

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

## Masterthesis

Het effect van carbon nanotubes op beton met verschillende samenstellingen

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :

Prof. ir. Pieter BAEKELAND

Robbe Coopmans, Tom Van Thielen

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

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2018•2019

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Het effect van carbon nanotubes op beton met verschillende samenstellingen

**PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

**PROMOTOR :**

Prof. ir. Pieter BAEKELAND

**Robbe Coopmans, Tom Van Thielen**

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



**KU LEUVEN**



## Woord vooraf

Eerst en vooral willen wij graag onze promotors, prof. ir. Pieter Baekeland en prof. dr. ir. Hervé Degée bedanken voor de hulp bij het opstellen van deze thesis.

Hiernaast wordt het bedrijf OCSiAl bedankt voor het ter beschikking stellen van de nanotubes en de hulp bij de opstart van de masterproef.

Ook wordt het bedrijf Lanxess bedankt voor het ter beschikking stellen van het nodige dispersieproduct en voor het verschaffen van de nodige informatie met betrekking tot het praktisch gedeelte van de masterproef.

Dan Dragan wordt bedankt voor het beschikbaar stellen van het betonlabo en voor de nodige hulp bij het maken van het vezelbeton en het uitvoeren van de proeven.

Geert Vandensande wordt bedankt voor de hulp bij het bepalen van de proefopstelling om de elektrische geleiding van het beton te bepalen.



# Inhoudsopgave

Woord vooraf .....	1
Lijst van tabellen .....	5
Lijst van figuren .....	7
Verklarende woordenlijst .....	9
Abstract .....	13
Abstract in English .....	15
1. Inleiding .....	17
2. Literatuurstudie .....	19
2.1 Wat zijn CNT's .....	19
2.2 Toepassingen .....	20
2.3 Beton .....	25
2.4 Dispersie .....	25
2.4.1 Rhenofit .....	26
2.4.2 Functionalisering .....	27
2.5 Nano-Silica Sol Gel .....	27
2.6 Vezelbeton .....	29
2.7 Toepassingen staalvezelbeton .....	32
2.8 Rekenwaardes staalvezelbeton .....	33
2.8.1 Waarom Vezelbeton .....	33
2.8.2 Rekenmethode drukkracht .....	33
2.8.3 Rekenmethode maximaal opneembaar moment .....	34
2.8.4 Minimumwapening .....	37
2.8.5 Rekenmethode buigtreksterkte .....	38
2.8.6 Rekenmethode splijttrekproef .....	40
2.9 Proeven .....	41
2.9.1 Drukproef .....	41
2.9.2 4-puntsbuigproef .....	41
2.9.3 Splijttreksterkteproef (Braziliaanse proef) .....	42
2.9.4 Zetmaat .....	43
2.9.5 Schudmaat .....	43
2.9.6 Proefstukken .....	45
3. Praktijk .....	47
3.1 Benodigde hoeveelheid nanotubes .....	47
3.1.1 Kubussen .....	47
3.1.2 Cilinders .....	47
3.1.3 Prisma's .....	48
3.2 Betonrecept .....	48
3.3 Aanmaak proefstukken .....	49

3.3.1	Benodigde hoeveelheid grondstoffen .....	49
3.3.2	Zeefproef .....	51
3.3.3	Aanmaak nanovezelbeton.....	52
3.3.4	Vullen van de mallen.....	53
3.3.5	Consistentie .....	54
3.3.5.1	Schudmaat .....	54
3.3.5.2	Zetmaat.....	55
3.3.6	Ontkisten .....	56
3.3.7	Uitharden proefstukken .....	57
3.4	Uitvoering van de testen.....	57
3.4.1	Meting elektrische weerstand betonnen kubussen.....	57
3.4.2	Uitvoering drukproef.....	59
3.4.3	Uitvoering Splijttreksterkteproeven (Braziliaanse proef).....	61
3.4.4	Uitvoering 4-puntsbuigproeven.....	63
3.5	Berekeningen.....	65
3.5.1	Berekening druksterkte referentiebeton.....	65
3.5.2	Berekening druksterkte 0.05% nanovezelbeton .....	65
3.5.3	Berekening druksterkte 0,07% nanovezelbeton .....	66
3.5.4	Berekening druksterkte 0,10% nanovezelbeton .....	66
3.5.5	Berekening splijttreksterkte referentiebeton.....	67
3.5.6	Berekening splijttreksterkte 0.05% nanovezelbeton .....	67
3.5.7	Berekening splijttreksterkte 0,07% nanovezelbeton .....	68
3.5.8	Berekening splijttreksterkte 0,10% nanovezelbeton .....	68
3.5.9	Berekening buigtreksterkte referentiebeton.....	69
3.5.10	Berekening buigtreksterkte 0,05% nanovezelbeton .....	69
3.5.11	Berekening buigtreksterkte 0,07% nanovezelbeton .....	70
3.5.12	Berekening buigtreksterkte 0,10% nanovezelbeton .....	70
3.5.13	Resultaten berekeningen.....	71
4.	Besluit.....	73
	Bibliografie.....	75

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Eigenschappen nanobuizen en -vezels .....	23
Tabel 2: Resultaten druk- en splijttreksterkteproeven op CNFRC en normaal beton .....	23
Tabel 3: Geschiktheid staalvezelbeton per constructiesoort .....	33
Tabel 4: Betonrecept voor 1m <sup>3</sup> beton .....	48
Tabel 5: Theoretisch benodigde hoeveelheid grondstoffen.....	49
Tabel 6: Praktisch benodigde hoeveelheden voor reeks 0.05% .....	50
Tabel 7: Praktisch benodigde hoeveelheden voor reeks 0.07% .....	50
Tabel 8: Praktisch benodigde hoeveelheden voor reeks 0.10% .....	50
Tabel 9: Praktisch benodigde hoeveelheden voor referentiebeton .....	50
Tabel 10: Resultaten zeefproef.....	51
Tabel 11: Resultaten zetmaat .....	55
Tabel 12: Resultaten zetmaatproef.....	55
Tabel 13: Resultaten elektrische weerstand betonnen kubussen .....	58
Tabel 14: Resultaten drukproef .....	59
Tabel 15: Resultaten splijttreksterkteproef.....	61
Tabel 16: Resultaten 4-puntsbuigproeven.....	63
Tabel 17: Samenvatting resultaten berekeningen.....	71





## Lijst van figuren

Figuur 1: Visuele voorstelling koolstofnanobuizen .....	19
Figuur 2: Productie koolstofnanobuizen .....	19
Figuur 3: Verweven net nanobuizen .....	20
Figuur 4: Verdeling nanobuizen in materialen .....	20
Figuur 5: Geleiding in functie van hoeveelheid .....	20
Figuur 6: Effect MWCNT op SI/C anode .....	21
Figuur 7: Effect nanobuizen op prestaties rubberband.....	21
Figuur 8: Effect nanobuizen op eigenschappen handschoen.....	22
Figuur 9: Ashby plot Young's modulus in functie van vloeisterkte .....	22
Figuur 10: Verschil opbouw koolstofnanovezel en koolstofnanobuis .....	23
Figuur 11: Autogene krimp van een cementpasta met verschillende concentraties cnt's.....	24
Figuur 12: Drukspanning-rek curve van mortel zonder cnt's, met cnt's en met nanovezels.....	24
Figuur 13: Verloop spanning - rek in de dwarsdoorsnede .....	25
Figuur 14: Mogelijke problemen nanobuismengsel .....	26
Figuur 15: Rhenofit oplossing bekeken door een elektronenmicroscop .....	26
Figuur 16: Covalente binding van nanobuizen met carboxylgroepen en hydratatieproducten .....	27
Figuur 17: Gladde nanobuizen zonder Sol Gel .....	28
Figuur 18: Ruwe nanobuizen met Sol Gel .....	28
Figuur 19: Invloed Sol Gel op warmtegeneratie door initiële hydratatie .....	28
Figuur 20: Invloed Sol Gel op hydratatiesnelheid.....	29
Figuur 21: Spanning-ervormingsdiagram ongewapend beton.....	29
Figuur 22: Spanning-ervormingsdiagram vezelbeton .....	30
Figuur 23: Belasting-doorbuigingsdiagram ongewapend- en vezelbeton .....	30
Figuur 24: Spanningsverdeling verschillende stadia.....	31
Figuur 25: Ringtest.....	32
Figuur 26: Verloop spanning - rek in de dwarsdoorsnede .....	34
Figuur 27: Spanning-rek diagram staal .....	36
Figuur 28: Kracht-doorbuigingsdiagram.....	38
Figuur 29: Gemiddelde equivalente buigtreksterkte .....	39
Figuur 30: Proefopstelling drukproef .....	41
Figuur 31: Proefopstelling 4-puntsbuigproef .....	41
Figuur 32: Poisson effect.....	42
Figuur 33: Krachtsverdeling in proefstukken.....	42
Figuur 34: Meting resultaat zetmaat.....	43
Figuur 35: Aanstampstaaf .....	44
Figuur 36: Kegelvormige mal .....	44
Figuur 37: Schudtafel .....	44
Figuur 38: Meting resultaat schudmaat .....	44
Figuur 39: Kubus drukproef .....	45
Figuur 40: Cilinder splijttrekproef .....	45
Figuur 41: Prisma 4-puntsbuigproef.....	45
Figuur 42: Foto verwarmingsoven .....	49
Figuur 43: Foto binnenkant verwarmingsoven.....	49
Figuur 44: Korrelverdeling algemene mix .....	51
Figuur 45: Geleverde tonnen(25 liter) rhenofitmengsel .....	52
Figuur 46: Rhenofitmengsel.....	52
Figuur 47: Hoeveelheden 1 portie referentiebeton.....	52
Figuur 48: Hoeveelheden 1 portie 0.10% nanovezelbeton.....	52
Figuur 49: Betonmolen.....	53
Figuur 50: Legen van betonmolen.....	53
Figuur 51: Gevulde mallen prisma's en kubussen (0.07% nanovezelbeton) .....	53

Figuur 52: Gevulde mallen cilinders (0.07% nanovezelbeton) .....	53
Figuur 53: Triltafel .....	54
Figuur 54: Triltafel in werking .....	54
Figuur 55: Opstelling schudmaatproef referentiebeton .....	54
Figuur 56: Schudmaatkegel gevuld met referentiebeton .....	54
Figuur 57: Resultaat schudmaatproef referentiebeton .....	54
Figuur 58: Schudmaatkegel gevuld met 0.10% nanovezelbeton .....	54
Figuur 59: 0.10% nanovezelkegel voor het uitvoeren van de schudmaatproef .....	54
Figuur 60: 0.10% nanovezelkegel na het uitvoeren van de schudmaatproef .....	54
Figuur 61: Proefopstelling kegel van Abraham .....	55
Figuur 62: Resultaat zetmaatproef met referentiebeton .....	55
Figuur 63: Resultaat zetmaatproef met 0.10% nanovezelbeton .....	55
Figuur 64: Lege mallen na ontkisten .....	56
Figuur 65: Proefstukken referentiebeton na ontkisten .....	56
Figuur 66: Proefstukken 0.10% nanovezelbeton na ontkisten .....	56
Figuur 67: Gevulde waterbak .....	57
Figuur 68: Proefstukken in de waterbak (rechts referentiebeton, links 0.10% nanovezelbeton) .....	57
Figuur 69: Proefopstelling elektrische weerstand .....	57
Figuur 70: Resultaten elektrische weerstand .....	58
Figuur 71: Beginopstelling drukproef .....	59
Figuur 72: Einde drukproef .....	59
Figuur 73: Kubussen na het testen .....	59
Figuur 74: Resultaten drukproef .....	60
Figuur 75: Beginopstelling splijttreksterkteproef .....	61
Figuur 76: Einde splijttreksterkteproef .....	61
Figuur 77: Cilinders na het testen .....	61
Figuur 78: Resultaten splijtproeven .....	62
Figuur 79: Beginopstelling 4-puntsbuigproef .....	63
Figuur 80: Einde 4-puntsbuigproef .....	63
Figuur 81: Prisma's na het testen .....	63
Figuur 82: Resultaten 4-puntsbuigproef .....	64
Figuur 83: Druksterkte i.f.v. wt% nanotubes .....	71
Figuur 84: Splijttreksterkte i.f.v. wt% nanotubes .....	71
Figuur 85: Buigtreksterkte i.f.v. wt% nanotubes .....	72

# Verklarende woordenlijst

## Afkortingen

1D	Eendimensionaal
2D	Tweedimensionaal
3CaO. 2SiO <sub>2</sub> . 4H <sub>2</sub> O	Tricalciumdisilicaathydraat
3D	Driedimensionaal
Ca(OH) <sub>2</sub>	Calciumhydroxide
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Calcium(II)silicaat
CNF	Carbon Nano Fibers/ Koolstofnanovezels
CNFRC	Carbon nanofiber reinforced concrete
CNT	Carbon Nanotubes/ Koolstofnanobuizen
EEM	Eindige elementenmethode
H <sub>2</sub> O	Water
Li-ion	Lithium-ion
MWCNT	Multiwall Carbon Nanotubes
NS	Nano Silica
PCC	Niet versterkte mortel
PCCF	Mortel versterkt met nanovezels
PCNT	Mortel versterkt met CNT's
Si/C	Silicium/koolstof
SWCNT	Singlewall Carbon Nanotubes
UV	Ultra Violet
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf

## Letters

$\mu$	Coëfficiënt van Poisson	/
a	De rekenkundige constructiehoogte	mm
$A_{ct}$	Oppervlakte van het beton dat onder trek staat voordat de eerste scheur gevormd wordt	mm <sup>2</sup>
$A_s$	Oppervlakte van de staalwapening	mm <sup>2</sup>
$A_{s,min}$	De nodige staafwapening in de trekzone wanneer staalvezels alleen niet voldoen	mm <sup>2</sup>
b	Breedte	mm
$B_{150}$	De buigtaaiheid voor n = 150	N/mm
d	Ligging van het wapeningsstaal	mm
d	Diameter/ zijde van het proefstuk	mm
dL	Verlenging	mm
e	Excentriciteit	mm
$E_s$	Elasticiteitsmodulus staal	N/mm <sup>2</sup>
$e_v$	Excentriciteit van de voorspankracht	/
$f_{c,cub}$	Kubusdruksterkte uit proeven	N/mm <sup>2</sup>
$f_{cd}$	Rekenwaarde betondruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ck}$	Karakteristieke betondruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{cm}$	Gemiddelde betondruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ct}$	Splijttreksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ct,L}^f$	Limit of proportionality volgens de buigproef	N/mm <sup>2</sup>
$f_{f,150}$	$f_{f,150}$ is de equivalente buigtreksterkte voor n = 150	N/mm <sup>2</sup>
$f_{fcd}$	Rekensterkte van het vezelversterkt beton	N/mm <sup>2</sup>
$f_{fcrep}$	Representatieve betondruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{fct}$	Buigtreksterkte ongewapend beton	N/mm <sup>2</sup>

