [%]
Fractie > 3 mm	2458 ± 9,50	2663 ± 15,80	5,26 ± 0,12	26,28 ± 2,62	26,47 ± 0,64

Door de gekozen breekfasen ontstaat gerecycleerd betongranulaat met een gelijkaardige korrelgrootteverdeling dan die van het natuurlijk granulaat. Hierdoor is het mogelijk om de resultaten van de geometrische, mechanische en fysische eigenschappen met elkaar te vergelijken zonder het effect van korrelgrootteverschillen. Het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm heeft een waterabsorptie van $5,26 \pm 0,12$ % in vergelijking met $0,64$ % voor natuurlijke kalksteen 7/14. Dat is een gemiddelde toename van 727 % voor de waterabsorptie voor en na recyclage. Toch blijft de waterabsorptie onder de normwaarde van 10 % zoals besproken in de literatuurstudie. Daarnaast bedraagt de weerstand tegen afslijting $26,28 \pm 2,62$ % ten opzichte van $15,98 \pm 0,52$ % voor kalksteen 7/14. De micro-Deval coëfficiënt neemt gemiddeld dus 64 % toe door recyclage. De vorst-dooi coëfficiënt van het gerecycleerd granulaat bedraagt $26,47 \pm 0,64$ %. Dat geeft aan dat de vorst-dooi coëfficiënt gemiddeld stijgt met een factor 80 ten opzichte van het natuurlijk granulaat met een vorst-dooi coëfficiënt van $0,33 \pm 0,12$ %. Dat is een zeer hoge toename van de vorst-dooi coëfficiënt maar aangezien dat alle drie de testporties zo een hoge waarde vertonen, kan die als betrouwbaar beschouwd worden. Die hoge waarde kan verklaard worden door de grote hoeveelheid resterend cement op de granulaatoppervlakte. Dat cement verhoogt de waterabsorptie van het gerecycleerd granulaat waardoor er meer water aanwezig is in de poriën. Wanneer het water bevriest, ontstaan scheuren in de cementrijke granulaatoppervlakte. De tien herhalingen van de vorst-dooicyclus leiden uiteindelijk tot afbrokkelingen van de granulaatoppervlakte van het gerecycleerd granulaat. Dat wordt bevestigd door een vergelijking van de metalen containers na de uitvoering van de vorst-dooitest, zoals getoond in Figuur 32.



Figuur 32: (a) Metalen container na uitvoering van de vorst-dooitest op het natuurlijk granulaat; (b) Metalen container na uitvoering van de vorst-dooitest op het gerecycleerd granulaat.

4.3 Gecarbonateerde granulaten

Er kan worden aangenomen dat de vorm van de gerecycleerde granulaten niet verandert na carbonatatie. Zoals vermeld in de literatuurstudie wordt bij veel recyclagetechnieken het cement op de granulaatoppervlakte verwijderd. Hierdoor zal de vorm van het granulaat terug de oorspronkelijke vorm benaderen. Dit is bij carbonatatie echter niet het geval want het cement wordt niet verwijderd maar chemisch behandeld. Het opgewaardeerd gerecycleerd granulaat zal dus nog steeds een hoekige vorm en grove oppervlakte hebben.

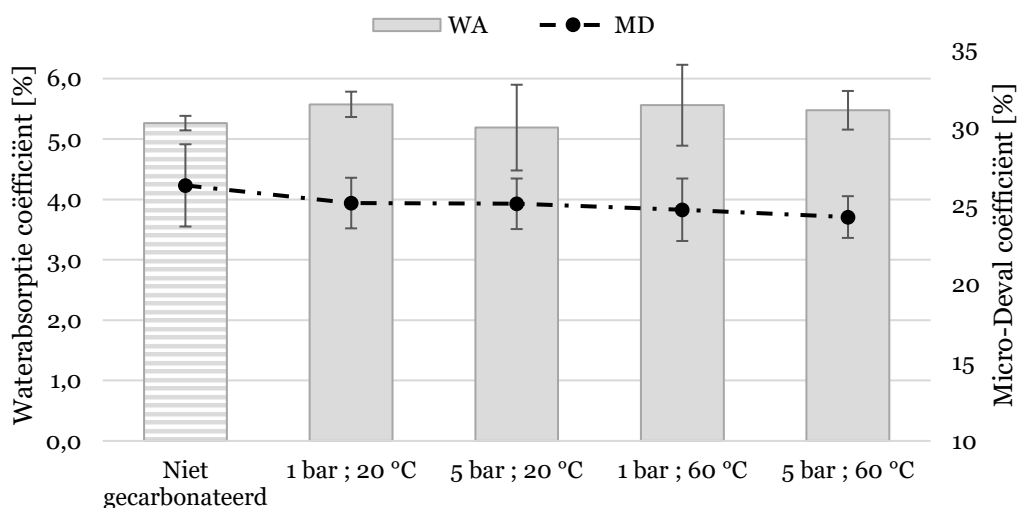
Tabel 10 geeft de verschillende carbonatatiecondities en de resultaten voor de SSD en de schijnbare dichtheid en de waterabsorptie van de experimenten. De eerste vier en de laatste drie experimenten geven ook een waarde voor de micro-Deval coëfficiënt. Daarnaast wordt er enkel een waarde getest voor de vorstdooicoëfficiënt bij de optimale carbonatatieparameters van experiment 12. De gedetailleerde resultaten van alle testen op gecarbonateerd granulaat zijn weergegeven in Bijlage B.3 Gecarbonateerde granulaten.

Tabel 10: Eigenschappen van alle gecarbonateerde experimenten (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).

Experiment	VC [-]	Φ [-]	pCO ₂ [bar]	T [°C]	t [uur]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]	Micro-Deval coëfficiënt [%]	Vorst-dooi coëfficiënt [%]
1	Nat	Verhoogd	1	20	1	2467 ± 66,30	2687 ± 94,70	5,57 ± 0,21	25,15	-
2	Nat	Verhoogd	5	20	1	2472 ± 12,60	2678 ± 15,80	5,19 ± 0,71	25,11 ± 1,61	-
3	Nat	Verhoogd	1	60	1	2464 ± 6,30	2683 ± 18,90	5,56 ± 0,67	24,73 ± 1,99	-
4	Nat	Verhoogd	5	60	1	2464 ± 22,10	2679 ± 15,80	5,48 ± 0,32	24,26 ± 1,33	-
5	Nat	Niet-verhoogd	1	20	4	2454 ± 15,80	2676 ± 3,20	5,70 ± 0,64	-	-
6	Nat	Niet-verhoogd	5	20	4	2472 ± 66,30	2688 ± 63,10	5,45 ± 0,45	-	-
7	Nat	Niet-verhoogd	1	20	24	2449	2687	6,09	-	-
8	Geacclimatiseerd	Verhoogd	1	20	1	2468 ± 9,50	2678 ± 3,20	5,34 ± 0,22	-	-
9	Geacclimatiseerd	Verhoogd	5	20	1	2465 ± 22,10	2677 ± 12,60	5,41 ± 0,37	-	-
10	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	1	20	1	2479 ± 3,20	2678 ± 0,00	5,03 ± 0,16	24,15 ± 1,99	-
11	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	5	20	1	2496 ± 6,30	2670 ± 28,40	4,32 ± 0,51	21,50 ± 1,10	-
12	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	5	20	4	2505	2675	4,21	22,21 ± 1,10	8,78 ± 7,49

De resultaten van de waterabsorptie coëfficiënten van gecarbonateerde granulaten met een natte vochtigheidsconditie kunnen vergeleken worden met de waarden uit het experimenteel onderzoek beschreven in de literatuurstudie [64]. De waterabsorptie coëfficiënt na carbonatatie van een testportie die behandeld werd in water gedurende 2 uur bedraagt 5,03 %. Die waarde komt redelijk goed overeen met de gevonden waarden in dit onderzoek, waarvan de gemiddelde waarde ongeveer 5,60 % bedraagt. Het is te verwachten dat de waterabsorptie coëfficiënt hoger is dan die uit het experimenteel onderzoek in de literatuurstudie omdat de duur van de voorbehandeling in water veel langer is.

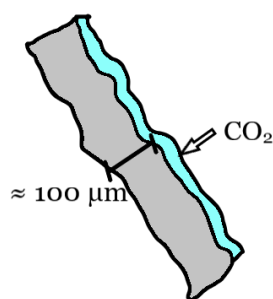
De waterabsorptie en micro-Deval coëfficiënten zijn beiden weergegeven in Figuur 33 voor de eerste vier experimenten. Die resultaten geven de waarden na 1 uur carbonatatie op natte gerecycleerde granulaten waarbij de relatieve vochtigheid verhoogd wordt in de carbonatatie ruimte. De waarden voor het niet-gecarbonateerde granulaat zijn ook weergegeven als referentie.



