

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

De invloed van Rhenofit-CNT3-koolstofnanobuizen in combinatie met hulpstof op de sterkte-eigenschappen van beton

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

Bram Cox, Willem Vandervelden

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

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



KU LEUVEN



KU LEUVEN

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

De invloed van Rhenofit-CNT3-koolstofnanobuizen in combinatie met hulpstof op de sterkte-eigenschappen van beton

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

Bram Cox, Willem Vandervelden

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



KU LEUVEN

Woord vooraf

Voor u, ligt de masterproef “De invloed van Rhenofit-CNT3-koolstofnanobuizen in combinatie met hulpstof op de sterkte-eigenschappen van beton”. Deze masterproef werd gemaakt als afsluiter van de studies Industriële Ingenieurswetenschappen Bouwkunde, een gemeenschappelijke opleiding aan de UHasselt & KULeuven.

Wij hebben dit onderwerp gekozen omdat innovatie in beton zijn opmars kent in de bouwsector. Daarnaast zijn we beide van jongs af al gefascineerd en geboeid door alles wat in relatie staat met het materiaal beton. We zijn dan ook zeer vereerd om ons steentje te mogen bijdragen aan de verdere ontwikkeling van de betonindustrie.

We zouden daarom ook graag enkele mensen bedanken.

Allereerst bedanken wij onze promotor Prof. dr. ir. Hervé Degée van harte. Hij heeft zijn kennis op een duidelijke wijze overgebracht zodat wij deze masterproef tot een goed einde konden brengen.

Daarnaast willen we De heer Dan Dragan en dr. ing. Rik Steensels bedanken ter ondersteuning van de testen in het labo. Hun vakbekwaamheid resulteerde in een efficiënt en vlot verloop, gedurende de volledige testreeks.

Ook bedanken wij dr. Bart Dreesen om nuttige feedback te verschaffen omtrent de grammaticale aanbevelingen.

Tot slot willen wij onze familie, vrienden en kennissen bedanken voor al hun steun tijdens het volledige proces van deze masterproef.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	
Lijst van tabellen.....	
Lijst van figuren	
Abstract	
Abstract in English.....	
1 Inleiding.....	
2 Literatuurstudie.....	15
2.1 Carbon nanotubes	15
2.1.1 Rhenofit-CNT3	16
2.1.2 Poeder vs. Suspensie	17
2.1.3 Dispersie bevorderen	17
2.2 Toelichting voorgaande masterproef 2018.....	18
2.2.1 Samenvatting.....	18
2.2.2 Problemen	18
2.3 Hulpstoffen.....	21
2.3.1 Inleiding.....	21
2.3.2 Soorten hulpstoffen	21
2.3.3 Superplastificeerder	22
2.3.4 Oppervlakte-actieve stoffen.....	26
2.4 Proefopstelling	27
2.4.1 Zetmaat	27
2.4.2 Schudmaat.....	27
2.4.3 Elektrische weerstand	29
2.4.4 Drukproef	30
2.4.5 4-Puntsbuigproef.....	31
2.4.6 Splijttrekroef (Braziliaanse trekproef).....	32
2.5 Gestandaardiseerde proefstukken.....	33
3 Mengselontwerp & Bereiding	35
3.1 Referentiebeton	35
3.1.1 Reproductie 2018	35
3.1.2 Nieuw mengselontwerp	37
3.1.3 Foutenverificatie mengselontwerp 2018	38
3.1.4 Correctie hypothese	39
3.2 Mengselontwerp CNT-mengsel & superplastificeerder.....	41
3.2.1 CNT-mengsel & MasterRheobuild 1100.....	41

3.2.2	CNT-mengsel & MasterEase 3650	42
3.3	Bereiding	43
3.3.1	Vorbereiding.....	43
3.3.2	Bereiding referentiebeton.....	44
3.3.3	Bereiding CNT-mengsel en superplastificeerder.....	46
3.4	Ontkisten	53
4	Resultaten	55
4.1	Elektrische weerstand	55
4.2	Druksterkte.....	56
4.3	Splijttrekproef.....	58
4.4	4-Puntsbuigproef.....	61
4.5	Samenvatting resultaten	65
4.6	Massadichtheid	66
4.7	Oppervlaktebeoordeling	67
4.7.1	Referentiebeton	67
4.7.2	CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.....	68
4.7.3	CNT-mengsel & MasterEase3650.....	69
4.8	Kernholtes	71
4.9	Verband: Massadichtheid, Oppervlakte- & kernholtes.....	74
4.10	Terugkoppeling literatuur	75
5	Besluit.....	77
6	Toekomstvisie.....	79
	Bibliografie	81
	Bijlagen.....	83
	Bijlage A: Technische fiche MasterRheobuild1100	83
	Bijlage B: Technische fiche MasterEase3650	86
	Bijlage C: Mengselontwerp Referentiebeton.....	89
	Bijlage D: Berekening Rhenofit hoeveelheden – MasterRheobuild.....	95
	Bijlage E: Berekening Rhenofit hoeveelheden – MasterEase	96
	Bijlage F: Calculatie sterkte-eigenschappen.....	97

Lijst van tabellen

Tabel 1: Elektrische weerstanden per testreeks [1, p. 58].....	20
Tabel 2: Resultaten van de verschillende sterkteproeven per wt% [1, p. 71]	20
Tabel 3: zakking per zetmaatklasse.....	27
Tabel 4: Samenstelling referentiebeton 2018 [1, p. 49].	35
Tabel 5: Vochtgehalte granulatenmix	36
Tabel 6: Materiaalhoeveelheid - Referentiebeton.....	38
Tabel 7: Vergelijking hoeveelheden.	39
Tabel 8: CNT-mengsel & MasterRheobuild 1100	41
Tabel 9: CNT-mengsel & MasterEase 3650	42
Tabel 10: Overzicht aantallen & hoeveelheid.	43
Tabel 11: Totaaloverzicht hoeveelheden	44
Tabel 12: Resultaten - Drukproef.....	57
Tabel 13: Resultaten - Slijttrekproef.	59
Tabel 14: Resultaten – 4-puntsbuigproef.....	63
Tabel 15: Samenvatting resultaten.	65
Tabel 16: Massadichtheid - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	66
Tabel 17: Massadichtheid - CNT-mengsel & MasterEase3650.	66
Tabel 18: Blootstellingsklasse met bijhorende cementklasse.....	89
Tabel 19: Eigenschappen cementtype	90
Tabel 20: Minimum betonklasse	91
Tabel 21: Betonklasse met bijhorende cementklasse.....	92
Tabel 22: Blootstellingsklasse met minimum cementgehalte	93
Tabel 23: Consistentieklasse	94
Tabel 24: Waterhoeveelheid	94

Lijst van figuren

Figuur 1: Single walled (SWCNT) en Multiwalled (MWCNT) carbon nanotubes [4].	15
Figuur 2: Rhenofit oplossing bekeken door een elektronenmicroscop [6, p. 2].	16
Figuur 3: Schudmaat referentiebeton [1, p. 54].	19
Figuur 4: CNT-mengsel 0,10%wt voor uitvoering schudmaat [1, p. 54].	19
Figuur 5: Schudmaat van CNT-mengsel met 0,10%wt na uitvoering schudmaat [1, p. 54].	19
Figuur 6: Druksterktes na 28 dagen voor de verschillende w/c-factoren en verschillende Superplastificeerders [17, p. 12].	23
Figuur 7: Druksterktes van betonmengsels met drie verschillende soorten superplastificeerders [17, p. 11].	24
Figuur 8: Aanstampstaaf [23, p. 8].	28
Figuur 9: Schudtafel [24].	28
Figuur 10: Combinatie schudmaat en zetmaat [22].	29
Figuur 11: Drukproef [25].	30
Figuur 12: 4-Puntsbuigproef Opstelling [26, p. 8].	31
Figuur 13: Splijttrekroef [27, p. 1].	32
Figuur 14: Drukproef – Kubus [3, p. 6].	33
Figuur 15: 4-Puntsbuigproef - prisma's [3, p. 8].	33
Figuur 16: Splijttrekproefstuk - cilinders [3, p. 7].	34
Figuur 17: Schudmaat referentiebeton voorgaande masterproef [1, p. 54].	36
Figuur 18: w/c 0.5 - Referentiebeton.	37
Figuur 19: Zetmaat met gedroogde granulaten - Referentiebeton.	37
Figuur 20: Oppervlakte uitzicht referentiebeton	39
Figuur 21: Oppervlakte uitzicht referentiebeton met Rhenofit	39
Figuur 22: Oppervlakte uitzicht in mal – Referentiebeton.	45
Figuur 23: Gevulde mallen - Referentiebeton.	45
Figuur 24: Minimale hoeveelheid MasterRheobuild1100.	46
Figuur 25: zetmaat - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	46
Figuur 26: Oppervlakte uitzicht na zetmaat - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	47
Figuur 27: Oppervlakte uitzicht - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	47
Figuur 28: Schudmaat voor toevoeging MasterRheobuild1100.	48
Figuur 29: Schudmaat na toevoeging 100% MasterRheobuild1100.	48
Figuur 30: Mallen met betonmengsel - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	49
Figuur 31: Zetmaat voor 40% maximale hoeveelheid SP – CNT-mengsel & MasterEase3650.	50
Figuur 32: Zetmaat voor 56% maximale hoeveelheid SP - CNT-mengsel & MasterEase3650.	50
Figuur 33: Oppervlak 40% maximum hoeveelheid SP - CNT-mengsel & MasterEase3650.	51
Figuur 34: Oppervlak 56% maximum hoeveelheid SP - CNT-mengsel & MasterEase3650.	52
Figuur 35: Schudmaat met 56% van maximum hoeveelheid - CNT-mengsel & MasterEase3650.	52
Figuur 36: Mallen met betonmengsel - CNT-mengsel & MasterEase3650.	53
Figuur 37: Proefstukken in waterbak.	53
Figuur 38: Proefopstelling - Elektrische weerstand.	55
Figuur 39: Proefopstelling - Drukproef.	56
Figuur 40: Resultaten – Drukproef.	57
Figuur 41: Proefopstelling - Splijttrekproef.	58
Figuur 42: Boxplot - CNT-mengsel & MasterEase3650.	60
Figuur 43: Resultaten - Splijttrekproef.	60
Figuur 44: Proefopstelling – 4-puntsbuigproef.	61

Figuur 45: Boxplot – CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	63
Figuur 46: Boxplot - CNT-mengsel & MasterEase3650.	64
Figuur 47: Resultaten – 4-puntsbruigproef.	64
Figuur 48: Oppervlak kubus - Referentiebeton.	67
Figuur 49: Oppervlak prisma - Referentiebeton.	67
Figuur 50: Oppervlak cilinder – Referentiebeton.	68
Figuur 51: Oppervlak kubus - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	68
Figuur 52: Oppervlak cilinder - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	69
Figuur 53: Oppervlak prisma - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.	69
Figuur 54: Oppervlak kubus - CNT-mengsel & MasterEase3650.	70
Figuur 55: Oppervlak cilinder - CNT-mengsel & MasterEase3650.	70
Figuur 56: Oppervlak prisma - CNT-mengsel & MasterEase3650.	70
Figuur 57: Kernholtes – Referentiebeton.	71
Figuur 58: Kernholtes - CNT-mengsel met MasterRheobuild1100.	72
Figuur 59: Kernholtes - CNT-mengsel met MasterEase3650.	72

Abstract

Carbon nanotubes (CNT's) bezitten een uitermate hoge buig- en treksterkte waardoor ze een opportuniteit vormen om de sterkte-eigenschappen van beton te verhogen. In de praktijk treedt het probleem op dat de consistentie van beton met CNT's van het type Rhenofit-CNT3 daalt waardoor de verhoopte sterktestijging niet wordt behaald. Deze thesis onderzoekt de mate waarin de consistentie, en bijgevolg de sterkte, van beton met CNT's vergroot kan worden door toevoeging van een hulpstof. De concrete doelstelling is het verhogen van de consistentie, druk-, slijttrek- en buigsterkte van beton voorzien van CNT's.

In het labo werden drie verschillende mengsels getest op druk-, slijttrek- en buigsterkte: een referentiebeton zonder CNT's of hulpstof en twee CNT-betonmengsels met een hoeveelheid CNT's gelijk aan 0,05% van het cementgewicht en voorzien van een hulpstof. Als hulpstof werd in het ene geval gekozen voor een superplastificeerder op basis van naftaleen en in het andere geval voor een superplastificeerder op basis van polycarboxylaat.

Hoewel beide de consistentie van beton met CNT's in positieve mate bevorderen, overtreft de superplastificeerder op polycarboxylaatbasis de superplastificeerder op naftaleenbasis. Uitgaande van de buigproefresultaten kan echter geconcludeerd worden dat de lage CNT-concentratie (0,2%) in combinatie met de grote hoeveelheid water (99,4%) in de Rhenofit-CNT3-suspensie de stijging in sterkte-eigenschappen van beton met CNT's belemmert, ongeacht de toevoeging van een hulpstof.

Abstract in English

Carbon nanotubes (CNTs) have an extremely high bending and tensile strength which gives them an opportunity to increase the strength properties of concrete. In practice, the consistency of concrete with CNTs of the Rhenofit-CNT3 type decreases, so that the hoped-for increase in strength is not achieved. This master's thesis investigates the extent to which the consistency, and consequently the strength, of concrete with CNTs can be increased by adding excipients. The specific objective is to increase the consistency, compressive, split tensile and flexural strength of concrete with CNTs.

In the laboratory, three different mixtures were tested for compressive, splitting tensile and flexural strength: a reference concrete without CNTs or excipients and two CNT concrete mixtures with an amount of CNTs equal to 0.05% of the cement weight and with excipients. As excipients, a naphthalene-based superplasticizer was chosen in one case and a polycarboxylate-based superplasticizer in the other.

Although both increase the consistency of concrete with CNTs, the polycarboxylate-based superplasticiser outperforms the naphthalene-based superplasticiser. However, based on the bending results, it can be concluded that the low CNT concentration (0.2%) in combination with the large amount of water (99.4%) in the Rhenofit-CNT3 suspension hinders the increase in strength properties of concrete with CNT's, regardless of the addition of excipients.

1 Inleiding

Beton is één van de meest gebruikte materialen ter wereld. Het is daarom van essentieel belang dat er onderzoek wordt gevoerd naar alternatieve versterkingsmethoden ten opzichte van de klassieke manier van wapenen. In deze thesis ligt de focus op het gebruik van koolstofnanobuizen (*Engels: carbon nanotubes of CNT's*) van het type Rhenofit-CNT3. De voornaamste eigenschappen van CNT's zijn de zeer hoge buig- en treksterkte. Hierdoor vormen ze een opportuniteit om de sterkte-eigenschappen van beton te verhogen.

Een voorgaande masterproef heeft aan de hand van destructieve proeven uitgewezen dat beton met CNT's van het type Rhenofit-CNT3, zonder hulpstoffen, geen gunstige invloed heeft op de betonsterkte. Echter werd er waargenomen dat het beton met CNT's van het type Rhenofit-CNT3 een zeer lage consistentie had. Hierdoor werd de vooropgestelde hypothese, namelijk een stijging in de sterkte-eigenschappen, niet bevestigd [1].

Vervolgens heeft een voorgaande bachelorproef geconcludeerd dat het toevoegen van een hulpstof de consistentie zal verhogen. Hierdoor zal er een stijging van de sterkte-eigenschappen van beton met CNT's van het type Rhenofit-CNT3 plaatsvinden [2]. Het doel van dit onderzoek is om een verbeterd betonmengsel te ontwerpen en te testen, op basis van de voorgaande bachelorproef. De onderzoeksvraag luidt als volgt: "Wat is de invloed van Rhenofit-CNT3-koolstofnanobuizen in combinatie met hulpstof op de sterkte-eigenschappen van beton?".

De literatuurstudie start met een toelichting over de eigenschappen van CNT's, gevolgd door een specifieke benadering van de Rhenofit-CNT3-suspensie. Daarna komen de problemen omtrent de lage consistentie en de afwijkende resultaten van de voorgaande masterproef gedetailleerder aan bod. Hierop aansluitend biedt de paragraaf "hulpstoffen" verschillende opties om de consistentie van beton te verhogen. Op basis hiervan wordt de meest geschikte hulpstof gekozen. Naast het belang van een goede consistentie, is het ook belangrijk dat de CNT's goed dispergeren in het beton. Als volgende worden dus de verschillende dispersiemethodes toegelicht.

In het hoofdstuk "Mengselontwerp & Bereiding", bespreekt men de mengsels gecreëerd in het labo. In het labo werden in het ene geval betonmengsels met CNT's en de geschikte hulpstof getest. In het andere geval werd een referentiebeton, die noch CNT's noch een hulpstof bevat, ontworpen en getest om de invloed van de CNT's in kaart te brengen. Tijdens de bereiding werden de zet- en schudmaat genomen om de invloed van de hulpstof op de consistentie van het beton met CNT's te onderzoeken. Vervolgens werden de mengsels gegoten in kubussen, cilinders en prisma's. In de resultaten wordt een analyse gemaakt van de resultaten van de druk-, splijttrek- en buigsterkte te besproken. De testen werden, aan de hand van de nodige meetapparatuur, uitgevoerd in het technologiecentrum in Diepenbeek.

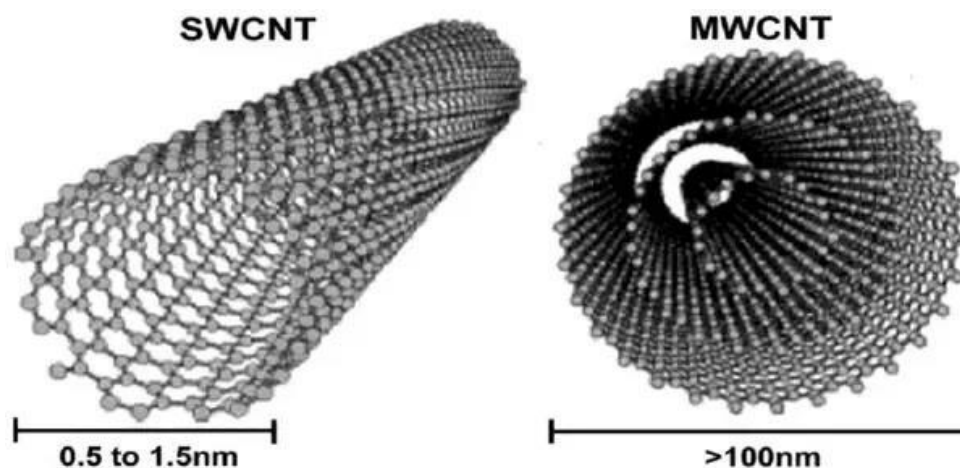
Op basis van de resultaten wordt er besloten of CNT's van het type Rhenofit-CNT3 al dan niet een sterkteverhoging teweeg brengen, mits de aanwezigheid van een hulpstof.

2 Literatuurstudie

De literatuurstudie geeft een gedetailleerde toelichting over de componenten van het beton, welke worden gebruikt in dit onderzoek. Eerst volgt een uitleg over carbon nanotubes, met een verwijzing naar de hoofdcomponent in dit onderzoek namelijk, Rhenofit-CNT3. Vervolgens worden de resultaten van de masterproef in 2018 beschreven om aan te tonen dat het toevoegen van een hulpstof zijn nut kan hebben, gehaald uit een voorgaande bachelorproef [2]. Daarna wordt de bevordering van de dispersie en consistentie van CNT's in beton diepgaander bekeken om concreet te maken welke hulpstof er aan bod komt in dit onderzoek. Tot slot worden de verschillende destructieve proeven toegelicht, conform de norm "NBN EN 12390-1: Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds" [3].

2.1 Carbon nanotubes

Carbon nanotubes zijn enkelwandige, dubbelwandige of meerwandige buisjes opgebouwd uit carbon atomen, met een wanddikte van één carbon atoom groot. Een visuele weergave is zichtbaar op onderstaande figuur. De figuur toont links en rechts de respectievelijk enkelwandige- en meerwandige CNT's. De enkelwandige- (SWCNT's = *single-walled carbon nanotubes*) en meerwandige- (MWCNT's = *Multi-walled carbon nanotubes*) koolstofnanobuizen zijn de meest voorkomende soorten in tegenstelling tot de dubbelwandige, welke minder voorkomend zijn. De CNT's bestaan op de markt in de vorm van een suspensie of poedervorm.



Figuur 1: Single walled (SWCNT) en Multiwalled (MWCNT) carbon nanotubes [4].

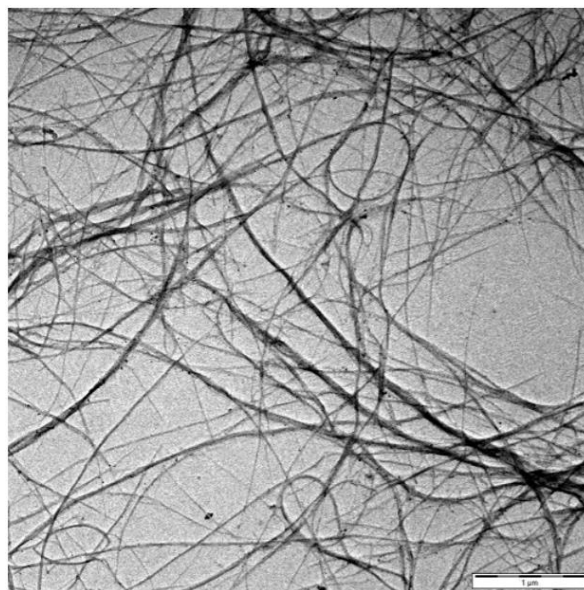
De SWCNT heeft een zeer variërende diameter, afhankelijk van de producent. De diameter kan oplopen tot 2 nanometer, waar de lengte kan variëren van 5 tot 30 micrometer [4]. Ze bestaan uit een vel van opgerold grafeen om een holle cilinder te bekomen met een wanddikte van één atoom dik. Door deze structuur bezitten de SWCNT's zeer exceptionele eigenschappen: een hoge thermische geleidbaarheid, hoge elektrische geleiding en tot slot zeer elastisch (~18% vervorming tot falen) en

zeer flexibel gedrag (Young's modulus +/- 1.8 TPa). Daarnaast bezitten ze ook een uitermate hoge treksterkte van 50-100 GPa. Indien SWCNT's worden toegevoegd aan beton, zouden de eigenschappen van het beton ook in gunstige maten toenemen [4].