$f_{fct,ef}$	Effectieve treksterkte van het beton wanneer de eerste scheur optreedt	$N/mm^2$
$f_{ftd}$	Rekentreksterkte van vezelversterkt beton volgens Figuur 26	$N/mm^2$
$f_{ftd,1}$	De buigtreksterkte in ongescheurde toestand	$N/mm^2$
$f_{ftm}$	De gemiddelde korteduur-treksterkte van staalvezelbeton	$N/mm^2$
$f_{ftrep,1}$	Representatieve waarde van de (langeduur-) treksterkte van staalvezelbeton op de grens waarbij nog lineair materiaalgedrag optreedt	$N/mm^2$
$F_{m,150}$	De conventionele gemiddelde buigtreksterkte voor $n = 150$	N
$f_r / f_{bri}$	Buigtreksterkte	$N/mm^2$
$F_r / F_{bri}$	Kracht bij ontstaan van de eerste scheur in N'	N
$f_{Rm,1}$	Gemiddelde residuele buigtreksterkte van het staalvezelbeton op het moment dat de eerste scheur optreedt	$N/mm^2$
$f_{ym}$	De gemiddelde vloeispanning	$N/mm^2$
$h$	Opgemeten hoogte na beproeving van de balk	mm
$h_{sp}$	Wanneer er bij de 4-puntsbuigproef gebruik gemaakt wordt van een inkeping, dan is $h_{sp}$ de afstand tussen de inkeping en de bovenkant van het proefstuk	mm
$I$	Traagheidsmoment	$mm^4$
$k$	Een factor die het niet uniform in evenwicht zijn van de spanning in rekening brengt	/
$k_c$	Een factor die de natuurlijke spanningsverdeling juist voor het scheuren in rekening brengt	/
$K_p$	Een factor die het effect van voorspanning in rekening brengt	/
$L$	Overspanning van de balk	mm
$M$	Maximaal opneembaar moment	Nmm
$M_r$	Het scheurmoment	Nmm
$n$	Aantal proefstukken	
$N_1$	Drukkracht dwarsdoorsnede staalvezelbeton	N
$s$	Standaardafwijking	$N/mm^2$
$T_1$	Trekkkracht opgenomen door staafwapening	N
$T_{2,1}$	Rechthoekig deel trekkkracht opgenomen door de staalvezels volgens Figuur [1]	N
$t_{2,1}$	Hefboomsarm voor trekkkracht $T_{2,1}$	mm
$T_{2,2}$	Driehoekig deel trekkkracht opgenomen door de vezels volgens Figuur [1]	N
$t_{2,2}$	Hefboomsarm voor trekkkracht $T_{2,2}$	mm
$x$	Ligging neutrale vezel	mm
$\alpha$	Voorspangraad	/
$\alpha_c$	Reductiecoëfficiënt van het beton	/
$\gamma$	Factor voor de materiaalveiligheid	/
$\gamma_{ft}$	Materiaalfactor op trek belast staalvezelbeton	/
$\epsilon_1$	Rek aan de meest getrokken zijde van de ongescheurd veronderstelde doorsnede	%
$\epsilon_1$	Rek aan de meest gedrukte zijde van de ongescheurd veronderstelde doorsnede	%
$\epsilon_c$	Betonstuik	%
$\epsilon_{ft}$	Staalvezelrek	%

$\varepsilon_s$	Rek ter hoogte van de wapening	‰
$\sigma_{cp}$	Spanning als gevolg van de voorspanning	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_s$	De maximale spanning die toegelaten is in de wapening nadat de eerste scheur is opgetreden. Deze spanning is gelijk aan de vloeigrens $f_{yk}$ van de wapening, namelijk 500N/mm <sup>2</sup> .	N/mm <sup>2</sup>



## Abstract

Het bedrijf OCSiAl is een producent van koolstofnanobuizen en wil zijn markt vergroten naar de betonsector. Deze masterproef onderzoekt het effect van koolstofnanobuizen op beton met verschillende samenstellingen. De doelstelling van de masterproef is het visualiseren van de invloed van koolstofnanobuizen op volgende eigenschappen van beton: elektrische geleiding, consistentie, buigtreksterkte, druksterkte en slijttreksterkte. Hiernaast wordt een antwoord gezocht op de vraag of koolstofnanobuizen een meerwaarde voor de bouwsector zijn.

Er wordt beton gemaakt met 4 verschillende samenstellingen, namelijk 0%, 0.05%, 0.07% en 0.10% koolstofnanobuizen ten opzichte van het cementgewicht. Om een goede dispersie te bekomen, is het dispersiemiddel 'Rhenofit CNT-3' gebruikt. De geleiding van het beton wordt gemeten met behulp van koperen platen en een multimeter. Daarnaast wordt een zet- en schudproef uitgevoerd om het effect op de consistentie van het beton te identificeren. Vervolgens wordt een drukproef, 4-puntsbuigproef en een slijttrekproef uitgevoerd om het effect op de sterkte van het beton te verduidelijken.

Uit de resultaten blijkt dat er bij deze betonsamenstelling met het Rhenofitmengsel geen verbetering, maar een vermindering van de druksterkte, slijttreksterkte en buigtreksterkte optreedt. De elektrische geleiding van de kubussen was groter dan bij de referentiekubussen wat erop wijst dat er geen probleem was met de dispersie. In de toekomst is er dus verder onderzoek nodig om de oorzaak te vinden.





## Abstract in English

The company OCSiAl is a producer of carbon nanotubes and wants to expand its market to the concrete industry. This Master's thesis investigates the effect of carbon nanotubes on concrete with different compositions. The objective of this Master's thesis is to visualize the influence of carbon nanotubes on the following properties of concrete: electrical conductivity, consistency, bending tensile strength, compressive strength and split tensile strength. In addition, an answer is sought to the question whether carbon nanotubes are an added value for the construction sector.

Concrete is made with 4 different compositions, namely 0%, 0.05%, 0.07% and 0.10% carbon nanotubes relative to the cement weight. To achieve a good dispersion, the 'Rhenofit CNT-3' dispersant was used. The conductivity of the concrete is measured using copper plates and a multimeter. In addition, a slump test and a flow table test are carried out to identify the effect on the consistency of the concrete. A pressure test, a four-point bending test and a splitting test are then carried out to clarify the effect on the strength of the concrete.

The results show that there is no improvement, but a reduction in compressive strength, split tensile strength and flexural tensile strength in this concrete composition with the Rhenofit mixture. The electrical conductivity of the cubes was greater than that of the reference cubes, indicating that there was no problem with the dispersion. This means that further research has to be done in the future to find the cause.



# 1. Inleiding

Het bedrijf OCSiAl, een producent van nanotubes, heeft zijn focus in het verleden altijd gelegd op coatings, elastomeren, composieten en energie. Nu zou dit bedrijf graag zijn afzetmarkt vergroten en vraagt het zich af of dit mogelijk zou zijn in de bouw. Om te weten te komen of hun product een meerwaarde zou kunnen bieden moet er eerst onderzoek verricht worden. Dit onderzoek zal gebeuren door verschillende betonsamenstellingen te maken die getest zullen worden om de invloed van koolstofnanobuizen op het beton te bestuderen. De probleemstelling van de masterproef gaat over wat de invloed van koolstofnanobuizen is op de eigenschappen van beton en of deze koolstofnanobuizen een meerwaarde zouden kunnen zijn in de bouwsector. Het doel van deze masterproef is het bepalen van de invloed van nanotubes op de eigenschappen van beton zoals druksterkte, buigtreksterkte, slijttreksterkte, consistentie en elektrische geleiding. Hieruit zal moeten blijken of koolstofnanovezelversterkt beton een meerwaarde kan zijn in de bouwsector.

Eerst is de literatuurstudie opgesteld door middel van online onderzoek. Hier is gekeken welke onderzoeken allemaal gedaan zijn in het verleden en wat hier de resultaten van zijn. De producent van de koolstofnanobuizen heeft verschillende papers en brochures voorzien van zijn producten waar informatie uit gehaald kon worden met betrekking tot de prestaties van de koolstofnanobuizen. Zo werd er in de literatuurstudie eerst uitgelegd wat nanotubes nu eigenlijk zijn en wat hun toepassingen zijn. Verder wordt het belang uitgelegd van een goede dispersie. In overleg met Lanxess werd er onderzoek gedaan naar welk koolstofnanobuismengsel er gebruikt moet worden in het beton om een zo goed mogelijke dispersie te verkrijgen. Dit is cruciaal om goede resultaten te bekomen uit de verschillende testen. Dit mengsel zal dan in tonnen van 25 kg geleverd worden waarin een mengsel van koolstofnanobuizen, water en een oppervlakte-actieve stof zit.

Als basis voor de rekenmodellen van de betonconstructies met koolstofnanobuizen is er onderzoek gedaan naar betonconstructies met staalvezels. Er is gezocht in de verschillende normen en hier zijn de belangrijkste en meest relevante formules uit gehaald om opgenomen te worden in 2.6 tot 2.8.

In het laatste deel van de literatuurstudie worden de proefopstellingen uitgelegd, waarbij de regels uit de normen ook zijn weergegeven. De afmetingen van de proefstukken en waar men op moet letten bij de uitvoering worden hier besproken.

Na de literatuurstudie komt hoofdstuk 3: Praktijk, waar alle praktische zaken uitgelegd worden. Zo worden er betonnen proefstukken gemaakt in de vorm van kubussen, prisma's en cilinders, welke verschillende concentraties koolstofnanobuizen zullen bevatten. Er zullen proeven uitgevoerd worden op proefstukken met een koolstofnanobuisconcentratie van 0.00, 0.05, 0.07 en 0.10% van het cementgewicht. Hier wordt er dus eerst berekend wat de benodigde hoeveelheid nanotubes is voor de proefstukken. Vervolgens wordt het betonrecept weergegeven in 3.2. Voor het maken van het beton was er water, zand, grind, koolstofnanobuizen in een dispersiemiddel en cement nodig. De proeven en het maken van de kubussen gebeurden in het labo van het technologiecentrum omdat al de nodige machines hier aanwezig zijn. In 3.3 wordt de aanmaak van de proefstukken uitbundig toegelicht, waarbij er ook uitleg wordt gegeven over de zeefproef, schudmaat- en zetmaatproef. Deze proefstukken hebben 35 dagen kunnen uitharden in een waterbak, waarna ze getest werden.

Na het uitharden werden drukproeven, slijttrekproeven en 4-puntsbuigproeven uitgevoerd, waarbij de elektrische weerstand van de kubussen ook is gemeten. Deze uitvoering vindt men onder '3.4 Uitvoering van de testen', waarbij ook meteen de proefresultaten worden weergegeven. In 3.5 worden vervolgens de berekeningen gedaan met behulp van de resultaten van de testen. Hier wordt de druksterkte, slijttreksterkte en de buigtreksterkte berekend. In 3.5.13 worden de resultaten vervolgens besproken, waarna het besluit gevormd kan worden.

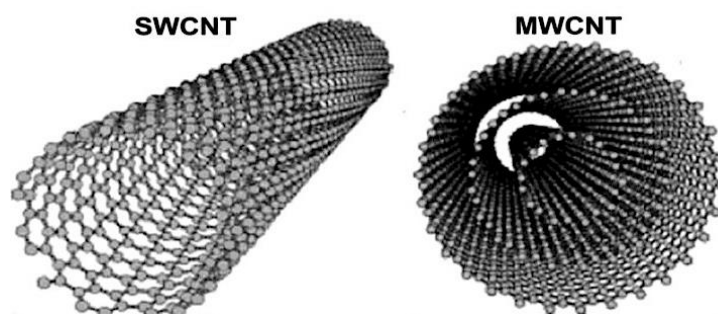


## 2. Literatuurstudie

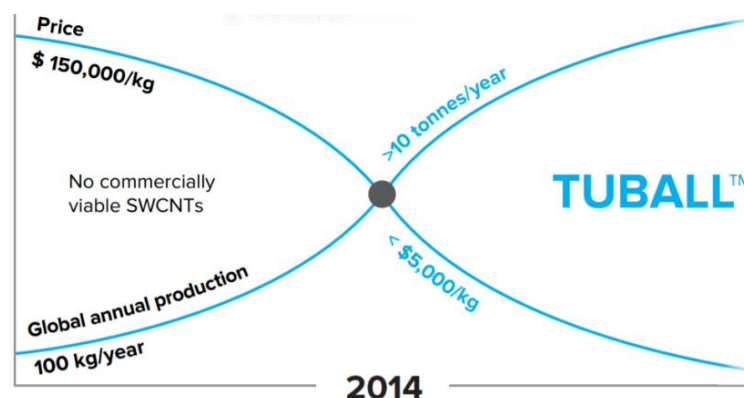
### 2.1 Wat zijn CNT's

CNT's zijn koolstofnanobuizen waarbij er enkelwandige en meerwandige varianten zijn zoals te zien is in Figuur 1. In deze paper zullen alleen de enkelwandige koolstofnanobuizen besproken worden. Een enkelwandige koolstofnanobuis is niets anders dan een dunne opgerolde laag grafeen. Deze buizen hebben een wanddikte van 1 koolstofatoom waardoor deze microscopisch flinterdun zijn. De buitendiameter van de koolstofbuis varieert tussen 1.2 en 2.0 nanometer terwijl de lengte groter is dan 5 micrometer. Doordat de koolstofnanobuizen zo klein zijn, wegen  $10^{17}$  nanobuizen maar 1 gram in totaal. Door de grote lengte en de flinterdunne diameter van de koolstofnanobuizen komt de totale lengte van de buizen die in 1 gram zitten neer op  $5 \cdot 10^{11}$  meter. Deze afstand komt overeen met de afstand van de aarde naar de zon en terug. Het is duidelijk dat met een zeer klein gewicht aan nanobuizen al een zeer groot net gevormd kan worden om de eigenschappen van materialen te verbeteren.

Wat de nanobuizen nu zo speciaal maakt, zijn hun geleidbaarheid, weerstand tegen hoge temperaturen, zeer laag gewicht, hoge sterkte en goede flexibiliteit [2]. De nanobuizen zijn 5 keer lichter dan koper terwijl ze goede geleidende eigenschappen hebben. Ook zijn de nanobuizen tot wel 100 keer sterker dan staal en kunnen ze in een vacuüm een temperatuur tot  $2800^{\circ}\text{C}$  weerstaan. In normale omstandigheden hebben de nanotubes een elektrische geleidbaarheid van 103 S/cm en een thermische geleidbaarheid van  $6600\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . De thermische weerstand bedraagt  $1000^{\circ}\text{C}$  wat dus aanzienlijk lager is dan in vacuüm. De treksterkte is gelijk aan 55GPa terwijl de elasticiteitsmodulus een waarde heeft van 5,5 TPa. De nanotubes hebben een remmend effect op de corrosie van metalen en op het effect van bijtende chemicaliën. Dit komt door de hoge chemische inertie en de mechanische, elektrische en thermische eigenschappen van de nanotubes [3]. Daarnaast zijn ze ook in staat om UV-golven en straling te absorberen [4]. De nanotubes hebben dus uitstekende eigenschappen, maar waarom werd hier vroeger dan bijna geen gebruik van gemaakt? De reden hiervoor is dat er geen techniek bestond voor de massaproductie van de nanobuizen. Figuur 2 toont dat men in 2014 erin geslaagd is een manier te vinden om deze buizen te produceren op grote schaal waardoor de prijs zeer hard daalde en de productie per jaar aanzienlijk steeg [2].