Figuur 33: Waterabsorptie coëfficiënten [%] en micro-Deval coëfficiënten [%] van gereycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "nat", relatieve vochtigheid "verhoogd" en tijd "1 uur" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).

Figuur 33 geeft duidelijk aan dat carbonatatie in natte conditie geen verbetering in waterabsorptie veroorzaakt. In experiment 1 en experiment 4 stijgt de waterabsorptie coëfficiënt zelfs significant, de p-waarden bedragen respectievelijk 0,0154 en 0,0597. Ondanks dat de waterabsorptie niet verbetert door die carbonatie experimenten, wordt er wel ontdekt dat het verhogen van de CO₂-druk van 1 bar naar 5 bar leidt tot een significant verschil in waterabsorptie. De vergelijking tussen de waterabsorptie coëfficiënten van experiment 1 en experiment 2 geeft een p-waarde van 0,0809. Verder zorgt een verandering in temperatuur niet voor een significant verschil. De p-waarden van de vergelijking tussen experiment 1 en experiment 3 bedraagt 0,9061 en die tussen experiment 2 en experiment 4 bedraagt 0,1444.

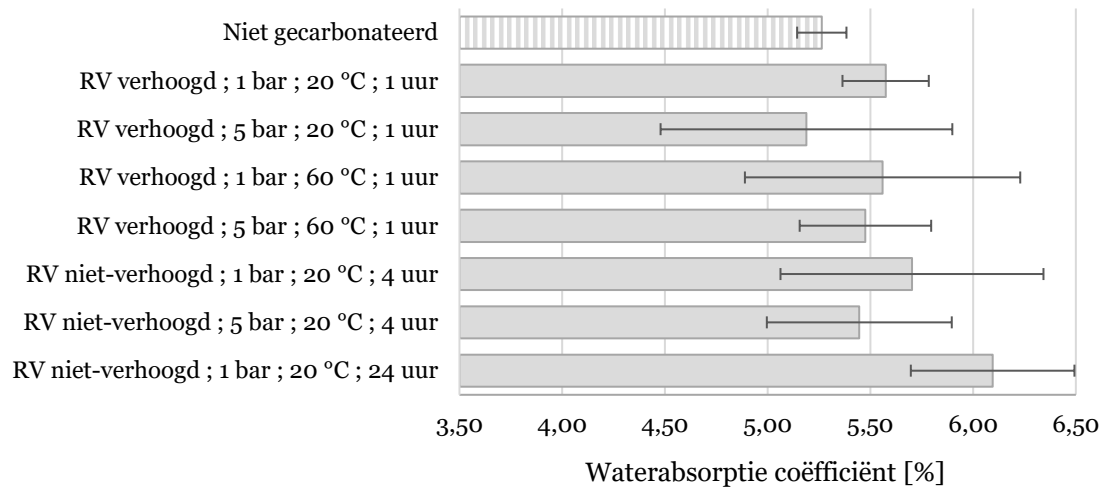
De tegenvallende resultaten na carbonatatie in natte conditie kunnen verklaard worden doordat het onderdompelen van gerecycleerd granulaat (zichtbare) uitloging van calciumhydroxide veroorzaakt. Door de uitloging van calciumhydroxide in het cement op de granulaatoppervlakte verhoogt de porositeit van het gerecycleerd granulaat waardoor ook de waterabsorptie verhoogt. Daarnaast komt extra water vrij bij de omzetting van calciumhydroxide naar calciumcarbonaat waardoor het calciumhydroxide verder uitloopt tijdens carbonatatie. Dat verschijnsel is bevestigd door de vorming van troebele waterrestanten op de bodem van de carbonatatiekamer. Bijkomend zorgt water op de granulaatoppervlakte voor een barrière waar het CO₂-gas moeilijk door kan. Door een laag water op de granulaatoppervlakte kan het onderliggende cement niet of niet voldoende diep gecarbonateerd worden zoals voorgesteld in Figuur 34.



Figuur 34: Schematische voorstelling van een hinderend waterlaagje op de granulaatoppervlakte.

Figuur 33 toont visueel een geringe daling in micro-Deval coëfficiënten maar enkel de coëfficiënten van experiment 3 en experiment 4 dalen significant ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. De p-waarden bedragen respectievelijk 0,0969 en 0,0494. Daarnaast is deze verbetering in weerstand tegen afslijting niet betekenisvol wanneer de waterabsorptie coëfficiënt niet verbeterd. Verder leiden veranderingen in andere carbonatatieparameters, namelijk de CO₂-druk en de temperatuur niet tot significante verschillen in micro-Deval coëfficiënten.

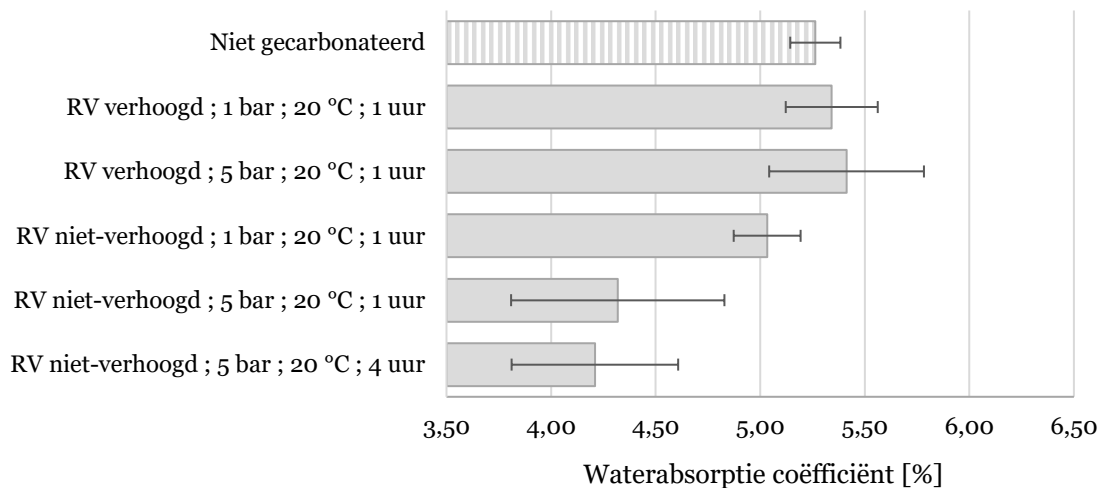
Bovenstaande resultaten zetten aan tot verder onderzoek van de invloed van vocht op carbonatatie. Bijgevolg is de relatieve vochtigheid in de carbonatatiekamer gewijzigd van verhoogd naar niet-verhoogd en is de carbonatatiekamer verlengd van 1 uur tot 4 uur. Figuur 35 geeft de resultaten voor de waterabsorptie van alle experimenten op nat gerecycleerd granulaat. Deze figuur toont de invloed van relatieve vochtigheid en carbonatatiekamer bij verschillende CO₂-druk en temperatuur. Als referentie bevindt de waterabsorptie coëfficiënt van het niet-gecarbonateerd granulaat zich ook in deze figuur.



Figuur 35: Waterabsorptie coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "nat" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).

Ook deze resultaten geven geen verbeterde waarden voor de waterabsorptie coëfficiënt. Experiment 5 en experiment 7 veroorzaken zelfs een significante stijging in waterabsorptie ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. De p-waarden van die toename bedragen respectievelijk 0,0508 en 0,0258. Daarnaast lijkt een langere carbonatatieperiode de waterabsorptie coëfficiënt te verhogen maar die toename is echter niet significant. Verder kan er geen significant verschil gevonden worden tussen de verschillende carbonatieparameters.