De MWCNT's, welke het meest voorkomen, zijn opgebouwd uit verschillende lagen - in elkaar liggende - SWCNT's tot wel 20 lagen in elkaar. De buitendiameter kan oplopen tot 100 nanometer met een binnendiameter rond de vijf à tien nanometer, afhankelijk van het soort MWCNT. Door deze meerdere SWCNT's in elkaar, krijgen ze ook enkele zeer belangrijke voordelen in vergelijking met SWCNT's. Ze kunnen makkelijker in grote massa worden geproduceerd, bezitten een lagere productiekost per eenheid en hebben een hogere thermische en chemische stabiliteit. Het blijkt dat deze twee eigenschappen kunnen resulteren in aantastingen van de SWCNT's, waar bij MWCNT's alleen de buitenste laag wordt aangetast door chemicaliën [5].

2.1.1 Rhenofit-CNT3

De suspensie bevat drie componenten waaronder SWCNT's, met een waarde van 0,2% van het totaal gewicht (*afkorting: wt%*), een dispersiemiddel (0,4 wt%) en tot slot water (99,4 wt%). Het dispergeermiddel heeft als functie om het kleven van de SWCNT's onderling terug te dringen. Het product heeft een PH gelegen tussen 7 en 9, wat erop wijst dat eventuele additieven zich ook in dit interval moeten bevinden om chemisch onevenwicht te vermijden [6].



Figuur 2: Rhenofit oplossing bekeken door een elektronenmicroscop [6, p. 2].

2.1.2 Poeder vs. Suspensie

Zoals eerder vermeld, zijn CNT's beschikbaar in enerzijds een poedervorm of anderzijds in een geprefabriceerde suspensie, waaronder Rhenofit-CNT3 wordt meegerekend. De geprefabriceerde suspensie heeft als doel dat de CNT's zich niet gaan bundelen en dat deze suspensie dadelijk bruikbaar is in de praktijk, zonder overbodige bereidingsmaatregelen. Het nadeel is onwetendheid over het toegevoegde dispersiemiddel in de geprefabriceerde suspensie. De reden hiervoor is dat de meeste bedrijven hun samenstellingen discreet willen houden doordat dit nog steeds een product in ontwikkeling is. Het voordeel bij het gebruik van een poeder is dat men kan kiezen wat de concentratie van CNT's bedraagt in de suspensie en men kan deze aanpassen in het geval van een slechte dispersie. Het voordeel bij het gebruik van de poedervorm is dus dat de keuze en de flexibiliteit tot aanpassing van de CNT-concentratie in handen ligt van de gebruiker.

Omtrent de preparatie van deze poeders is er in het verleden al onderzoek naar uitgevoerd. Volgens [7] zou het poeder best eerst worden blootgesteld aan sonicatie (zie paragraaf 2.3) en waar vervolgens een oppervlakte-actieve stof genaamd Dolapix 67 wordt toegevoegd. Deze oppervlakte-actieve stof heeft als doel de dispersie door sonicatie in stand te houden. Daarna werd dit mengsel gemengd met 40% van het benodigde water, waar de resterende 60% werd gebruikt om de aggregaten te bevochtigen. Deze suspensie werd dan voor 4 uur magnetisch gemengd, gevolgd door opnieuw 30 minuten sonicatie. De suspensies in [8] werden 45 minuten magnetisch gemengd en daarna nog 30 minuten sonicatie op toegepast.

[8] toont aan dat het gebruik van een poeder of geprefabriceerde suspensie geen groot verschil teweeg brengt tussen de verschillende sterkte-eigenschappen van de betonmengsels. Het belangrijkste besluit was dat de hoeveelheid van CNT's zich tussen de 0,05 en 0,1% van het cementgewicht moest bevinden om de beste resultaten inzake de sterkte-eigenschappen.

2.1.3 Dispersie bevorderen

De verbetering van de dispersie van CNT's heeft men door de jaren heen op verscheidene manieren verbeterd. De twee voornaamste categorieën zijn fysische- en chemische technieken zoals sonicatie, ball-milling (kogelmolen), oppervlaktemodificatie, het gebruik van een oppervlakte-actieve stof of niet-ionogene oppervlakte-actieve stof en tot slot de (super)plastificeerder.

Sonicatie geeft hoog energetische trillingen door aan de suspensie waardoor microscopische bubbels ontstaan in de suspensie. Deze bubbels zorgen ervoor dat de CNT's scheiden van de bundels waarin ze zich bevinden.

Dispersie met behulp van de kogelmolen zal het oppervlak van de CNT's laden, wat indringing van de CNT's in de composiet mogelijk maakt. Vervolgens is oppervlaktemodificatie het veranderen van het oppervlak van een materiaal met als gevolg dat de indringing van CNT's beter verloopt. De niet-ionogene oppervlakte-actieve stoffen worden geabsorbeerd door de CNT's waardoor individuele CNT's afschilferen van de gebundelde CNT's. De bevordering van de dispersie door een plastificeerder

zal later in de paper uitgebreid worden uitgelegd. Tot slot werd in [8] aangehaald dat de meest optimale wijze ter bereiding van een suspensie bestaat uit het gebruik van een poeder in combinatie met een oppervlakte-actieve stof [9], [10].

Het gebruik van sonicatie, oppervlakte-actieve stoffen en plastificeerder zijn de meest voorkomende methodes om de dispersie te bevorderen. Dit onderzoek focust zich op het zoeken van een toevoegsel welke de problemen, aangehaald in volgende paragraaf, moet oplossen [8], [9], [10].

2.2 Toelichting voorgaande masterproef 2018

2.2.1 Samenvatting

Een voorgaande masterproef in 2018, uitgevoerd aan de UHasselt, focuste zich reeds op dit onderwerp. Het doel was om de sterkte eigenschappen (voornamelijk buigtreksterkte) van betonmengsels te verhogen met behulp van CNT's van het type Rhenofit-CNT3 [1]. Er werden 3 testreeksen opgesteld van 10 proefstukken per testreeks, voorzien van een verschillend percentage CNT van respectievelijk 0,05; 0,07 en 0,10%wt. Tijdens de bereiding van de betonmengsels traden er enkele significante problemen op. De verwerkbaarheid, en achteraf ook de sterktes, kwamen niet overeen met de vooropgestelde hypothesen. In de volgende alinea's worden deze problemen toegelicht.

2.2.2 Problemen

2.2.2.1 Consistentie

Tijdens de bereiding in het labo traden er enkele significante problemen op, waaronder de consistentie van het beton met CNT's. De resultaten van de schudmaat-proef zijn zichtbaar op de volgende figuren 4 en 5. Figuur 3 is het resultaat van het referentiebeton, zonder CNT's. Figuur 4 is het betonmengsel met 0,10%wt CNT's, voor de schudtafel werd aangezet. Dan figuur 5 is het eindresultaat nadat de schudmaat werd genomen. Er is duidelijk zichtbaar dat het referentiebeton meer vloeibaar oogt dan het beton met CNT's.



Figuur 3: Schudmaat referentiebeton [1, p. 54].



Figuur 4: CNT-mengsel 0,10%wt voor uitvoering schudmaat [1, p. 54].



Figuur 5: Schudmaat van CNT-mengsel met 0,10%wt na uitvoering schudmaat [1, p. 54].

Er kan dus besloten worden dat door toevoeging van de Rhenofit-suspensie aan het beton, de consistentie drastisch afneemt en dat hier een oplossing voor moet gevonden worden. De bachelorproef toonde aan dat de toevoeging van een hulpstof voor verbetering kan zorgen [2].

2.2.2.2 Elektrische weerstand

De elektrische weerstand is een parameter die het geleidend gedrag van het beton in kaart brengt. De hypothese geldt dat wanneer het percentage CNT's stijgt, de elektrische weerstand zou dalen. Deze hypothese kan opgesteld worden doordat de CNT's goed elektrisch geleidbaar zijn. Dus indien er een hoger percentage CNT's aanwezig is in het beton, zou de elektrische weerstand moeten dalen indien er een goede dispersie aanwezig is. De resultaten van deze proef zijn zichtbaar in tabel 1 [1].

Tabel 1: Elektrische weerstanden per testreeks [1, p. 58].

Proefstuk	0% (Ω)	0.05% (Ω)	0.07% (Ω)	0.10% (Ω)
1	3500	880	500	1600
2	2800	520	495	1160
3	3040	830	465	1400
4	1600	1370	770	1260
5	1280	1170	640	1370
6	1700	1250	880	1700
7	1400	1050	1060	1900
8	1600	780	1130	1900
9	2000	930	840	1900
10	2400	1350	980	1700
11	2400	-	-	900
12	-	-	-	900
Gemiddeld	2375	1013	776	1474

De elektrische weerstand lag lager dan de referentiewaarde wat gunstig leek, maar bij de CNT-betonmengsels onderling waren enkele problemen merkbaar. Een concentratie van 0,10wt% bood meer elektrische weerstand dan deze van 0,07wt%. Hieruit wordt afgeleid dat de mate van dispersie bij hogere percentages van CNT's een dalende trend vertoonde.

2.2.2.3 Reductie in sterkte

Al de voorgaande problemen resulteren in het feit dat de representatieve sterktes van de CNT-mengsels lager liggen dan de sterkte van het referentiebeton, zonder CNT's. De druk-, buig-, en slijttreksterkte lagen alsnog lager dan de referentiewaarde maar er was wel een stijgend verloop merkbaar naarmate het percentage CNT werd verhoogd, op uitzondering van het CNT-mengsel met 0,7%wt.

Tabel 2: Resultaten van de verschillende sterkteproeven per wt% [1, p. 71]

	0.0%	0.05%	0.07%	0.10%
$f_{fc,rep}$ (MPa)	39,82	33,85	31,06	30,38
f_{ct} (MPa)	3,68	2,91	2,55	3,1
$f_{ct,L}^f$ (MPa)	2,83	2,17	1,99	2,46

2.3 Hulpstoffen

2.3.1 Inleiding

Uit de voorgaande paragraaf is gebleken dat de consistentie drastisch daalde na toevoeging van de CNT's. Daarnaast is gebleken dat de dispersie van de CNT's niet optimaal plaatsvond. Naarmate het percentage CNT's toenam, steeg ook de elektrische weerstand. De vooropgestelde hypothese gold dat in ideale omstandigheden de elektrische weerstand had moeten dalen wanneer het percentage CNT's toenam. Deze hypothese werd aanschouwd met het feit dat CNT's een goede elektrische geleidbaarheid als eigenschap bezitten.

Het toevoegen van een hulpstof kan een oplossing bieden. Het toevoegen ervan zal resulteren in betere verwerkingseigenschappen op gebied van consistentie, dispersie en zo dus ook de elektrische geleidbaarheid. Al deze factoren hebben uiteraard als doel om de sterkte te verhogen [2].

2.3.2 Soorten hulpstoffen

Er zijn vandaag de dag een groot aantal hulpstoffen verkrijgbaar op de markt. In het kader van dit onderzoek is het belangrijk dat de toevoegsels, na de conclusie van de voorgaande masterproef, de verwerkbaarheid, de dispersie en de sterkte bevorderen en verhogen. Voorbeelden van hulpstoffen zijn bindingsversnellers en -vertragers, luchtbelvormers, plastificeerders en superplastificeerders [11]. Op basis van de voorgaande bachelorproef is het resultaat dat de hulpstof van het type superplastificeerder effectief in aanmerking komt om deze parameters te laten toenemen [2]. Daarnaast kan er ook worden gebruik gemaakt van de oppervlakte-actieve stoffen.

Een soort hulpstof, genaamd superplastificeerder, is veruit de meest gebruikte hulpstof voor beton. Superplastificeerders bestaan uit kunstmatige (gesynthetiseerde) moleculen. De verschillende soorten superplastificeerders die er bestaan zijn de "melamines" (PMS), de "naftalenen" (PNS) en tot slot nog de "polycarboxylaten" (PCP) en de "polycarboxylaat-ethers" (PCE) [11].

Daarnaast zijn er ook de hulpstoffen "oppervlakte-actieve stoffen". Deze stoffen zorgen ervoor dat de oppervlaktespanning tussen een vloeistof en een vast element verlaagd wordt [12]. Oppervlakte-actieve stoffen worden opgedeeld in vier grote groepen namelijk, de niet-ionische-, anionische-, amfotere- en kationische stoffen. Het contrast tussen deze stoffen is het verschil in de lading van het hydrofiele deel [13].

Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat het toevoegen van de hulpstof superplastificeerder een gunstige invloed kan genereren op de betonsterktes indien CNT's worden toegevoegd [2]. In dit onderzoek wordt er gekozen voor enerzijds de superplastificeerder op basis van naftaleen genaamd "*MasterRheobuild1100*", en anderzijds de superplastificeerder op basis van polycarboxylaat "*MasterEase3650*". De oppervlakte-actieve stof 'Triton-X100' bleek op voorhand een positief effect te

garanderen maar na onderzoek is gebleken dat de toevoeging ervan zeer nadelig is, in de paragraaf "3.4.1 Triton-X100" meer hierover.

2.3.3 Superplastificeerder

Een superplastificeerder zorgt voor éézelfde verwerkbaarheid bij een lagere hoeveelheid water. Daarnaast fungeert het als een dispersiemiddel van de CNT's in het beton. Het gebruik van een superplastificeerder bevat, zoals eerder vermeld, verschillende voordelen maar zeker ook aandachtspunten. Deze worden verder toegelicht in volgende paragrafen.

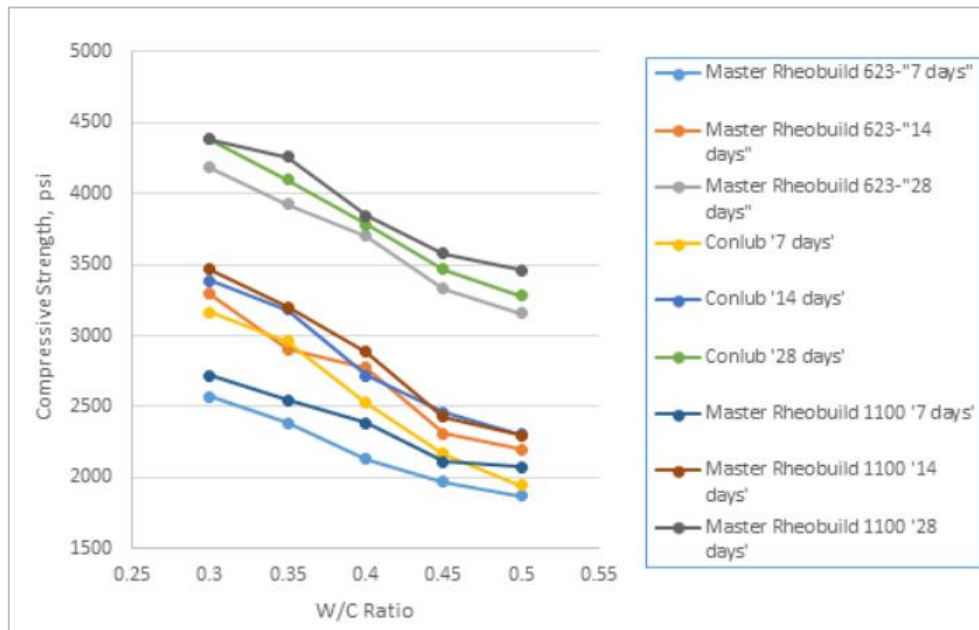
2.3.3.1 Werking

Door de toevoeging van een superplastificeerder aan een betonmengsel zullen de cementfracties en het aanmaakwater deze superplastificeerder absorberen. Zodra hieraan is voldaan, krijgt elke cementfractie een negatieve lading doordat de superplastificeerder zich hier rond bindt [14]. CNT's en de superplastificeerder vertonen dus respectievelijk apolair en polair gedrag [13]. Hierdoor zullen de korrels zich onderling afstoten. Het doel is dat hetzelfde gebeurt met de CNT's in de Rhenofit-suspensie. De CNT's zullen op dezelfde manier als de cementfracties een geabsorbeerde laag van de superplastificeerder krijgen.

De dikte van deze laag heeft een waarde rond de 50 Å (Angstrom = 10^{-10} meter) terwijl de afstand voor de werking van Van der Waals krachten tussen CNT's 2,0-12,0 Å bevindt. Deze absorptielaag zal er dus voor zorgen dat de CNT's elkaar niet gaan aantrekken. De oorzaak hiervan is dat de geabsorbeerde laag groter is dan de afstand, dewelke vanderwaalskrachten nodig hebben om effectief in werking te treden. Indien dit niet het geval is, zullen de CNT's samenklitten en zullen er slechte resultaten worden bekomen voor de sterkte-eigenschappen en de elektrische weerstand [14].

Bij éézelfde verwerkbaarheid zorgt de superplastificeerder ervoor dat de hoeveelheid water sterk wordt teruggeschroefd, met een sterkte toename als gevolg hiervan [15]. Aangezien de Rhenofit-suspensie bestaat uit 99,4% water, zal er klaarblijkelijk een groot aandeel van het aanmaakwater worden vervangen door het oplosmiddel betreft de Rhenofit-suspensie. De superplastificeerder is dus een oplossing voor dit probleem.

Onderstaande figuur is een grafische weergave waar het effect van de plastificeerder bij een hogere w/c-factor direct duidelijk wordt. Bij een w/c-factor van 0,50 wordt na 7, 14 en 28 een groter verschil in sterkte waargenomen bij het gebruik van een MasterRheobuild 1100 ten opzichte van de andere mengsels. Dit verschil in sterkte is minder in het geval van lagere w/c-factoren.



Figuur 6: Druksterktes na 28 dagen voor de verschillende w/c-factoren en verschillende Superplastificeerders [15, p. 12].

2.3.3.2 Aandachtspunten

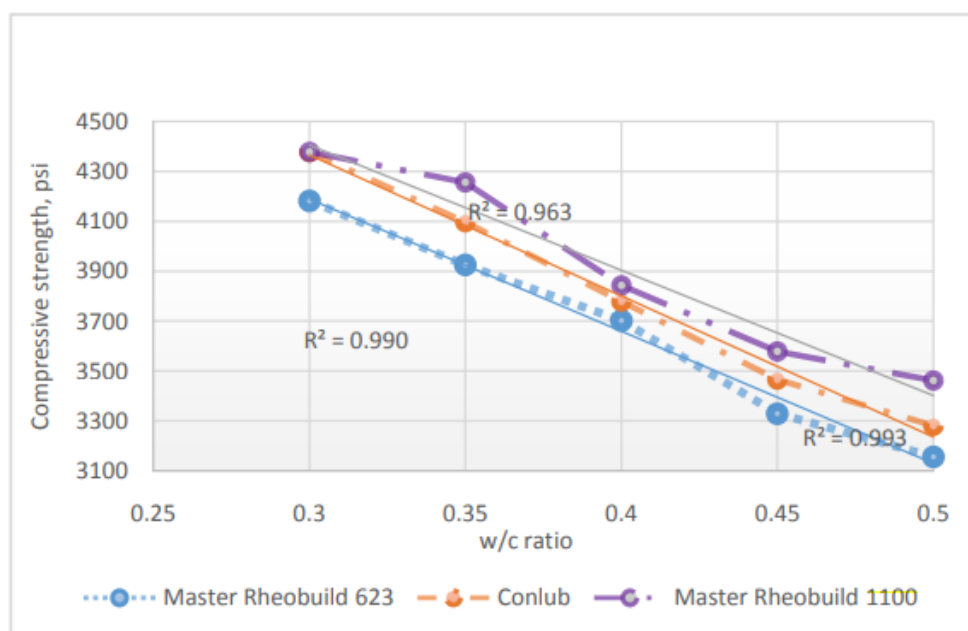
De hoeveelheid toe te voegen superplastificeerder dient wel nauwkeurig bepaald te worden. Een toevoeging van een 1,2%- en 1,8%-superplastificeerder aan een betonmengsel met 0,02%wt CNT's resulteerde in een sterkte afname van respectievelijk 11 en 19% [16]. Het is dus zeer belangrijk om de verhouding superplastificeerder-cement nauwkeurig te bepalen. Hier wordt meer aandacht aan besteed tijdens het bepalen van de materiaalhoeveelheden. Meer info omtrent het toevoegen van de superplastificeerder volgt tijdens de bereiding van het beton zelf in het hoofdstuk "Mengselontwerp".

2.3.3.3 Keuze superplastificeerder

Vandaag de dag is het gamma aan superplastificeerders zeer uitgebreid. Elk van deze producten heeft zijn specificatie om betonmengsels te verbeteren. Het is voor dit onderzoek van alle belang dat de verschillende parameters worden bekeken waar de superplastificeerder zijn aandeel in heeft. Deze parameters zijn verwerkingsduur, pH-zuurtegraad, chemische samenstelling, etc.. Na contact met een producent van superplastificeerders, werden er twee soorten superplastificeerders aangeboden.

2.3.3.3.1 MasterRheobuild 1100

MasterRheobuild1100 is een superplastificeerder op basis van naftaleen formaldehyde condensaat. Een voorbeeld van dispersieverbetering werd aangetoond door onderzoek naar de invloed van een superplastificeerder inzake de dispersie van de poedervormige MWCNT's [6]. Via UV-vis spectra-, zeta potentiaal- en elektrische weerstandsmetingen werd geconcludeerd dat een superplastificeerder met hoofdcomponent naftaleen de beste oplossing bood, aangezien het de beste resultaten kon voorleggen bij 2 van de 3 metingen [14]. Toch vertoonde een superplastificeerder met hoofdcomponent polycarboxylaat de beste resultaten naar elektrische geleidbaarheid toe [14]. Het heeft een pH-waarde tussen 6-9 wat overeenkomt met de pH-grad van de CNT-suspensie, 7-9. Indien de pH-waarde te laag zou zijn, kon het misschien voorvallen dat de CNT's chemisch werden aangetast waardoor ze hun werking verloren. Onderstaande figuur toont aan dat het betonmengsel met MasterRheobuild1100 de hoogste sterkte bekommt na 28 dagen t.o.v. twee andere superplastificeerders.



Figuur 7: Druksterktes van betonmengsels met drie verschillende soorten superplastificeerders [15, p. 11].

Het nadeel van dit product is de ouderdom want het is een technologie van de jaren '60. Tegenwoordig wordt het zelden tot nooit meer verkocht. Doorheen de jaren zijn de naftalenen vervangen door carboxylaten. Een ander nadeel is dat de verwerkingstijd van het naftaleen type lager ligt (60 minuten) dan die van het carboxylaat type (1 uur 30 minuten). Er werd door de producent dus aangeraden om ook testen uit te voeren met de mindset om het later toepasbaar te maken in de bouwsector. Deze vernieuwende superplastificeerder wordt beschreven in de volgende paragraaf.