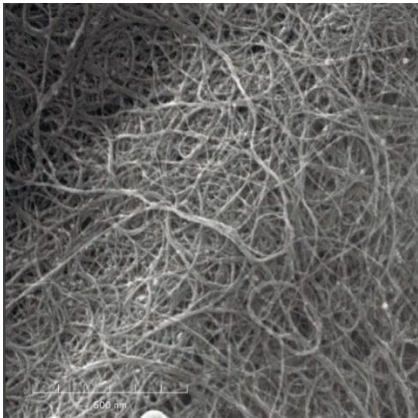
Figuur 1: Visuele voorstelling koolstofnanobuizen [5, p. 1]



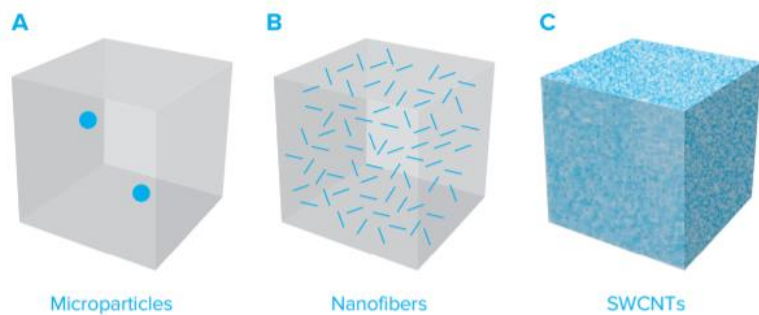
Figuur 2: Productie koolstofnanobuizen [2, p. 7]

## 2.2 Toepassingen

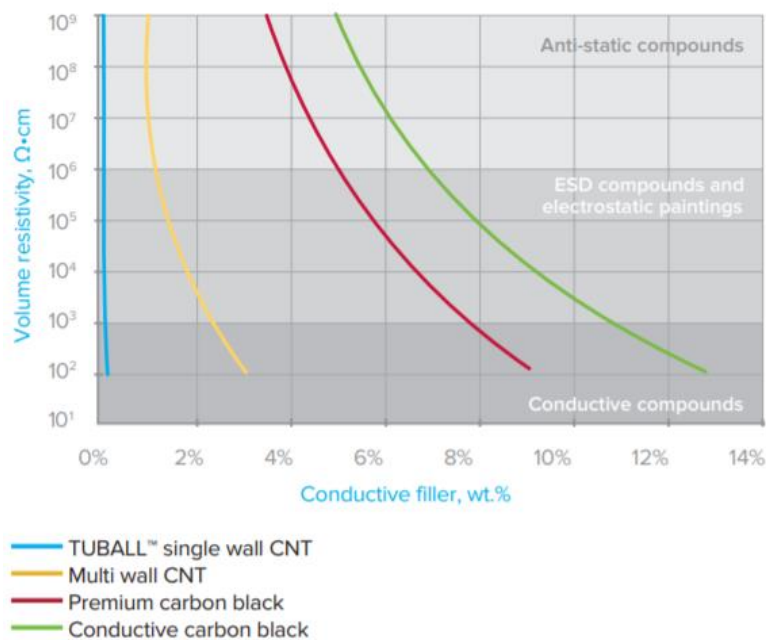
De massaproductie van de nanobuizen heeft ervoor gezorgd dat ze vele toepassingen hebben. De belangrijkste toepassingen zijn: elektrochemische stroombronnen, beton, keramiek, glas, koper, sensors en semiconductors, composieten, rubber, lijm, plastic, aluminium en verf. Deze materialen kunnen door toevoegen van zeer kleine hoeveelheden nanotubes verbeterd worden. Figuur 3 toont dat bij een zeer lage hoeveelheid nanobuizen een verweven net gevormd wordt waardoor er een zekere weerstand wordt opgebouwd. Wanneer de nanobuizen gelijk zijn verdeeld doorheen het materiaal, dan wordt er een uniform elektrisch geleidend netwerk gecreëerd. Hiernaast zal het de mechanische eigenschappen van de materialen verbeteren waardoor de nanobuizen geschikt zijn voor een breed spectrum aan toepassingen. Figuur 4 toont hoe de nanobuizen in het materiaal worden verdeeld. Deze verdeling kan bekomen worden met een hoeveelheid van 0.01% nanotubes ten opzichte van het te versterken materiaal. Zo zorgt de nanobuizenstructuur voor een 3D versterkt en geleidend netwerk dat, in tegenstelling tot meerwandige koolstofnanobuizen en nanovezels, uniform verdeeld kan worden doorheen het materiaal. Figuur 5 toont dat er zeer weinig enkelwandige koolstofnanobuizen nodig zijn om een geleider te vormen [6].



Figuur 3: Verweven net nanobuizen [2, p. 10]

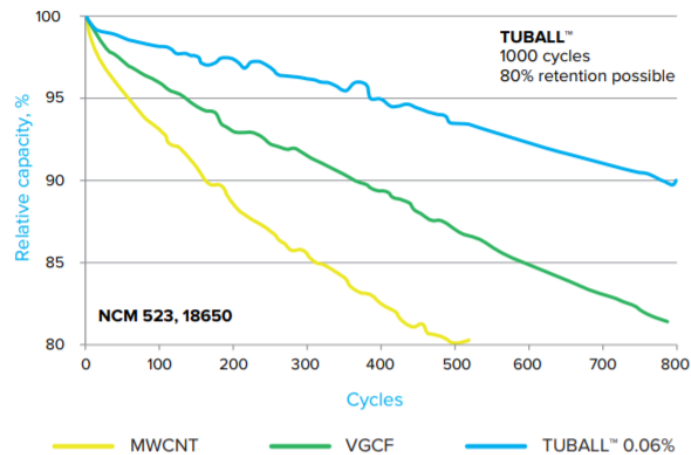


Figuur 4: Verdeling nanobuizen in materialen [2, p. 24]



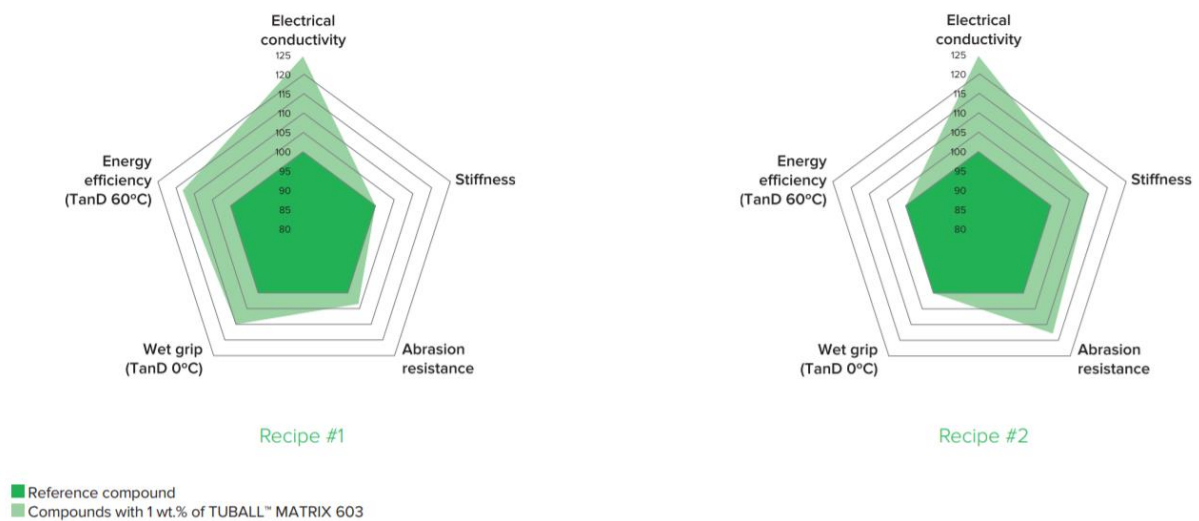
Figuur 5: Geleiding in functie van hoeveelheid [6, p. 11]

Een specifiek voorbeeld van waar de nanobuizen gebruikt worden, is bij de Si/C anodes. Deze anodes worden onder andere gebruikt voor Li-ion batterijen [7]. Ook hier hebben de enkelwandige nanobuizen een positief effect. De levensduur van de anode kan namelijk verlengd worden door toevoeging van de nanobuizen. Figuur 6 toont dat er na 800 oplaad- en ontladcyclussen nog 80% behoud van capaciteit mogelijk is.



Figuur 6: Effect MWCNT op Si/C anode [6, p. 19]

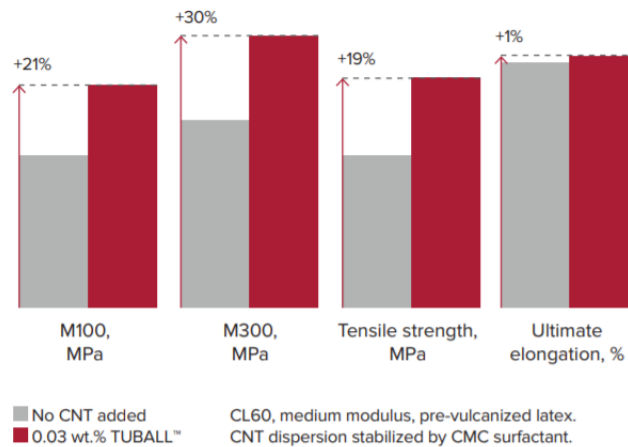
In rubberen banden zijn er ook tests gedaan om het effect van de enkelwandige nanobuizen op de eigenschappen van de banden in kaart te brengen. Figuur 7 toont het effect van 2 verschillende recepten voor de samenstelling van de banden. Hier is te zien dat de nanobuizen de elektrische geleiding, stijfheid, slijtvastheid, grip bij natte ondergrond en energie-efficiëntie kan bevorderen, afhankelijk van het recept.



Figuur 7: Effect nanobuizen op prestaties rubberband [6, pp. 34-35]

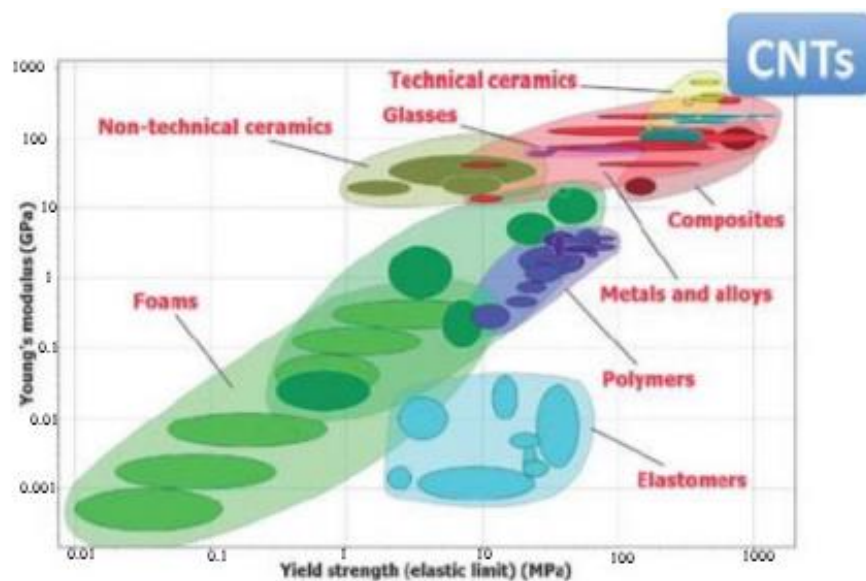


Een andere toepassing waarbij er een bewezen positief effect optreedt door de nanobuizen komt voor bij latex handschoenen. Figuur 8 toont dat de M100 modulus en de M300 modulus verbeterd wordt. Deze modulusen zijn de spanningen die nodig zijn om respectievelijk 100% en 300% rek te bekomen [8]. Hiernaast is de treksterkte verhoogd en de maximale verlenging wordt met 1% verbeterd ten opzichte van de referentiehandschoen.



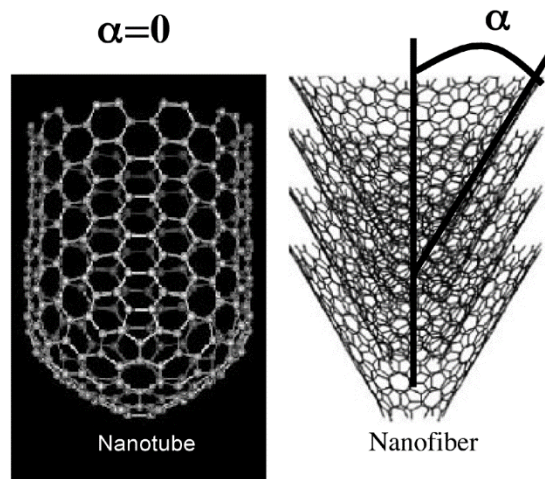
Figuur 8: Effect nanobuizen op eigenschappen handschoen [6, p. 47]

Door de combinatie van een hoge elasticiteitsmodulus en een hoge treksterkte van de nanobuizen, zijn deze ook zeer interessant om toe te passen in beton. Figuur 9 toont de combinatie van deze eigenschappen van de verschillende bestaande materialen, hier wordt duidelijk dat deze een groot potentieel hebben [9].



Figuur 9: Ashby plot Young's modulus in functie van vloeisterkte [9, p. 2]

Hiernaast zijn er ook al testen gedaan op cementmengsels in combinatie met cnt's en koolstofnanovezels (cnf's). Figuur 10 toont het verschil in opbouw van koolstofnanovezels en koolstofnanobuizen. Hier is te zien dat er geen perfect cilindervormige wand bekomen wordt, maar dat er verschillende kegelvormige koolstofstructuren op elkaar worden gestapeld waardoor een vezel verkregen wordt. Hierbij zijn de randvlakken van de kegelvormen blootgesteld langs de buitenkant van de vezel want deze steken wat uit. De eigenschappen van de nanovezels worden vergeleken met die van nanobuizen in Tabel 1.



Figuur 10: Verschil opbouw koolstofnanovezel en koolstofnanobuis [10, p. 2]

Tabel 1: Eigenschappen nanobuizen en -vezels [11, p. 2]

Materiaaltype		Eigenschappen			
		Fysieke eigenschappen		Mechanische eigenschappen	
		Diameter	Lengte	Young modulus	Treksterkte
CNT	SWCNT	1.2-2nm	>5 $\mu$ m	5.5TPa	65GPa
	MWCNT	20-40nm	1-20 $\mu$ m		
CNF		60-150nm	30-100 $\mu$ m	400GPa	7GPa

Na het uitvoeren van proeven op koolstofnanovezelversterkt beton (CNFRC), kon men verschillende conclusies trekken. De druksterkte van het beton werd verbeterd door toevoeging van nanovezels. De thermische geleiding van het beton verminderde waardoor deze beter zou kunnen isoleren. De duurzaamheid van het beton nam ook toe, terwijl de elektrische conductiviteit ook steeg zodat deze de mogelijkheid biedt als 'smart concrete'. Hiernaast zijn er drukproeven en slijttreksterkteproeven uitgevoerd waarvan de resultaten in Tabel 2 zijn weergegeven. Hierbij zijn de nanovezels gemengd met water en een superplastificeerder waarbij er via sonificatie een goede dispersie bekomen werd. Deze proeven zijn uitgevoerd op cilinders met diameter 100 mm en hoogte 200mm. Hierbij is te zien dat de druksterkte met 38% gestegen is, terwijl de slijttreksterkte 8% verbeterd is [11]. Deze effecten zullen dan ook verwacht worden bij de testen op beton met koolstofnanobuizen.