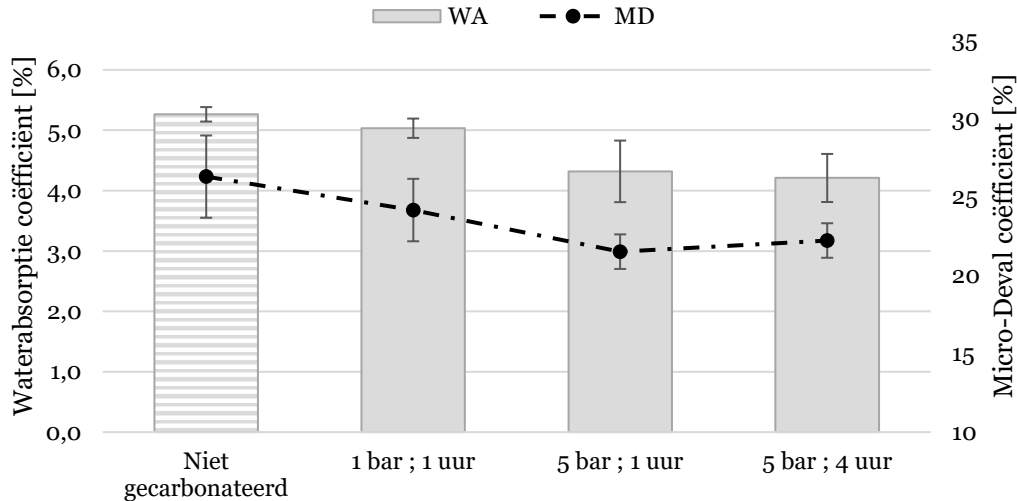
Vervolgens wordt de aanwezigheid van vocht tijdens carbonatie verder gelimiteerd door de experimenten uit te voeren op geacclimatiseerd granulaat in plaats van nat granulaat. De waterabsorptie coëfficiënten na carbonatie van granulaat geacclimatiseerd op 95 % relatieve vochtigheid zijn weergegeven in Figuur 36. In deze figuur is de invloed van CO₂-druk, relatieve vochtigheid en carbonatatieperiode getoond. Bovendien is hier ook de referentiewaarde van het niet-gecarbonateerde granulaat weergegeven.



Figuur 36: Waterabsorptie coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "geacclimatiseerd" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).

Vergelijkbaar met de carbonatatie van nat granulaat, is duidelijk dat carbonatatie van geacclimatiseerd granulaat in een omgeving met verhoogde relatieve vochtigheid de waterabsorptie niet verbetert. De waterabsorptie coëfficiënt na carbonatatie op geacclimatiseerd granulaat verlaagt echter wel in een droge omgeving. Experiment 10, experiment 11 en experiment 12 veroorzaken alle drie een significante daling in waterabsorptie coëfficiënt ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. De p-waarden bedragen respectievelijk 0,0181, 0,0076 en 0,0203. Deze resultaten geven de doorbraak in het optimale effect van de carbonatatiecondities. De vergelijking tussen experiment 8 en experiment 10, waar enkel de relatieve vochtigheid verschilt, bevestigt dat de waterabsorptie coëfficiënt significant daalt bij een niet-verhoogde relatieve vochtigheid. Deze bevestiging wordt ook gevonden tussen experiment 9 en experiment 11. De p-waarden van deze twee vergelijkingen bedragen respectievelijk 0,0185 en 0,0082. Verder kan net zoals bij de natte granulaten afgeleid worden dat een toename in CO₂-druk van 1 bar naar 5 bar, in experiment 10 en experiment 11, een significante verbetering veroorzaakt in de waterabsorptie coëfficiënt. De p-waarde van deze vergelijking bedraagt 0,0135.

Figuur 37 geeft de waterabsorptie en de micro-Deval coëfficiënten voor de drie experimenten met de beste resultaten. Dat zijn de experimenten uitgevoerd op geacclimatiseerde granulaten waarbij de relatieve vochtigheid niet wordt verhoogd tijdens het carbonatatieproces. De referentiewaarden van het niet-gecarbonateerd granulaat zijn hier opnieuw weergegeven om een vergelijking te kunnen maken.



Figuur 37: Waterabsorptie coëfficiënten [%] en micro-Deval coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd met vochtigheidsconditie "geacclimatiseerd", relatieve vochtigheid "niet-verhoogd" en temperatuur "20 °C" (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).

Zoals hierboven beschreven veroorzaken de drie experimenten uit Figuur 37 significante dalingen in waterabsorptie coëfficiënt ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. Daarnaast is de daling in micro-Deval coëfficiënt bij deze experimenten ook significant met p-waarden van respectievelijk 0,0549, 0,0088 en 0,0120. Er kan dus besloten worden dat deze drie mogelijke combinaties van carbonatieparameters leiden tot de opwaardering van het gerecycleerd betongranulaat.

De waterabsorptie van het gerecycleerd granulaat gecarbonateerd gedurende 1 uur bij 1 bar en 20 °C in een omgeving met niet-verhoogde relatieve vochtigheid bedraagt $5,03 \pm 0,16$ %. De micro-Deval coëfficiënt bij dat experiment bedraagt $24,14 \pm 1,99$ %. Die resultaten geven respectievelijk een gemiddelde daling van 4,4 % in waterabsorptie en 8,1 % in weerstand tegen afslijting ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. Voor het gerecycleerd granulaat gecarbonateerd onder dezelfde condities maar waarbij de CO₂-druk verhoogd is tot 5 bar, daalt de waterabsorptie verder naar $4,32 \pm 0,51$ % en de micro-Deval coëfficiënt tot $21,50 \pm 1,10$ %. Dat leidt tot een gemiddelde daling in die twee parameters van 18 % ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. Wanneer het laatste experiment herhaald wordt met een verlengde carbonatatie-duur van 1 uur tot 4 uur, bedraagt de waterabsorptie coëfficiënt 4,21 % en de micro-Deval coëfficiënt $22,21 \pm 1,10$ %. Carbonatie bij deze condities veroorzaakt een gemiddelde daling van 20 % in waterabsorptie en 15 % in weerstand tegen afslijting. De carbonatieparameters van experiment 12 worden beschouwd als optimaal omdat hier de gemiddelde daling in waterabsorptie maximaal is. De micro-Deval coëfficiënt daalt gemiddeld het meest in experiment 11 maar deze eigenschap is minder belangrijk dan de waterabsorptie.

Tot slot is voor experiment 12 ook de vorst-dooi coëfficiënt bepaald. Deze waarde bedraagt $8,78 \pm 7,49$ %, zoals weergegeven in Tabel 10, en daalt gemiddeld 67 % ten opzichte van het niet-gecarbonateerde granulaat. Desondanks die sterke daling is de vorst-dooi coëfficiënt nog steeds hoog in vergelijking met de waarde voor het natuurlijk granulaat, namelijk $0,33 \pm 0,12$ %. Daarnaast kan uit de hoge waarde van de foutmarge bij de vorst-dooi coëfficiënt afgeleid worden dat het materiaal niet homogeen gecarbonateerd is. Dat kan verklaard worden door een eventueel ongelijke relatieve vochtigheid in de carbonatieruimte. Waar de relatieve vochtigheid hoger is, wordt het materiaal plaatselijk minder gecarbonateerd.

Uit voorgaande analyses kan geconcludeerd worden dat de optimale carbonatiecondities bestaan uit geacclimatiseerd granulaat, een niet-verhoogde relatieve vochtigheid, een CO₂-druk van 5 bar en een temperatuur van 20 °C. De onderzoekstechnisch beste oplossing is dus experiment 11 of experiment 12. Het enige verschil tussen deze twee oplossingen is de carbonatieduur, respectievelijk 1 uur of 4 uur. Experiment 11 heeft een waterabsorptie coëfficiënt van $4,32 \pm 0,51$ % en experiment 12 heeft een waterabsorptie coëfficiënt van 4,21 %. De gemiddelde verbetering in vergelijking met het niet-gecarbonateerd granulaat is respectievelijk 18 % of 20 %. Wanneer deze resultaten vergeleken worden met het experimenteel onderzoek beschreven in de literatuurstudie [64] is het logisch dat de waterabsorptie gering daalt na het verlengen van de carbonatieduur van 1 uur tot 4 uur. Hier werd namelijk beschreven dat het carbonatiepercentage toeneemt bij een langere carbonatieduur maar dat het percentage na 2 uur nog maar zeer gering stijgt.

Theoretisch is een verbetering van ongeveer 20 % een goed resultaat maar in de praktijk is deze kwaliteitsverbetering vaak niet realiseerbaar. Ten eerste is het onwaarschijnlijk dat recyclagefabrieken tijd maken om de grote hoeveelheden gerecycleerd granulaat eerst te acclimatiseren en daarna voor een verlengde duur te carbonateren. Daarnaast is het zeer moeilijk om een hogere CO₂-druk toe te passen op grote hoeveelheden materiaal. Wanneer de optimale condities niet toegepast worden, heeft de carbonatie weinig tot geen effect op de kwaliteit van het gerecycleerd granulaat. In een aantal gevallen zal de waterabsorptie coëfficiënt zelfs verhogen ten gevolge van carbonatie. Daarnaast is een verbetering van ongeveer 20 % in waterabsorptie ten opzichte van het gerecycleerd granulaat beperkt te noemen. De beperkte verbetering is te verklaren door de goede kwaliteit van het gerecycleerd granulaat voor carbonatie omdat het afkomstig is van een sterk beton. Daarnaast werd dit beton gebroken in 2 breekfasen waardoor de eigenschappen van het gerecycleerd granulaat al zeer goed waren voor carbonatie.