2.3.3.3.2 MasterEase 3650

MasterEase 3650 is een superplastificeerder op basis van poly aryl ether (polycarboxylaate = verouderde naam). Het kan toegepast worden voor betonspecies die zich bevinden in volgende consistentieclassen: S2 - S5 of F2 - F5. Daarnaast bevindt de pH-waarde zich tussen 4,0 en 7,0. In eerste instantie kan deze pH-waarde voor een probleem zorgen bij Rhenofit-CNT3. Echter werkt het ook bij PH waardes tussen 2 en 10, waardoor de kans op chemische aantasten van de CNT's wordt gereduceerd. Van deze superplastificeerder mag er tussen de 500 en 2500 gram per 100 kg cement worden toegevoegd, terwijl er bij de "MasterRheobuild 1100" maar een hoeveelheid tussen de 150 en 1500 gram per 100 kg cement mag worden toegevoegd. Deze informatie over de superplastificeerders is terug te vinden op de verschillende technische fiches (zie bijlage A en B) ervan.

Er werd tevens ook onderzoek uitgevoerd naar een plastificeerder op basis van polycarboxylaate voor cementgebonden mengsels. Hieruit bleek dat elektrische weerstand lager lag bij het gebruik van een superplastificeerder op basis van polycarboxylaate ten opzichte van de overige superplastificeerders. Echter was dit niet de conclusie bij de UV-Vis spectra en zeta potentiaal metingen [14].

Verder onderzoek toonde aan dat over het algemeen de superplastificeerders op basis van polycarboxylaate superieur zijn ten opzichte van een superplastificeerder met als hoofdcomponent naftaleen. Dit op vlak van dispersie van CNT's in een waterige oplossing. Men bekeek het verschil tussen verschillende types van polycarboxylaten. Uit dit onderzoek bleek dat polycarboxylaten met een langere ruggengraat (295 methacryl eenheden) betere resultaten opleverden omtrent de dispersie in tegenstelling tot wanneer er een korte ruggengraat (83 methacryl-eenheden) werd gebruikt. Het tweede belangrijke aspect is dat de lengte van de zijgroepen minder invloed had op de dispersie [17].

Daarnaast is er een superplastificeerder getest op basis van polycarboxylaate in combinatie met CNT's in beton. Er kan worden afgeleid dat de sterkte met een superplastificeerder op basis van polycarboxylaate een stijging van 25% vertoont in sterkte ten opzicht van hetzelfde mengsel zonder superplastificeerder. Dit bevestigt dat deze soort van plastificeerder ook kan toegepast worden bij betonsamenstellingen met CNT's en niet alleen bij mortels met CNT's [18].

Tot slot vermeld de technische fiche van MasterEase3650 dat een overmaat aan superplastificeerder zorgt voor ontmenging en bleeding. Het is dus ten zeerste afgeraden om een overmaat van dit product toe te voegen.

2.3.4 Oppervlakte-actieve stoffen

Aangezien het van uiterst belang is dat er een goede dispersie aanwezig is, kan het toevoegen van een oppervlakte-actieve stof de dispersie bevorderen. Deze stof heeft als eigenschap dat het, zoals bij een superplastificeerder, ervoor zorgt dat het polair en apolair gedrag veroorzaakt. In ons geval zou dit de dispersie verbeteren aangezien de CNT-deeltjes zich beter kunnen verspreiden door de reductie van de aanwezige Van Der Waals-krachten. Deze stof kan gezien worden als een component van de superplastificeerder maar het bezit alleen de werking van de absorberende laagvorming.

2.3.4.1 TritonX100

Er wordt geconcludeerd dat TritonX100 een oppervlakte-actieve stof is die kan gebruikt worden om de dispersie van CNT's te bevorderen. Er werden vier verschillende stoffen gebruikt om de dispersie te verbeteren in een mortel. Twee van de vier stoffen waren superplastificeerders met als hoofdcomponent polycarboxylaat ether en een naftaleen gebaseerde superplastificeerder. De resultaten toonden aan dat de dispersie met TritonX100 30% hoger was dan de superplastificeerders. Dus op eerste zicht leek TritonX100 een goede keuze om de dispersie te bevorderen.

Echter bleek het dat druksterkte van de verschillende mengsels met TritonX100 tot wel 5 tot 7 keer lager lag dan bij het gebruik van de superplastificeerders [19]. Ook de fabrikant van de superplastificeerder bevestigde dat het toevoegen van oppervlakte-actieve stoffen de dispersie van de CNT's bevordert maar dat het ook nadelige invloed heeft op de sterkte-eigenschappen van beton.

2.4 Proefopstelling

In volgende paragrafen worden de verschillende testen toegelicht, welke worden uitgevoerd op de verschillende proefstukken. Deze resultaten worden vergeleken voor alle mengsels onderling, alsook ten opzichte van de masterproef [1]. De verschillende proeven die worden uitgevoerd op de mengsels zijn de druk-, de 4-puntsbuig- en de Braziliaanse splijtproef. Daarnaast wordt ook de elektrische weerstand gemeten. In het kader van de verwerkbaarheid zullen de schud- en zetmaat genomen worden van de betonmengsels.

2.4.1 Zetmaat

De zetmaat wijst op consistentiegraad van het beton, gemeten met behulp van de kegel van Abrams. Deze kegel heeft een diameter van 100 mm en 200 mm respectievelijk boven- en onderaan met een hoogte van 300 mm. De zetmaat wordt dan bepaald aan de hand van hoeveel mm de betonspecie inzakt nadat de kegel van Abrams wordt verwijderd. De graad van inzakking bepaalt dan de consistentieklasse. Hoe hoger de zetmaat, hoe vloeibaarder de betonspecie en hoe hoger de consistentieklasse van het beton. In tabel 3 zijn de verschillende consistentieklassen weergegeven inclusief hun zetmaat. De grootte van de zetmaat, met de S van Slump, is S1 tot en met S5 [20].

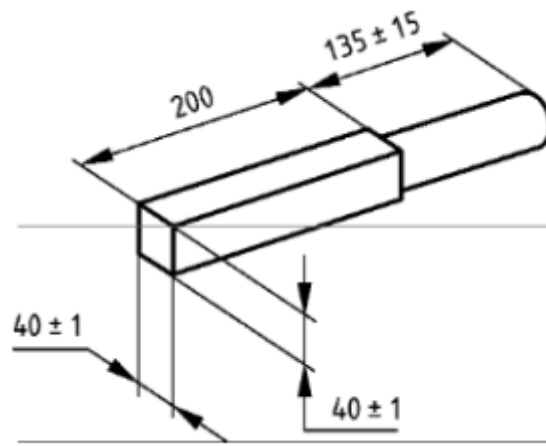
Tabel 3: zakking per zetmaatklasse

Zetmaatklasse	Zetmaat (mm)
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 2200

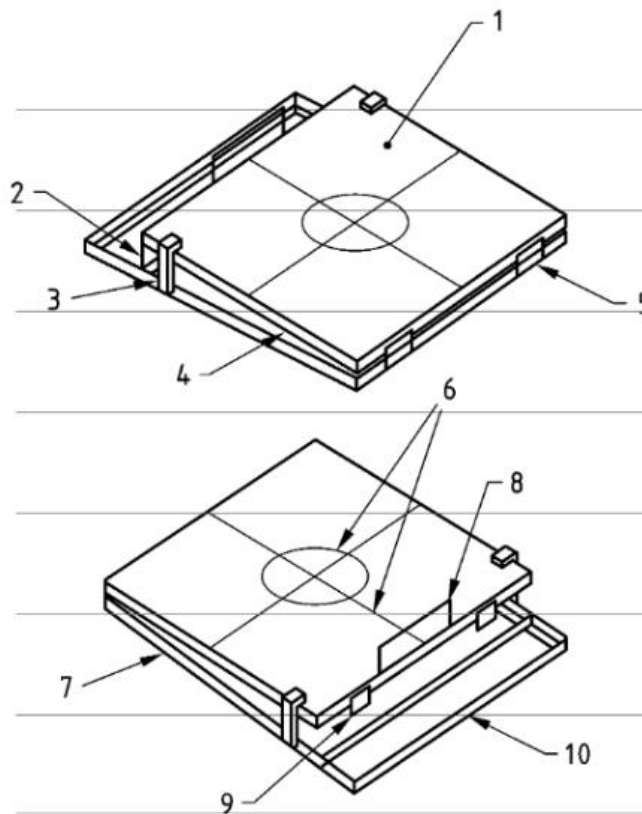
2.4.2 Schudmaat

Het bepalen van de schudmaat wordt uitgevoerd door een kegel te plaatsen op een schudtafel waarin de betonspecie wordt aangebracht. Hier heeft de onderzijde een diameter van 130 mm, de bovenzijde een diameter van 200 mm en een hoogte van 200mm. De tafel wordt nu, handmatig, 15 keer scharnierend opgetild en losgelaten. De zakking die hierna optreedt, ook wel de schudmaat genoemd, wordt gekenmerkt door de diameter van de betonspecie op de tafel [21].

De betonspecie moet voldoende worden verdicht in de kegel, door gebruik van een aanstamp staaf zoals weergegeven in figuur 8. Figuur 9 is een schematische weergave van een schudtafel.



Figuur 8: Aanstampstaaf [21, p. 8]



Key

- | | | | |
|---|----------------------------------|----|----------------|
| 1 | Metal plate | 6 | Markings |
| 2 | Travel limited to (40 ± 1) | 7 | Base frame |
| 3 | Upper stop | 8 | Lifting handle |
| 4 | Table top | 9 | Lower stop |
| 5 | External hinges | 10 | Toe board |

Figuur 9: Schudtafel [22].

De schudmaat heeft een codering, met de F van Flow, van F1 tot en met F7. Deze consistentieklassen hebben dan hun eigen grenzen van de schudmaat zoals weergegeven in Figuur 10 [21].

► Consistentieklassen (op te geven door aannemer)				
Aanduiding	Verdichtingsmaat c		Zetmaat (mm) h	Schudmaat (mm)
Droog	C0	≥ 1,46		
Aardvochtig	C1	1,45–1,26	S1 (10–40)	F1 (≤ 340)
Halfplastisch	C2	(1,25–1,11)	S2 50–90	F2 (350–410)
Plastisch	C3	(1,10–1,04)	S3 100–150	F3 (420–480)
Zeer plastisch			S4 (160–210)	F4 490–550
Vloeibaar			S5 (≥ 220)	F5 560–620
Zeer vloeibaar				F6** (≥ 630)

Verdichtingsmaat $C = \left(\frac{h_0}{h_0 - s} \right)$

Zetmaat (mm)

Schudmaat (mm)

* Voor schudmaat aangepaste kegel H=200 mm gebruiken (15× schudden).
 ** Voor zelfverdichtend beton vloeimaat en stabiliteit volgens BRL 1801 en CUR-aanbeveling 93.

Figuur 10: Combinatie schudmaat en zetmaat [20].

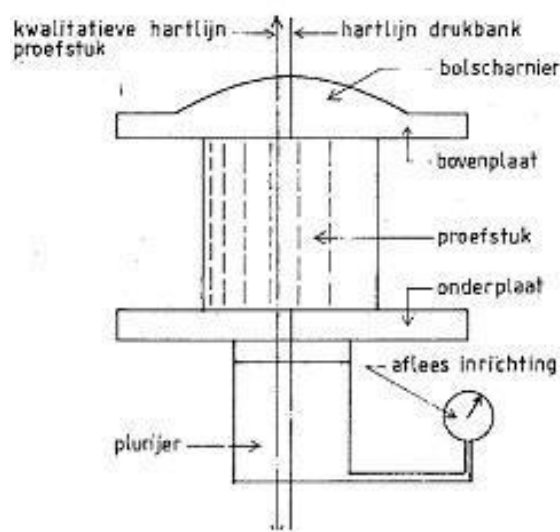
Bovenstaande figuur is een samenvattende tabel waarin de resultaten van zowel de schudmaat als de zetmaat zichtbaar zijn. Hieruit wordt duidelijk dat er een samenhang is tussen deze twee verschillende testen.

2.4.3 Elektrische weerstand

Het bepalen van de elektrische weerstand is één van de voornaamste eigenschappen die zal bepaald worden. Uit de resultaten kan worden afgeleid of de dispersie al dan niet voldoende is. Indien we een dalende trend zien van de elektrische weerstand ten opzichte van de voorgaande masterproef kunnen we besluiten dat de dispersie verbeterd is. Deze resultaten kunnen vergeleken worden met de voorgaande masterproef en er wordt een equivalente proefopstelling gebruikt. Op deze manier kunnen de verschillende weerstanden vergeleken worden. Als na de vergelijking blijkt dat de waarden voor de elektrische weerstand lager zijn, duidt dit op een verbeterde dispersie.

2.4.4 Drukproef

De drukproef bepaalt de druksterkte (N/mm^2) van een kubusvormig proefstuk. De proef bekomt zijn meetwaarde door het proefstuk te belasten tot het bezwijkt. Dit kunnen zowel kubussen als cilinders ($\varnothing 150$ mm en 300 hoog) zijn. In deze masterproef maakt men gebruik van kubussen met een ribbe van 150 mm. Deze kubussen moeten op een gecontroleerde manier worden verhard. Dit betekent gecontroleerd drogen in een klimaat ruimte met relatieve vochtigheid van 95% ofwel ondergedompeld in water van 20 °C. Na 28 dagen in deze gecontroleerde omgeving, kunnen de druksterktes worden bepaald. Meer informatie over de eisen van de proefstukken, verhardingscondities en de uitvoering van de proef zijn te vinden in deel 1 tot 4 van “NBN EN 12390-5 Beproeving van verhard beton”. De bekomen druksterktes van de proefstukken bepaalt de uiteindelijke sterkteklasse van het beton [23].

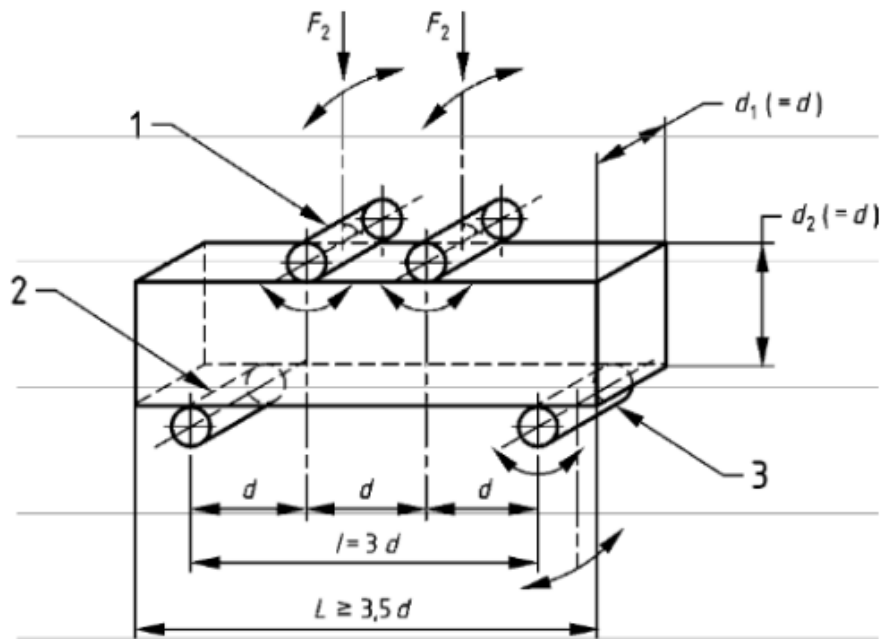


Figuur 11: Drukproef [24].

Zoals weergegeven op figuur 11 moet de hartlijn van het proefstuk overeenkomen met de hartlijn van de drukbank. Indien dit niet het geval is, kunnen er zeer afwijkende resultaten optreden, wat in het nadeel speelt van de gemiddelde druksterkte. De bovenplaat zal dan ongelijkmatig kracht uitoefenen op het oppervlak van de kubus waardoor de metingen kunnen afwijken.

2.4.5 4-Puntsbuigproef

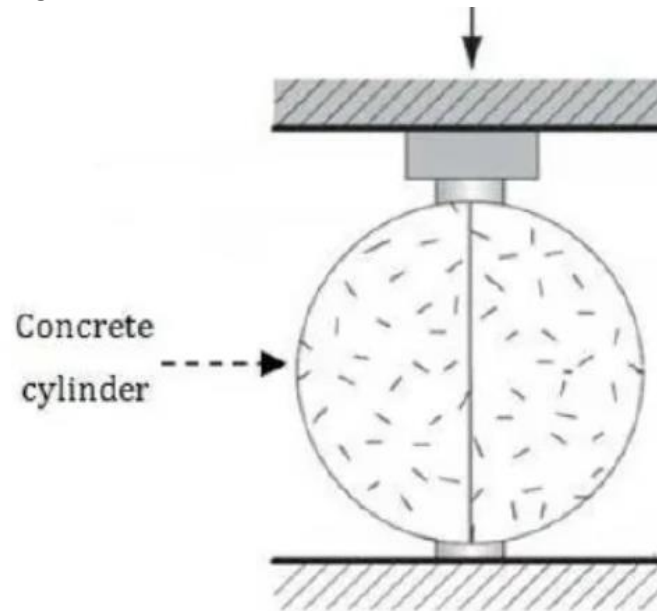
De 4-puntsbuigproef is de derde proef die wordt uitgevoerd. Met deze proef zal de treksterkte van een balkvormig proefstuk worden bepaald. De afmetingen zijn 100 mm x 100 mm x 500 mm. Deze prisma's worden getest zoals weergegeven in figuur 12. De ladingen F_1 en F_2 zullen gaandeweg verhoogd worden met een constante toename tussen 0,04 MPa/s en 0,06 MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2\cdot\text{s}$). De constante toename vindt plaats na de aanbreng van de initiële lading, dewelke maximaal 20% van de kritieke sterkte mag aannemen.



Figuur 12: 4-Puntsbuigproef Opstelling [25, p. 8].

2.4.6 Splijttrekroef (Braziliaanse trekproef)

De splijttreksterkte wordt bepaald op de cilindervormige proefstukken ($\varnothing 150$ mm en 300 hoog) te belasten met een lijnlast, vervaardigd door de drukbank. Het verschil met de drukproef is dat men gebruik maakt van een cilinder in plaats van een kubus. De cilinder wordt belast op de langste zijde, zoals afgebeeld op figuur 13. De drukbank zal lichtjes worden aangepast waarna men een stuk hout met lengte en breedte van respectievelijk 30 cm en 12 mm moet bevestigen aan de drukbank om de lijnlast op de cilinder te garanderen [26].

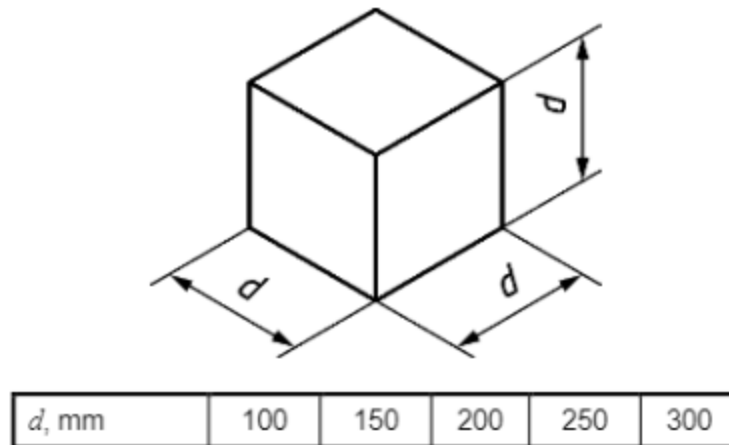


Figuur 13: Splijttrekroef [26, p. 1].

Dezelfde belastingverhoging wordt gebruikt zoals vermeld bij de 4-puntsbuigproef. Eerst zal er een beginlast worden aangebracht, hierna zal de belasting constant vermeerderd worden. Het is aangeraden om deze constante belasting te verhogen tussen een waarde van 0,04 en 0,06 MPa/s.

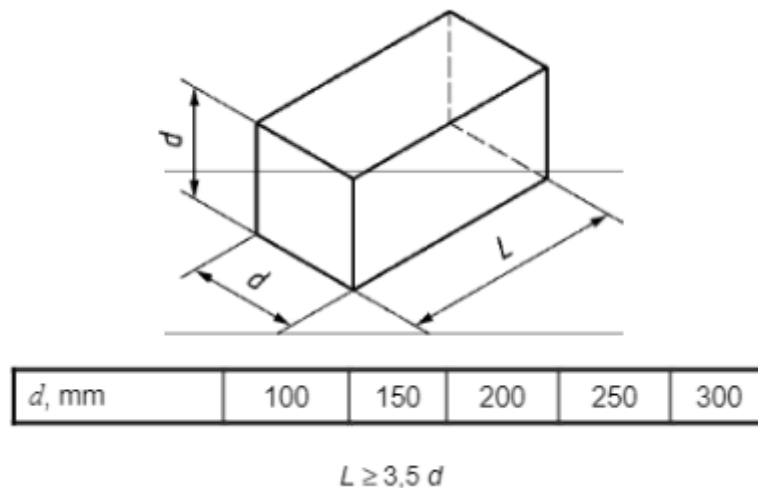
2.5 Gestandaardiseerde proefstukken

De proefstukken die getest worden, zijn conform aan NBN EN 12390-1 [3]. In figuur 14 zijn verschillende maten weergegeven die gebruikt mogen worden voor de kubussen te gieten. Er wordt gebruik gemaakt van kubussen met zijde $d = 150$ mm. Dit komt overeen met de beschikbare mallen voor het gieten van het beton en voor te kunnen vergelijken met de voorgaande masterproef.



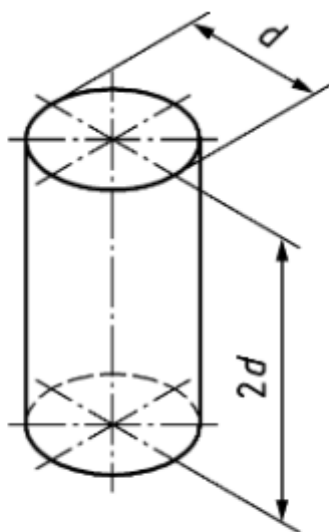
Figuur 14: Drukproef – Kubus [3, p. 6].

De verschillende maten voor de prisma's zijn weergegeven in figuur 15. Er wordt gebruik gemaakt van prisma's lengte L , breedte b en hoogte h van respectievelijk 500, 100 en 100 mm. Belangrijk hierbij is dat is voldaan aan de voorwaarde dat $L \geq 3,5 d$ zoals weergegeven in figuur 15 [3].



Figuur 15: 4-Puntsbuigproef - prisma's [3, p. 8].