Tabel 2: Resultaten druk-en slijttreksterkteproeven op CNFRC en normaal beton [11, p. 2]

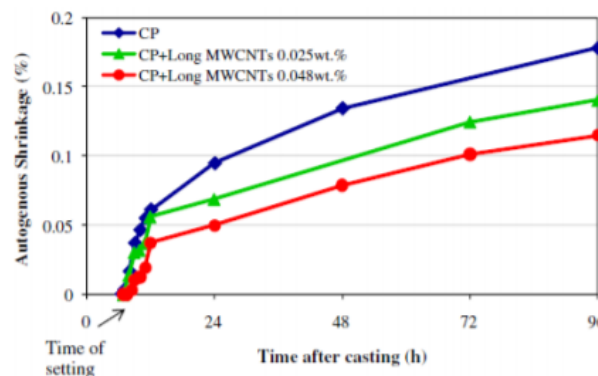
	% cnf t.o.v. volume cement	w/c factor	Druksterkte (MPa)	Slijttreksterkte (MPa)
Normaal beton	0	0.34	60.5	6.2
CNFRC	0.5	0.34	84.0	6.7

Nu is er ook onderzoek gedaan naar de invloed van nanotubes op de porositeit van beton. De porositeit speelt een rol in de uiteindelijke sterkte van het beton. Zoveel te meer poriën, zoveel te minder beton om de krachten op te vangen. Naarmate de porositeit stijgt, zal het beton ook kwetsbaarder worden voor de indringing van agressieve stoffen zoals water, chloriden en sulfaten. De waarde van de autogene krimp of uitdrogingskrimp, die vooral voorkomt bij beton met een lage w/c factor en met

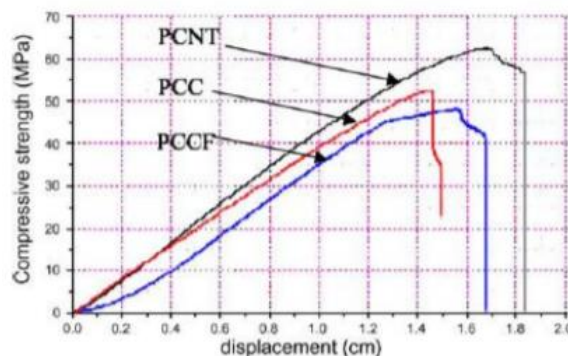
veel fijne stoffen, wordt ook bepaald door de porositeit. Zo zijn er microporiën met een straal kleiner dan 1.25nm en kleine mesoporiën met een straal tussen 1.25 en 25nm.

Deze hebben geen effect op de uiteindelijke sterkte of op de permeabiliteit, maar wel op de mate van autogene krimp. Macroporiën met een straal tussen 25nm en 5µm, luchtholtes en microscheuren bepalen de permeabiliteit. In het onderzoek is de porositeit van een mortel met 0.5% cnt's ten opzichte van het gewicht van cement onderzocht met behulp van kwikporosimetrie. Hierbij wordt kwik op het oppervlak van het te onderzoeken materiaal aangebracht en wordt dit onder verschillende drukken gebracht. Hierbij zal dan gekeken worden hoeveel kwik in de poriën van het materiaal gebracht kan worden onder druk. Het resultaat was dat de interne porositeit 64% was gedaald ten opzichte van een normale mortel. De poriegrootteverdeling nam ook af terwijl het totaal volume van macroporiën en holtes met 82% verminderd was. De gemiddelde straal van de poriën daalde ook van 15nm tot 8.7nm. Er kan dus besloten worden dat de cnt's de grotere poriën grotendeels vullen, waardoor een compactere mortel bekomen wordt en de sterkte stijgt. Door de grotere compactheid daalt de permeabiliteit, waardoor de mortel minder kwetsbaar is voor indringing van agressieve stoffen. Hierdoor zal de duurzaamheid positief beïnvloed worden. Doordat de methode van kwikporosimetrie alleen rekening houdt met poriën groter dan 2nm, moet er een andere proef uitgevoerd worden om de poriën kleiner dan 2nm te onderzoeken [9].

Om nu het effect van cnt's op de poriën met een straal kleiner dan 2nm te onderzoeken, werd er verondersteld dat de waarde van de autogene krimp van beton volledig bepaald werd door de poriën met een straal kleiner dan 20nm. Er werd gevonden dat, bij een cement met 0.028-0.048% cnt's ten opzichte van het gewicht van het cement, de autogene krimp daalde met 30%. De resultaten van de proef zijn weergegeven in Figuur 11, waarin te zien is dat de autogene krimp daalt bij een toenemend % cnt's. Deze grafiek geeft dan ook de relatie weer tussen de fijne porositeit en het % cnt's. Doordat er minder autogene krimp optreedt, zullen er minder microscheuren gevormd worden door krimp en zal dit de duurzaamheid ten goede komen. Ook was er een verbetering van de ductiliteit van een mortel waar te nemen zoals in Figuur 12 is weergegeven. Hierbij staat PCNT voor een mortel versterkt met cnt's, PCCF een mortel versterkt met nanovezels en PCC de onversterkte mortel [9].



Figuur 11: Autogene krimp van een cementpasta met verschillende concentraties cnt's [9, p. 6]



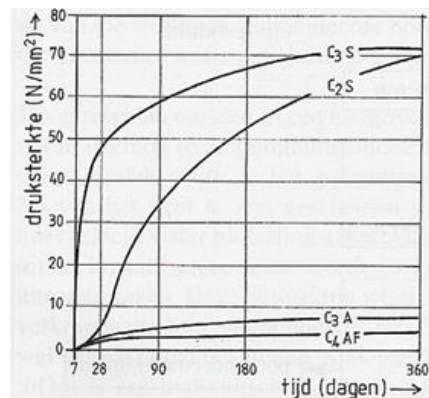
Figuur 12: Drukspanning-rek curve van mortel zonder cnt's, met cnt's en met nanovezels [9, p. 6]

## 2.3 Beton

Beton is een kunstmatig steenachtig materiaal dat overwegend gebruikt wordt als bouw materiaal. Beton bestaat hoofdzakelijk uit granulaten (grind en zand), cement en water waarbij cement het bindmiddel van het mengsel is. De binding wordt veroorzaakt door een chemische reactie, namelijk de hydratatie waarbij calcium(II)silicaat en water worden omgezet in tricalciumdisilicaathydraat en calciumhydroxide.



Deze reactie zorgt dus voor de samenhang van de verschillende materialen en dus ook voor de sterkte van het beton. De reactie tussen het cement en het water treedt niet onmiddellijk op. De sterkteontwikkeling en dus ook de reactie tussen cement en water wordt weergegeven in Figuur 13, welke aantoont dat beton het grootste deel van zijn sterkte verworven heeft na 28 dagen. Dit is ook de reden waarom betonnen kubussen geproefd worden na deze tijd [12], [13].

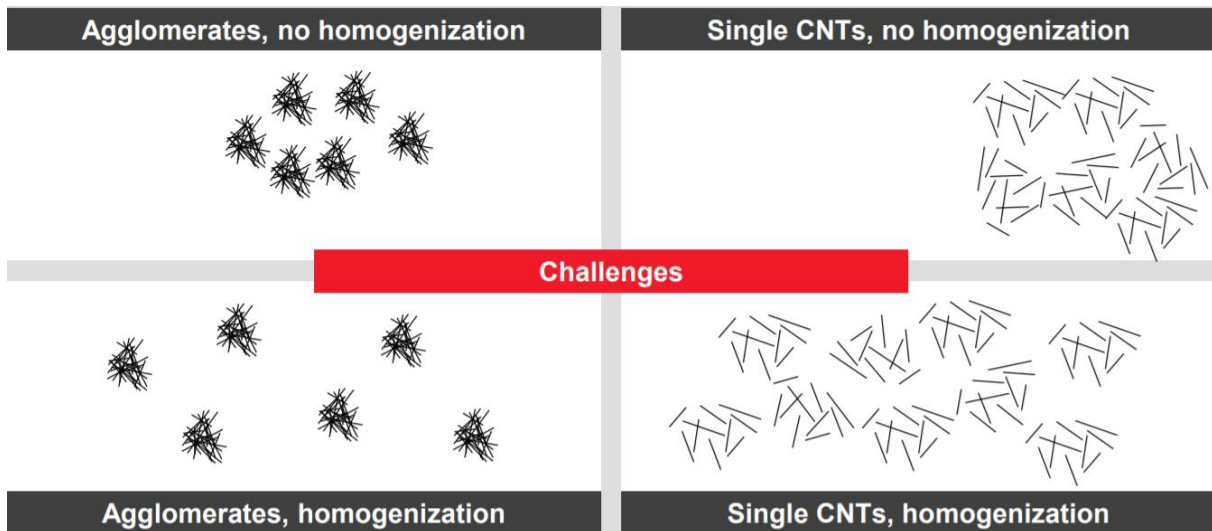


Figuur 13: Verloop spanning - rek in de dwarsdoorsnede [13, p. 1]

Beton is een materiaal dat zeer goed drukspanningen kan verdragen. Echter worden er ook constructies gemaakt die niet enkel op druk belast worden, maar ook op trek en buiging. Om deze eigenschappen in het beton te verbeteren wordt er meestal gebruik gemaakt van stalen staven. Staal heeft een zeer hoge trek en buigsterkte en heeft nagenoeg dezelfde thermische uitzettingscoëfficiënt als het beton. Hierdoor is het dus uiterst geschikt om de trek- en buigspanningen van het beton op te vangen. Echter kunnen stalen staven niet altijd gebruikt worden doordat er soms geen plaats is voor de staven in de constructie of doordat de plaats waar het beton gestort dient te worden moeilijk toegankelijk is met stalen staven. Om dit probleem op te lossen kan er gebruik gemaakt worden van vezelbeton. Vezelbeton is een composietmengsel van beton en vezels waarbij de vezels kunnen bestaan uit: staal, kunststof, glas, koolstof of textiel. Elke vezelsoort heeft andere specifieke eigenschappen, maar de hoofdzaak van de vezels is het opvangen van de trek- en buigspanningen [12], [14].

## 2.4 Dispersie

Een belangrijk probleem bij het toevoegen van enkelwandige koolstofnanobuizen bij een cementmengsel is de dispersie. Bij het mengen van deze onderdelen, gaan de nanobuizen accumuleren door de grote specifieke oppervlakte van de nanobuizen en de krachtige vanderwaalskrachten. Door deze accumulatie vermindert het versterkend effect van de nanobuizen op de finale constructie [15]. Voor dit probleem worden er intussen suspensies gebruikt zodat de nanobuizen homogeen verdeeld kunnen worden doorheen het cementmengsel om zo een optimaal effect te bekomen. Het mengsel moet dus homogeen zijn zonder dat de koolstofnanobuizen gaan accumuleren. Mogelijke problemen bij het toevoegen van koolstofnanobuizen in een mengsel worden weergegeven in Figuur 14.

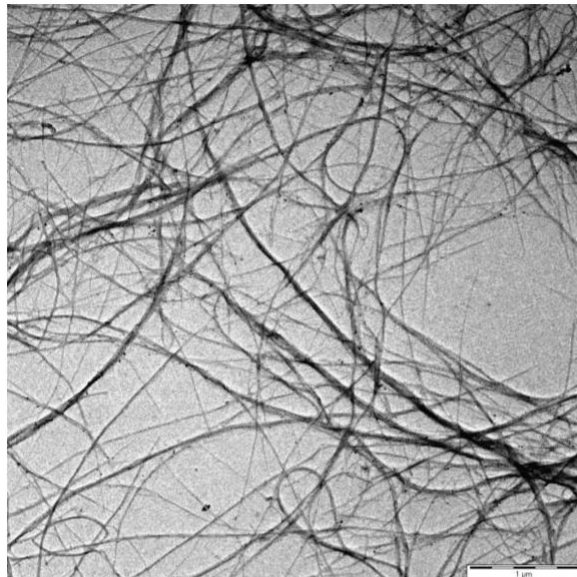


Figuur 14: Mogelijke problemen nanobuismengsel [16, p. 6]

### 2.4.1 Rhenofit

Rhenofit CNT-3 is een water gedragen suspensie van enkelwandige koolstofnanobuizen. Deze kan direct gebruikt worden voor samenstellingen zoals beton. De oplossing is gestabiliseerd, de gebruikte koolstofnanobuizen zijn gedispergeerd en de oplossing is zeer homogeen zoals te zien is in Figuur 15. Het toegepaste proces zorgt voor een niet-destructieve dispersie van koolstofnanobuizen in milde omstandigheden [17].

Rhenofit CNT-3 kan gebruikt worden voor verschillende toepassingen zoals beton, latex, rubber, verven en vele andere. Hierbij zorgt Rhenofit CNT-3 voor een toename van de mechanische sterkte: een verhoging van de trek- en drukweerstand bij beton. Voor vaste stoffen is een concentratie actief materiaal kleiner dan 0.02% voldoende [16], [17].

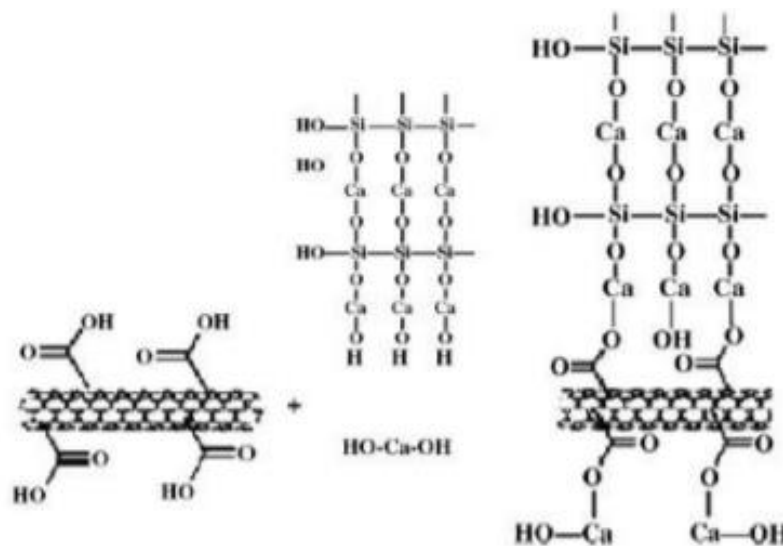


Figuur 15: Rhenofit oplossing bekeken door een elektronenmicroscop [17, p. 2]



## 2.4.2 Functionalisering

Een andere methode betreft het gebruik van functionaliserende middelen om het oppervlak van de nanobuizen te behandelen. Hierbij wordt er ook gebruik gemaakt van ultrasonificatie om de koolstofnanobuisbundels te doorbreken. Bij ultrasonificatie wordt er gebruik gemaakt van ultrasone geluidsgolven op hoge frequentie om zo de koolstofnanobuisbundels te verbreken door cavitatie. Hier worden er kleine bubbels in het mengsel gevormd die na het ontstaan zullen imploderen. Door dit fenomeen worden de individuele cnt's gescheiden van de bundels, waardoor een homogene concentratie bekomen wordt. Het product waarmee de nanobuizen behandeld worden, is meestal een sterk zuur. Door deze behandeling van de nanobuizen, zullen er zich functionele groepen aan hun oppervlak bevinden. Deze kunnen zorgen voor een betere dispersie en kunnen covalente bindingen vormen met de cementmatrix. Door de sterk oxiderende werking van de zuren zullen er zich bijvoorbeeld carboxylgroepen(-COOH) aan het oppervlak van de cnt's bevinden. Deze carboxylgroepen zullen reageren met de hydratatieproducten(C-S-H) van cement. Deze binding zal er dan uitzien zoals in Figuur 16.