4.4 Extra carbonatatie experimenten

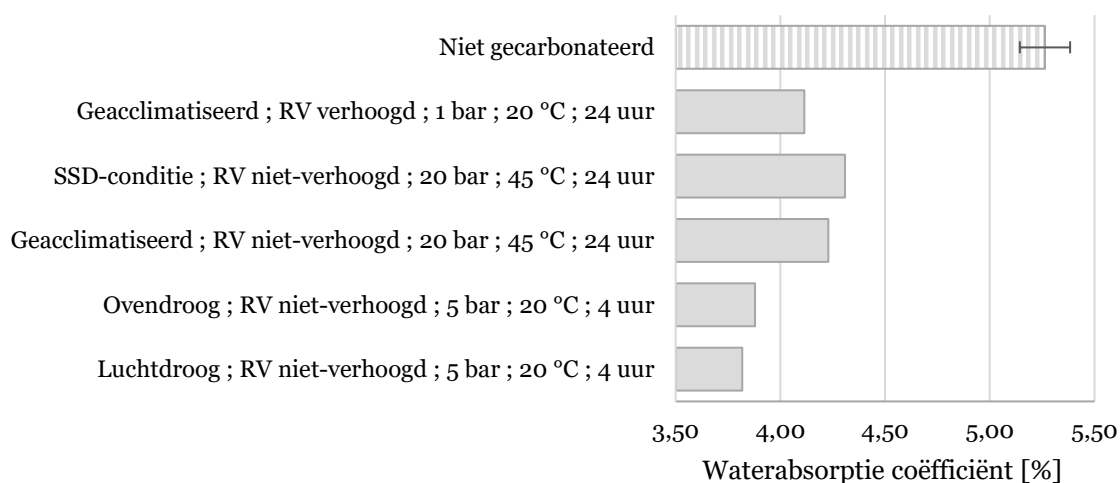
De verschillende carbonatatiecondities van de extra experimenten en de overeenkomstige resultaten voor de SSD-dichtheid, de schijnbare dichtheid en de waterabsorptie worden gegeven in Tabel 11. In Bijlage B.3 Gecarbonateerde granulaten kunnen alle gedetailleerde resultaten teruggevonden worden.

Tabel 11: Eigenschappen van de extra gecarbonateerde experimenten (foutmarges geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval bij testen in duplicaat).

Experiment	VC [-]	Φ [-]	p_{CO_2} [bar]	T [°C]	t [uur]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
13	Geacclimatiseerd	Verhoogd	1	20	24	2520	2689	4,11
14	SSD	Niet-verhoogd	20	45	24	2520	2683	4,31
15	Geacclimatiseerd	Niet-verhoogd	20	45	24	2512	2684	4,23
16	Oven droog	Niet-verhoogd	5	20	4	2516	2674	3,88
17	Lucht droog	Niet-verhoogd	5	20	4	2509	2662	3,82

Het resultaat voor de waterabsorptie coëfficiënt van experiment 17 kan vergeleken worden met de gevonden waarde in het experimenteel onderzoek beschreven in de literatuurstudie [64]. Beide testporties werden vooraf opgeslagen zonder specifieke behandeling en hebben dus een lucht droge vochtigheidsconditie. De waterabsorptie coëfficiënt van 3,82 % uit experiment 17 komt redelijk goed overeen met de gevonden waarde van 3,37 % uit het onderzoek in de literatuurstudie.

De resultaten voor de waterabsorptie coëfficiënt van deze vijf experimenten worden getoond in Figuur 38. In deze figuur kunnen de waarden niet allemaal met elkaar vergeleken worden omdat de condities zeer verschillende zijn aan elkaar. Wel wordt duidelijk aangetoond wat het verschil is ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat waarvan de waterabsorptie coëfficiënt ook in deze figuur wordt opgenomen.



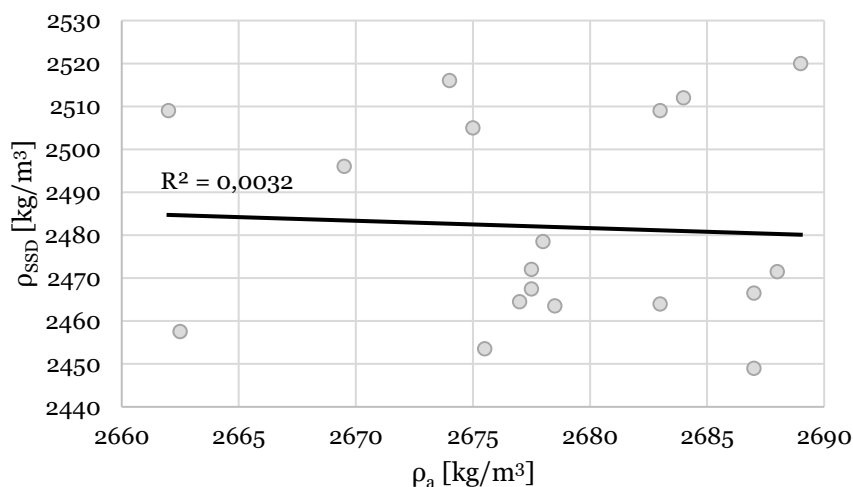
Figuur 38: Waterabsorptie coëfficiënten [%] van gerecycleerd betongranulaat gecarbonateerd in de extra experimenten (foutbalken geven het 90 % betrouwbaarheidsinterval).

Al deze vijf experimenten veroorzaken een duidelijke verlaging van de waterabsorptie coëfficiënt ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. Er zijn geen foutbalken gegeven voor deze resultaten omdat de test telkens maar één keer is uitgevoerd in deze experimenten. Ten eerste heeft experiment 13 een waterabsorptie coëfficiënt van 4,11 % wat een gemiddelde daling van 22 % betekent. Daarnaast hebben de twee volgende experimenten met extreme carbonatatiecondities een waterabsorptie coëfficiënt van 4,31 % en 4,23 %. De gemiddelde daling die hiermee overeenkomt is respectievelijk 18 % en 20 %. De twee laatste experimenten, met vochtigheidsconditie oven droog en lucht droog, hebben een zeer sterk gedaalde waterabsorptie coëfficiënt van respectievelijk 3,88 % en 3,82 %. Ten opzichte van het niet-gecarbonateerde granulaat zijn dit respectievelijk gemiddelde dalingen van 26 % en 27 %.

Er kan geconcludeerd worden dat het verder elimineren van vocht in het materiaal zorgt voor een beter resultaat. In experiment 16 en 17 is de vochtigheidsconditie respectievelijk oven droog en lucht droog waarbij de waterabsorptie respectievelijk 26 % en 27 % daalt ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat. Deze dalingen zijn veel groter dan de maximale daling van 20 % bij de geacclimatiseerde granulaten.

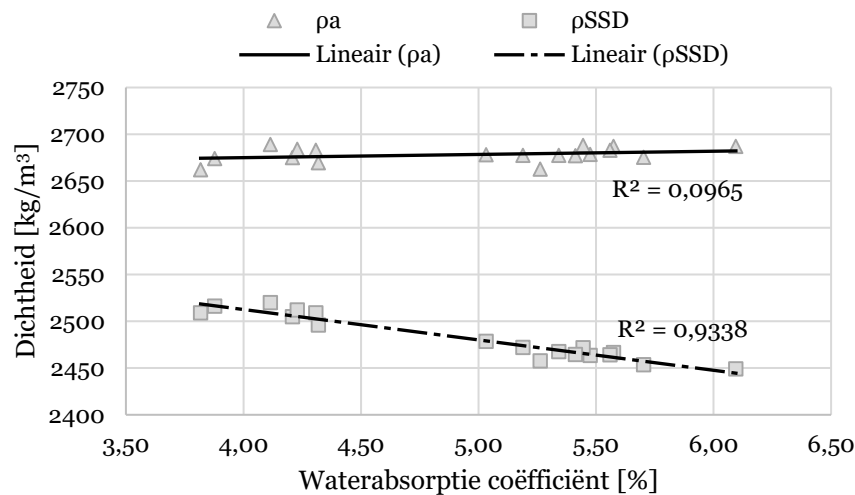
4.5 Verbanden tussen eigenschappen

Er wordt verondersteld dat de onderzochte waarden aan elkaar gelinkt zijn. Wanneer de dichtheid stijgt, zal de waterabsorptie en de micro-Deval coëfficiënt afnemen. Eerst worden de verschillende dichtheden met elkaar vergeleken. Figuur 39 toont het verband tussen de schijnbare en de SSD-dichtheid van alle carbonatatie experimenten. Daarna wordt in Figuur 40 weergegeven of de waterabsorptie in relatie staat met de schijnbare of de SSD-dichtheid. Figuur 41 toont het verband tussen de micro-Deval coëfficiënt en de SSD-dichtheid. Vervolgens wordt het verband tussen de micro-Deval coëfficiënt en de waterabsorptie coëfficiënt weergegeven in Figuur 42.