De verschillende afmetingen van de cilinders die voldoen aan de norm zijn weergegeven in figuur 16. Er wordt gebruikt gemaakt van cilinders met diameter $d = 150$ mm en hoogte $2d = 300$ mm [3].



d , mm	100	113 ^a	150	200	250	300
^a This has a load-bearing area of 10 000 mm ² .						

Figuur 16: Splijttrekproefstuk - cilinders [3, p. 7].

3 Mengselontwerp & Bereiding

In volgende paragrafen wordt beschreven hoe elk betonmengsel werd samengesteld en welke hoeveelheden nodig zijn voor elke testreeks. Elk mengsel, exclusief het referentiebeton, wordt voorzien van de Rhenofit-suspensie met een hoeveelheid van 0,05%wt CNT's, wegens de beperkte beschikbaarheid van de Rhenofit-suspensie in het labo. Indien er wordt geopteerd om een tweede testreeks te organiseren, zal het CNT-percentages zich bevinden tussen 0,05 en 0,1%wt, aangezien in eerder onderzoek positieve resultaten werden verkregen bij deze percentages [8].

In totaal worden er 3 verschillende betonmengsels ontworpen en bereid. Vooraleerst wordt er een referentiebeton samengesteld om een vergelijking mogelijk te maken met CNT-beton. Daarnaast worden er 2 equivalente CNT-betonmengsels getest met elk een verschillende superplastificeerder op natfaleen- en polycarboxylaatsbasis, met als merknaam MasterRheobuild1100 en MasterEase3650.

3.1 Referentiebeton

3.1.1 Reproductie 2018

Een eerste opvatting was om hetzelfde mengselontwerp te gebruiken en te testen, zoals deze uit de voorgaande masterproef [1]. De enige correctie die werd toegepast, is het verlagen van de w/c-factor van 0,6 naar 0,5 waardoor het vergelijken van de resultaten mogelijk werd. Dit recept is zichtbaar in onderstaande tabel.

Tabel 4: Samenstelling referentiebeton 2018 [1, p. 49].

Materiaal	Hoeveelheid
CEM I 52,5N	350 kg
Algemene mix zand en grind 0-16 mm	1820 kg
w/c factor 0,5	175 l
Totaal	2345 kg/m ³
Consistentieklasse	S5
Vochtgehalte granulaten	0,80%

Na de bereiding van het betonmengsel, met de hoeveelheden uit tabel 4, werd een consistentieklasse S1 waargenomen na het nemen van de zetmaat. Het vochtgehalte in de voorgaande masterproef had maar een waarde van 0,80%, zichtbaar in bovenstaande tabel. Het vochtgehalte van de granulaten in dit onderzoek bedroeg 4,60%, zichtbaar in onderstaande tabel.

Tabel 5: Vochtgehalte granulatenmix

Vochtigheidsmeting	Natte massa (g)	Massa schaal (g)	Droge massa (g)	Vochtgehalte (%)
Droge granulaten	6083	985	5905	3,49
Natte granulaten	9346	970	8868	5,71
Natte granulaten	8616	970	8227	5,09
Mix natte en droge granulaten	7793	655	7500	4,10
Gemiddelde waardes	7960	895	7625	4,60

In eerste instantie werd er dus als reden voor de S1-consistentieklasse gedacht aan het feit dat de granulaten te vochtig waren waardoor er niet de gewenste hoeveelheid water kon toegevoegd worden. Ter verificatie werd een schaal met granulaten gedroogd in de oven met een tijdsduur van 12 uur. Op deze wijze zou de berekende hoeveelheid aanmaakwater worden toegevoegd. Met deze droge granulaten werd het mengsel van tabel 4 opnieuw bereid maar met een w/c factor van 0,6. Opnieuw werd een droog beton waargenomen met S1-consistentieklasse, wat tegen de vooropgestelde hypothese van een S5 in ging. Er werd geconcludeerd dat het mengselontwerp niet nauwkeurig genoeg werd bepaald, aangezien het onmogelijk bleek om een S5-consistentieklasse te bekomen na een verlaging van het vochtgehalte van de granulaten.

Uit deze waarnemingen werd geconcludeerd dat er foutieve hoeveelheden werden gebruikt tijdens de bereiding van de mengsels in de voorgaande masterproef. De conclusie na het bereiden van deze twee samenstellingen is de vraag of CNT's wel degelijk veel invloed hebben op de consistentie van het beton, aangezien het referentiebeton ook al een S1 opleverde.

Op figuur 17 is het referentiebeton met een S5-consistentieklasse weergegeven, gecreëerd in de masterproef van 2018. Dit mengsel werd samengesteld met de toevoegsels uit tabel 4 maar met een w/c van 0,6. Dit mengsel is dan opnieuw samengesteld in deze masterproef met een w/c van 0,5 en een w/c van 0,6, weergegeven in figuur 18 & 19. Op experimenteel vlak kan dus bewezen worden dat figuur 17 onmogelijk is te bereiken met de componenten weergegeven in tabel 4.



Figuur 17: Schudmaat referentiebeton voorgaande masterproef [1, p. 54].



Figuur 18: w/c 0.5 - Referentiebeton.



Figuur 19: Zetmaat met gedroogde granulaten - Referentiebeton.

3.1.2 Nieuw mengselontwerp

Doordat de mengselontwerpen van de voorgaande masterproef niet bruikbaar waren, werd er geopteerd om een volledig nieuw mengselontwerp uit te werken, gebruikmakend van ontwerptabellen. Er wordt gerekend met een gemiddeld vochtgehalte van 4,00%, aangezien dit het gemeten vochtgehalte was van de granulatenmix op het moment van het gieten. Voor een gedetailleerd mengselontwerp wordt er verwezen naar bijlage C. De samenstelling is in volgende tabel terug te vinden.

Er werd geopteerd om een nieuw mengsel te ontwerpen met een S3-consistentieklasse aangezien het vorige mengsel een S1-consistentieklasse verkreeg, waar er oorspronkelijk een S5-consistentieklasse werd verwacht. Indien het na de toevoeging van de CNT's blijkt dat de consistentie afwijkt, kan het toevoegen van de gekozen hulpstof de consistentie verbeteren.

Tabel 6: Materiaalhoeveelheid - Referentiebeton.

Materiaal	Hoeveelheid
CEM I 52,5N	440 kg
Algemene mix zand en grind 0-16 mm	1678,53 kg
w/c factor 0,5	155,44 l
ρ_{totaal}	2263,97 kg/m ³
Consistentieklasse	S3
Vochtgehalte granulaten	4,00%

3.1.3 Foutenverificatie mengselontwerp 2018

Zoals eerder vermeld, werd in eerste instantie het mengselontwerp van de voorgaande masterproef gebruikt als de basis om in dit onderzoek een nieuwe testreeks uit te werken. In het labo werd al snel duidelijk dat het mengselontwerp van de voorgaande masterproef niet voldeed aan de eisen omtrent de zetmaat want er werd een S1- in plaats van een S5-consistentieklasse waargenomen. Het is dus noodzakelijk dat deze opmerkelijke bevindingen worden aangetoond via berekeningen die in de volgende paragrafen worden toegelicht. Deze controle toont aan dat er in het labo van deze masterproef geen fouten zijn gemaakt, alsook dat de conclusies in de voorgaande masterproef fout waren.

Uit tabel 21 in bijlage C, kan er een eerste gegeven worden gehaald, bij een cementklasse van 52,5 en een w/c gehalte van 0,55 kan er worden afgeleid dat men hier te maken heeft met een betonklasse C28/35. Het w/c gehalte moet verhoogd worden met 10% doordat er gebruik wordt gemaakt met een granulaten mix van 0-16mm. Hierdoor wordt er een w/c gehalte verkregen van 0,60.

Uit tabel 24 kan de hoeveelheid water worden bepaald per m³, de consistentieklasse wordt gekozen als S1 doordat dit overeenkomt met de bevindingen in het labo. Zo bevat het beton 185 liter water per m³ beton, deze hoeveelheid moet verhoogd worden met 10% doordat er gebruik wordt gemaakt van een granulaten mix 0-16 mm. Zo zal het beton 203,5 liter water per m³ beton bevatten.

Nu wordt de hoeveelheid cement bepaald, deze wordt berekend door de verhouding van de hoeveelheid water (203,5 kg/m³) gedeeld door de w/c factor (0,60). Zo verkrijgt men een cementgehalte van 340 kg/m³.

Ten laatste wordt de hoeveelheid aggregatenmix bepaald, dit wordt gedaan aan de hand van onderstaande formule:

$$A_g^i = 2600 \left(1000 - \frac{340}{3,16} - \frac{203,5}{1,0} - 20 \right) = 1740 \text{ kg/m}^3$$

Tabel 7: Vergelijking hoeveelheden.

	Referentie beton voorgaande masterproef 2018	Ontworpen referentiebeton huidig onderzoek
Granulaten (kg/m ³)	1820	1740
Cement (kg/m ³)	350	340
Water (kg/m ³)	210	203,5
Totaal (kg/m ³)	2380	2283,5

In bovenstaande tabel wordt een vergelijking gemaakt tussen het referentiebeton van de voorgaande masterproef en bovenstaand ontwerp. Hieruit is af te leiden dat er enkel een verschil optreedt in de hoeveelheid granulaten per m³ beton. Het verschil in granulaat hoeveelheid is echter beperkt. Daardoor kan men uit bovenstaande vergelijking concluderen dat de waarneming van een S1-consistentieklasse in het labo correct was. Dit bevestigt dus dat de S5-consistentie onmogelijk is om te bekomen zoals werd bereikt in de masterproef van 2018 [1].

3.1.4 Correctie hypothese

De conclusie uit de vorige paragraaf heeft belangrijke gevolgen voor de hypothesen die in dit onderzoek werden vastgelegd. Het toevoegen van CNT's aan de betonmengsels heeft niet de nadelige invloed die initieel verwacht werd omtrent de verwerkbaarheid. Deze conclusie werd bevestigd met het feit dat de referentiebetonmengsels uit de voorgaande masterproef een consistentieklasse van S1 bekomen in plaats van een S5. Onderstaande figuren bevestigen deze minimale impact van Rhenofit-CNT3 op de consistentie.



Figuur 20: Oppervlakte uitzicht referentiebeton



Figuur 21: Oppervlakte uitzicht referentiebeton met Rhenofit

Op de respectievelijk rechtse en linkse foto, is het betonmengsel zonder en met de CNT's zichtbaar. De zakking van beide mengsels blijft onveranderd na het verwijderen van de Abrams-kegel. Er wordt geconcludeerd dat de CNT's niet de nadelige invloed uitoefent, welke de voorgaande masterproef beweerde [1]. Er wordt wel waargenomen dat het referentiebeton in kleine maten meer verdicht is dan het betonmengsel met CNT's. Desalniettemin weegt deze waarneming niet op tegen het feit dat het referentiebeton, met een verwachte S5-consistentieklasse, maar een S1-consistentieklasse haalde.

De conclusie van de voorgaande masterproef wordt dus weerlegd met deze resultaten met als conclusie dat Rhenofit-CNT3 een beperkte invloed uitoefent op de consistentiegraad. De toevoeging van Rhenofit-CNT3 aan een betonmengsel met een S5-consistentieklasse zal dus niet veranderen in een mengsel met een S1-consistentieklasse zoals werd beweerd in [1]. Er wordt verder gewerkt met het nieuw ontworpen betonmengsel dat werd berekend in bijlage C. De bereiding ervan volgt in paragraaf 2.

3.2 Mengselontwerp CNT-mengsel & superplastificeerder

Naast het herontwerp van het referentiebeton, werd er eveneens ook een nieuw betonmengsel ontworpen omtrent de betonmengsels met CNT's en de superplastificeerder. In de volgende paragrafen wordt toegelicht welke ontwerpprocedures er zijn gevolgd om te komen tot de finale mengselontwerpen.

3.2.1 CNT-mengsel & MasterRheobuild 1100

Het eerste betonmengsel met de Rhenofit suspensie werd voorzien van de superplastificeerder op naftaleenbasis met als merknaam "MasterRheobuild1100". Aangezien er maar geringe hoeveelheid Rhenofit-suspensie aanwezig was in het labo, werden de mengsels voorzien van 0,05%wt. Deze hoeveelheid CNT's is de minimumgrens om een stijging in sterkte eigenschappen te bekomen. Voor een gedetailleerde beschrijving van dit mengselontwerp met de superplastificeerder "MasterRheobuild1100" wordt er verwezen naar bijlage D.

De uiteindelijke hoeveelheden voor 1,0 m³ van dit betonmengsel met Rhenofit-suspensie en de superplastificeerder "MasterRheobuild 1100", wordt weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 8: CNT-mengsel & MasterRheobuild 1100

MATERIAAL	HOEVEELHEID (kg/m ³)
Granulatenmix 0-16 mm	1678,53
Cement (CEMI 52,5)	440
Water	46,1
Rhenofit-CNT3	109,34
MasterRheobuild1100	660-6600 (g)
Totaal	2276,17-2284,97

3.2.2 CNT-mengsel & MasterEase 3650

De equivalente berekening werd gemaakt voor de superplastificeerder “MasterEase3650”. Het verschil op experimenteel vlak zit in de hoeveelheid die mag toegevoegd worden van de superplastificeerder op basis van polycarboxylaat. Voor een gedetailleerde berekening wordt er verwezen naar bijlage E.

Tabel 9: CNT-mengsel & MasterEase 3650

MATERIAAL	HOEVEELHEID (kg/m³)
Granulatenmix 0-16 mm	1678,53
Cement (CEMI 52,5)	440
Water	46,1
Rhenofit-CNT3	109,34
MasterEase3650	2200-11000 (g)
Totaal	2276,17-2284,97

3.3 Bereiding

De keuze omtrent aantal proefstukken per type mal (kubus, cilinder, prisma) wordt in de volgende paragraaf verder toegelicht. Voor het effectief gieten van de proefstukken, werden de hoeveelheden nauwkeurig afgewogen. Zodra de juiste hoeveelheden werden verzameld, werd alles samengevoegd in de betonmolen. Na voldoende menging werden de zet- en de schudmaat genomen om de verwerkbaarheid alsook de oppervlaktestructuur te inspecteren. Deze waarnemingen zijn zichtbaar in de volgende paragrafen waarna de conclusies volgen.

3.3.1 Voorbereiding

3.3.1.1 Bepalen hoeveelheden

Er werden keuzes gemaakt omtrent de proefstukaantallen doordat er maar een beperkte hoeveelheid Rhenofit suspensie van 18,2 kg beschikbaar was in het labo. Dit verhinderde dat er van elk type mal 8 proefstukken werd gegoten. Er zijn 3 type mallen namelijk, kubussen, cilinders en prisma's om respectievelijk de druk-, slijttrek- en de 4-puntsbuigproef uit te voeren.

CNT's hebben een hoge buigsterkte waardoor er werd geprefereerd om de 4-puntsbuig- en de slijttrekproef uit te voeren met respectievelijk prisma's en cilinders. Om toch een indicatie te verkrijgen van de druksterkte, werden er alsnog 2 kubussen van elk type mengsel bereid. De specifieke hoeveelheden zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 10: Overzicht aantallen & hoeveelheid.

Hoeveelheid	Referentiebeton	MasterRheobuild1100	MasterEase3650
Kubussen	2	2	2
Cilinders	2	6	6
Prisma's	2	6	6
Totaal volume (m ³)	0,02735	0,06856	0,06856
Volume + 20% (m ³)	0,03282	0,08227	0,08227
Granulatenmix 0-16mm (kg)	55,10	138,09	138,09
Cement CEMI 52,5 (kg)	14,44	36,20	36,20
Water (kg)	5,10	3,79	3,79
Rhenofit-CNT3 (kg)	-	9,05	9,05
Superplastificeerder (g)	-	54,30 – 542,98	180,99 – 904,97

De beschikbare hoeveelheid Rhenofit-suspensie werd optimaal gebruikt tijdens het bereiden van de mengsels. Er was 18,2 kg beschikbaar en er werd 18,1 kg gebruikt. De hoeveelheden die in het labo afgewogen waren weken altijd zeer miniem af. Indien er gekeken wordt naar het totale gewicht zal dit geen effect hebben op het eindresultaat. De totale hoeveelheid nodig in het labo wordt weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 11: Totaaloverzicht hoeveelheden

MATERIAAL	HOEVEELHEID (kg)
Granulatenmix 0-16mm	331,28
Cement CEMI 52,5	86,24
Water	12,68
Rhenofit-CNT3	18,1
MasterRheobuild1100	54,30-542,98 (g)
MasterEase3650	180,99-904,97 (g)

3.3.2 Bereiding referentiebeton

Na het bereiden van het referentiemengsel werd de zetmaat genomen en dit resulteerde opnieuw in een S1-consistentieklasse, zichtbaar op figuur 20. De S3-ontwerpconsistentieklasse kwam niet overeen met de resultaten in het labo. Doordat het betonmengsel toch voldoende vochtigheid had en het uitzicht in de mallen na trillen acceptabel was (zie figuur 22), werd er gekozen om verder te werken met dit betonmengsel doorheen de volledige testreeks.

Wanneer de vergelijking wordt gemaakt tussen de zetmaat van figuur 19, kan er besloten worden dat dit betonmengsel in werkelijkheid toepasbaar kan zijn. De oorzaak dat het betonmengsel geen S3-consistentieklasse bereikt, is tot op heden nog niet achterhaald.

De betonmolen werd altijd voor gebruik bevochtigd en de toevoegsels en hulpstoffen werden tot 0,1% correct afgewogen. Het cement werd op voorhand gecontroleerd op de ongewenste reactie met de omgevingslucht, maar dit was niet het geval.



Figuur 22: Oppervlakte uitzicht in mal – Referentiebeton.

Tijdens het bereiden was het buiten -6°C . Door gebruik van CEMI 52,5 werd dit probleem gecounterd aangezien dit type cement geen problemen ondervindt bij vriestemperaturen. De proefstukken werden na het bereiden onmiddellijk in een ruimte van 15°C geplaatst zodat ze onder gecontroleerde temperaturen konden uitharden.

Op figuur 20 is de zetmaat zichtbaar van het referentiebeton, waar geen zakking gemeten werd. Deze meting bevestigt dat het referentiebeton een S1-consistentieklasse heeft. In totaal werden er 2 kubussen, 2 cilinders en 2 prisma's gemaakt van het referentiebeton. De gevulde mallen zijn op figuur 23 zichtbaar.



Figuur 23: Gevulde mallen - Referentiebeton.

3.3.3 Bereiding CNT-mengsel en superplastificeerder

De hoeveelheid superplastificeerder wordt bepaald via de trial-and-error methode want het doel is om een gelijkaardige verwerkbaarheid te verkrijgen van beide betonmengsels. Het was onmogelijk om het effect van de superplastificeerder te bepalen omtrent de verwerkbaarheid doordat de reactie tussen de Rhenofit-suspensie en de plastificeerder onbekend was.

3.3.3.1 Bereiding CNT-mengsel & MasterRheobuild 1100

Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat er een optimale methode bestaat ter menging van de materialen van een betonmengsel met een Rhenofit suspensie [2]. Eerst werden alle granulaten aangebracht in de betonmolen. Vervolgens werd 60% van het aanmaakwater toegevoegd. Na voldoende mengtijd werd de volledige hoeveelheid Rhenofit-suspensie toegevoegd. Tot slot werd de overige 40% aanmaakwater gebruikt om de achtergebleven Rhenofit-suspensie in de emmers te vermengen en alsnog toe te voegen. Na toevoeging en menging in de molen werd een voorlopige zetmaat genomen om de evolutie van de verwerkbaarheid voor en na toevoeging van de superplastificeerder te onderzoeken. Het resultaat is zichtbaar op figuur 24 waar een S1-consistentieklasse werd bekomen.

De volgende stap bestond uit het toevoegen van de juiste hoeveelheden superplastificeerder. De superplastificeerder werd stapsgewijs toegevoegd. De hoeveelheid per toevoeging bedroeg 10 à 20% van de maximale hoeveelheid superplastificeerder die mocht toegevoegd worden.



Figuur 24: Minimale hoeveelheid MasterRheobuild1100.



Figuur 25: zetmaat - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.

Door het toevoegen van de superplastificeerder is er een verbetering zichtbaar op gebied van verwerkbaarheid door de gladdere oppervlaktestructuur en de graad van inzakking. Dit is zichtbaar op boven- en onderstaande figuren.

Tijdens de bereiding van dit mengsel werd de maximale hoeveelheid superplastificeerder toegevoegd met de consistentie zichtbaar op figuur 26. Dit komt overeen met 6600 gram van MasterRheobuild 1100 per m³ beton, de berekening om tot deze waarde te komen is weergegeven in bijlage D. Er zijn geen significante verschillen zichtbaar omtrent de verwerkbaarheid, maar wel op gebied van oppervlaktestructuur. De conclusie is dat de superplastificeerder een duidelijke invloed had op het betonmengsel met de Rhenofit-suspensie. De zetmaat in figuur 25 toont aan dat er een zakking van 3cm aanwezig is.



Figuur 26: Oppervlakte uitzicht na zetmaat - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.



Figuur 27: Oppervlakte uitzicht - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.

Op onderstaande figuren zijn de schudmaten zichtbaar van de Rhenofit-mengsels zonder en met superplastificeerder. Het verschil in verwerkbaarheid is duidelijk zichtbaar. Op figuur 28 is een droog beton zichtbaar waar de granulaten zich niet aan elkaar binden. De granulaten zijn afzonderlijk zichtbaar waaruit afgeleid kan worden dat de cementfracties zich niet voldoende hebben gebonden aan de omliggende granulaten.

Op figuur 29 is de schudmaat zichtbaar na toevoeging van de maximale hoeveelheid superplastificeerder MasterRheobuild1100. Door de verbeterde samenhang zijn de afzonderlijke granulaten niet meer zichtbaar.



Figuur 28: Schudmaat voor toevoeging MasterRheobuild1100.



Figuur 29: Schudmaat na toevoeging 100% MasterRheobuild1100.

De conclusie na het nemen van de schudmaat is dat de superplastificeerder ervoor zorgt dat de materialen zich beter aan mekaar gaan binden en dat de verwerkbaarheid stijgt. Deze waarneming komt overeen met de hypothese die op voorhand werd opgesteld. De gevulde mallen zijn zichtbaar op figuur 30, in totaal zijn er 2 kubussen, 6 cilinders en 7 prisma's gemaakt voor dit betonmengsel.



Figuur 30: Mallen met betonmengsel - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.