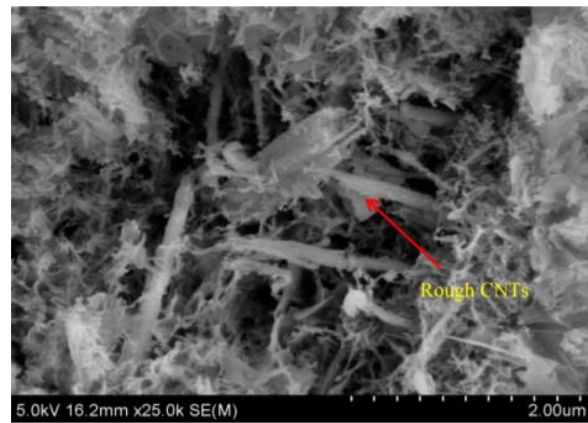
Figuur 16: Covalente binding van nanobuizen met carboxylgroepen en hydratatieproducten [9, p. 5]

## 2.5 Nano-Silica Sol Gel

Koolstofnanobuizen hebben het potentieel om de mechanische eigenschappen van het beton te verbeteren door scheuroverbrugging en hun frictionele uittreksterkte. Doordat koolstofnanobuizen een glad oppervlak hebben op atomische schaal, lijkt deze geen goede aanhechting met een cementmatrix te kunnen creëren. Het is dus ook zeer belangrijk om de interactieve eigenschappen van de koolstofnanobuizen en de cement matrix te optimaliseren. De toevoeging van Nano-Silica Sol Gel bij Multiwall Carbon Nanotubes(MWCNT)-versterkt beton heeft een positieve invloed op de interactieve krachten tussen de cementmatrix en de MWCNTs en zal de nanobuizen een ruwer oppervlak geven. Het verschil in ruwheid van het oppervlak zonder en met Sol Gel wordt weergegeven in Figuur 17 en Figuur 18 [15].



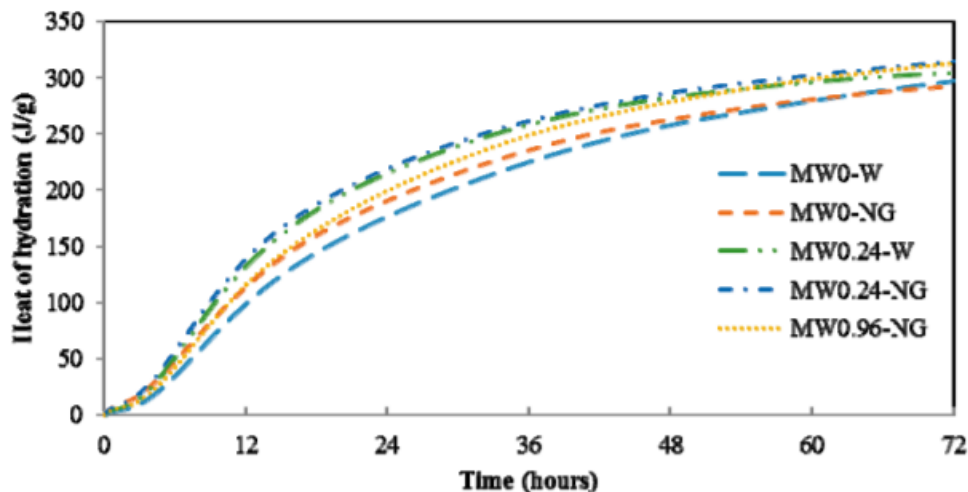
Figuur 17: Gladde nanobuizen zonder Sol Gel [15, p. 6]



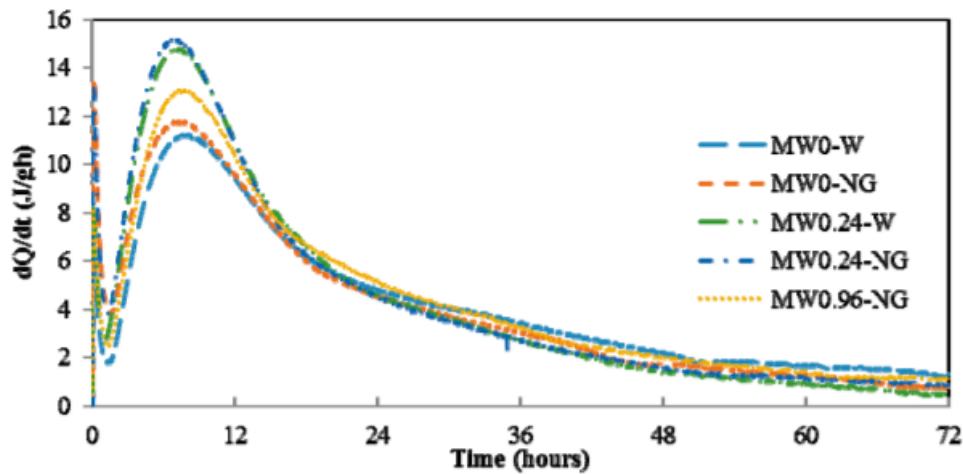
Figuur 18: Ruwe nanobuizen met Sol Gel [15, p. 7]

Er is hier gekozen voor een silica gel door de kleine grootte van de deeltjes en de mogelijkheid tot puzzolane reacties. Uit onderzoek blijkt dat de nano-silica Sol Gel een verwaarloosbaar effect heeft op de dispersie van de nanobuizen in het beton. De optimale dosering van MWCNTs in een NS-oplossing is volgens het onderzoek gelijk aan 0,02% van het gewicht van het cement. Dit geldt echter niet voor de dispersie van MWCNTs in waterachtige oplossingen. Wanneer er een hoger percentage van nanobuizen werd gebruikt in combinatie met de Sol Gel, was de stabiliteit van het mengsel niet meer optimaal en werd de dispersie op langere termijn negatief beïnvloed. Dit komt doordat wanneer er een hoger nanobuispercentage wordt gebruikt, de afstand tussen de afzonderlijke nanobuizen verkleint. Dit kan leiden tot sterkere vanderwaalskrachten en dus een sterkere neiging tot agglomeratie van de nanobuizen.

NS wordt geadsorbeerd aan het oppervlak van de MWCNTs en bevordert zo de vorming van hydratatieproducten aan het oppervlak van de MWCNTs. De nanobuizen dienen hier als plaats waar nucleatie optreedt voor de vorming van calciumsilicaathydraat (C-S-H). Dit calciumsilicaathydraat vormt zich preferentieel rond de nanobuizen waardoor de hydratatie van het cement versneld wordt. Door toevoeging van de Sol Gel is er ook een kleine verbetering van de C-S-H vorming zoals te zien is in Figuur 19 en Figuur 20. Hierdoor wordt de onderlinge hechting tussen de MWCNTs en de cementmatrix verbeterd. Dit leidt ook tot een verbetering van de belastingsoverdracht en de algehele sterkte van het cementcomposiet [15].



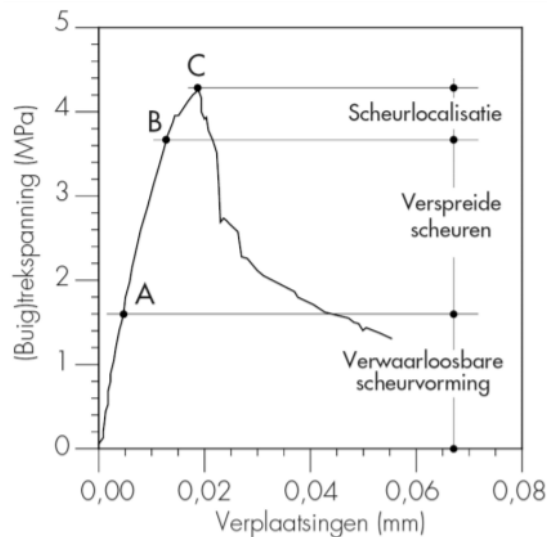
Figuur 19: Invloed Sol Gel op warmtegeneratie door initiële hydratatie [15, p. 5]



Figuur 20: Invloed Sol Gel op hydratatiesnelheid [15, p. 5]

## 2.6 Vezelbeton

Tegenwoordig worden grotere vezels al gebruikt in beton bij het vervaardigen van betonnen constructies. Deze vezels kunnen scheuren overbruggen waardoor er een verbetering van het nascheurgedrag van beton bekomen wordt. Hierdoor zal het beton niet bros breken in tegenstelling tot ongewapend beton. De scheuren ontstaan door een trekspanning, want beton kan niet goed trek opnemen. De buigtaaiheid van het beton is een maat voor de grootte van de trekkracht die het vezelversterkt beton nog kan opnemen nadat er scheuren gevormd zijn. Deze buigtaaiheid verschilt afhankelijk van de samenstelling van het vezelbeton en indien deze groot genoeg is, kunnen de scheuren overbrugd worden. Dankzij deze vezels kan er een herverdeling van de interne krachten optreden waardoor de scheurwijdte beperkt wordt. Figuur 21 geeft het spanning-vervormingsdiagram van ongewapend beton onder invloed van een buigtrekspanning [18].



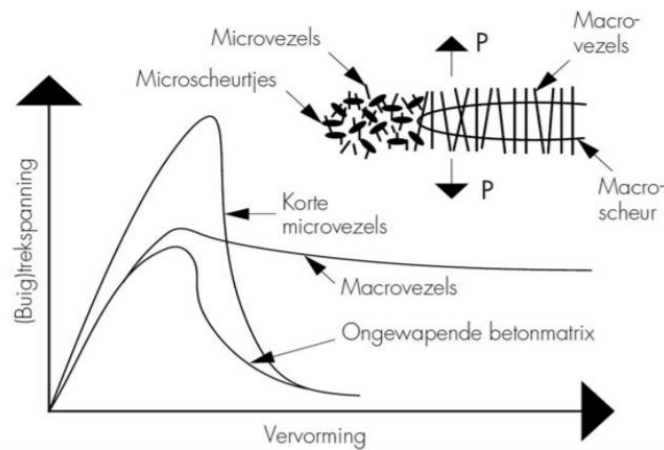
Figuur 21: Spanning-vervormingsdiagram ongewapend beton [18, p. 4]

In het eerste gebied treden er nog geen scheuren op door de lage trekspanningen. Tussen A en B bereikt de trekspanning een waarde waarbij er overal in het beton op willekeurige plaatsen microscheuren voorkomen. Wanneer de trekspanning een waarde tussen B en C bereikt, wordt er een macroscheur gevormd. Deze macroscheur is de ondergang van de betonnen constructie zoals in Figuur 21 te zien is. De macroscheur plant zich zeer snel voort en heeft steeds minder kracht nodig doordat het beton bezwijkt. Doordat deze macroscheuren zich in ongewapend beton zo snel kunnen



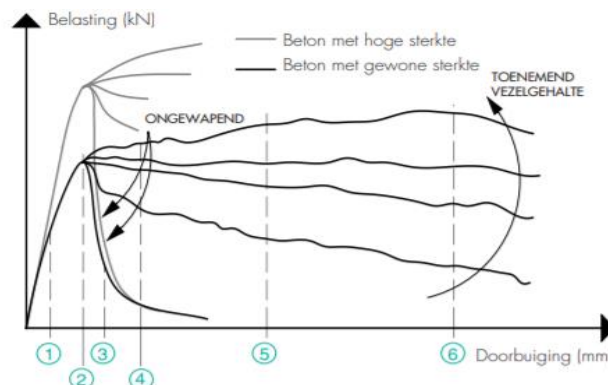
ontwikkelen onder invloed van een belasting, wordt het bros gedrag duidelijk. Zoals voordien aangehaald kan dit bros gedrag verbeterd worden door toevoeging van vezels.

Nu speelt de grootte van de vezels ook een rol in het scheurgedrag van het beton. Bij zeer kleine vezels (microvezels) gaan de haarscheurtjes overbrugd worden waardoor er zeer veel kleine scheurtjes zullen optreden voordat er macroscheuren ontstaan. Hierdoor zal de vorming van macroscheuren uitgesteld worden en zal de (buig)treksterkte van het beton stijgen. Men spreekt van microvezels wanneer de vezels een lengte kleiner dan 15mm, en een diameter tussen 10 en 150µm hebben. Vanaf het moment dat de maximale (buig)trekspanning optreedt, gaan de macroscheuren zich ontwikkelen. Doordat de microvezels zo klein zijn, zullen deze geen effect meer hebben op het groeien van de macroscheuren want zij kunnen deze niet meer overbruggen. Naast microvezels bestaan er ook macrovezels die een voordeel kunnen bieden aan het scheurgedrag van beton. Men spreekt van macrovezels bij een lengte van 25 à 60mm en een diameter van 0.2 à 1mm. Deze macrovezels zullen na het bereiken van de maximale (buig)treksterkte een effect uitoefenen door de ontwikkeling van de macroscheuren tegen te gaan waardoor het beton minder snel zal bezwijken. Figuur 22 geeft het spanning-ervormingsdiagram van vezelbeton en het ongewapende beton onder invloed van een (buig)trekspanning [18].



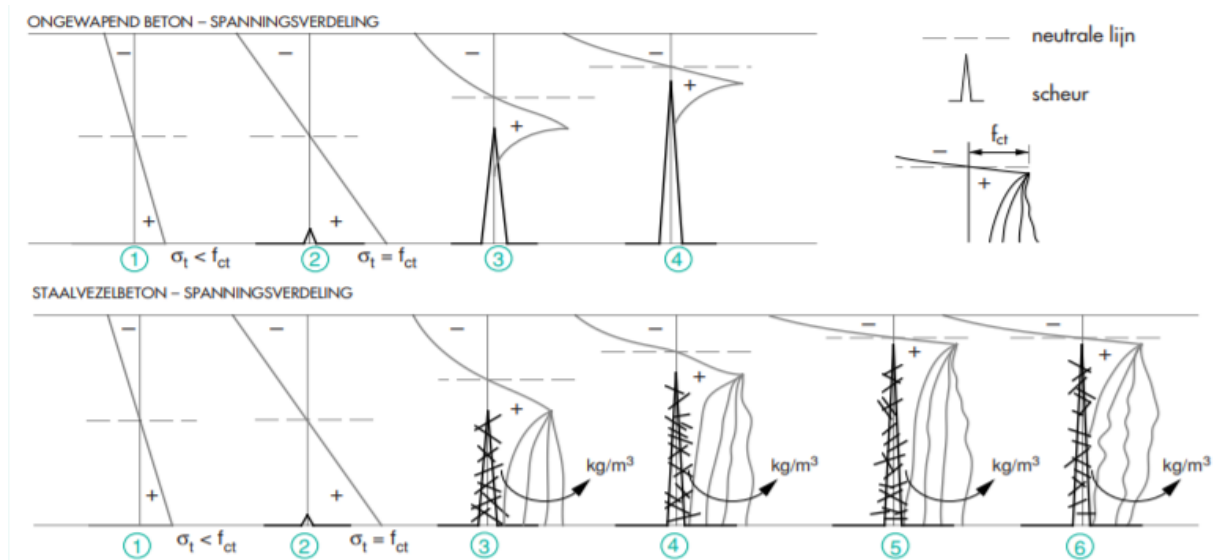
Figuur 22: Spanning-ervormingsdiagram vezelbeton [18, p. 4]

Wanneer er nu een 4-puntsbuigproef wordt uitgevoerd, kan de uitgeoefende kracht in functie van de doorbuiging in een grafiek gezet worden. Figuur 23 geeft deze relatie weer voor verschillende vezelgehalten en ongewapend beton.



Figuur 23: Belasting-doorbuigingsdiagram ongewapend- en vezelbeton [18, p. 6]

Het belasting-doorbuigingsdiagram onder invloed van de buigingsproef is nu opgedeeld in 6 fasen. In het eerste deel treden er nog geen grote scheuren op en dus wordt alle trekkracht opgenomen. In de tweede fase wordt er een macroscheur gevormd waardoor de maximumbelasting wordt bereikt. In fase 3 zou bij ongewapend beton de macroscheur zich snel voortzetten waardoor de betonnen constructie het zou begeven. Zoals gezegd is dat bij vezelbeton niet het geval zoals zichtbaar is in de volgende fasen [18]. Figuur 24 toont deze resultaten door het visualiseren van de verschillende stadia.