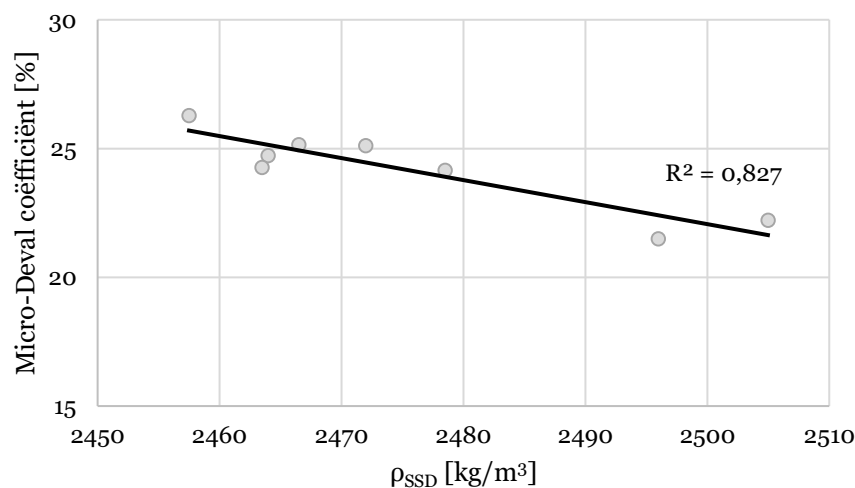
Figuur 39: Lineair verband tussen de schijnbare dichtheid [kg/m³] en de SSD-dichtheid [kg/m³] van alle carbonatatie experimenten en het niet-gecarbonateerde granulaat.

Ten eerste geeft de trendlijn in Figuur 39 aan dat de schijnbare dichtheid en de SSD-dichtheid volledig onafhankelijk van elkaar zijn. De R²-waarde bedraagt hier 0,0032, wat zeer laag is. Visueel is ook te zien dat de punten zeer gespreid zijn gelegen. Dit resultaat geeft aan dat het verwachte verband tussen de schijnbare dichtheid en de SSD-dichtheid niet bestaat.



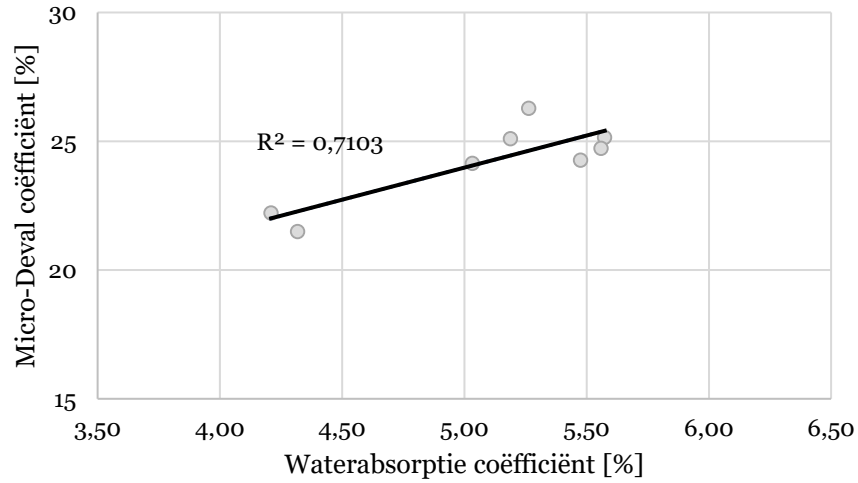
Figuur 40: Lineair verband tussen de waterabsorptie coëfficiënt [%] en de schijnbare en de SSD-dichtheid [kg/m³] van alle carbonatatie experimenten en het niet-gecarbonateerde granulaat.

Zoals af te lezen uit Figuur 40 is de waterabsorptiecoëfficiënt niet gerelateerd aan de schijnbare dichtheid maar wel aan de SSD-dichtheid. De R²-waarden van dit verband zijn respectievelijk 0,0965 en 0,9338. Die laatste waarde geeft aan dat er een sterke correlatie bestaat tussen de waterabsorptie coëfficiënt en de SSD-dichtheid. Bestaand onderzoek geeft vaak waarden voor de schijnbare dichtheid van gerecycleerde granulaten. Maar door de correlatie die hier gevonden is, wordt er aangeraden om in vervolgonderzoek te focussen op de SSD-dichtheid.



Figuur 41: Lineair verband tussen de micro-Deval coëfficiënt [%] en de schijnbare dichtheid [kg/m³] van de carbonatatie experimenten waarvan de micro-Deval coëfficiënt bepaald is en het niet-gecarbonateerde granulaat.

Normaal wordt er verwacht dat de relatie tussen de micro-Deval coëfficiënt en de SSD-dichtheid gelijkaardig verloopt als die tussen de waterabsorptie coëfficiënt en de SSD-dichtheid. In Figuur 41 wordt die relatie getoond en bedraagt de trendlijn een R²-waarde van 0,8270. Dit betekent inderdaad dat de micro-Deval coëfficiënt en de SSD-dichtheid gerelateerd zijn zoals verwacht.



Figuur 42: Lineair verband tussen de micro-Deval coëfficiënt [%] en de waterabsorptie coëfficiënt [%] van de carbonatatie experimenten waarvan de micro-Deval coëfficiënt bepaald is en het niet-gecarbonateerde granulaat.

Uiteindelijk wordt het verwachte verband tussen de waterabsorptie coëfficiënt en de micro-Deval coëfficiënt weergegeven in Figuur 42. Uit deze figuur volgt een R^2 -waarde van 0,7103 wat een correlatie tussen de twee eigenschappen aangeeft.

5 Conclusie

De analyse van de gecarbonateerde granulaten geeft aan dat carbonatatie op natte granulaten niet leidt tot een verbetering van de waterabsorptie en de weerstand tegen afslijting. Die tegenvallende resultaten zijn te verklaren door de uitloging van calciumhydroxide in het aanwezige vocht. Dat veroorzaakt een verhoging van de porositeit en dus ook een verhoging in waterabsorptie. Daarnaast creëert een waterlaag op de granulaatoppervlakte een barrière waardoor het CO₂-gas het cement niet kan bereiken. Ook bij geacclimatiseerde granulaten leidt de aanwezigheid van vocht tot tegenvallende resultaten voor de invloed van carbonatatie op de granulaatkwaliteit.

Carbonatatie op geacclimatiseerde granulaten veroorzaakt echter wel een verbetering van de waterabsorptie en de weerstand tegen afslijting wanneer de relatieve vochtigheid niet wordt verhoogd tijdens het proces. Deze condities zijn de doorbraak voor de positieve invloed van carbonatatie op de kwaliteit van het gerecycleerd betongranulaat. Daarnaast geven de verschillende experimenten aan dat een verhoging van CO₂-druk leidt tot een verbetering van het effect van de carbonatatie. De experimenten op geacclimatiseerd granulaat gecarbonateerd gedurende 1 uur of 4 uur bij een CO₂-druk van 5 bar en een temperatuur van 20 °C in een omgeving met niet-verhoogde relatieve vochtigheid geven de beste resultaten voor de waterabsorptie en de weerstand tegen afslijting. Dit kan verklaard worden door de voldoende hoge CO₂-druk van 5 bar en de beperkte aanwezigheid van vocht. Het principe dat de eliminatie van vocht tijdens carbonatatie leidt tot betere resultaten wordt ook bevestigd in de extra uitgevoerde experimenten. Deze resultaten geven namelijk aan dat de waterabsorptie verder daalt bij carbonatatie van oven droge en lucht droge granulaten onder dezelfde carbonatatieparameters.

Verder is het belangrijk om het effect van andere carbonatatieparameters te onderzoeken om zo de absolute optimale condities te vinden. Daarnaast kan er ook gefocust worden op het onderzoeken van carbonatatie op gerecycleerde granulaten van een lagere kwaliteit. Het breken van beton van mindere kwaliteit of het breken van beton in één breekfase creëren beiden gerecycleerd granulaat met een verminderde kwaliteit. Vervolgens zal er extra onderzoek uitgevoerd moeten worden om de vorst-dooi coëfficiënten verder te beperken.