3.3.3.2 Bereiding CNT-mengsel & MasterEase 3650

Het bereidingsproces voor het mengsel met MasterEase3650 is equivalent aan deze van de vorige. Voor dit mengsel mocht een minimum- en maximumhoeveelheid superplastificeerder van respectievelijk 2200 gram en 11000 gram per m³ beton worden toegevoegd. Dit is beduidend meer dan de hoeveelheid superplastificeerder in de vorige paragraaf.

Na toevoeging van de minimale hoeveelheid MasterEase3650, werd dezelfde situatie bekomen zoals op figuur 24. Na toevoeging van de volgende 20% was er echter een grote toename in de verwerkbaarheid van het beton, waarvan de zetmaat hieronder is weergegeven.



Figuur 31: Zetmaat voor 40% maximale hoeveelheid SP – CNT-mengsel & MasterEase3650.

De verwerkbaarheid van het mengsel voorzien van 40% MasterEase3650, met een zetmaat van 5cm, kwam zeer goed overeen met het mengsel waar 100% MasterRheobuild1100 werd toegevoegd. Na deze constatacie werd gekozen om de exacte hoeveelheid van de toegevoegde superplastificeerders gelijk te houden. Er werd bij dit mengsel dus 6600g/m³ MasterEase3650 toegevoegd, equivalent aan de maximale hoeveelheid toegevoegde MasterRheobuild1100 van het voorgaande mengsel. De 6600g/m³ MasterEase3650 is wel maar 56% van de maximale hoeveelheid die mocht toegevoegd worden. De zetmaat bij 6600g/m³ MasterEase3650 had een waarde van 7,8 cm wat resulteert in een S2-consistentieklasse, zichtbaar op figuur 32.



Figuur 32: Zetmaat voor 56% maximale hoeveelheid SP - CNT-mengsel & MasterEase3650.

Indien de maximaal toegelaten hoeveelheid MasterEase3650 werd gebruikt, kon er zeker een S3-consistentieklasse bereikt worden. Er is niet gekozen om de maximale hoeveelheid MasterEase3650 toe te voegen want anders werd het verwerkbaarheidsverschil tussen de mengsels te groot. Er kan wel duidelijk gesteld worden dat MasterEase3650 een grotere invloed heeft op de verwerkbaarheid, wat later ook duidelijk wordt in de resultatenanalyse.

Op onderstaande figuren zijn enkele close-ups weergegeven waar er duidelijk is te zien dat de vorm van de kegels van de twee betonmengsels zeer verschillend is. Op figuur 33 aan de bovenzijde is te zien dat er een vochtiger geheel is gevormd. Op figuur 33 is een veel stijver beton aanwezig, in tegenstelling tot figuur 34 waar oorspronkelijke kegelvorm meer is veranderd naar een ingezakte kegel.



Figuur 33: Oppervlak 40% maximum hoeveelheid SP - CNT-mengsel & MasterEase3650.



Figuur 34: Oppervlak 56% maximum hoeveelheid SP - CNT-mengsel & MasterEase3650.

De schudmaat van het mengsel met 56% van de maximale toegelaten hoeveelheid MasterEase3650 gaf een waarde van 36 centimeter, dewelke het gebied van de F2-consistentieklasse (35-41cm) bereikt. De schudmaat is op figuur 35 weergegeven.



Figuur 35: Schudmaat met 56% van maximum hoeveelheid - CNT-mengsel & MasterEase3650.

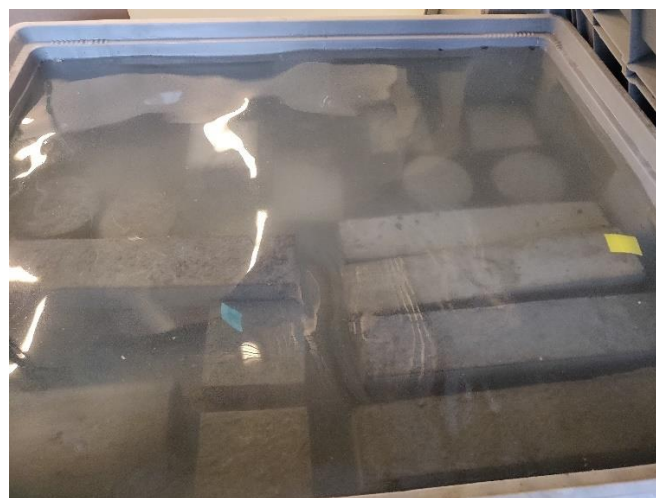
In totaal werden er 2 kubussen, 6 cilinders en 6 prisma's gemaakt van dit mengsel. Bij dit mengsel is er geen zevende prisma gemaakt door enkele verliezen die waren opgetreden tijdens het vullen van de mallen. Het uitzicht van de mallen is weergegeven op onderstaande figuur 36.



Figuur 36: Mallen met betonmengsel - CNT-mengsel & MasterEase3650.

3.4 Ontkisten

De proefstukken hebben gedurende vier dagen gedroogd in de mallen voordat ze ontkist werden. Na het ontkisten werden ze ondergedompeld in een waterbak met constante temperatuur, zichtbaar op figuur 37. Exact 28 dagen nadat de proefstukken werden gegoten, werden de testen erop uitgevoerd.



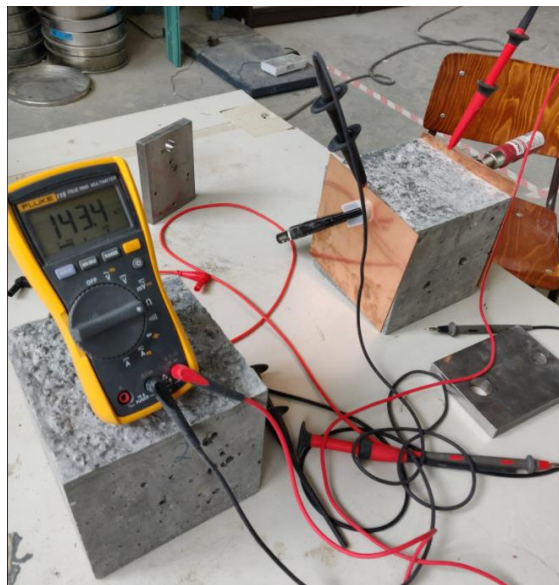
Figuur 37: Proefstukken in waterbak.

4 Resultaten

De resultatenanalyse start reeds met de toelichting over de uitvoering van de niet-destructieve proeven. Daarna komen de destructieve testen aan bod. Per test wordt de norm “NBN EN 12390” gebruikt, de gemeten kracht op elk proefstuk wordt omgezet naar zijn equivalente sterkte. Aansluitend volgt de uitwerking via een statistische analyse op de sterktes via de normale verdeling met een betrouwbaarheidsinterval van 95% om eventuele uitschieters te elimineren. Tot slot volgt de beoordeling van de oppervlakte- en kernholtes van de proefstukken

4.1 Elektrische weerstand

De elektrische weerstand werd gemeten ter bepaling van de dispersiegraad van de CNT's in het beton. Op onderstaande figuur 38 is de proefopstelling zichtbaar. Door middel van een klem werden twee koperen plaatjes bevestigd aan weerszijden van de kubus. Hierop werden de elektroden van de multimeter bevestigd.



Figuur 38: Proefopstelling - Elektrische weerstand.

Echter traden er enkele problemen op tijdens de meting. De meting was namelijk zeer drukgevoelig. Wanneer de koperen plaatjes op één of meerdere contactpunten werden vastgeklemd, werden er geen constante weerstanden gemeten. Hierdoor fluctueerde de weerstand gedurende de volledige periode tijdens het contact met de koperen plaatjes. Deze fluctuaties werden ook niet veroorzaakt door de multimeter aangezien het meettoestel werd getest door het opmeten van de elektrische weerstand van de afzonderlijke koperplaatjes. Hier werd wel een constante weerstand gemeten. De metingen van de elektrische weerstandsproef waren niet bruikbaar en worden dus niet opgenomen in de resultatenanalyse.

4.2 Druksterkte

De proefstukken worden getest door een drukkracht aan te brengen op de proefstukken tot ze falen. Uit deze krachtmeting volgt een omzetting van een drukkracht naar een druksterkte via de norm "NBN EN 12390-4: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens" [24].



Figuur 39: Proefopstelling - Drukproef.

De gemiddelde druksterkte $f_{c,cub}$ wordt bepaald door de drukkracht te delen door het contactoppervlak van de kubus met een zijde $d = 150$ mm. Vervolgens kan de gemiddelde druksterkte gevonden worden via de volgende formule:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,cub}}{n}$$

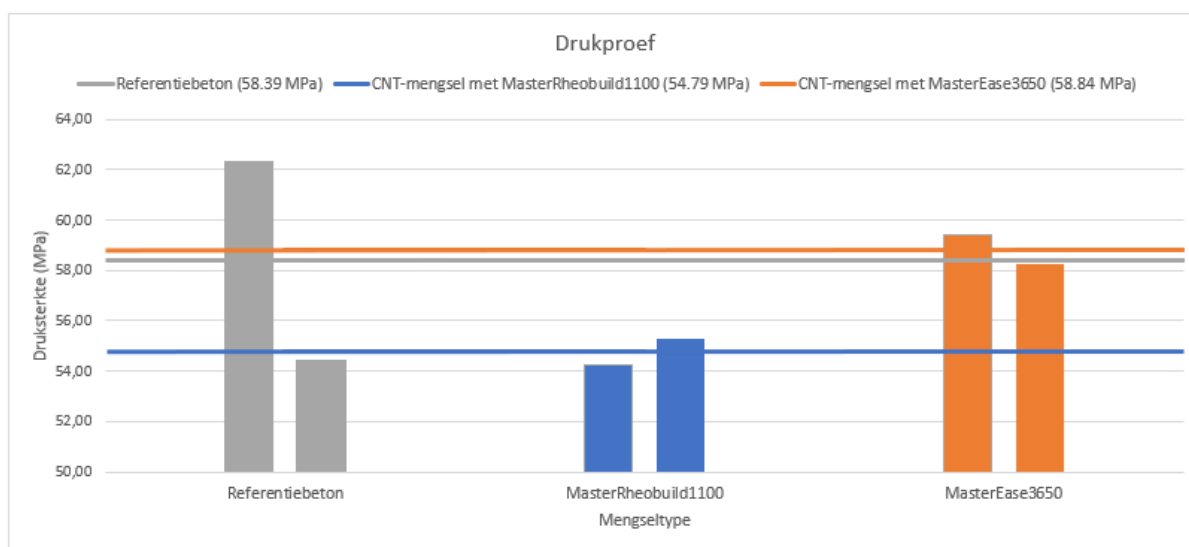
In onderstaande tabel zijn de resultaten van de drukproef weergegeven. Er zijn per type mengsel twee proefstukken getest op druksterkte. Ter bepaling van de karakteristieke druksterkte is de standaardafwijking niet in rekening gebracht. De berekening van de standaardafwijking is niet zinvol aangezien er maar twee druksterktes per mengsel zijn getest. Daarnaast is de spreiding van de resultaten omtrent het referentiebeton met een waarde van 62,34 en 54,44 MPa te groot om de standaardafwijking te bepalen waardoor er onmogelijk een realistisch beeld kan gevormd worden. De gedetailleerde berekeningen zijn terug te vinden in bijlage F.

Tabel 12: Resultaten - Drukproef.

Drukproef (MPa)			
Proefstuk	Referentiebeton	MasterRheobuild1100	MasterEase3650
1	62,34	54,27	59,42
2	54,44	55,30	58,27
f_{cm}	58,39	54,79	58,84

In onderstaande figuur zijn de metingen geplot met een bijhorend horizontaal gemiddelde. De figuur toont aan dat de druksterkte van het referentiebeton met een gemiddelde waarde van 58,39 MPa, hoger ligt dan het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 met een gemiddelde waarde van 54,79 MPa. Het CNT-mengsel met MasterEase3650 vertoont sterktes dewelke 0,45 MPa hoger liggen dan het referentiebeton. Echter werd toch de hoogste exacte waarde van 62,34 MPa gemeten bij het referentiebeton.

Indien de CNT-mengsels onderling worden vergeleken, is waarneembaar dat het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 lagere druksterktes bekomt dan het CNT-mengsel met MasterEase3650. De oorzaak hiervan wordt later besproken in de paragraaf "Massadichtheid" en de relatie met de kern- en de oppervlakteholtes.



Figuur 40: Resultaten – Drukproef

De conclusie na de analyse van de drukproeven is dat er geen grote toename in druksterkte merkbaar is na toevoegen van CNT's en een hulpstof ten opzichte van het referentiebeton. Het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 vertoont zelfs lagere druksterktes. Om hier een accurater besluit uit te trekken, dienen er meer proefstukken getest te worden om een beter inzicht te krijgen in de sterktes van de verschillende mengsels. Het expliciete doel van dit onderzoek ligt niet in het verhogen van de druksterkte maar eerder in een buig- en treksterkteverhoging, aangezien dit de voornaamste eigenschappen zijn die CNT's bezitten.

4.3 Splijttrekproef

De splijttrekproef werd uitgevoerd op de cilinders. De proefopstelling gebruikt in het labo is zichtbaar op onderstaande figuur. Om de lijnlast gelijkmatig te verdelen, werden er boven- en onderaan twee houten balkjes aangebracht met een breedte en lengte van respectievelijk twaalf millimeter en dertig centimeter. De lijnlast werd verhoogd tot het proefstuk faalde.



Figuur 41: Proefopstelling - Splijttrekproef.

De sterkte werd niet rechtstreeks afgelezen van het meettoestel. Dit om de simpele reden dat het toestel staat gekalibreerd op het testen van sterktes op kubussen en dus niet op die van cilinders. Daarom wordt de kracht, afgelezen op het meettoestel, omgezet naar een sterkte equivalent voor cilinders. Er wordt gebruik gemaakt van de norm "NBN EN 12390-6: Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens" ter bepaling van de splijttreksterkte [26].

$$f_{ct} = \frac{2 * F (N)}{\pi * L * d}$$

Met:

- f_{ct} : de splijttreksterkte in N/mm^2
- F : de maximumbelasting in Newton
- L : de lengte van de contactlijn van het proefstuk in mm
- d : de diameter van het proefstuk in mm

Vervolgens wordt de gemiddelde splijttreksterkte via volgende formule bepaald:

$$f_{ct,m} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ct}}{n}$$

Met behulp van de standaardafwijking s wordt de representatieve splijttreksterkte bepaald:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{ct} - f_{ct,m})^2}{n-1}}$$

Tot slot wordt de representatieve splijttreksterkte bepaald door de statistische benadering via de normaalverdeling met een betrouwbaarheidsinterval van 95%, gegeven door de volgende formule:

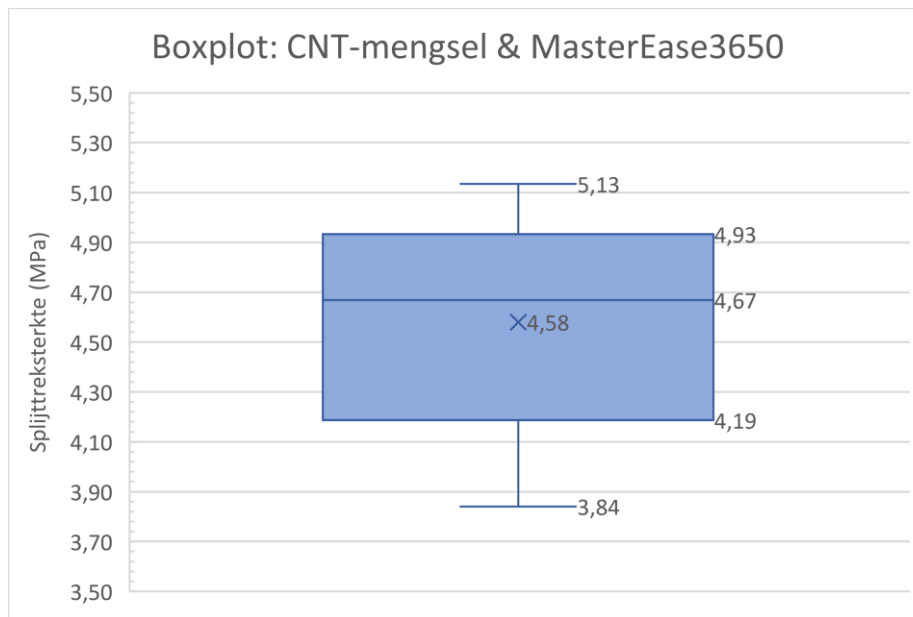
$$f_{ct,rep} = f_{ct,m} - 1,96 * s$$

Zoals eerder vermeld, is het zinloos om een standaardafwijking voor de 2 metingen van het referentiebeton te bepalen. De gemiddelde sterkte van het CNT-mengsel met MasterEase3650 ligt hoger dan CNT-mengsel met MasterRheobuild1100, zichtbaar in tabel 13. De standaardafwijking van het CNT-mengsel met MasterEase3650 wordt daarom toegekend aan het referentiebeton. Op deze wijze wordt er een realistische voorspelling gemaakt van de standaardafwijking die er zou kunnen optreden mits een grotere kwantiteit aan metingen. De gedetailleerde berekeningen zijn terug te vinden in bijlage F.

Tabel 13: Resultaten - Splijttrekproef.

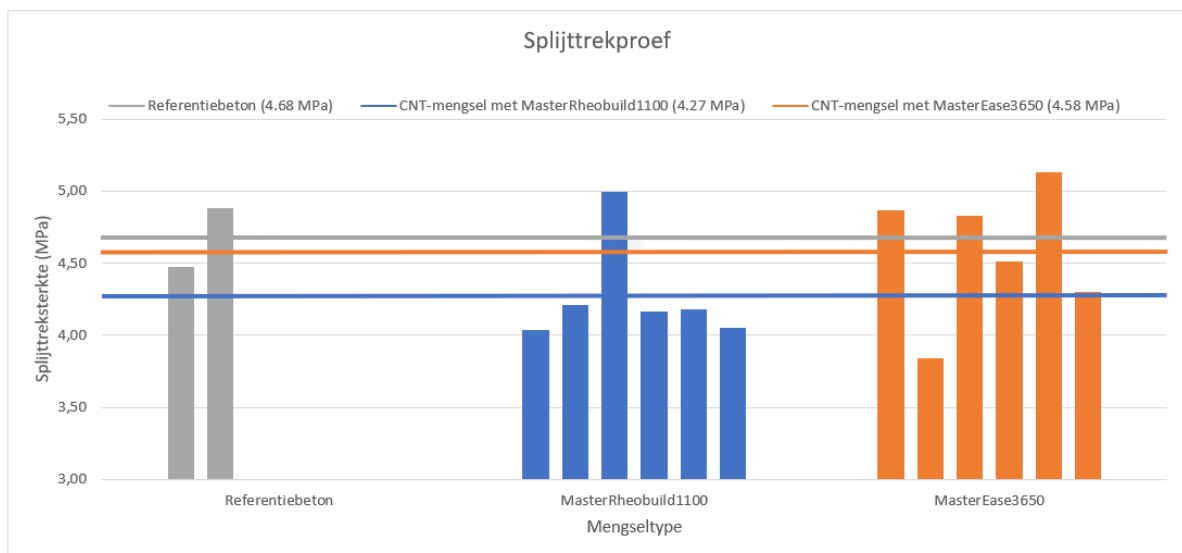
Splijttreksterkte (MPa)			
Proefstuk	Referentiebeton	MasterRheobuild1100	MasterEase3650
1	4,47	4,03	4,87
2	4,88	4,21	<u>3,84</u>
3	-	5,00	4,83
4	-	4,16	4,51
5	-	4,18	5,13
6	-	4,05	4,30
$f_{ct,m}$	4,68	4,27	4,58
standaardafwijking	0,46	0,36	0,46
$f_{ct,rep}$	3,78	3,56	3,67

De analyse van de resultaten ging gepaard met het bepalen van eventuele uitschieters. De hypothese was dat de waarde 3,84 MPa bij het CNT-mengsel met MasterEase3650 een uitschieter zou zijn door de afwijking merkbaar op het eerste zicht. Door middel van een boxplot werd vastgesteld dat deze waarde geen uitschieter is, waardoor dit resultaat mee wordt opgenomen in de analyse. Onderstaande figuur toont dit aan.



Figuur 42: Boxplot - CNT-mengsel & MasterEase3650.

De grafische weergave van de metingen wordt getoond in onderstaande figuur 42. Echter is er merkbaar dat bij beide CNT-mengsels een absoluut hogere waarde wordt gemeten, ten opzichte van de hoogste absoluut gemeten waarde van het referentiebeton (4,88 MPa). Het gaat hier dan specifiek over meting 3 van het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 (5,00 MPa) en meting 5 van het CNT-mengsel met MasterEase3650 (5,13 MPa).



Figuur 43: Resultaten - Splijttrekproef

Hoewel er bij de CNT-mengsels met een hulpstof een absoluut hogere waarde werd gemeten ten opzichte van het referentiebeton, heeft de Rhenofit-suspensie geen positieve invloed op de splijttreksterkte van het beton. Dit wordt verklaard door de statistische analyse van de metingen doordat de representatieve treksterkte van de CNT-mengsels met een hulpstof lager liggen dan deze van het referentiebeton, zichtbaar in tabel 13.

4.4 4-Puntsbuigproef

De 4-puntsbuigproef testte de prisma's op de buigsterkte. De proefopstelling van de 4-puntsbuigproef is zichtbaar op onderstaande figuur, deze is uitgevoerd conform de richtlijnen. De nodige tussenafstand van de raakpunten zijn op de correcte locaties gepositioneerd. Het proefstuk werd geplaatst in het toestel waarna de belasting werd verhoogd tot het proefstuk faalde.



Figuur 44: Proefopstelling – 4-puntsbuigproef.

De kracht, afgelezen op het meettoestel, wordt omgezet naar een buigsterkte uit de norm “NBN EN 12390-5: Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens” [25] via de volgende formule:

$$f_{ct,fl} = \frac{F_{ct,fl} * l}{b * h^2}$$

Waarin:

- $f_{ct,fl}$: Buigtreksterkte in N/mm²
- $F_{ct,fl}$: Maximum belasting in N.
- l : Overspanning van de balk in mm.
- b : Breedte van het prisma in mm.
- h : Hoogte van het prisma in mm.