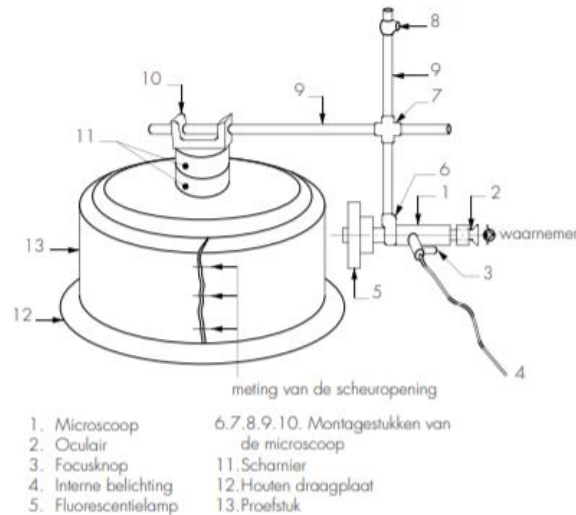


Figuur 24: Spanningsverdeling verschillende stadia [18, p. 6]

Uit deze proef kan naast de buigtreksterkte ook de buigtaaiheid afgeleid worden. Het WTCB definieert de buigtaaiheid als volgt: “De buigtaaiheid is een maat voor de opgenomen energie en wordt uitgedrukt in N/mm” [18, p. 7]. Deze energie kan men vinden als oppervlakte onder de curve in het belasting-doorbuigingsdiagram. Figuur 23 toont dat de buigtaaiheid van het vezelbeton stijgt naarmate het vezelpercentage stijgt. Door een hogere buigtaaiheid verhoogt de weerstand tegen vermoeiing, waardoor de uiteindelijke doorbuiging onder invloed van een belasting zal dalen. Naast een verbetering van de vermoeiing is er ook een verbetering van de weerstand tegen impact en dynamische belastingen, doordat staalvezelbeton een grotere capaciteit heeft om energie op te nemen. Een ander voordeel is dat staalvezelbeton beter reageert bij brand dan klassiek gewapend beton met staven doordat er minder betonschilfers afspringen onder invloed van de hitte [18].

Uit drukproeven is er gebleken dat de druksterkte van staalvezelbeton met maximum 10% stijgt ten opzichte van ongewapend beton. Dit komt door de scheuroverbruggende werking van de kleine scheurtjes door de staalvezels voordat het bezwijken van de kubus optreedt [18].

Een interessante eigenschap van staalvezelbeton is het tegengaan van verhinderde krimp. Via de ringtest, afgebeeld in Figuur 25, kan men de invloed van staalvezels testen. Hierbij wordt er beton gestort in een ring waarin men het beton ook laat uildrogen. Beton krimpt tijdens het drogen, maar door de ring kan het beton niet krimpen. Door deze verhinderde krimp ontstaan er grote spanningen in het beton waardoor het gaat scheuren. Bij ongewapend beton treedt er 1 grote scheur op waar alle spanning afgegeven kan worden, maar dit is niet het geval bij vezelbeton. Bij vezelbeton zullen de vezels ervoor zorgen dat er niet 1 maar meerdere kleine scheuren zullen ontstaan waarvan de scheurwijdte kleiner is dan bij ongewapend beton. Hierdoor is vezelbeton geschikt voor waterdichte constructies [18].



Figuur 25: Ringtest [18, p. 10]

## 2.7 Toepassingen staalvezelbeton

Bij funderingspalen wordt er vaak gebruik gemaakt van ongewapend beton wanneer er geen grote excentriciteiten verwacht worden. Doordat het beton ongewapend is, is er het risico op paalbreuk tijdens de uitvoering. Dit risico kan verholpen worden door gebruik van staalvezels. Hiernaast kunnen trillingen tijdens het plaatsen beter opgenomen worden met staalvezelbeton. Het is niet aangeraden balken in staalvezelbeton te maken door de hoge geconcentreerde momenten die hier optreden. Hier kan er wel gebruik gemaakt worden van een hybride variant om de balk te verstevigen. Bij een poer kan er ook gebruik gemaakt worden van een hybride door het grote volume van de poer. Hierin kunnen de staalvezels homogeen worden verdeeld om deze te verstevigen, terwijl er onderaan gebruik gemaakt wordt van traditionele staafwapening in de trekband. Bij prefab kunnen staalvezels gebruikt worden omwille van het goed te controleren productieproces.

Bij niet-vloeistofdichte vloeren kan er gebruik gemaakt worden van staalvezelbeton omdat er hier scheuren van 0.5 tot 2mm mogen ontstaan. Bij een vloer die vloeistofdicht moet zijn, zoals in kelders, kan men best gebruik maken van een hybride variant doordat de krimp de staalvezelberekening moeilijker maakt. Bij wanden kan staalvezelbeton ook gebruikt worden doordat de krachten hier meestal in het vlak van de plaat werken. Bij onderwaterbeton wordt er ook gebruik gemaakt van staalvezelbeton zodat er trekspanningen opgenomen kunnen worden. Ook heeft dit onderwaterbeton vaak grote afmetingen waardoor het effect van de staalvezels zeer positief kan zijn. Om minder beugels nodig te hebben, kan er bij kolommen ook gebruik gemaakt worden van staalvezelbeton. Wanneer de momentcapaciteit te laag is, moet er gebruik gemaakt worden van een hybride variant. Bij ultrahogesterktebeton treedt er een grotere autogene krimp op dan bij normaal beton. Hierdoor ontstaan er spanningen die opgevangen kunnen worden door staalvezels om zo microscheuren te beperken [19]. In Tabel 3 wordt er een kort overzicht gegeven van de geschiktheid van staalvezelbeton voor de verschillende toepassingen.

Tabel 3: Geschiktheid staalvezelbeton per constructiesoort [19, p. 6]

	Staalvezel	Hybride	Berekening	Opgelegde rek (bijv. krimp of temperatuur)
Funderingspalen	+	+		n.v.t.
Balken	-	+	1D/2D	
Poeren	+/-	++	2D,3D EEM NL	n.v.t.(hydratatie soms)
Prefab	++	+	1D,2D	n.v.t.
Platen: vloeren	+	++	2D,3D EEM NL	ja
Platen: vloeren(vloeistofdicht)	-	++	3D EEM NL	ja
Platen: wanden	+/-	++	2D,3D EEM NL	ja
Onderwaterbeton	++	+	3D EEM NL	ja
Kolommen	-	+	1D	n.v.t.
(U)HSB	++	+	EEM NL	ja

## 2.8 Rekenwaardes staalvezelbeton

### 2.8.1 Waarom Vezelbeton

Vezelbeton zal tijdens de masterproef gebruikt worden als voorbeeld om formules op te stellen voor koolstofnanotubes in beton. Dit komt doordat er verwacht wordt dat beton met koolstofnanotubes gelijkaardige eigenschappen zal vertonen als vezelbeton. Door vezelbeton te bestuderen wordt er ook verwacht een beter inzicht te verwerven in de eigenschappen en de werking van carbon nanotubes in beton.

### 2.8.2 Rekenmethode drukkracht

Om de druksterkte van het vezelversterkt beton te bepalen, worden er drukproeven uitgevoerd op kubussen volgens Eurocode NBN EN 12390-1. Uit deze resultaten wordt de betonklasse bepaald en dus ook de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$ . De kubussen die gebruikt worden, hebben een zijde van 15cm. De druksterkte die op deze kubussen gemeten werd tijdens de proeven, wordt voorgesteld door  $f_{c,cub150}$ . De volgende formules zijn gevonden in [1, p. 83], [20, p. 7] .

De gemiddelde druksterkte van het beton kan als volgt gevonden worden:

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

Met behulp van de gemiddelde druksterkte kan de karakteristieke druksterkte van beton gevonden worden volgens [21]:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,48 \cdot s \quad (2)$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan als volgt berekend worden:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{c,cube,i} - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (3)$$

De representatieve betondruksterkte wordt gevonden door:

$$f_{fcrep} = 0,85 \cdot f_{ck} \quad (4)$$

Om nu de rekenwaarde van de druksterkte van het beton te bekomen moeten we nog delen door een factor  $\gamma$ :

$$f_{cd} = \frac{f_{fcrep}}{\gamma_{fc}} \quad (5)$$

Met:  $\gamma = 1,2$  onder druk

$\gamma = 1,25$  onder trek

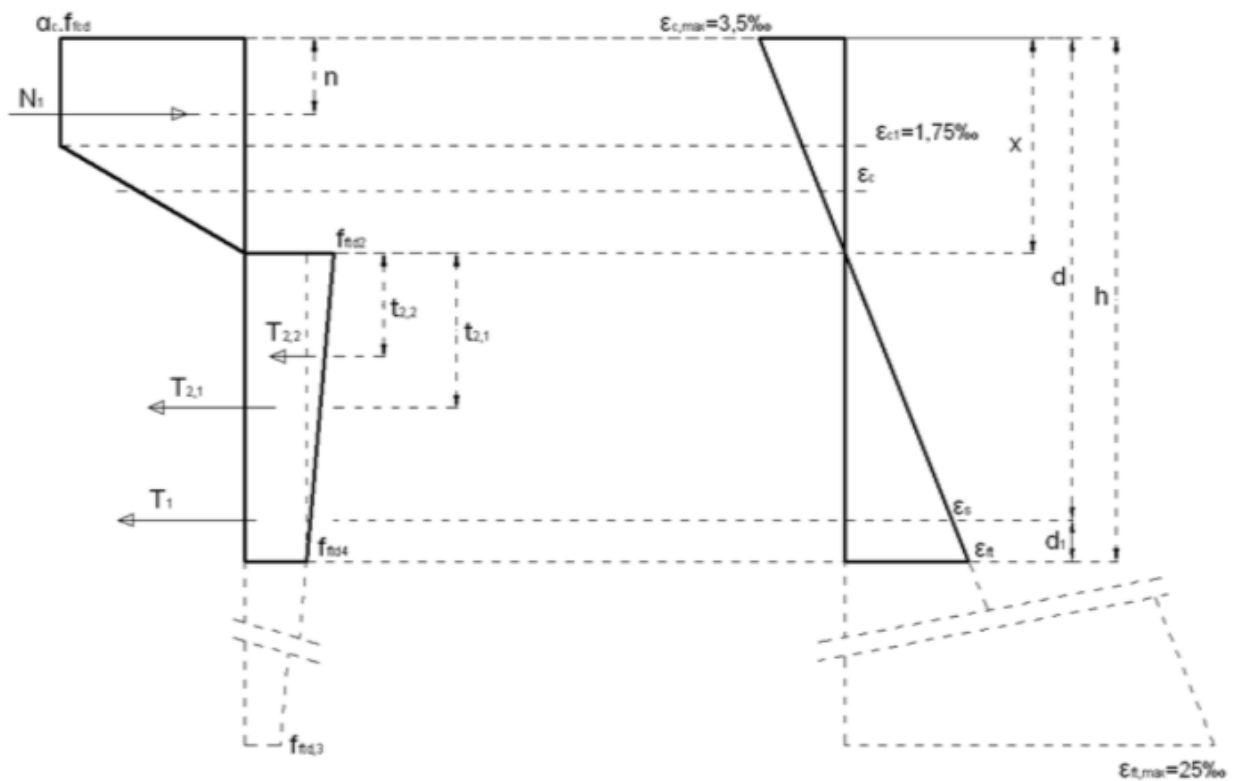
### 2.8.3 Rekenmethode maximaal opneembaar moment

Het maximaal opneembaar moment kan berekend worden door de betonstuik  $\epsilon_c$  en de staalvezelrek  $\epsilon_{ft}$  te laten variëren terwijl er altijd een horizontaal evenwicht moet zijn. Volgende methodiek is gevonden in [1, pp. 35-38].

Eerst moet de ligging  $x$  van de neutrale lijn bepaald worden door volgende formule:

$$x = h \cdot \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{ft}} \quad (6)$$

Wanneer er nu staalvezels en wapeningsstaven samen worden gebruikt, dan bekomt men een dwarsdoorsnede met een krachtenwerking zoals in Figuur 26.



Figuur 26: Verloop spanning - rek in de dwarsdoorsnede [1, p. 36]

In Figuur 26 vindt men bovenaan de drukkracht  $N_1$  die met volgende formules berekend kan worden.

Wanneer de betonstuik een waarde tussen  $0‰ < \epsilon_c \leq 1,75‰$  heeft, dan kan  $N_1$  berekend worden met:

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot x \cdot \alpha_c \cdot f_{fcd} \cdot \frac{\epsilon_c}{1.75} \quad (7)$$

Wanneer de betonstuik een waarde tussen  $1,75\% < \varepsilon_c \leq 3,5\%$  heeft, dan kan  $N_1$  berekend worden met:

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot x \cdot \alpha_c \cdot f_{fcd} \cdot \frac{1,75}{\varepsilon_c} + b \cdot x \cdot \alpha_c \cdot f_{fcd} \cdot \frac{\varepsilon_c - 1,75}{\varepsilon_c} \quad (8)$$

Hierbij is:

- $N_1$  de drukkracht in de dwarsdoorsnede
- $x$  de ligging van de neutrale vezel
- $b$  de breedte
- $f_{fcd}$  de rekensterkte van het vezelversterkt beton
- $\alpha_c$  de reductiecoëfficiënt van het beton
- $\varepsilon_c$  de stuik in de gedrukte zone [1]

Aan de trekzijde vindt men trekkrachten  $T_{2,1}$  en  $T_{2,2}$  die opgenomen worden door de vezels. Deze kunnen als volgt berekend worden:

$$T_{2,1} = b \cdot (h - x) \cdot \left( f_{ftd,2} - \frac{\varepsilon_{ft}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot (f_{ftd,2} - f_{ftd,3}) \right) = b \cdot (h - x) \cdot f_{ftd,4} \quad (9)$$

Hierbij is:

- $T_{2,1}$  het rechthoekig gedeelte van de trekkracht opgenomen door de vezels
- $h$  de hoogte
- $f_{ftd,2}$  de rekestreksterkte van vezelversterkt beton volgens Figuur 26
- $f_{ftd,3}$  de rekestreksterkte van vezelversterkt beton volgens Figuur 26
- $f_{ftd,4}$  de rekestreksterkte van vezelversterkt beton volgens Figuur 26
- $\varepsilon_{ft}$  de rek in de getrokken zone

$$T_{2,2} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot (h - x) \cdot (f_{ftd,2} - f_{ftd,4}) \quad (10)$$

Hierbij is  $T_{2,2}$  het driehoekig gedeelte van de trekkracht opgenomen door de vezels [1].

Naast de trekkrachten  $T_{2,1}$  en  $T_{2,2}$  die opgenomen worden door de vezels, wordt er ook een trekkracht  $T_1$  opgenomen door de staafwapening indien deze aanwezig is.