Referentielijst

- [1] Cement and Concrete Association of New Zealand, *Best practice guide for the used of recycled aggregates in new concrete*, CCANZ, 2011.
- [2] International Energy Agency, „Cement Technology Roadmap 2009,” International Energy Agency, 2009.
- [3] J. Van Herck, H. De Krem, W. Noblesse, B. Vandoren en S. Kox, „TETRA-Project 150167 Hoogwaardig betongranulaat voor duurzame wegenbouw,” 2015.
- [4] Timetric, „Global Construction Aggregates Market - Key Trends and Opportunities to 2017,” Timetric, 2013.
- [5] T. Tietenberg, *Environmental and natural resource economics*, 6th red., New York: Addison Wesley, 2002, p. 656.
- [6] Leefmilieu Brussel, „Fiche 4.1: Het gebruik van recyclinggranulaten,” Leefmilieu Brussel, Brussel, 2011.
- [7] Eurostat, „Waste statistics in Europe,” *Statistics Explained*, 2015.
- [8] R. V. Silva, J. de Brito en R. Dhir, „Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 598-614, 2016.
- [9] P. K. Mehta en P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd edition, New York: McGraw-Hill Education, 2005.
- [10] Institute for European Environmental Policy; Arcadis; BIO Intelligence Service, „Service contract on management of construction and demolition waste - SR1 Final Report Task 2,” BIO Intelligence Service, Brussels, 2011.
- [11] Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM), *Data bedrijfsafval en secundaire grondstoffen 2004-2016*, 2017.
- [12] J. de Brito en R. V. Silva, „Current status on the use of recycled aggregates in concrete: Where do we go from here?,” *RILEM Technical Letters*, vol. 1, pp. 1-5, 2016.
- [13] D. Bond, „Technical and cost benefits of recycled and secondary aggregates: Supply chain case studies (Infrastructure),” *The Waste & Resource Action Programme*, 2005.

- [14] BRBS Recycling, „Toepassingsmogelijkheden recyclinggranulaten,” BRBS Recycling, Zaltbommel.
- [15] S. Lotfi, M. Eggimann, E. Wagner, R. Mróz en J. Deja, „Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology,” *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 243-256, 1 October 2015.
- [16] RILEM TC 121-DRG, „Specifications for concrete with recycled aggregates,” *Materials and Structures*, vol. 27, nr. 173, pp. 557-559, 1994.
- [17] Oosterzeelse Breek- en Betoncentrale, *Hoogwaardig betonpuingranulaat in hoogwaardige toepassingen: proefproject met "groen beton"*, Oosterzele, 2015.
- [18] WTCB, „Stortklaar beton voor de toekomst - Deel 1: beton met gerecycleerde granulaten,” November 2014.
- [19] F. T. Rodrigues, M. T. Carvalho, L. Evangelista en J. M. C. L. De Brito, „Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 438-445, 1 August 2013.
- [20] M. Bravo, J. M. C. L. De Brito, J. Pontes en L. Evangelista, „Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants,” *Journal of Cleaner Production*, nr. 99, pp. 59-74, 15 July 2015.
- [21] L. Boehme, M. Joseph, J. Vrijders en A. Van Geysel, „De kwaliteit van betongranulaat i.f.v. betonproductie,” *Veiligheid & Milieu*, vol. 19, nr. 6, Juni 2012.
- [22] R. V. Silva, J. M. C. L. De Brito en R. Dhir, „Comparative analysis of existing prediction models on the creep behaviour of recycled aggregate concrete,” *Engineering Structures*, nr. 100, pp. 31-42, 1 October 2015.
- [23] H. F. Yang, Z. H. Deng en Y. F. Hu, „Microstructure and Finite Element Analysis of Recycled Aggregate Concrete,” *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 van %2357-360, pp. 1383-1388, August 2013.
- [24] *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (+AC:2010)*, Brussel: Bureau voor Normalisatie, 2005.
- [25] ACI Committee 318, *318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, 2014.
- [26] „Recycled aggregates,” *BRE Digest*, nr. 433, 1998.

- [27] *Nederlandse aanvulling op NEN-EN 12620+A1 "Toeslagmaterialen voor beton"*, Stichting Nederlands Normalisatie-Instituut, 2010.
- [28] P. Gonçalves en J. De Brito, „Recycled aggregate concrete (RAC) - Comparative analysis of existing specifications,” *Magazine of concrete Research*, vol. 62, nr. 5, pp. 339-346, May 2010.
- [29] *TRA 550 BENOR-certificatie van stortklaar beton: Bepalingen voor de producent*, Be-Cert.
- [30] *Concrete - Specification, performance, production and conformity*, Brussels: Bureau for Standardisation, 2016.
- [31] *Beton - Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit - Nationale aanvulling bij NBN EN 206:2013+A1:2016*, Brussel: Bureau voor Normalisatie, 2018.
- [32] Agentschap Wegen & Verkeer, *Standaardbestek 250*, 2019.
- [33] L. Boehme, A. Van Gysel, J. Vrijders, M. Joseph en J. Claes, *Valorisation of Recycled Concrete Aggregates in Concrete C20/25 & C25/C30*, 1e red., Leuven: Luc Boehme, 2012, p. 200.
- [34] A. Braga, *Comparative analysis of the life cycle assessment of conventional and recycled aggregate concrete*, Lisbon: Instituto Superior Técnica, University of Lisbon, 2015.
- [35] X. Shan, J. Zhou, V. W.-C. Chang en E.-H. Yang, „Life cycle assessment of adoption of local recycled aggregates and green concrete in Singapore perspective,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 918-926, 15 October 2017.
- [36] H. Bartelings en V. Linderhof, *Effective landfill taxation: A case study for the Netherlands*, Brussels, 2006.
- [37] European Environment Agency, „Diverting waste from landfill: Effectiveness of waste-management policies in the European Union,” Luxembourg, 2009.
- [38] *Code on Structural Concrete (EHE-08)*, 2011.
- [39] R. V. Silva, J. M. C. L. De Brito en R. K. Dhir, „Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, nr. 4, pp. 2171-2186, 20 January 2016.
- [40] R. V. Silva, J. M. C. L. De Brito, L. Evangelista en R. K. Dhir, „Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with

Eurocode 2,” *Construction and Building Materials*, vol. 105, pp. 144-156, 15 February 2016.

- [41] K. de Prins, „Bouw- en sloopafval: van bouwafval tot bouw materiaal,” OVAM, Brussel, 2012.
- [42] *Aggregates for concrete*, Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2013.
- [43] R. V. Silva, J. M. C. L. De Brito en R. Dhir, „Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production,” *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 201-207, 29 August 2014.
- [44] R. V. Silva, J. de Brito en R. Dhir, „The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 19, pp. 825-849, October 2014.
- [45] R. V. Silva, J. de Brito en R. K. Dhir, „Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 83, pp. 108-118, 15 May 2015.
- [46] *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*, Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2012.
- [47] *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*, Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2013.
- [48] *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)*, Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2011.
- [49] *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*, Brussels: CEN European Committee Standardization, 2010.
- [50] *Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing*, Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2007.
- [51] J. W. Hurley en C. McGrath, *Deconstruction and reuse of construction materials*, London: British Research Establishment, 2001, p. 32.

- [52] R. Dhir, T. Dyer en K. A. Paine, „Dismantling barriers: Roles for research in realising markets for construction and demolition wastes,” Singapore, 2004.
- [53] J. Vrijders en J. Desmyter, *Een hoogwaardig gebruik van puingranulaten stimuleren*, OVAM, 2008.
- [54] C. Ulsen, H. Kahn, G. Hawlitschek, E. A. Masini en S. C. Angulo, „Separability studies of construction and demolition waste recycled sand,” *Waste Management*, vol. 33, nr. 3, pp. 656-662, 2013.
- [55] K. H. Kim, H. C. Cho en J. W. Ahn, „Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill,” *Minerals Engineering*, vol. 35, pp. 43-45, 2012.
- [56] R. Cardoso, R. V. Silva, J. de Brito en R. Dhir, „Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review,” *Waste Management*, vol. 49, pp. 131-145, 2016.
- [57] K. Devriendt, *Scheidings- en zuiveringstechnieken voor puingranulaten*, Oostende: KHBO, 2010.
- [58] K. Bru, S. Touzé, F. Bourgeois, N. Lippiatt en Y. Ménard, „Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 126, pp. 90-98, 2014.
- [59] N. Lippiatt en F. Bourgeois, „Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing,” *Minerals Engineering*, vol. 31, pp. 71-81, 2012.
- [60] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, M. H. Zhang, C. T. Tam en T. Foo, „Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, nr. 8, pp. 3469-3479, 2011.
- [61] S. Touzé, K. Bru, Y. Ménard, A. Weh en F. Von der Weid, „Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste - Effect on aggregate liberation,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 158, pp. 68-75, 2017.
- [62] K. J. Schenk, „Separating Device”. International (PCT) Patent WO 2011/142663, 17 11 2011.
- [63] M. Florea en J. Brouwers, „Slim breken sluit materiaalkringloop,” *Cementonline*, pp. 74-78, 24 April 2013.