Met behulp van volgende formule kan de gemiddelde buigtreksterkte bepaald worden:

$$f_{ct,fl,m} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ct,fl}}{n}$$

Met behulp van de standaardafwijking s wordt de karakteristieke splijttreksterkte bepaald:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{ct,fl} - f_{ct,fl,m})^2}{n - 1}}$$

Vervolgens wordt de representatieve buigsterkte bepaald door de statistische benadering via de normaalverdeling met een betrouwbaarheidsinterval van 95%:

$$f_{ct,fl,rep} = f_{ct,fl,m} - 1,96 * s$$

De resultaten van de 4-puntsbuigproef zijn zichtbaar in onderstaande tabel. De gedetailleerde berekeningen zijn terug te vinden in bijlage F. Ook hier zijn er 2 metingen uitgevoerd op het referentiebeton om een indicatie te vormen van de buigsterkte zonder CNT's.

Figuur 47 toont aan dat de sterktes van het CNT-mengsel met MasterEase3650, exclusief meting 1 en 2, hoger liggen dan de metingen van het referentiebeton. Echter tonen de sterktes van het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 ook aan dat er een sterkteverhoging mogelijk is doordat er 3 meetwaarden hoger liggen dan de hoogst gemeten sterkte van het referentiebeton.

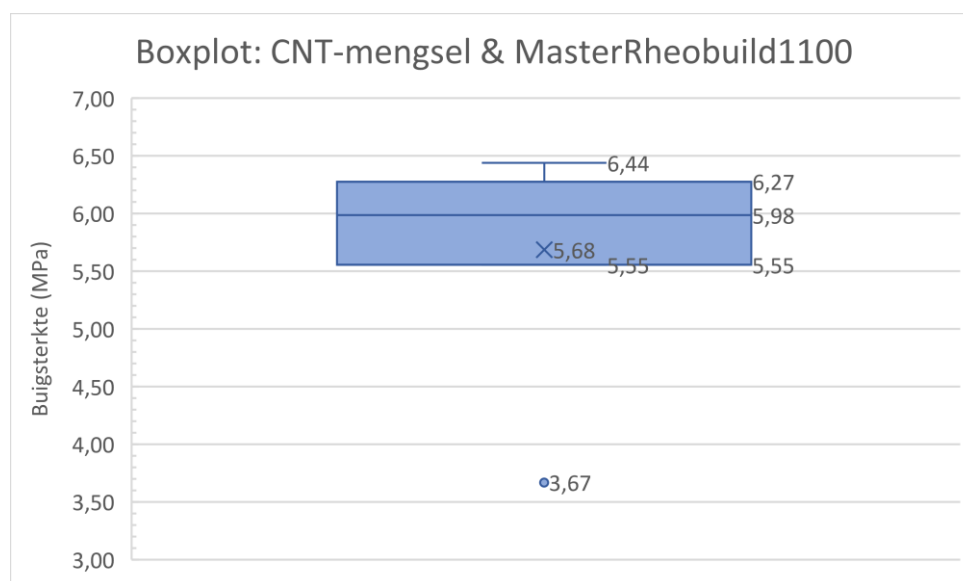
Er wordt daarom gekozen om het gemiddelde van de standaardafwijking van CNT-mengsel met MasterEase3650 & MasterRheobuild1100 toe te kennen aan het referentiebeton, met een waarde van 0,40. Deze methode wordt gehanteerd wegens de aanwezigheid van een achterliggende stabiele standaardafwijking om een indicatie van de representatieve buigsterkte van het referentiebeton te bekomen.

Daarom wordt de standaardafwijking van CNT-mengsel met MasterEase3650 toegekend aan het referentiebeton. Dit resulteert in een standaardafwijking van 0,42 voor het referentiebeton. Deze methode wordt toegepast aangezien er in deze testreeks ook maar 2 metingen op het referentiebeton zijn uitgevoerd waardoor de bepaling van de standaardafwijking op basis van de resultaten van het referentiebeton zinloos is.

Tabel 14: Resultaten – 4-puntsbuigproef.

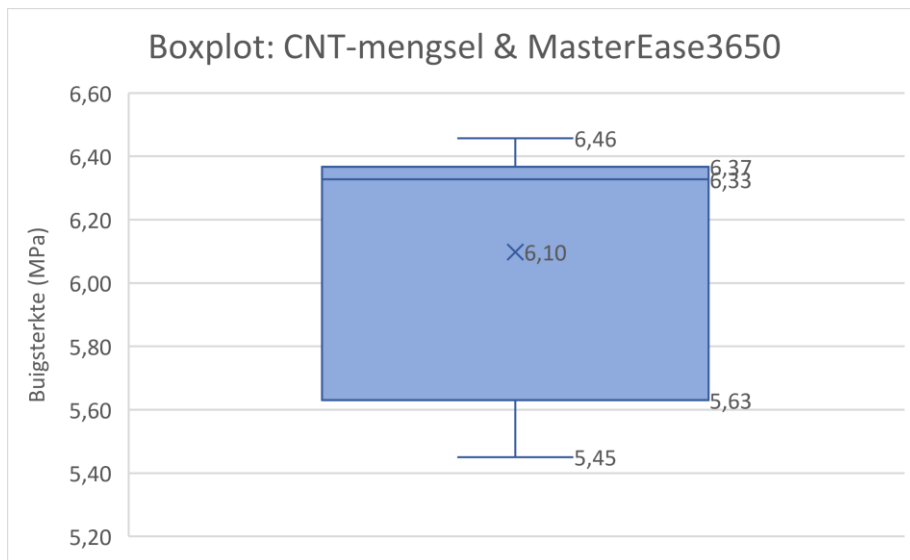
Buigsterkte (MPa)			
Proefstuk	Referentiebeton	MasterRheobuild1100	MasterEase3650
1	6,19	6,25	5,45
2	5,78	5,98	5,69
3	-	6,27	6,34
4	-	5,55	6,32
5	-	6,44	6,46
6	-	5,62	6,33
7	-	3,67	-
$f_{ct,fl,m}$	5,99	6,02	6,10
Standaardafwijking	0,40	0,37	0,42
$f_{ct,fl,rep}$	5,21	5,30	5,28

De statistische analyse heeft uitgewezen dat de waarde van 3,67 MPa bij het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 een uitschieter is. Doordat deze niet tussen de acceptabele waarden ligt van de boxplot. Dit wordt verduidelijkt door onderstaande boxplot. Deze waarde wordt dus niet opgenomen in de resultatenanalyse.



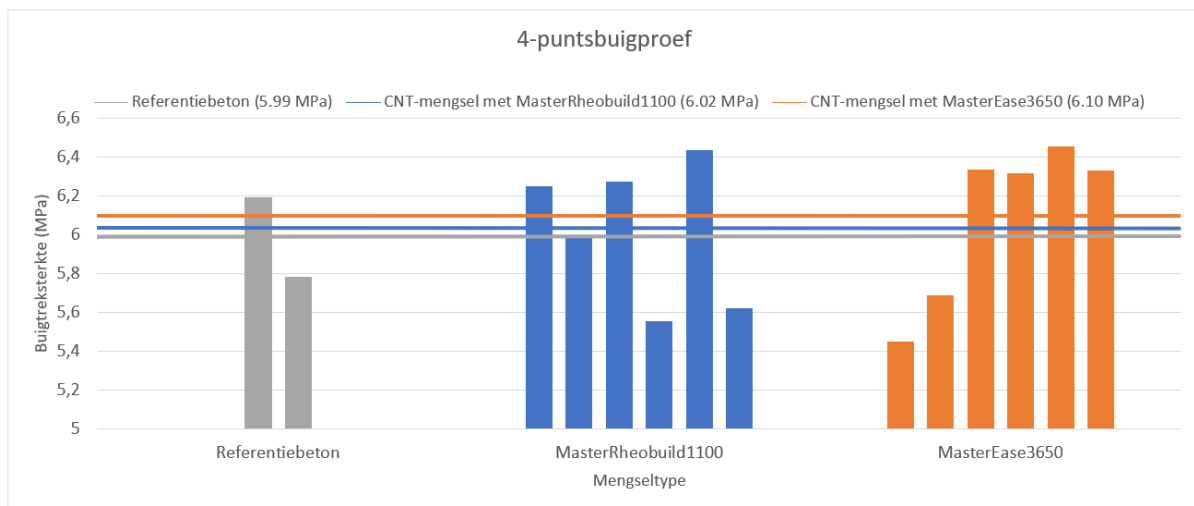
Figuur 45: Boxplot – CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.

Daarnaast was er ook twijfel omtrent de waarden 5,45 en 5,69 MPa bij het CNT-mengsel met MasterEase3650. Er werd in eerste instantie overwogen om deze waarden te elimineren doordat het uitschieters konden zijn. Door middel van onderstaande boxplot wordt aangetoond dat deze waarden echter toch binnen het bereik liggen, waardoor ze wel worden opgenomen in de analyse.



Figuur 46: Boxplot - CNT-mengsel & MasterEase3650.

De grafische weergave, zichtbaar op figuur 46, toont aan dat de buigsterkte van het CNT-mengsel met MasterEase3650 in kleine mate toeneemt ten opzichte van het referentiebeton. Vier van de zes metingen liggen boven de hoogst gemeten waarde van het referentiebeton. Indien de laagste waarde van het referentiebeton wordt vergeleken met de hoogste waarde van het CNT-mengsel met MasterEase3650, treedt er een sterkteverhoging op van 0,68 MPa. Daarnaast toont de onderlinge vergelijking van de superplastificeerders aan dat de superplastificeerder op basis van polycarboxylaat beter scoort dan diegene op naftaleenbasis.



Figuur 47: Resultaten – 4-puntsbuigproef.

De conclusie uit de resultaten van de 4-puntsbuigproef is dat het CNT-mengsel met MasterEase3650 wel degelijk een positieve invloed kan uitoefenen op de buigsterkte van beton. Echter bevat de Rhenofit-suspensie maar 0,2% CNT's en 99,4% dispersiemiddel waardoor de stijging van de sterkte wordt belemmerd. Er zijn tevens toch perspectieven naar de toekomst toe om dit verder in detail te bekijken.

4.5 Samenvatting resultaten

Tot slot worden de representatieve sterktes samengevat in tabel 15. De algemene conclusie omtrent de proeven wijst uit dat de druk- en slijttreksterkte niet werden verhoogd door toevoeging van CNT's en een hulpstof aan het referentiebeton, zoals de literatuur beoogde. Dit komt later terug in de terugkoppeling naar de literatuur in paragraaf 10.

Echter geeft de buigproef resultaten, welke mits meer onderzoek een relevante sterkteverhoging kunnen bekomen. Het blijkt dat de lage concentratie aan CNT's in de Rhenofit-CNT3-suspensie nadelige invloeden uitoefent.

Tabel 15: Samenvatting resultaten.

	Referentiebeton	MasterRheobuild1100	MasterEase3650
f_{cm}	58,39	54,79	58,84
$f_{ct,rep}$	3,78	3,56	3,67
$f_{ct,fl,rep}$	5,17	5,30	5,28

4.6 Massadichtheid

Tijdens het testen van de proefstukken werd er waargenomen dat de CNT-mengsels met MasterRheobuild1100 systematisch lagere sterktes vertoonden dan de CNT-mengsels met MasterEase3650 voor de 3 verschillende proeven. Ter controle van de verdichtingsgraad van het beton, werden de kubussen van de CNT-mengsels gewogen. Door middel van het afgelezen gewicht en het standaard volume van de kubus ($0,003375\text{m}^3$) werd de massadichtheid bepaald. De massadichtheid van beide CNT-mengsels is zichtbaar in onderstaande tabellen.

Tabel 16: Massadichtheid - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.

MasterRheobuild1100			
proefstuk	m (kg)	V (m^3)	ρ (kg/m^3)
1	7,4131	0,003375	2197
2	7,5361	0,003375	2233
ρ_{gem}			2215

Tabel 17: Massadichtheid - CNT-mengsel & MasterEase3650.

MasterEase3650			
proefstuk	m (kg)	V (m^3)	ρ (kg/m^3)
1	7,6305	0,003375	2261
2	7,6136	0,003375	2256
ρ_{gem}			2259

Uit bovenstaande tabellen volgt dat de verdichtingsgraad van de CNT-mengsels met MasterEase3650 ($2259\text{kg}/\text{m}^3$) beter is dan de CNT-mengsels met MasterRheobuild1100 ($2215\text{kg}/\text{m}^3$). Het verschil bedraagt 1,95%. Dit is mede een verklaring voor de systematisch lagere sterktes van de CNT-mengsels met MasterRheobuild1100 ten opzichte van de CNT-mengsels met MasterEase3650. De vergelijking mag gemaakt worden aangezien beide mengsels werden voorzien van éénzelfde volumetrische hoeveelheid materialen. Deze waarneming toont aan dat een superplastificeerder op basis van polycarboxylaat effectiever werkt dan de verouderde superplastificeerder op basis van naftaleen.

4.7 Oppervlaktebeoordeling

4.7.1 Referentiebeton

De oppervlaktes van de verschillende proefstuktypes van het referentiebeton zijn weergegeven op onderstaande figuren. De verdichtingsgraad van de kubus en het prisma hadden een hogere kwaliteit dan het cilinderoppervlak. Een oorzaak hieromtrent is de ronde vorm van de cilindermal. Het is belangrijk dat het beton in de kern genoeg verdicht is. Of de oppervlakteholtes veel invloed hebben op de sterkte van de proefstukken, zal blijken uit de analyse van de kernholtes. Naast het gebruik van de triltafel kon er ook geopteerd worden om extra te verdichten met de trilnaald, maar dat was hier niet het geval.



Figuur 48: Oppervlak kubus - Referentiebeton.



Figuur 49: Oppervlak prisma - Referentiebeton.



Figuur 50: Oppervlak cilinder – Referentiebeton.

4.7.2 CNT-mengsel & MasterRheobuild1100

Op onderstaande figuren zijn de oppervlaktes weergegeven van het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100. Een eerste waarneming wees erop dat er grotere holtes aanwezig waren ten opzichte van het referentiebeton, besproken in de vorige paragraaf. Deze waarneming wijst erop dat dit mengsel minder goed is verdicht dan het referentiebeton. Nochtans gaf de zetmaat een indicatie dat dit type mengsel een betere consistentie had dan het referentiebeton. Enerzijds is de conclusie hier dat de toevoeging van de Rhenofit suspensie ervoor zorgt dat de verdichtingsgraad afneemt. Anderzijds kan de reactie tussen de Rhenofit suspensie en MasterRheobuild1100 ervoor gezorgd hebben dat er minder lucht kon ontsnappen tijdens het trillen van de proefstukken. Ook hier was het een oplossing geweest om extra te verdichten met de trilnaald.



Figuur 51: Oppervlak kubus - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.



Figuur 52: Oppervlak cilinder - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.



Figuur 53: Oppervlak prisma - CNT-mengsel & MasterRheobuild1100.

4.7.3 CNT-mengsel & MasterEase3650

Tot slot wordt het betonoppervlak van het CNT-mengsel en MasterEase 3650 geanalyseerd. Indien naar de betonoppervlakken wordt gekeken op onderstaande figuren ziet men dat er minder holtes zijn dan bij het vorige mengsel. Er zijn minder grote holtes aanwezig en ook een kleiner aantal in alle drie de soorten proefstukken. Het betonoppervlak voor de kubus en het prisma zijn echter nog steeds slechter dan het referentiebeton. Er is wel een verbetering zichtbaar voor de cilinders.

Uit deze vergelijkingen kan men concluderen dat MasterEase3650 zorgt voor een betere verdichting dan MasterRheobuild1100. Indien hetzelfde geldt voor de kern, kan dit leiden tot een verschil in sterkte-eigenschappen, dit zal duidelijker worden bij de bespreking van de destructieve testen.



Figuur 54: Oppervlak kubus - CNT-mengsel & MasterEase3650.



Figuur 55: Oppervlak cilinder - CNT-mengsel & MasterEase3650.



Figuur 56: Oppervlak prisma - CNT-mengsel & MasterEase3650.

4.8 Kernholtes

Zoals eerder vermeld bij de inspectie van de oppervlakteholtes, wordt hier bekeken welke invloed de kernholtes hebben op de sterkte van de proefstukken. Aangezien de verdichtingsgraad van de CNT-mengsels met MasterRheobuild1100 lager is ten opzichte van de CNT-mengsels met MasterEase3650, wordt dit verder bekeken via de kernholtes in het beton. Op onderstaande figuren zijn de close-ups van de kernen van de verschillende mengsels zichtbaar. De holtes worden aangeduid door rode cirkels om een globaal overzicht te verkrijgen van de holtes die aanwezig zijn in de verschillende mengsels.

Het referentiebeton vertoont naast kleine verspreide holtes, ook enkele grotere holtes. Op basis van een visuele analyse kan men concluderen dat er geen holtes groter zijn dan 8mm in de doorsnede van het referentiebeton. Men kan twee intervallen maken van groottes van holtes, de grootste klasse ligt tussen een diameter van 2,5 en 8 mm. Het kleinere interval is een diameter kleiner dan 2,5 mm. Uit de visuele analyse kan men concluderen dat 27% van de holtes zich bevinden in het grotere interval en dat de rest van de holtes zich bevinden in het interval voor een diameter kleiner dan 2,5mm. Echter is het beton algemeen goed verdicht. Dit was enigszins verrassend aangezien de schud- en zetmaat niet de vooropgestelde consistentieklasse beoogde.



Figuur 57: Kernholtes – Referentiebeton.

Omtrent de CNT-mengsels zijn er grotere holtes zichtbaar. Er werd oorspronkelijk verwacht, na het nemen van de zet- en schudmaat, dat de CNT-mengsels een hogere verdichtingsgraad zouden bekommen. Echter na de analyse van de kernholtes blijkt het dat er meer en grotere holtes aanwezig zijn.

De doorsnede van het CNT-mengsel met MasterRheobuild zal als eerste geanalyseerd worden. Er is duidelijk zichtbaar dat een interval groter dan 8mm nodig is voor de klassering van de holtes. In het eerste interval voor holtes kleiner dan 2,5 mm bevindt zich 40% van de holtes, voor het tweede interval is dit 45%. Het interval voor holtes groter dan 8mm bevat 15% van de aanwezige holtes.



Figuur 58: Kernholtes - CNT-mengsel met MasterRheobuild1100.

Voor het CNT-mengsel met MasterEase zal hetzelfde interval worden gebruikt dan bij MasterRheobuild. Uit de visuele analyse kan men concluderen dat 76% van de holtes behoren tot interval 1, 16% van de holtes behoren tot interval 2 en 8% van holtes worden toegewezen aan het laatste interval.



Figuur 59: Kernholtes - CNT-mengsel met MasterEase3650.

Indien de CNT-mengsels onderling worden vergeleken, tonen de bovenstaande figuren aan dat het CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 meer en grotere holtes vertoont dan het CNT-mengsel met MasterEase3650.

Deze waarnemingen zijn tegen de verwachtingen in, aangezien de superplastificeerders de functie hebben om het beton extra te verdichten, naast de functie van de verhoogde verwerkbaarheid. Daarnaast gaven de zet- en schudmaat van de CNT-mengsels een indicatie dat de verdichtingsgraad van deze mengsels beter zou zijn dan deze van het referentiebeton. Daarom is het verrassend dat de doorsnedes van de CNT-mengsels grotere kernholtes bevatten.

4.9 Verband: Massadichtheid, Oppervlakte- & kernholtes

Indien er wordt gekeken naar de oppervlakteholtes, dewelke eerder vermeld waren, is er een verband waarneembaar. Het referentiebeton, met weinig kernholtes, vertoonde een structuur met minder oppervlakteholtes in vergelijking met de CNT-mengsels. De oppervlakteholtes staan dus in relatie met het aantal kernholtes.

Indien de oppervlakteholtes worden gerelateerd aan de kernholtes in de derde dimensie, kan dus de hoeveelheid lucht in de proefstukken worden bepaald. Hieruit wordt afgeleid dat het referentiebeton bestaat uit 2,83% lucht. Daarnaast hebben de CNT-mengsels met MasterRheobuild1100 en MasterEase3650 een luchtgehalte van respectievelijk 4,9 en 3,57% lucht. Dit geeft een verschil in massa van 1,33%. Indien dit holtepercentage wordt vergeleken met percentages van de massadichtheid (1,95%), kan men concluderen dat dit een goede inschatting geeft van de hoeveelheid lucht in elk mengsel. Het besluit is dat het verschil in sterkte tussen de CNT-mengsels veroorzaakt wordt door de hoeveelheid holtes in het beton.

4.10 Terugkoppeling literatuur

Het is van belang om de resultaten te vergelijken met de gevonden literatuur. De vergelijking met de masterproef van 2018 [1] zal niet worden uitgevoerd doordat in deze paper de mengsels op een foutieve manier werden uitgevoerd.

Eerder onderzoek concludeerde dat een superplastificeerder op basis van polycarboxylaar (PCE) de superplastificeerder op basis van naftaleen (NPH) overtreft omtrent de consistentiegraad [19]. Dezelfde waarnemingen vonden plaats in dit onderzoek, voor eenzelfde hoeveelheid superplastificeerder realiseerde de plastificeerder op basis van PCE voor een hogere stijging in verwerkbaarheid.

Daarnaast werd er in [19] waargenomen dat de druksterkte na toevoeging van de superplastificeerder op basis van naftaleen hoger lag dan de druksterktes van andere superplastificeerders onder andere polycarboxylaar. Het verschil in druksterkte was echter zeer minimalistisch. In dit onderzoek werd het tegenovergestelde waargenomen. Het verschil zou veroorzaakt zijn doordat men gebruik maakte van een geprefabriceerde CNT-suspensie, in de gebruikte literatuur werd de suspensie ontwikkeld in het labo.

Een andere vergelijking wordt gemaakt met de conclusie in [8], de splijtsterkte ondervond een daling van 2% ten opzichte van het referentiebeton. Dit is vergelijkbaar met de resultaten in dit onderzoek waar men een daling van 3% waarnam voor het CNT-mengsel met polycarboxylaar als hoofdcomponent. Deze vergelijking wordt enkel gemaakt voor mengsels die gebruik maken van een suspensie met een CNT-percentages van 0,05wt% met een droogtijd van 28 dagen, equivalent aan dit onderzoek. De buigsterkte van de proefstukken in deze thesis gaven echter een beter resultaat dan in [8]. In dit onderzoek verkreeg men een stijging van 1% voor de mengsels met CNT's, waar er een daling zichtbaar van 5,2% ten opzichte van het referentiebeton voor [8].

Uit bovenstaande vergelijkingen kan besloten worden dat de verkregen resultaten in de masterproef overeenkomen met de gevonden literatuur. Zo kan men concluderen dat de gevonden resultaten onderzoek waardig zijn. Toch worden er voor de buigproef betere resultaten verkregen in vergelijking met de literatuur, zo kan worden afgeleid dat de CNT's beter hun eigenschappen toonden dan in de gevonden literatuur.