Wanneer  $\varepsilon_s \leq \frac{f_{ym}}{E_s}$ , dan is:

$$T_1 = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \quad (11)$$

Wanneer  $\frac{f_{ym}}{E_s} \leq \varepsilon_s$ , dan is:

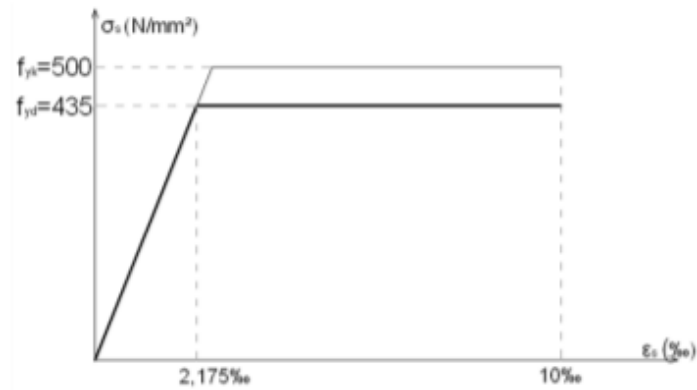
$$T_1 = A_s \cdot f_{ym} \quad (12)$$

Hierbij is:

- $T_1$  de trekkracht opgenomen door de staafwapening
- $E_s$  de elasticiteitsmodulus van staal die gelijk is aan 200 000N/mm<sup>2</sup>
- $D$  de ligging van het wapeningsstaal
- $\varepsilon_s$  de rek ter hoogte van de wapening, gelijk aan:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{ft} \cdot \frac{(d-x)}{(h-x)} \quad (13)$$

Het spanning-rek diagram van staal heeft een verloop zoals in Figuur 27.



Figuur 27: Spanning-rek diagram staal [1, p. 37]

Hierbij vindt men:

$$\varepsilon_s = \frac{f_{ym}}{E_s} = \frac{435}{200\,000} = 2,175\text{‰}$$

Om het maximaal moment te berekenen, zijn de hefboomsarmen nodig want moment is gelijk aan kracht maal afstand.

De hefboomsarm voor drukkracht  $N_1$  wanneer  $0\text{‰} < \varepsilon_c < 1,75\text{‰}$ , wordt beschreven door:

$$(x - n) = \frac{2}{3} \cdot x \quad (14)$$

De hefboomsarm voor drukkracht  $N_1$  wanneer  $1,75\text{‰} < \varepsilon_c < 3,5\text{‰}$ , wordt beschreven door:

$$(x - n) = \frac{\frac{b \cdot x^2 \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\varepsilon_c^2} \left( \frac{(1,75 \cdot 10^{-3})^2}{3} + \frac{\varepsilon_c^2 - (1,75 \cdot 10^{-3})^2}{2} \right)}{N_1} \quad (15)$$

De hefboomsarm  $t_{2,1}$  voor trekkracht  $T_{2,1}$  is gelijk aan:

$$t_{2,1} = \frac{1}{2} \cdot (h - x) \quad (16)$$

De hefboomsarm  $t_{2,2}$  voor trekkracht  $T_{2,2}$  is gelijk aan:

$$t_{2,2} = \frac{1}{3} \cdot (h - x) \quad (17)$$

De hefboomsarm voor trekkracht  $T_1$  is gelijk aan:

$$d - d_1 - x \quad (18)$$

Het maximaal opneembaar moment  $M$  kan dan gevonden worden door combinatie van vorige formules:

$$M = (x - n) \cdot N_1 + t_{2,1} \cdot T_{2,1} + t_{2,2} \cdot T_{2,2} + (d - d_1 - x) \cdot T_1 \quad (19)$$

Deze methode mag alleen gebruikt worden als er aan volgende voorwaarde is voldaan:

$$\sum H = 0 \Leftrightarrow N_1 = T_1 + T_{2,1} + T_{2,2} \Leftrightarrow N_1 - T_1 - T_{2,1} - T_{2,2} = 0 \quad (20)$$

## 2.8.4 Minimumwapening

Nu is het belangrijk te weten of deze staafwapening altijd nodig is, of dat staalvezels alleen al genoeg sterkte kunnen geven aan de constructie. De minimale hoeveelheid wapening om geen te grote scheuren te bekomen, is gevonden in [1, pp. 38-39] en kan als volgt berekend worden:

$$A_{s,min} = (k_c \cdot k \cdot k_p \cdot f_{fct,ef} - 0,45 \cdot f_{Rm,1}) \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (21)$$

Hierbij is:

- $A_{s,min}$  de nodige staafwapening in de trekzone wanneer staalvezels alleen niet voldoen. Wanneer er een negatieve waarde voor  $A_{s,min}$  bekomen wordt, voldoen de vezels zonder extra wapening.
- $f_{fct,ef}$  de effectieve treksterkte van het beton wanneer de eerste scheur optreedt.
- $f_{Rm,1}$  de gemiddelde residuele buigtreksterkte van het staalvezelbeton op het moment dat de eerste scheur optreedt.
- $A_{ct}$  de oppervlakte van het beton dat onder trek staat voordat de eerste scheur gevormd wordt.

$$A_{ct} = b \cdot (h - x) \quad (22)$$

- $\sigma_s$  de maximale spanning die toegelaten is in de wapening nadat de eerste scheur is opgetreden. Deze spanning is gelijk aan de vloeigrens  $f_{yk}$  van de wapening, namelijk 500N/mm<sup>2</sup>.
- $K_c$  een factor die de natuurlijke spanningsverdeling juist voor het scheuren in rekening brengt. Deze hangt af van of er trek, druk of buiging optreedt en kan volgende waardes aannemen:
  - $K_c = 1$  wanneer er pure trek optreedt, dit betekent dat de excentriciteit nul is.
  - $K_c = 0,4$  wanneer er buiging optreedt zonder normale drukkracht. Hierbij is de excentriciteit oneindig.
  - Voor de andere gevallen waar  $0 \leq e \leq \infty$

$$\text{Indien } \frac{e}{h} < 0,4, \text{ dan is } k_c = \frac{1 + \frac{e}{0,4 \cdot h}}{1 + \frac{6 \cdot e}{h}} \quad (23)$$

$$\text{Indien } \frac{e}{h} \geq 0,4, \text{ dan is } k_c = \frac{1 + \frac{0,4 \cdot h}{e}}{2,5 \cdot (1 + \frac{h}{6 \cdot e})} \quad (24)$$

- $K$  een factor die het niet uniform in evenwicht zijn van de spanning in rekening brengt. Voor een schatting kan deze gelijk genomen worden aan 0,5. Indien men deze factor meer in detail wil dan moet deze kijken in ENV 1992-1-1.
- $K_p$  een factor die het effect van voorspanning in rekening brengt. Deze kan als volgt berekend worden:

$$k_p = 1 - \frac{\alpha}{k_c} \cdot \left( 1 - k_c + 2,4 \cdot \frac{e_v}{h} - 6 \cdot \frac{e_v \cdot k_c}{h} \right) \quad (25)$$

Hier is:

- $\alpha$  de voorspangraad die berekend kan worden door:

$$\alpha = \frac{\sigma_{cp}}{k \cdot f_{fct,ef}} \quad (26)$$

- $\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$  (27)

met  $N_{sd}$  de voorspankracht en  $A_c$  de dwarsdoorsnede van het beton.

- $e_v$  de excentriciteit van de voorspankracht



## 2.8.5 Rekenmethode buigtreksterkte

De buigtreksterkte van staalvezelbeton op het moment dat de eerste scheur ontstaat, wordt bepaald door middel van een 4-puntsbuigproef. Deze kan berekend worden volgens [18, p. 7]:

$$f_r = \frac{M_r \cdot \frac{h}{2}}{I} = \frac{M_r \cdot \frac{h}{2}}{\frac{b \cdot h^3}{12}} = \frac{F_r}{2} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} = \frac{F_r \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (28)$$

$f_r$  (ook wel  $f_{bri}$  genoemd) = Buigtreksterkte

$F_r$  (ook wel  $F_{bri}$  genoemd) = Kracht bij ontstaan van de eerste scheur in N'

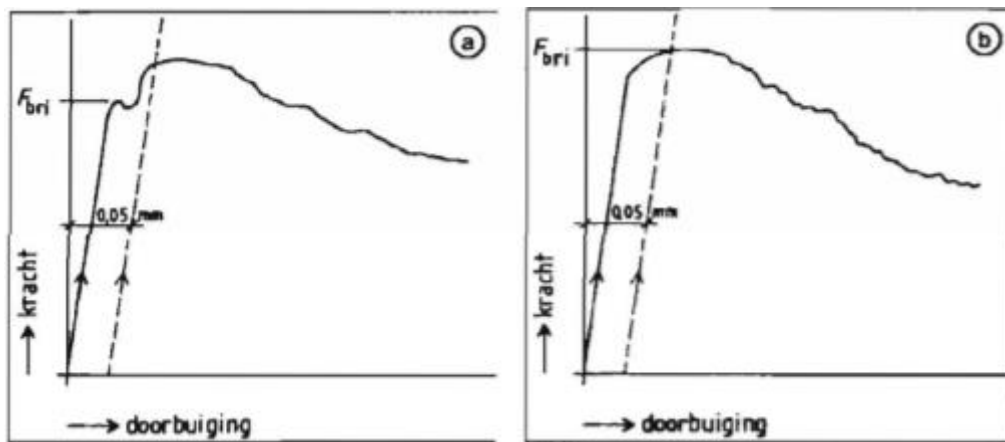
$L$  = Overspanning van de balk in mm.

$b$  = Opgemeten breedte na beproeving van de balk in mm.

$h$  = Opgemeten hoogte na beproeving van de balk in mm [22, p. 20].

De kracht die zich voordoet bij het optreden van de eerste scheur kan uit het kracht-doorbuigingsdiagram afgelezen worden. Hierbij wordt er een rechte lijn getrokken die het lineair gedrag van het eerste deel van de curve volgt. Deze lijn wordt op een afstand van 0.05mm van de curve getekend, evenwijdig met het lineaire deel van de curve zoals in Figuur 28 te zien is. Als de curve niet begint met een recht deel, maar direct begint met een kromming, dan wordt de raaklijn aan de curve getekend op het punt waar de kracht gelijk is aan  $0.3 \cdot F_{bri}$ . Nu mag men  $F_{bri}$  gelijk nemen aan:

- Het maximum van de curve links van de getekende rechte indien er een maximum optreedt.
- Het snijpunt van de rechte met de curve indien er geen maximum optreedt aan de linkerkant van de rechte.



Figuur 28: Kracht-doorbuigingsdiagram [22, p. 20]

De buigtreksterkte van staalvezelbeton kan berekend worden volgens [18, p. 13], via het semi-empirische model van Meyerhof dat vertrokken is van de vloeilijentheorie. Hier wordt er gebruik gemaakt van de eigenschappen van ongewapend beton in combinatie met een verhogingsfactor afhankelijk van de buigtaaiheid:

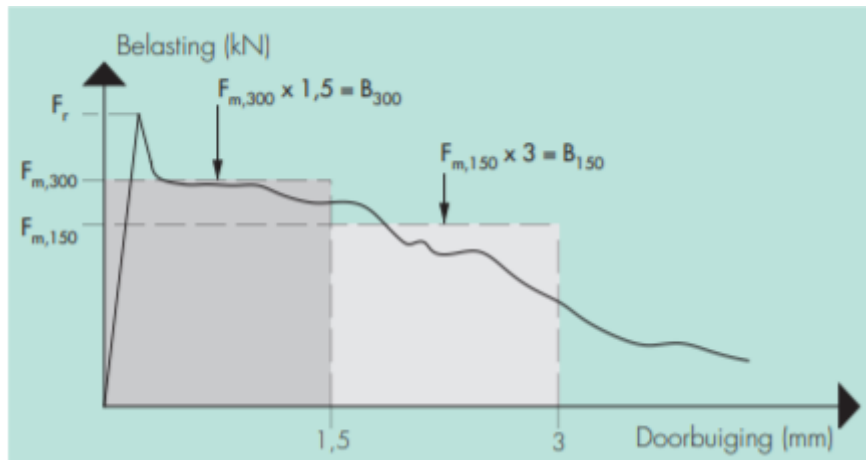
$$f_{fct} = f_{ct} \cdot \left(1 + \frac{f_{f,150}}{f_r}\right) \quad (29)$$

Hierbij is  $f_{ct}$  de buigtreksterkte van ongewapend beton en  $f_{f,150}$  is de equivalente buigtreksterkte voor  $n = 150$ . Deze wordt voorgesteld als een fictieve maximumspanning in de uiterste trekvezel wanneer men een rechthoekig spanningsverloop in de ongescheurde toestand veronderstelt, overeenkomstig met de conventionele gemiddelde buigtreksterkte  $F_{m,150}$ . Deze kracht wordt afgebeeld in Figuur 29.

De equivalente buigtreksterkte kan volgens [18, p. 7] met volgende formule berekend worden:

$$f_{f,150} = F_{m,150} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} = \frac{B_{150}}{\frac{L}{150}} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} = \frac{B_{150} \cdot 150}{b \cdot h^2} \quad (30)$$

$$\text{Met } B_{150} = F_{m,150} \cdot \frac{L}{150} \quad (31)$$



Figuur 29: Gemiddelde equivalente buigtreksterkte [18, p. 7]

De buigtreksterkte in ongescheurde toestand kan dan berekend worden volgens [20, p. 8]:

$$f_{ftd,1} = \frac{f_{ftrep,1}}{\gamma_{ft}} = \frac{f_{ftm}}{\gamma_{ft}} \cdot \frac{1600-a}{1000} \geq \frac{f_{ftm}}{\gamma_{ft}} \quad (32)$$

Hierbij is:

$$f_{ftm} = 0.6 \cdot f_{ct,L}^f \quad (33)$$

$f_{ct,L}^f$  kan als volgt bekomen worden:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_r \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (34)$$

Hiernaast kan  $a$  ook berekend worden met behulp van de optredende rekken:

$$a = \frac{2 \cdot \varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \cdot h \quad (35)$$

Hierbij is:

$\varepsilon_1$  de rek aan de meest getrokken zijde van de ongescheurd veronderstelde doorsnede;

$\varepsilon_2$  de rek aan de meest gedrukte zijde van de ongescheurd veronderstelde doorsnede;

$H$  de totale hoogte van de betondoorsnede.

### 2.8.6 Rekenmethode slijttrekproef

De slijttreksterkte wordt bepaald door middel van een slijttrekproef. De kracht  $F$  die uitgeoefend wordt door de machine kan afgelezen worden op het toestel.