- [64] B. Zhan, C. S. Poon, Q. Liu, S. Kou en C. Shi, „Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 67, nr. A, pp. 3-7, 30 September 2013.
- [65] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong en Z. Xie, „Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, nr. 1, pp. 466-472, 20 Januari 2016.
- [66] *Testing fresh concrete - Part 2: Slump-test*, Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2009.
- [67] *Beproeving van verhard beton - Deel 3 : Druksterkte van proefstukken (+ AC:2011)*, Brussel, 2015.
- [68] J. V. Puthussery, R. Kumar en A. Garg, „Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study,” *Waste Management*, vol. 60, pp. 270-276, 2017.
- [69] A. Jacobs, E. Hooyberghs, K. Vrancken, J. Van Dessel en W. Adams, „Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor recyclage van bouw- en slooppuin,” Academia Press, Gent, 2005.

Bijlagenlijst

Bijlage A: Lijst van de berekende p-waarden	73
Bijlage B: Gedetailleerde resultatenlijst	74
B.1Natuurlijke granulaten	74
B.2Gerecycleerde granulaten.....	75
B.3Gecarbonateerde granulaten.....	77

Bijlagen

Bijlage A: Lijst van de berekende p-waarden

Tabel 12 geeft de berekende p-waarden voor de vergelijking tussen de waterabsorptie en micro-Deval coëfficiënten van het niet-gecarbonateerd granulaat en de eerste twaalf experimenten. Hierin wordt ook aangegeven of er een significante stijging of daling is tussen die verschillende waarden. Vervolgens wordt de invloed van de carbonatatieparameters bepaald door verschillende vergelijkingen uit te voeren. De resulterende p-waarden en de afgeleide invloed hiervan worden opgesomd in Tabel 13.

Tabel 12: Lijst van p-waarden voor de bepaling van de significantie van de toe- of afname in de waterabsorptie of de micro-Deval coëfficiënt ten opzichte van het niet-gecarbonateerd granulaat.

Vergelijking tussen ...		Waterabsorptie		Micro-Deval	
		p-waarde	Invloed	p-waarde	Invloed
Niet-gecarbonateerd	Experiment 1	0,0154	↗	0,3620	"="
Niet-gecarbonateerd	Experiment 2	0,5782	"="	0,1383	"="
Niet-gecarbonateerd	Experiment 3	0,1119	"="	0,0969	↘
Niet-gecarbonateerd	Experiment 4	0,0597	↗	0,0494	↘
Niet-gecarbonateerd	Experiment 5	0,0508	↗	-	-
Niet-gecarbonateerd	Experiment 6	0,1339	"="	-	-
Niet-gecarbonateerd	Experiment 7	0,0258	↗	-	-
Niet-gecarbonateerd	Experiment 8	0,1876	"="	-	-
Niet-gecarbonateerd	Experiment 9	0,1385	"="	-	-
Niet-gecarbonateerd	Experiment 10	0,0181	↘	0,0549	↘
Niet-gecarbonateerd	Experiment 11	0,0076	↘	0,0088	↘
Niet-gecarbonateerd	Experiment 12	0,0203	↘	0,0120	↘

Tabel 13: Lijst van de p-waarden voor de bepaling van de significantie van de toe- of afname in de waterabsorptie of de micro-Deval coëfficiënt tussen twee verschillende carbonatatieparameters.

Invloed van ...	Vergelijking tussen ...		Waterabsorptie		Micro-Deval	
			p-waarde	Invloed	p-waarde	Invloed
CO ₂ -druk	Experiment 1	Experiment 2	0,0809	↘	0,9354	"="
	Experiment 5	Experiment 6	0,1746	"="	-	-
	Experiment 10	Experiment 11	0,0135	↘	0,0180	↘
Temperatuur	Experiment 1	Experiment 3	0,9061	"="	0,5787	"="
	Experiment 2	Experiment 4	0,1444	"="	0,1248	"="
Duur	Experiment 1	Experiment 5	0,3518	"="	-	-
	Experiment 2	Experiment 6	0,1927	"="	-	-
	Experiment 5	Experiment 7	0,2669	"="	-	-
	Experiment 11	Experiment 12	0,5758	"="	0,1031	"="
Relatieve vochtigheid	Experiment 8	Experiment 10	0,0185	↘	-	-
	Experiment 9	Experiment 11	0,0082	↘	-	-
Vochtigheidsconditie	Experiment 1	Experiment 8	0,0410	↘	-	-
	Experiment 2	Experiment 9	0,2185	"="	-	-
	Experiment 6	Experiment 12	0,0639	↘	-	-

Bijlage B: Gedetailleerde resultatenlijst

B.1 Natuurlijke granulaten

De gedetailleerde resultaten van de korrelgrootteverdeling van de drie groottefracties van het natuurlijk granulaat worden weergegeven in Tabel 14. Vervolgens geeft Tabel 15 de gedetailleerde resultaten voor de bepaling van de waterabsorptie en de dichtheid van de drie groottefractie van het natuurlijk granulaat. Tabel 16 en Tabel 17 geven respectievelijk de resultaten van de micro-Deval en de vorst-dooitest uitgevoerd op kalksteen 7/14.

Tabel 14: Korrelgrootteverdeling voor de drie verschillende groottefracties van het natuurlijk granulaat.

Kalksteen 7/14						
Zeefmaat [mm]	Zeef [g]	Zeef + zeefrest [g]	Zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
16	425,35	452,29	26,94	0,7	0,7	99,3
14	408,20	560,91	152,71	4,1	4,9	95,1
12,5	438,66	800,15	361,49	9,8	14,7	85,3
10	457,56	1834,34	1376,78	37,4	52,1	47,9
8	397,91	1180,08	782,17	21,3	73,4	26,6
6,3	391,27	947,16	555,89	15,1	88,5	11,5
4	425,97	702,80	276,83	7,5	96,0	4,0
2	392,51	449,32	56,81	1,5	97,5	2,5
1	330,27	365,37	35,10	1,0	98,5	1,5
0,5	262,50	385,92	23,42	0,6	99,1	0,9
0	347,22	379,05	31,83	0,9	100,0	0,0
Som			3679,97			
Kalksteen 2/7						
Zeefmaat [mm]	Zeef [g]	Zeef + zeefrest [g]	Zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	457,56	457,56	0,00	0,0	0,0	100,0
8	397,91	403,68	5,77	0,3	0,3	99,7
6,3	391,27	578,94	187,67	9,6	9,9	90,1
4	425,97	1408,61	982,64	50,3	60,2	39,8
2	392,51	1108,85	716,34	36,7	96,9	3,1
1	330,27	383,52	53,25	2,7	99,7	0,3
0,5	262,50	266,63	4,13	0,2	99,9	0,1
0	347,81	350,23	2,42	0,1	100,0	0,0
Som			1952,22			
Rivierzand 0/3						
Zeefmaat [mm]	Zeef [g]	Zeef + zeefrest [g]	Zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
4	426,13	426,39	0,26	0,0	0,0	100,0
2	392,53	479,72	87,19	7,3	7,4	92,6
1	330,29	534,11	203,82	17,2	24,5	75,5
0,5	262,56	696,69	434,13	36,6	61,1	38,9
0,25	294,99	713,68	418,69	35,3	96,4	3,6
0,125	276,12	317,20	41,08	3,5	99,8	0,2
0,063	251,75	252,81	1,06	0,1	99,9	0,1
0	431,87	432,89	1,02	0,1	100,0	0,0
Som			1187,25			

Tabel 15: Resultaten van de waterabsorptie- en dichtheid test voor de drie verschillende groottefracties van het natuurlijk granulaat.

Kalksteen 7/14						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2018,90	2710,70	1100,86	1093,90	2687	2716	0,64
Kalksteen 2/7						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2018,40	2487,40	749,90	743,80	2665	2702	0,82
Rivierzand 0/3						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
1146,64	1539,44	631,26	629,06	2644	2659	0,35
1146,58	1362,26	346,67	345,32	2643	2660	0,39

Tabel 16: Resultaten van de micro-Deval test voor het natuurlijk granulaat.

Kalksteen 7/14						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,21	174,19	5000,80	2,50	12000	420,00	15,90
325,50	174,88	5000,66	2,50	12000	420,00	16,06

Tabel 17: Resultaten van de vorst-dooit test voor het natuurlijk granulaat.