5 Besluit

De doelstelling van dit onderzoek is om te achterhalen welke invloed het toevoegen van een hulpstof uitoefent op beton voorzien van een Rhenofit-CNT3-suspensie.

De consistentie van beton daalt na toevoegen van de Rhenofit-CNT3-suspensie, maar niet in deze mate in vergelijking met de resultaten uit de masterproef van 2018. In dit onderzoek gold de hypothese dat de verwerkbaarheid zou stijgen indien er een hulpstof werd toegevoegd. Dit werd bevestigd doordat het beton meer vloeibaar werd na het toevoegen van de hulpstof. De superplastificeerder op basis van polycarboxylaat toonde echter betere resultaten inzake de consistentiegraad in vergelijking met de superplastificeerder op basis van naftaleen, wat vergelijkbaar is met de literatuur.

Uit de waarnemingen betreft de oppervlakte- en kernholtes wordt geconcludeerd dat er ruimte voor verbetering aanwezig is op gebied van de verdichting van het beton met CNT's en de hulpstof. Deze conclusie, gekoppeld aan de extra mogelijkheid tot verdichting door middel van een trilnaald, toont aan dat er zeker kansen zijn om de sterkte-eigenschappen van beton met CNT's te verhogen.

De superplastificeerder op basis van polycarboxylaat vertoont, mits gebruik van slechts 56% van de maximaal toegelaten hoeveelheid, betere resultaten dan de superplastificeerder op basis van naftaleen. Dit geldt voor zowel de druk- en splijttrekproef.

De conclusie uit de resultaten van de 4-puntsbuigproef is dat het effect van de CNT's de stijging in buigsterkte van beton duidelijker waarneembaar is ten opzichte van de druk- en treksterkteproef. De CNT's worden wel degelijk op een deel van hun buigsterktecapaciteit benut. Dit is duidelijk zichtbaar door het feit dat de CNT-mengsels een verschillende massadichtheid hadden maar toch eenzelfde buigsterkte, dit werd mogelijk gemaakt door de CNT's. Echter is het wel zo dat de stijging van de andere sterkte-eigenschappen van het beton afhankelijk zijn van het soort superplastificeerder. Doordat deze invloed had op de verdichting van het beton, verkreeg het CNT-mengsel met een superplastificeerder op basis van polycarboxylaat een hogere massadichtheid. Hierdoor kreeg dit mengsel een hogere druk- en splijttreksterkte doordat de massadichtheid een grotere invloed op deze sterktes heeft. Men kan dus concluderen dat de 4-puntsbuigproef beter de effecten van CNT's op het beton weerspiegelt en minder afhankelijk is van de massadichtheid.

De lage CNT-concentratie (0,2%) in combinatie met de grote hoeveelheid water (99,4%) in de Rhenofit-CNT3-suspensie belemmert de potentiële stijging in sterkte-eigenschappen van beton met CNT's, ongeacht de toevoeging van een hulpstof. De maximale hoeveelheid Rhenofit-suspensie wordt beperkt tot de hoeveelheid aanmaakwater wat resulteert in een beperking van de maximale hoeveelheid CNT's die kunnen worden toegevoegd aan het beton.

6 Toekomstvisie

In de toekomst moet er verder onderzoek gebeuren naar de verhoging van de sterkte-eigenschappen van beton door CNT's. Doordat de Rhenofit-suspensie een te lage concentratie aan CNT's bezit, wordt er aangestuurd op een bereiding door gebruik van een CNT-poeder en het gebruik van Rhenofit zal achterwegen worden gelaten. Op deze wijze kan de concentratie van de CNT-suspensie zelf gekozen worden en kunnen er verschillende concentraties op een makkelijkere manier met elkaar vergeleken worden. Op deze manier kan er een duidelijke stijging of daling in buigsterkte worden waargenomen indien er gebruik wordt gemaakt van andere CNT percentages, deze liggen best nog altijd tussen de 0,05% en 0,10% van het cement gewicht. De toename van de sterkte-eigenschappen door CNT's wordt het meeste duidelijk in een buigproef, daarom zal men doormiddel van deze testmethode de beste conclusies kunnen maken.

Ten tweede zal men de maximale hoeveelheid superplastificeerder op basis van polycarboxylaat (MasterEase3650) toevoegen voor een verhoogde verwerkbaarheid. De stijging in verwerkbaarheid en door het gebruik te maken van een trilnaald zou kunnen zorgen voor minder kernholtes in het beton. Zo kan men beton realiseren met hogere druk- en slijtsterkte.

Als laatste punt zou men een gepaste methode moeten zoeken voor het meten van de elektrische weerstand van betonnen elementen. Op deze manier kan de dispersie vergeleken worden van betonmengsel met verschillende CNT concentraties.

Bibliografie

- [1] R. Coopmans en T. van Thielen, „Het effect van carbon nanotubes op beton met verschillende samenstellingen [Eindwerk],” Gezamenlijke opleiding Industriële ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, Diepenbeek, 2019.
- [2] B. Cox, D. Coenen en C. Jeurissen, „Critical analysis of existing CNT research in view of future experimentation of new concrete compositions [Eindwerk],” Gezamenlijke opleiding Industriële ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, Diepenbeek, 2020.
- [3] NBN, Bureau voor Normalisatie, „NBN EN 12390-1: Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds,” Bureau voor Normalisatie, België, 2012.
- [4] "TUBALL", „Single-walled carbon nanotubes: structure, properties, applications, and health & safety,” 2020. [Online]. Available: https://www.ossila.com/products/single-walled-carbon-nanotubes?_pos=1&_sid=ce5f37966&_ss=r&variant=34447448961. [Geopend November 2020].
- [5] Jia Choi, PhD en Yong Zhang, „Single, Double, MultiWall Carbon Nanotube Properties & Applications,” 2011. [Online]. Available: <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/single-double-multi-walled-carbon-nanotubes.html>. [Geopend November 2020].
- [6] Lanxess, „Lanxess,” RheinChemie Industries, 15 Maart 2019. [Online]. Available: http://cnt.ext.lanxess.com/wp-content/uploads/sites/7/2017/09/TDS-Rhenofit_CNT-3_EN_v2.pdf. [Geopend November 2020].
- [7] M. Guedes, H. H. Ahmed, J. A. Bogas en S. Olhero, „EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR EVALUATION OF CNT DISPERSION IN HIGH pH MEDIA CHARACTERISTIC OF CEMENTITIOUS MATRIXES,” Research Gate, Lissabon, Portugal, 2016.
- [8] A. Hawreen, J. A. Bogas en R. Kurda, „Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes,” Springer, Irak, 2019.
- [9] W. Li, W. Ji, F. T. Isfahani, Y. Wang, G. Li en F. Xing, „Nano-Silica Sol-Gel and Carbon Nanotube Coupling Effect on the Performance of Cement-Based Materials,” MDPI, Shenzhen, 2017.
- [10] K. M. Liwa, M. F. Kai en L. W. Zhang, Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview, HongKong: Elsevier, 2016.
- [11] Holcim, „De bestanddelen van beton: Hulpstoffen,” Holcim, 21 Maart 2019. [Online]. Available: <https://www.holcim.be/nl/de-bestanddelen-van-beton-hulpstoffen>. [Geopend November 2020].
- [12] ECOVER, „Wat zijn oppervlakte-actieve stoffen of surfactanten?” [Online]. Available: <https://faqs.ecover.com/hc/nl-be/articles/213589589-Wat-zijn-oppervlakte-actieve-stoffen-of-surfactanten-#:~:text=Het%20zijn%20de%20werkpaarden%20van,anionische%2C%20amfotere%20en%20kationische%20stoffen>. [Geopend November 2020].
- [13] F. Collins, J. Lambert en H. W. Duan, „The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–OPC paste mixtures,” ELSEVIER, Monash University, Australia, 2011.
- [14] J. Kang, S. Al-Sabah en R. Théo, „Effect of Single-walled Carbon Nanotubes on Strength Properties of Cement Composites,” MDPI, University College Dublin, 2020.

- [15] A. S. Osmani, „Analysis of compressive strength of concrete using different SulphonatedNaphthalene Polymer based admixtures,” MAT Journals, Sylhet, Bangladesh, 2017.
- [16] S. A.-R. Ahmed, M. S. Elfeky en E. E. Hefne, „NAPHTHALENE-SULFONATE BASED SUPER-PLASTICIZER AND ULTRASONICATION EFFECTS ON THE DISPERSION OF CNTS IN CEMENT COMPOSITES SUBJECTED TO CYCLIC LOADING,” IJMTER, Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig 44519, Egypt; National Research Centre, Cairo, Egypt., 2018.
- [17] M. Liebscher, A. Lange, C. Schröfl, R. Fuge, V. Mechtcherine, J. Plank en A. Leonhardt, „Impact of the molecular architecture of polycarboxylate superplasticizers on the dispersion of multi-walled carbon nanotubes in aqueous phase,” CrossMark, Institute of Construction Materials, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany, 2016.
- [18] G. R. Vesmawala, A. R. Vaghela, K. Yadav en Y. Patil, „Effectiveness of polycarboxylate as a dispersant of carbon nanotubes in concrete,” in *Materials Today: PROCEEDINGS*, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Ichhanath, Surat 395007, India, ScienceDirect, 2020, pp. 1170-1174.
- [19] S. Alrekabi, A. B. Cundy, A. Lampropoulos en I. N. Savina, „Influence of superplasticizer/surfactant aided aqueous dispersion of multi-walled Carbon nanotubes and its impact on workability and mechanical properties of cementitious composites,” University of Brighton, Regensburg, Germany, 2020.
- [20] J. Devree, „Zetmaat,” [Online]. Available: <https://www.joostdevree.nl/shtmls/zetmaat.shtml>. [Geopend November 2020].
- [21] D. Joost, „Schudmaat,” [Online]. Available: <https://www.joostdevree.nl/shtmls/schudmaat.shtml>. [Geopend 15 November 2020].
- [22] NBN, Bureau voor Normalisatie, „NBN EN 12350-5: Testing fresh concrete - Part 5: Flow table test,” 2009. [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/327022?l=E>. [Geopend November 2020].
- [23] Onbekend, „Betonlexicon,” 15 Oktober 2018. [Online]. Available: <https://www.betonlexicon.nl/D/Drukproef/>. [Geopend November 2020].
- [24] NBN, Bureau voor Normalisatie, „NBN EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimen,” NBN, België, 2019.
- [25] NBN, Bureau voor Normalisatie, „NBN EN 12390-5: Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens,” NBN, België, 2019.
- [26] NBN, Bureau voor Normalisatie, „NBN EN 12390-6: Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens,” NBN, België, 2019.
- [27] Kijlstra, „betonmortelNederland,” Kijlstra, [Online]. Available: <https://www.betonmortelNederland.nl/betonmortel/175/>. [Geopend November 2020].
- [28] B. Ribeiro, E. Botelho en M. L. Costa, „Carbon nanotube buckypaper reinforced polymer composites: A review,” ResearchGate, Departamento de Materiais e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” –, 2017.

Bijlage A: Technische fiche MasterRheobuild1100



We create chemistry

MasterRheobuild 1100 con 40%

Superplastificeerder/sterk waterreducerder voor betonspecie.

SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2



BESCHRIJVING

MasterRheobuild 1100 con 40% is een superplastificeerder voor betonspecie op basis van gesulfoneerd naftaleen formaldehyde condensaat.

TOEPASSING

MasterRheobuild 1100 con 40% kan gebruikt worden voor de productie van :

- Transportbeton
- Prefab beton
- Ongewapend beton
- Gewapend beton
- Voorgespannen beton

MasterRheobuild 1100 con 40% kan toegepast worden in betonspecie in de consistentie gebieden (EN 206) :

- S2 tot S5
- F2 tot F5

MasterRheobuild 1100 con 40% wordt geadviseerd voor toepassing in betonspecie met een temperatuur bereik van :

- +5 °C tot +25 °C

DOSERING

MasterRheobuild 1100 con 40% heeft een doseringsbereik in g per 100 kg cement / bindmiddel van :

- 150 tot 1500

MasterRheobuild 1100 con 40% heeft het meeste effect indien het gedoseerd wordt nadat het water geheel of gedeeltelijk is toegevoegd aan de overige componenten van de betonspecie.

MasterRheobuild 1100 con 40% is een gebruiksklare hulpstof. Voor een goede werking en om een homogene verdeling te bereiken dient voldoende mengtijd aan gehouden te worden.

Voor specifieke toepassingen kunnen andere doseringen worden gehanteerd. Een vooronderzoek is daarbij noodzakelijk.

VERENIGBAARHEID

MasterRheobuild 1100 con 40% is niet verenigbaar en mag niet gecombineerd worden met hulpstoffen zoals o.a. MasterGlenium op basis van PCE

GESCHIKTHEIDSONDERZOEK

MasterRheobuild 1100 con 40% dient voorafgaand aan de toepassing door middel van een geschiktheidsonderzoek onderzocht te worden of het het gewenste effect heeft.

Bij dit onderzoek moeten de grondstoffen van de betoncentrale gebruikt worden in de betonsamenstelling waarin de hulpstof toegepast zal worden.

MasterRheobuild 1100 con 40% kan een ander effect geven op bijvoorbeeld het behoud van verwerkbaarheid en sterkte ontwikkeling. Enkele aspecten die daarbij van invloed kunnen zijn, zijn :

temperatuur van de omgeving en de specie, cementsoort, -klasse, mengverhouding, andere hulpstoffen, soort toeslagmateriaal, transportmethode en dergelijke.

BIJWERKINGEN

MasterRheobuild 1100 con 40% kan bij overschrijding van de geadviseerde dosering een ongewenste bijwerking geven.

- Hierbij kan gedacht worden aan :
- Lange vertragingstijd
 - Langzame sterkteontwikkeling
 - Ontmenging, Bleeding

OPSLAG

MasterRheobuild 1100 con 40% moet vorstvrij, uit de zon en in gesloten tanks of verpakking opgeslagen worden.

Geadviseerde opslag temperatuur is tussen +5° C en +30° C.

MasterRheobuild 1100 con 40% kan indien het toch bevroren is, langzaam ontdooid worden waarna het mechanisch omgeroerd moet worden tot een homogeen geheel.

Indien het product niet gemengd is gedurende een periode, is het zinvol om dit voor gebruik mechanisch goed te mengen.

Gebruik geen perslucht om het product te mengen.

Bij bulkopslag dient rekening gehouden te worden met lokaal geldende regels ten aanzien van de opslag van chemicaliën.

Aanbevolen wordt om bulkopslag tanks periodiek te reinigen om groei van micro-organismen in met name de spatzone te voorkomen.

Bij wisseling van hulpstof dienen opslagtank, toe- en afvoerleidingen volledig gereinigd te worden om verontreiniging van het product te voorkomen.

HOUDBAARHEID

MasterRheobuild 1100 con 40% heeft, indien opgeslagen volgens het opslag advies, een houdbaarheidstermijn van minimaal 12 maanden na productie datum.

VOORZORGSMAATREGELEN

MasterRheobuild 1100 con 40% is niet schadelijk voor gezondheid en milieu en heeft ook geen speciale kenmerken nodig volgens de EC richtlijnen.

Voorafgaand aan het gebruik en voor verdere inlichtingen wordt dringend aangeraden het veiligheidsinformatieblad (MSDS) te raadplegen.



We create chemistry

MasterRheobuild 1100 con 40%

Superplastificeerder/sterk waterreducerder voor betonspecie.

SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2

EXTRA INFORMATIE

Voor extra informatie en aspecten die niet in dit product informatie blad beschreven zijn verwijzen wij naar ondersteuning bij uw technisch adviseur.

De BENOR-certificatie van het product geeft aan dat op basis van een periodieke externe controle een voldoende mate van vertrouwen bestaat dat de producent in staat is om doorlopend de overeenstemming van het product, zoals vastgelegd in technische referentiespecificaties, te waarborgen. Voorliggend BENOR-fiche/technische fiche bevat de prestaties van kenmerken die door de producent verklaard worden en wordt door de certificatie-instelling geverifieerd.

MasterRheobuild 1100 con 40%

Superplastificeerder/sterk waterreducerder voor betonspecie.

SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2

Technische gegevens	
Categorie volgens EN934-2	: SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2
Chloride gehalte in %m	: max. 0,10
Natriumoxide-eq. in %m	: max. 6,5
Corrosie gedrag	: Bevat uitsluitend componenten volgens EN 934-1:2008, Annex A.1
Hoofdwering	: superplastificerend
Volumieke massa kg/l	: 1,200
Droge stofgehalte EN480-8	: 40,00
pH	: 6,0 - 9,0
Aggregatie toestand	: Vloeibaar
	: vloeibaar
Toepassingstemperatuur	: vanaf 5°C
oplosbaarheid in water (g/l)	: goed oplosbaar
Kleur	: bruin
VHB kleurcode	: grijs
Effectief bestanddeel	: gesulfoneerd naftaleen formaldehyde condensaat
Verklaring door de fabrikant ontleend aan de DoP voor	: de hoofdwering, het chloridegehalte, Natriumoxide-eq en het corrosiegedrag

BASF Nederland B.V., Construction Chemicals

Karolusstraat 2
Postbus 132, NL-4900 AC Oosterhout N.B.
Tel. +31 162 47 66 60. Fax +31 162 42 96 94
e-mail : basf-cc-nl@basf.com
www.master-builders-solutions.basf.nl
B.T.W. NL 001829117B01
HR Arnhem 09022883



De data die in dit technische informatieblad worden vermeld alsmede adviezen en andere ondersteunende activiteiten zijn gebaseerd op onze huidige technische kennis en ervaring. In verband met de vele factoren bij de verwerking en toepassing van onze producten, wordt de koper van onze producten niet ontslagen van zijn verplichting om deze producten zelf te keuren en te testen, specifiek met betrekking tot de geschiktheid van de geleverde goederen voor de geïmplementeerde processen of daaruit voortvloeiende producten. De data garanderen niet bepaalde eigenschappen of de geschiktheid voor een concrete toepassing van het product. Alle bijbehorende beschrijvingen, tekeningen, foto's, data, verhoudingen, gewichten etc. kunnen zonder voorafgaande kennisgeving worden gewijzigd en vertegenwoordigen niet de overeengekomen contractuele kwaliteit van het product. Het is de verantwoordelijkheid van de ontvanger van onze producten om eventuele Intellectuele eigendomsrechten, bestaande wet- en regelgeving in acht te nemen. Bij herdruk komen voorgaande uitgaven te vervallen.

MasterEase 3650

Superplastificeerder/ Sterk waterreducerder/ Waterdichtingsmiddel in de massa

SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2

WRS EN 934-2 : T9



BESCHRIJVING

MasterEase 3650 is een superplastificeerder voor betonspecie op basis van polyarylether.

MasterEase 3650 maakt het mogelijk betonspecie te maken met een laag watergehalte en toch een lage taaiheid en goed vloeigedrag.

TOEPASSING

MasterEase 3650 kan gebruikt worden voor de productie van :

- Transportbeton
- Ongewapend beton
- Gewapend beton
- Voorgespannen beton

MasterEase 3650 kan toegepast worden in betonspecie in de consistentie gebieden (EN 206) :

- S2 tot S5
- F2 tot F5
- Zelfverdichtend beton

MasterEase 3650 wordt geadviseerd voor toepassing in betonspecie met een temperatuur bereik van :

- +5 °C tot +30 °C

MasterEase 3650 kan, indien een langere verwerkingstijd nodig is zonder de verwerkbaarheid te verhogen, gecombineerd worden met MasterEase 3950 of met een MasterSet R vertrager.

DOSERING

MasterEase 3650 heeft een doseringsbereik in g per 100 kg cement / bindmiddel van :

- 500 tot 2500

MasterEase 3650 heeft het meeste effect indien het gedoseerd wordt nadat het water geheel of gedeeltelijk is toegevoegd aan de overige componenten van de betonspecie.

Voor specifieke toepassingen kunnen andere doseringen worden gehanteerd. Een vooronderzoek is daarbij noodzakelijk.

VERENIGBAARHEID

MasterEase 3650 is niet verenigbaar en mag niet gecombineerd worden met hulpstoffen zoals o.a. MasterRheobuild op basis van gesulfoneerd-naftaleen of -melamine.

MasterEase 3650 is verenigbaar met alle cement types zoals, portland cement en composiet cement

GESCHIKTHEIDSONDERZOEK

MasterEase 3650 dient voorafgaand aan de toepassing door middel van een geschiktheidsonderzoek onderzocht te worden of het het gewenste effect heeft.

Bij dit onderzoek moeten de grondstoffen van de betoncentrale gebruikt worden in de betonsamenstelling waarin de hulpstof toegepast zal worden.

MasterEase 3650 kan een ander effect geven op bijvoorbeeld het behoud van verwerkbaarheid en sterkte ontwikkeling. Enkele aspecten die daarbij van invloed kunnen zijn, zijn : temperatuur van de omgeving en de specie, cementsoort, -klasse, mengverhouding, andere hulpstoffen, soort toeslagmateriaal, transportmethode en dergelijke.

BIJWERKINGEN

MasterEase 3650 geeft de mogelijkheid van een belangrijke bindingsvertraging in functie van het gebruikte cementtype.

MasterEase 3650 is door een extern laboratorium getest volgens EN 480-2 bij de geadviseerde maximum dosering waarbij :

een bindingsvertraging van 26u 40min werd vastgesteld met cement CEM II / BV 32,5R

MasterEase 3650 kan bij overschrijding van de geadviseerde dosering een ongewenste bijwerking geven. Hierbij kan gedacht worden aan :

- Lange vertragingstijd
- Langzame sterkteontwikkeling
- Ontmenging, Bleeding

OPSLAG

MasterEase 3650 moet vorstvrij, uit de zon en in gesloten tanks of verpakking opgeslagen worden.

Geadviseerde opslag temperatuur is tussen +5° C en +30°C. MasterEase 3650 kan indien het toch bevroren is, langzaam ontdooid worden waarna het mechanisch omgeroerd moet worden tot een homogeen geheel.

Indien het product niet gemengd is gedurende een periode, is het zinvol om dit voor gebruik mechanisch goed te mengen. Gebruik geen perslucht om het product te mengen.

Bij bulkopslag dient rekening gehouden te worden met lokaal geldende regels ten aanzien van de opslag van chemicaliën. Aanbevolen wordt om bulkopslag tanks periodiek te reinigen om groei van micro-organismen in met name de spatzone te voorkomen.

Bij wisseling van hulpstof dienen opslagtank, toe- en afvoerteidingen volledig gereinigd te worden om verontreiniging van het product te voorkomen.