Kalksteen 7/14		
Initiële droge massa 8 - 16 mm [g]	Finale droge massa 8 - 16 mm [g]	Massaverlies [%]
2024,00	2015,70	0,41
2037,10	2031,10	0,29
2062,70	2057,00	0,28

B.2 Gerecycleerde granulaten

In Tabel 18 kunnen de gedetailleerde resultaten van de zeefmethode uitgevoerd op het gerecycleerd granulaat teruggevonden worden. De korrelgrootteverdeling werd apart bepaald voor de fractie groter en die kleiner dan 3 mm. De volgende testen worden enkel uitgevoerd op het gerecycleerd betongranulaat groter dan 3 mm. Tabel 19 geeft de gedetailleerde resultaten van de bepaling van de waterabsorptie en de dichtheid. Vervolgens worden de resultaten van de micro-Deval en de vorst-dooi test respectievelijk weergegeven in Tabel 20 en Tabel 21.

Tabel 18: Korrelgrootteverdeling voor de twee verschillende groottefracties van het gerecycleerd granulaat.

Gerecycleerd betongranulaat > 3 mm						
Zeefmaat [mm]	Zeef [g]	Zeef + zeeffrest [g]	Zeeffrest [g]	Zeeffrest [%]	Gecumuleerde zeeffrest [%]	Doorval [%]
20	421,66	421,66	0,00	0,0	0,0	100,0
16	425,42	558,18	132,76	2,4	2,4	97,6
14	408,18	724,40	316,22	5,7	8,0	92,0
12,5	428,57	1068,37	639,80	11,5	19,5	80,5
10	457,59	2842,50	2384,91	42,7	62,2	37,8
6,3	396,81	1579,52	1182,71	21,2	83,4	16,6
4	529,92	1130,80	600,88	10,8	94,2	5,8
2	494,24	799,77	305,53	5,5	99,6	0,4
0	254,41	275,08	20,67	0,4	100,0	0,0
Som			5583,48			
Gerecycleerd betongranulaat < 3 mm						
Zeefmaat [mm]	Zeef [g]	Zeef + zeeffrest [g]	Zeeffrest [g]	Zeeffrest [%]	Gecumuleerde zeeffrest [%]	Doorval [%]
4	405,30	405,30	0,00	0,0	0,0	100,0
2	483,21	556,54	73,33	9,8	9,8	90,2
1	325,12	537,08	211,96	28,3	38,1	61,9
0,5	270,33	450,74	180,41	24,1	62,2	37,8
0,25	295,58	411,48	115,90	15,5	77,7	22,3
0,125	261,65	316,62	54,97	7,3	85,1	14,9
0,063	251,76	292,84	41,08	5,5	90,6	9,4
0	346,88	417,42	70,54	9,4	100,0	0,0
Som			748,19			

Tabel 19: Resultaten van de waterabsorptie- en densiteit test voor het gerecycleerd granulaat.

Gerecycleerd betongranulaat > 3 mm						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2017,30	2688,40	1129,97	1073,27	2459	2665	5,28
2017,70	2554,30	904,12	859,07	2456	2660	5,24

Tabel 20: Resultaten van de micro-Deval test het gerecycleerd granulaat.

Gerecycleerd betongranulaat > 3 mm						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,60	175,05	5000,05	2,50	12000	371,16	25,86
324,87	174,80	5001,02	2,50	12000	366,29	26,69

Tabel 21: Resultaten van de vorst-dooitest voor het gerecycleerd granulaat.

Gerecycleerd betongranulaat > 3 mm		
Initiële droge massa 8 - 16 mm [g]	Finale droge massa 8 - 16 mm [g]	Massaverlies [%]
1945,79	1425,11	26,76
1917,80	1408,92	26,61
1950,24	1442,47	26,04

B.3 Gecarbonateerde granulaten

Tabel 22 geeft de testresultaten van de waterabsorptie en de dichtheid voor alle carbonatatie experimenten, van experiment 1 tot en met experiment 17. Daarnaast werd de micro-Deval test enkel uitgevoerd voor bepaalde experimenten. De resultaten hiervan worden gegeven in Tabel 23. De vorst-dooitest is enkel uitgevoerd op het materiaal van experiment 12. De resultaten van deze test staan in Tabel 24.

Tabel 22: Resultaten van de waterabsorptie- en densiteit test voor de verschillende experimenten van het gecarbonateerd granulaat.

Experiment 1						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,70	2616,20	1007,68	954,17	2477	2702	5,61
2014,50	2701,30	1157,25	1096,54	2456	2672	5,54
Experiment 2						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,50	2606,60	993,88	943,85	2470	2680	5,30
2014,50	2533,20	869,68	827,66	2474	2675	5,08
Experiment 3						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,10	2582,50	955,80	904,55	2463	2686	5,67
2014,10	2620,50	1018,99	966,30	2465	2680	5,45
Experiment 4						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,00	2614,00	1007,60	955,75	2467	2681	5,43
2014,00	2654,90	1078,27	1021,78	2460	2676	5,53
Experiment 5						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,30	2735,40	1215,05	1150,59	2456	2675	5,60
2014,00	2661,90	1093,69	1033,73	2451	2676	5,80

Experiment 6						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2010,70	2738,80	1218,23	1156,10	2482	2698	5,37
2014,10	2664,20	1094,01	1036,80	2461	2678	5,52
Experiment 7						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,90	2843,10	1398,65	1318,32	2449	2687	6,09
Experiment 8						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,00	2663,10	1090,65	1035,03	2466	2677	5,37
2013,60	2663,90	1091,72	1036,66	2469	2678	5,31
Experiment 9						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,20	2662,20	1090,37	1033,76	2461	2675	5,48
2014,40	2643,90	1057,33	1003,63	2468	2679	5,35
Experiment 10						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,90	2597,30	975,34	928,82	2479	2678	5,01
2014,30	2686,50	1126,01	1071,79	2478	2678	5,06
Experiment 11						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2015,00	2702,70	1146,52	1099,90	2495	2665	4,24
2014,40	2612,50	996,74	954,75	2497	2674	4,40
Experiment 12						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,80	2441,50	709,25	680,60	2505	2675	4,21
Experiment 13						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,90	2526,30	847,20	813,72	2520	2689	4,11
Experiment 14						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + AggSSD [g]	AggSSD [g]	Aggdroog [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2014,80	2606,40	983,01	942,41	2509	2683	4,31

Experiment 15						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2015,10	2556,30	898,63	862,17	2512	2684	4,23
Experiment 16						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2013,60	2646,70	1049,31	1010,13	2516	2674	3,88
Experiment 17						
Pyknometer + water [g]	Pyknometer + water + Agg _{SSD} [g]	Agg _{SSD} [g]	Agg _{droog} [g]	SSD dichtheid [kg/m ³]	Schijnbare dichtheid [kg/m ³]	Waterabsorptie coëfficiënt [%]
2015,10	2650,60	1056,14	1017,30	2509	2662	3,82

Tabel 23: Resultaten van de micro-Deval test voor de verschillende experimenten van het gecarbonateerd granulaat.

Experiment 1						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,62	174,58	4999,21	2,55	12000	374,41	25,15
Experiment 2						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,55	174,68	5003,22	2,47	12000	373,39	25,36
324,75	174,56	4998,94	2,51	12000	375,24	24,85
Experiment 3						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,52	175,04	4999,21	2,46	12000	375,22	25,04
324,62	174,40	5003,22	2,50	12000	377,20	24,41
Experiment 4						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,70	175,46	5001,29	2,49	12000	380,63	24,05
324,98	176,72	4998,94	2,53	12000	378,95	24,47
Experiment 10						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,25	175,06	4999,04	2,50	12000	377,94	24,46
325,25	175,06	5001,56	2,50	12000	381,09	23,83

Experiment 11						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,21	175,09	5000,97	2,50	12000	391,87	21,67
325,21	175,09	5000,77	2,50	12000	393,66	21,32
Experiment 12						
10 - 12,5 mm [g]	12,5 - 14 mm [g]	Stalen ballen [g]	Water [l]	Aantal rotaties [-]	>1,6 mm na wassen + drogen [g]	Micro-Deval coëfficiënt [%]
325,84	174,05	5000,46	2,49	12000	387,99	22,38
325,24	175,77	5000,03	2,50	12000	390,65	22,03

Tabel 24: Resultaten van de vorst-dooitest voor het optimale experiment van het gecarbonateerd granulaat.

Experiment 12		
Initiële droge massa 8 - 16 mm [g]	Finale droge massa 8 - 16 mm [g]	Massaverlies [%]
2015,80	1901,35	5,68
1980,63	1705,95	13,87
2085,40	1944,07	6,78