MasterEase 3650

Superplastificeerder/ Sterk waterreducerder/ Waterdichtingsmiddel in de massa

SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2

WRS EN 934-2 : T9

HOUDBAARHEID

MasterEase 3650 heeft, indien opgeslagen volgens het opslag advies, een houdbaarheidstermijn van minimaal 12 maanden na productie datum.

VOORZORGSMAATREGELEN

MasterEase 3650 is niet schadelijk voor gezondheid en milieu en heeft ook geen speciale kenmerken nodig volgens de EC richtlijnen.

Voorafgaand aan het gebruik en voor verdere inlichtingen wordt dringend aangeraden het veiligheidsinformatieblad (MSDS) te raadplegen.

EXTRA INFORMATIE

Voor extra informatie en aspecten die niet in dit product informatie blad beschreven zijn verwijzen wij naar ondersteuning bij uw technisch adviseur.

De BENOR-certificatie van het product geeft aan dat op basis van een periodieke externe controle een voldoende mate van vertrouwen bestaat dat de producent in staat is om doorlopend de overeenstemming van het product, zoals vastgelegd in technische referentiespecificaties, te waarborgen. Voorliggend BENOR-fiche/technische fiche bevat de prestaties van kenmerken die door de producent verklaard worden en wordt door de certificatie-instelling geverifieerd.

MasterEase 3650

Superplastificeerder/ Sterk waterreducerder/ Waterdichtingsmiddel in de massa

SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2

WRS EN 934-2 : T9

Technische gegevens	
Categorie volgens EN934-2	: SPL EN 934-2 : T3.1/T3.2
	: WRS EN 934-2 : T9
Chloride gehalte in %m	: max. 0,10
Natriumoxide-eq. in %m	: max. 2,0
Corrosie gedrag	: Bevat uitsluitend componenten volgens EN 934-1:2008, Annex A.1
Hoofdwering	: superplastificerend
Volumieke massa kg/l	: 1,045
Droge stofgehalte EN480-8	: 19,90
pH	: 4,0 - 7,0
Aggregatie toestand	: vloeibaar
Toepassingstemperatuur	: vanaf 5°C
Kleur	: lichtbruin
VHB kleurcode	: grijs
Effectief bestanddeel	: polyaryl ether
Verklaring door de fabrikant ontleend aan de DoP voor	: de hoofdwering, het chloridegehalte, Natriumoxide-eq en het corrosiegedrag

Master Builders Solutions Nederland B.V.

Karolusstraat 2
 Postbus 132, NL-4900 AC Oosterhout N.B.
 Tel. +31 162 47 66 60
 e-mail : mbs-cc-nl@mbcc-group.com
 www.master-builders-solutions.com/nl-nl
 B.T.W. NL8601.94.048B01



De data die in dit technische informatieblad worden vermeld alsmede adviezen en andere ondersteunende activiteiten zijn gebaseerd op onze huidige technische kennis en ervaring. In verband met de vele factoren bij de verwerking en toepassing van onze producten, wordt de koper van onze producten niet ontslagen van zijn verplichting om deze producten zelf te keuren en te testen, specifiek met betrekking tot de geschiktheid van de geleverde goederen voor de geïmplementeerde processen of daaruit voortvloeiende producten. De data garanderen niet bepaalde eigenschappen of de geschiktheid voor een concrete toepassing van het product. Alle bijbehorende beschrijvingen, tekeningen, foto's, data, verhoudingen, gewichten etc. kunnen zonder voorafgaande kennisgeving worden gewijzigd en vertegenwoordigen niet de overeengekomen contractuele kwaliteit van het product. Het is de verantwoordelijkheid van de ontvanger van onze producten om eventuele Intellectuele eigendomsrechten, bestaande wet- en regelgeving in acht te nemen. Bij herdruk komen voorgaande uitgaven te vervallen.

Bijlage C: Mengselontwerp Referentiebeton

Keuze granulaten:

Zoals aangegeven in de voorwaarde wordt er gekozen voor een granulaten mix van 0-16 mm.

Blootstellingsklasse:

Doordat een CEM I 52,5N beschikbaar is in het labo zal hier rekening mee worden gehouden, zoals zichtbaar in onderstaande tabel is een blootstellingsklasse XC4 geschikt voor elementen tegen vorst.

Tabel 18: Blootstellingsklasse met bijhorende cementklasse

Building element	Exposure Classes	CEM I	SR I	CD 40	IA 52,5	CEM II	CEM III
Plain concrete	X0	x	x	x	x	x	x
Elements protected against frost	XC1, XC2 XC3, XC4	x	x	x	x	x	x
External elements, normal conditions	XC XF1	x	x	x	x	x	x
Hydro Construction	XC XF3	x	x	x	x	o	x
External elements subjected to gelivity with de-icing agents	XC XD XF2 XF4	x	x	x	x	o	o
Marine structures	XC, XS XF2, XF4	x	x	x	x	o	o
Chemical attack	XA	x	x	x	x	o	o
Traffic areas	XF4 XM	x	x	x	x	o	o
Wear without freezing thawing	XM	x	x	x	x	x	x
Wear with freezing thawing	XM	x	x	x	x	o	o

Uit onderstaande tabel wordt er afgeleid dat alle cement klassen van 52,5 een goede weerstand hebben tegen vorst bij gieten. Aangezien de temperatuur -5°C bedroeg tijdens het gieten, zou het gekozen type cement hiervan geen invloed mogen ondervinden. Daarom was de keuze voor een cementklasse van 52,5 een goede keuze.

Tabel 19: Eigenschappen cementtype

Type of Cement	Sensitivity to Freezing-Thawing	Heat Release	To be preferentially used for....	Contraindications	Special observations
CEM I, 32,5 N or R	Sensitive	Reduced	Any type of concrete unexposed to chemical attack.	Concrete poured in cold weather	Prolonged treatment required
CEM II B 32,5 N or R	Low Sensitive	Reduced	Any type of concrete unexposed to chemical attack	Concrete poured in cold weather	Prolonged treatment required
CEM II A-S 32,5 N or R	Sensitive	Reduced	Any type of concrete unexposed to chemical attack	-	-
CEM III A 32,5 R	Highly Sensitive	Reduced	Any type of concrete unexposed to chemical attack	Concrete poured in cold weather	Prolonged treatment required
CEM I 42,5 N or R	Insensitive	High	Any type of concrete, Prefabricated concrete	Massive concrete, copings	Special measures will be taken in hot weather
CEM II A-S 42,5 N or R	Low Sensitive	Mean	Any type of concrete unexposed to chemical attack	-	-
CEM II B 42,5 N or R	Sensitive	Reduced	Any type of concrete, Prefabricated concrete	-	Prolonged treatment required
All cements Of class 52,5	Insensitive	High	Any type of concrete, Prefabricated concrete	Any type of concrete, Prefabricated concrete.	Special measures will be taken in hot weather

Met deze bloostellingsklasse XC4 kan een minimum beton klasse worden bepaald, uit onderstaande tabel is dan af te leiden dat de beton klasse ten minste een C25/30 moet zijn.

Tabel 20: Minimum betonklasse

	Class Designation	Description of the environment	Informative examples where exposure classes may occur	Minimum concrete class
X0 – No risk of corrosion or attack	X0	For concrete without reinforcement or embedded metal: all exposures except where there is freeze/thaw, abrasion or chemical attack. For concrete with reinforcement or embedded metal: very dry	Concrete inside buildings with very low air humidity	C 8/10
XC – Corrosion induced by carbonation	XC1	Dry or permanently wet	Concrete inside buildings with low air humidity. Concrete permanently submerged in water.	C 16/20
	XC2	Wet, rarely dry	Concrete surfaces subject to longterm water contact. Many foundations.	C 16/20
	XC3	Moderate humidity	Concrete inside buildings with moderate or high air humidity. External concrete sheltered from rain.	C 20/25
	XC4	Cyclic wet and dry	Concrete surfaces subject to water contact, not withing exposure class XC2.	C 25/30

Maximum waarde van de gebruikte w/c ratio:

Het verband tussen de minimum cement- en betonklasse met een w/c-ratio van 0,5 kan afgeleid worden uit onderstaande tabel. Een betonklasse van C35/45 met een w/c-factor van 0,517, namens er een verhoging van 10% wordt toegepast aangezien er wordt gewerkt met een 0-16mm algemene granulatenmix.

Tabel 21: Betonklasse met bijhorende cementklasse

Concrete class	Cement class		
	32,5	42,5	52,5
C 8/10	0,75	-	-
C 12/15	0,65	-	-
C 16/20	0,55	0,65	-
C 18/22,5*	0,53	0,62	-
C 20/25	0,50	0,60	-
C25/30	0,45	0,55	0,60
C 28/35*	0,40	0,50	0,55
C 30/37	-	0,47	0,53
C 32/40*	-	0,45	0,59
C 35/45	-	0,40	0,47
C 40/50	-	-	0,45
C 45/55	-	-	0,42
C 50/60	-	-	0,40

In onderstaande tabel is zichtbaar dat het minimum cementgehalte voor een blootstellingsklasse XC4 gelijk is aan 300kg/m³, gekoppeld aan een maximum w/c-factor van 0,5. Uit deze tabel kan dan ook worden gehaald dat er een maximum w/c ratio is van 0,55 en een verhoging van 10% wordt toegepast door het gebruik van de algemene granulatenmix 0-16mm.

Tabel 22: Blootstellingsklasse met minimum cementgehalte

Exposure class	Maximum A/C ratio	Minimum concrete class	Minimum cement dosage
XO	-	C 8/10	-
XC1	0,65	C 16/20	260
XC2	0,60	C 16/20	260
XC3	0,60	C 20/25	280
XC4	0,50	C 25/30	300
XD1	0,55	C30/37	300
XD2	0,50	C35/45	320*
XD3	0,45	C35/45	320*
XS1	0,55	C 30/37	300
XS2	0,50	C 35/45	320*
XS3	0,45	C 35/45	320*
XF1	0,50	C 25/30	300
XF2	0,50	C 35/45	320
XF3	0,50	C 35/45	320
XF4	0,50	C 30/37	340
XA1	0,55	C 25/30	300
XA2	0,50	C 35/45	320
XA3	0,45	C 35/45	360
XM1	0,55	C 30/37	300
XM2 with the treatment of the concrete surface by vacuuming	0,55	C 30/37	300
XM2 without the treatment of the concrete surface	0,45	C 35/45	320
XM3	0,45	C 35/45	320

Zodra de gevonden maximale w/c-factoren worden vergeleken, wordt de laagste waarde gebruikt in het mengselontwerp. De finale maximale w/c-factor bedraagt dus 0,517, waardoor een w/c-factor van 0,5 kan toegepast worden. Deze w/c-factor komt overeen met een XC4-blootstellingsklasse en een C35/45-betonklasse.

Consistentie klasse:

De hypothese gaat ervan uit dat toevoeging van Rhenofit-CNT3 zorgt voor een afname van de verwerkbaarheid. Doordat er alleen superplastificeerder wordt toegevoegd, is er gekozen om te werken met een S3 en F3 aangezien een S4 of S5 te optimistisch is in de huidige omstandigheden.

Tabel 23: Consistentieklasse

NO.	Type of elements	Consistency class	Compression (mm)
1	Plain or poorly reinforced concrete foundations, massive elements	S1	10 – 40
2	Reinforced concrete foundations, pillars, beams, structural walls	S2	50 – 90
3	Idem, built with pumped concrete, monolithic structures	S3	100 – 150
4	Monolithic elements with dense reinforcements or compaction difficulties, elements with reduced sections	S4	160 – 210
5	Elements for which the building technology requires highly fluid concrete	S5	≥ 220

Hoeveelheid water per m³ beton:

In onderstaande tabel ziet men dat er voor een consistentieklasse S3 of F3 en een betonklasse ≥ C25/30, er 200 liter water per m³ beton moet worden toegevoegd om de gewenste verwerkbaarheid te verkrijgen. Doordat er gebruik wordt gemaakt van een granulaten mix van 0-16 mm, wordt de waarde verhoogd met 10% waardoor er 220l/m³ aanmaakwater nodig is om een S3 of F3 te bereiken.

Tabel 24: Waterhoeveelheid

Concrete class	Water quantity (A ₀) - l/m ³ , for the consistency class			
	S1, S2, F1, F2	S3, F3	S4, F4	S5, F5, F6
< C 8/10	160	170	-	-
C 8/10 ... C20/25	170	185	200	220
≥ C 25/30	185	200	215	230

Volgende formule wordt toegepast ter bepaling van de hoeveelheid cement per m³ beton:

$$C = \frac{A_0^c}{A/C} = \frac{220}{0,50} = 440 \frac{kg}{m^3} > C_{min} = 300 \frac{kg}{m^3}$$

Het berekende cementgehalte van 440 kg/m³ is hoger dan het minimale cementgehalte dat vereist was om aan een blootstellingklasse XC4 te voldoen. Er wordt dus verder gerekend met een cementgehalte van 440 kg/m³.

Hoeveelheid granulaten:

De hoeveelheid granulaten dat nodig is voor een m³ beton hangt af van de hoeveelheid cement dat nodig is en de w/c ratio van het betonmengsel. De hoeveelheid lucht dat zich bevindt in het betonmengsel is ook van belang en wordt ook in rekening genomen in onderstaande formule:

$$A_g^i = \rho_{ag} \left(1000 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{A_0^c}{\rho_a} - P \right)$$

- C is de cement hoeveelheid in kg/m³
- ρ_c is de dichtheid van cement = 3,16 kg/l
- A₀^c is de hoeveelheid water in kg/m³
- ρ_a is de dichtheid van water = 1,0 kg/l
- ρ_{ag} is de dichtheid van de granulaten = 2600 kg/m³ (granulaten mix 0-16 mm)
- P = 20 l/m³ = opgesloten lucht in beton

Met behulp van deze formule vindt men het volgende resultaat voor de hoeveelheid granulaten mix 0-16mm:

$$A_g^i = 2600 \left(1000 - \frac{440}{3,16} - \frac{220}{1,0} - 20 \right) = 1613,97 \text{ kg/m}^3$$

Correctie op basis van hoeveelheid water in granulaten:

Zoals eerder vermeld, had de granulaten mix op het moment van gieten een vochtgehalte van 4,00%. Deze vochtigheid moet dus in rekening worden gebracht voor het bepalen van de hoeveelheid water dat zal toegevoegd worden aan het beton mengsels. De hoeveelheid granulaten dat moet worden toegevoegd in het beton zal door het vochtigheidsgehalte ook veranderen, de berekeningen voor bovenstaand mengsel worden hieronder weergegeven.

Hoeveelheid water in de granulaten mix:

$$\text{Hoeveelheid water: } 4,00\% \text{ van } 1613,97 \text{ kg} = 64,56 \text{ kg}$$

Totale hoeveelheid granulaten mix toe te voegen voor 1,0 m³ beton:

$$\text{Hoeveelheid granulaten: } 1613,97 \text{ kg} + 64,56 \text{ kg} = 1678,53 \text{ kg}$$

Totale hoeveelheid water toe te voegen voor 1,0 m³ beton:

$$\text{Hoeveelheid water: } 220 - 64,56 = 155,44 \text{ kg}$$

Totale hoeveelheid cement toe te voegen voor 1,0 m³:

$$\text{Hoeveelheid cement: } 440 \text{ kg}$$

Bijlage D: Berekening Rhenofit hoeveelheden – MasterRheobuild

Het is belangrijk om rekening te houden dat het gewicht van Rhenofit CNT3 maar bestaat uit 0,2% enkelwandige carbon nanotubes. Dus indien de hoeveelheid carbon nanotubes is bepaald moet deze hoeveelheid vermenigvuldigd worden met 500 voor de hoeveelheid Rhenofit CNT3 te bepalen. Bij de gebruikte hoeveelheden is al rekening gehouden met een vochtgehalte van 4,00% van de granulaten zoals zichtbaar is bij het ontwerp van het referentiebeton.

Totale hoeveelheid Rhenofit toe te voegen voor 1,0 m³ beton:

Hoeveelheid cement: 440 kg

Hoeveelheid enkelwandige carbon nanotubes: 0,05% van 440 kg = 0,22kg

*Hoeveelheid Rhenofit voor 1.0 m³ beton: 0,22 kg * 500 = 110 kg*

De Rhenofit-CNT3 suspensie bestaat voor 99,4% uit water. Hieruit volgt een reductie in de hoeveelheid extern toe te voegen aanmaakwater. Onderstaande berekening toont dit aan. Dit zal in rekening moeten worden gebracht voor het bepalen van de hoeveelheid extern aanmaakwater dat moet worden toegevoegd bij het betonmengsel.

Totale hoeveelheid water toe te voegen voor 1,0 m³ beton:

Hoeveelheid water zonder vermindering Rhenofit suspensie: 155,44 kg

Hoeveelheid water in Rhenofit suspensie: 99,4% van 110 = 109,34 kg

Hoeveelheid extern aanmaakwater zonder Rhenofit suspensie: 155,44 – 109,34 = 46,1 kg

Uit bovenstaande berekening blijkt dus dat er nog 46,1 kg aanmaakwater bovenop de Rhenofit-suspensie kan worden toegevoegd. De laatste hoeveelheid die nog niet berekend werd, is de hoeveelheid superplastificeerder die moet worden toegevoegd. Doordat de hoeveelheid superplastificeerder met behulp van trial-and-error zal worden bepaald in het labo, wordt ter verificatie de maximale- en minimale waarde superplastificeerder berekend. Literatuur heeft aangetoond dat een overmaat aan superplastificeerder negatieve effecten kan veroorzaken. In het labo wordt er dus nooit meer dan de maximale hoeveelheid superplastificeerder toegevoegd. Hieronder volgt een korte berekening voor de minimale en maximale hoeveelheid superplastificeerder die mag worden toegevoegd voor 1,0 m³ beton.

Minimale en maximale hoeveelheid superplastificeerder voor 1,0 m³ beton:

Minimale hoeveelheid MasterRheobuild: 150 gram per 100 kg cement

*Minimale hoeveelheid MasterRheobuild: 440 * 150 / 100 = 660 gram*

Maximale hoeveelheid MasterRheobuild: 1500 gram per 100 kg cement

*Maximale hoeveelheid MasterRheobuild: 440 * 1500 / 100 = 6600 gram*

Bijlage E: Berekening Rhenofit hoeveelheden – MasterEase

Minimale en maximale hoeveelheid superplastificeerder voor 1.0 m³ beton:

Minimale hoeveelheid MasterEase: 500 gram per 100 kg cement

*Minimale hoeveelheid MasterEase: 440 * 500 / 100 = 2200 gram*

Maximale hoeveelheid MasterEase: 2500 gram per 100 kg cement

*Maximale hoeveelheid MasterEase: 440 * 2500 / 100 = 11000 gram*

Bijlage F: Calculatie sterkte-eigenschappen

Druksterkte (Drukproef)

Referentiebeton:

$$f_{cm} = \frac{62,34 + 54,4}{2} = 58,39 \text{ MPa}$$

CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 :

$$f_{cm} = \frac{55,27 + 54,30}{2} = 54,79 \text{ MPa}$$

CNT-mengsel met MasterEase3650:

$$f_{cm} = \frac{59,2 + 58,27}{2} = 58,84 \text{ MPa}$$

Treksterkte (slijttreksterkteproef)

Referentiebeton:

$$f_{ct,m} = \frac{4,47 + 4,88}{2} = 4,68 \text{ MPa}$$

Standaardafwijking van MasterEase3650 wordt toegekend

$$s = 0,46$$

$$f_{ct,rep} = f_{ct,m} - 1,96 * s = 4,68 - 1,96 * 0,46 = 3,78 \text{ MPa}$$

CNT-mengsel met MasterRheobuild1100:

$$f_{ct,m} = \frac{4,03 + 4,21 + 5,00 + 4,16 + 4,18 + 4,05}{6} = 4,27 \text{ MPa}$$

$$s = \sqrt{\frac{(4,03 - 4,27)^2 + (4,21 - 4,27)^2 + (5,00 - 4,27)^2 + (4,16 - 4,27)^2 + (4,18 - 4,27)^2 + (4,05 - 4,27)^2}{5}} = 0,36 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,rep} = f_{ct,m} - 1,48 * s = 4,27 - 1,48 * 0,36 = 3,56 \text{ MPa}$$

CNT-mengsel met MasterEase3650:

$$f_m = \frac{4,87 + 3,84 + 4,83 + 4,51 + 5,13 + 4,30}{6} = 4,58 \text{ MPa}$$

$$s = \sqrt{\frac{(4,87 - 4,58)^2 + (3,84 - 4,58)^2 + (4,83 - 4,58)^2 + (4,51 - 4,58)^2 + (5,13 - 4,58)^2 + (4,30 - 4,58)^2}{5}} = 0,46 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,rep} = f_{ct,m} - 1,96 * s = 4,58 - 1,96 * 0,46 = 3,67 \text{ MPa}$$

Buigsterkte (4-puntsbuigproef)

Referentiebeton:

$$f_{ct,fl,m} = \frac{6,19 + 5,78}{2} = 5,99 \text{ MPa}$$

Gemiddelde standaardafwijking van MasterEase3650 & MasterRheobuild1100 wordt toegekend:

$$s = 0,40$$

$$f_{ct,fl,rep} = f_{ct,fl,m} - 1,96 * s = 5,99 - 1,96 * 0,40 = 5,21 \text{ MPa}$$

CNT-mengsel met MasterRheobuild1100 (zonder meting 7: 3.67 MPa):

$$f_{ct,fl,m} = \frac{6,25 + 5,98 + 6,27 + 5,55 + 6,44 + 5,62}{6} = 6,02 \text{ MPa}$$

$$s = \sqrt{\frac{(6,25 - 6,02)^2 + (5,98 - 6,02)^2 + (6,27 - 6,02)^2 + (5,55 - 6,02)^2 + (6,44 - 6,02)^2 + (5,62 - 6,02)^2}{5}} = 0,37 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,fl,rep} = f_{ct,fl,m} - 1,96 * s = 6,02 - 1,96 * 0,37 = 5,30 \text{ MPa}$$

CNT-mengsel met MasterEase3650:

$$f_{ct,fl,m} = \frac{5,45 + 5,69 + 6,34 + 6,32 + 6,46 + 6,33}{6} = 6,10 \text{ MPa}$$

$$s = \sqrt{\frac{(5,45 - 6,10)^2 + (5,69 - 6,10)^2 + (6,34 - 6,10)^2 + (6,32 - 6,10)^2 + (6,46 - 6,10)^2 + (6,33 - 6,10)^2}{5}} = 0,42 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,fl,rep} = f_{ct,fl,m} - 1,96 * s = 6,10 - 1,96 * 0,42 = 5,28 \text{ MPa}$$