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan als volgt gevonden worden:

$$f_m = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \quad (36)$$

Met behulp van de gemiddelde uitgeoefende kracht, kan de karakteristieke uitgeoefende kracht op het beton gevonden worden door:

$$f_k = f_m - 1,48 \cdot s \quad (37)$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan als volgt berekend worden:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - f_m)^2}{n - 1}}$$

De formule voor de slijttreksterkte op moment dat de eerste scheur ontstaat wordt volgens [23, p. 1] gegeven door:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F_k}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (38)$$

$f_{ct}$  = de slijttreksterkte in  $N/mm^2$

$F_k$  = de karakteristieke maximumbelasting in Newton

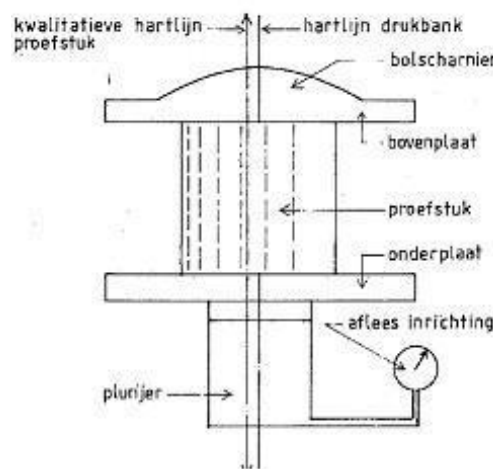
$L$  = de lengte van de contactlijn van het proefstuk in mm

$d$  = de diameter van het proefstuk in mm

## 2.9 Proeven

### 2.9.1 Drukproef

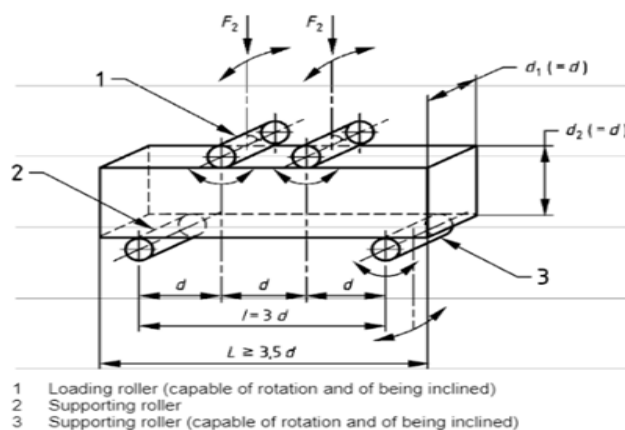
Een drukproef is een proef waarbij men de druksterkte van een betonnen proefstuk wenst te bepalen door het proefstuk te belasten tot het bezwijkt. De proefstukken kunnen zowel kubussen als cilinders zijn. In België worden hoofdzakelijk kubussen gebruikt voor het bepalen van de druksterkte. De verharding van het proefstuk dient te gebeuren onder geconditioneerde omstandigheden (in een klimaatruimte met een relatieve vochtigheid van meer dan 95% of ondergedompeld in water met een temperatuur van 20 °C). De drukproef wordt uitgevoerd met behulp van een drukproefmachine waarvan de opstelling in Figuur 30 wordt weergegeven. Het betonnen proefstuk wordt op de onderplaat geplaatst met de hartlijn van het proefstuk op de hartlijn van het element. Het betonnen proefstuk dient zo geplaatst te worden dat de belasting loodrecht op de gietrichting uitgeoefend wordt. Daarna komt de bovenplaat naar onder met een constante belastingssnelheid die gekozen dient te worden in het gebied tussen de  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s. Dit dient te gebeuren totdat het betonnen proefstuk bezwijkt. Met behulp van metingen kan dan de uiteindelijke druksterkte van het betonnen proefstuk bepaald worden [24], [25].



Figuur 30: Proefopstelling drukproef [24, p. 1]

### 2.9.2 4-puntsbuigproef

De 4-puntsbuigproef oefent een spanning uit op de onderste en bovenste steunpunten. De maximale spanning voordat breuk optreedt wordt gemeten en hieruit bepaalt men dan de maximale buigtreksterkte van het proefstuk. De spanning dient uitgeoefend te worden door middel van 4 steunpunten zoals weergegeven in Figuur 31. Deze 4 steunpunten bestaan uit 2 steunpunten onderaan het proefstuk die het proefstuk enkel ondersteunen en 2 steunpunten bovenaan het proefstuk die de spanning op het proefstuk uitoefenen. Deze spanning dient constant aangebracht te worden met een snelheid tussen de 0.04MPa/s en de 0.06MPa/s [26].



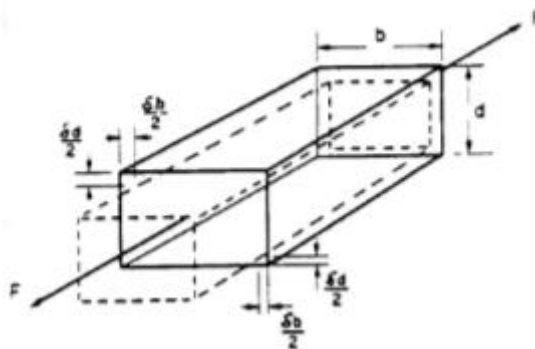
Figuur 31: Proefopstelling 4-puntsbuigproef [26, p. 8]

### 2.9.3 Splijttreksterkteproef (Braziliaanse proef)

De splijttreksterkteproef berust op het feit dat wanneer men een drukkracht uitoefent op de lengterichting van een cilinder er een trekkracht ontstaat loodrecht op deze kracht. Dit effect komt voort uit de coëfficiënt van Poisson. Figuur 32 geeft het effect van de coëfficiënt van Poisson  $\mu$  weer onder invloed van een trekbelasting waarbij:

$$\mu = \frac{-dD}{\frac{D}{dL}} \quad (39)$$

Onder invloed van de trekbelasting treedt er een verlenging  $dL$  op, maar ook een verkleining van de doorsnede. Wanneer een proefstuk onder druk wordt gebracht dan heeft het proefstuk de neiging om uit te zetten in de andere 2 richtingen. Het minteken geeft aan dat wanneer er een vergroting in lengte is, er als resultaat ook een verkleining van de doorsnede gaat zijn. De coëfficiënt van Poisson bij beton wordt gelijk genomen aan 0.25 [27].

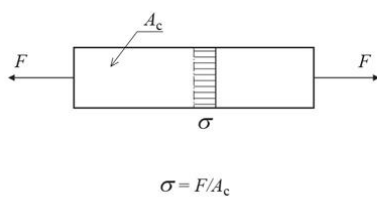


Figuur 32: Poisson effect [27, p. 28]

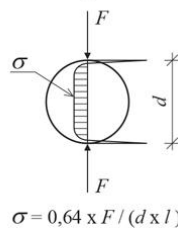
Deze trekkracht, veroorzaakt door de samendrukking van de cilinder, zorgt ervoor dat deze laatste uiteindelijk faalt. De cilinder dient gecentreerd in het toestel geplaatst te zijn wanneer de eerste kracht wordt aangebracht. Dit kan door middel van een mal of met behulp van tijdelijke ondersteuning. Nadat de eerste kracht aangebracht is, dient er een constante spanning aangebracht te worden op het proefstuk. Deze spanning dient te liggen tussen de 0.04 MPa/s en de 0.06 MPa/s en wordt uitgeoefend tot het proefstuk faalt [28].

Figuur 33 toont de krachtsverdeling in de verschillende proefstukken. Bij een zuivere trekproef zal er in de gehele doorsnede een rechtlijnig verloop zijn van de spanningscurve. Bij de splijttreksterkteproef treedt de spanning centraal in het proefstuk op waar de belasting wordt uitgeoefend. Bij de buigtrekproef zal er van boven druk plaatsvinden waardoor er door buiging van onder trek ontstaat.

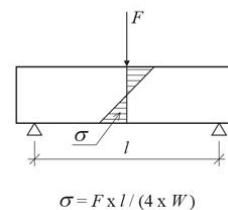
Schematische weergave van de beproeving van



Zuivere treksterkte



Splijttreksterkte

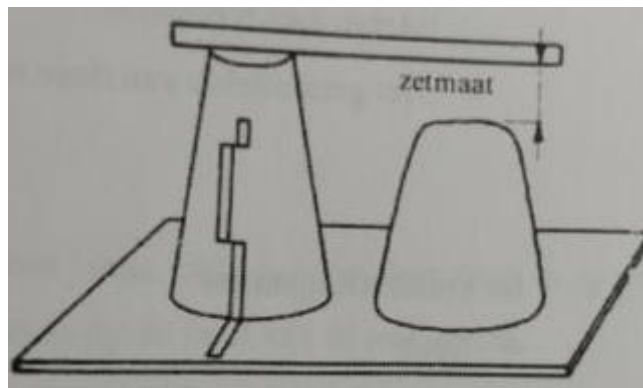


Buigtreksterkte

Figuur 33: Krachtsverdeling in proefstukken [29, p. 1]

#### 2.9.4 Zetmaat

De zetmaat is een proef waarmee men de vloeibaarheid van de betonspecie wenst te bepalen. Dit doet men door de zakking te bepalen van de proefspecie na het omhoogtrekken van de standaardkegel waarin de proefspecie zich bevindt, zoals weergegeven in Figuur 34. Hoe groter de zakking, hoe groter de zetmaat, des te vloeibaarder de betonspecie. De standaardkegel wordt ook de kegel van Abrams genoemd en heeft onderaan een diameter van  $200 \pm 2$  mm en bovenaan een diameter van  $100 \pm 2$  mm gemeten aan de binnenzijde van de kegel. De hoogte van de kegel is gewoonlijk  $300 \pm 2$  mm [30]. Bij het uitvoeren van de proef is het belangrijk dat deze niet wordt uitgevoerd op een wateropzuigende grond, want anders zou het mengsel water verliezen. Het vullen van de kegel met de betonspecie wordt in 3 gelijke delen gedaan waarbij telkens  $1/3$  van het kegelvolume wordt bijgevoegd. Na ieder deel wordt er ongeveer 10 keer met een staaf in gestoken zodat het mengsel verdicht wordt. Wanneer de kegel helemaal gevuld is, wordt de bovenkant afgestreeken zodat er een nauwkeurigere meting kan plaatsvinden. Men laat de volle kegel 30 seconden rusten waarna men de kegel verwijdert en de zakking wordt opgemeten [31].

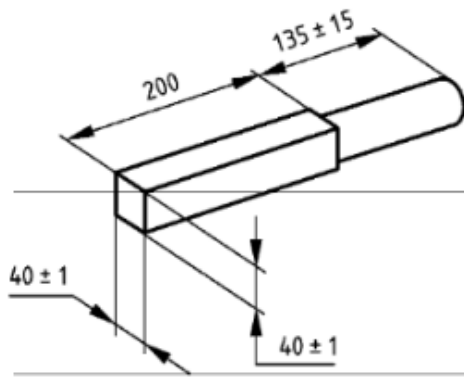


Figuur 34: Meting resultaat zetmaat [31, p. 110]

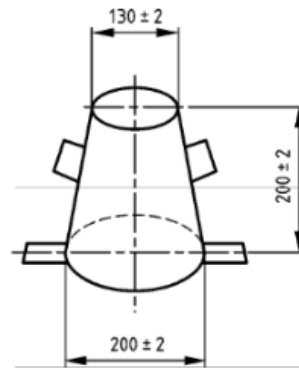
#### 2.9.5 Schudmaat

De schudmaat is een proef die de consistentie van vers beton bepaalt. Dit gebeurt door het meten van de spreiding van beton op een vlakke plaat die onderhevig is aan schudkrachten. Het beton wordt in een kegel geplaatst op de tafel waarbij de kegel op dezelfde manier gevuld wordt als bij de zetmaat. Figuur 35 geeft de aanstampstaaf weer voor het verdichten van het mengsel in de kegel. Figuur 36 toont de geometrie van de kegelvormige mal, terwijl Figuur 37 de opstelling van de schudtafel weergeeft. Na 30 seconden mag de kegel verwijderd worden en dienen er 15 schokken plaats te vinden. Dit gebeurt telkens met een tussentijd van 1 tot 3 seconden. Na de schokken dient de diameter van het beton gemeten te worden in de twee richtingen parallel aan de zijdes van de tafel, zoals weergegeven in Figuur 38. De schudmaat wordt dan gegeven door het gemiddelde te berekenen van de twee diameters.

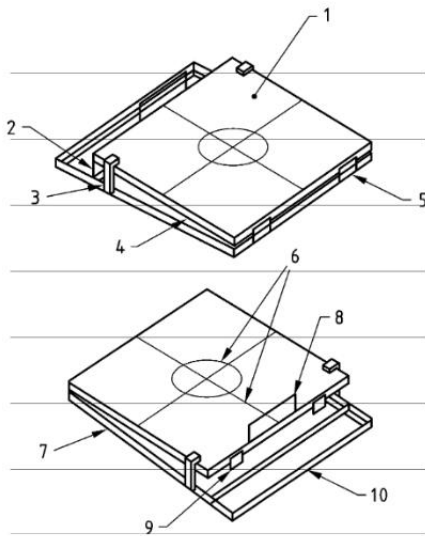
De kegel heeft als afmetingen een bovendiameter van  $130 \pm 2$  mm en een onderdiameter van  $200 \pm 2$  mm gemeten aan de binnenkant van de kegel, terwijl de hoogte van de kegel gelijk is aan  $200 \pm 2$  mm. De tafel heeft een oppervlakte van  $700 \pm 2$  mm x  $700 \pm 2$  mm. De tafel heeft een glad metalen oppervlak met een minimale dikte van 2 mm. Het metaal van de tafel mag niet aangetast worden door de cementpasta en mag niet gevoelig zijn voor corrosie. De tafel heeft ook een kruis in het midden waarvan de lijnen evenwijdig met de zijden dienen te lopen. Hiernaast dient er ook centraal een cirkel aanwezig te zijn met een diameter van  $210 \pm 1$  mm. De valhoogte van de tafel mag maximaal  $40 \pm 1$  mm zijn door middel van 1 of meer schokken. De aanstampstaaf is gemaakt uit hard materiaal en heeft een vierkante zijde van  $40 \pm 1$  mm, een lengte van 200 mm en een cilindervormig handvat met een lengte van 120 tot 150 mm [32].



Figuur 35: Aanstampstaaf [32, p. 8]

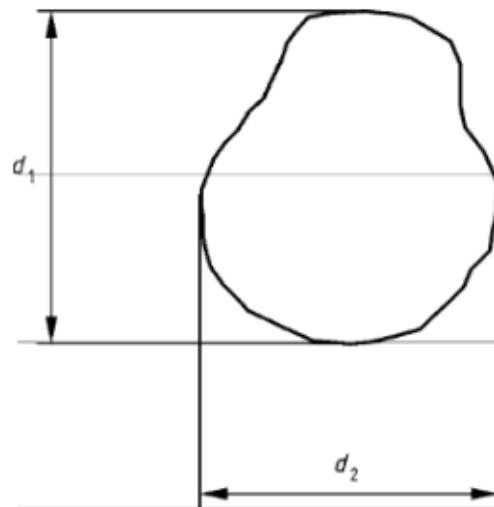


Figuur 36: Kegelvormige mal [32, p. 8]



- 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     |

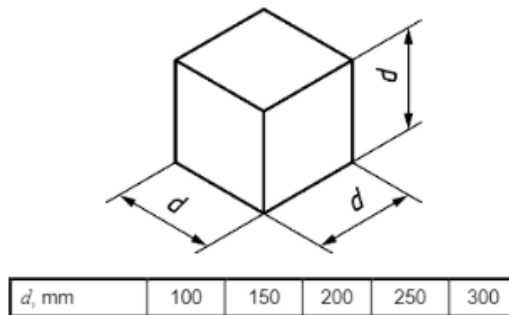
Figuur 37: Schudtafel [32, p. 7]



Figuur 38: Meting resultaat schudmaat [32, p. 9]

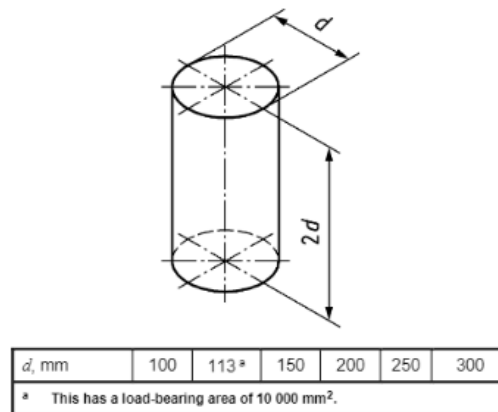
### 2.9.6 Proefstukken

Kubusvormige proefstukken dienen aan de eisen van eurocode NBN EN 12390-1 (2012) te voldoen zoals weergegeven in Figuur 39. De kubussen die gebruikt worden voor dit onderzoek zullen kubussen zijn met zijde  $d = 150 \text{ mm}$  [33].



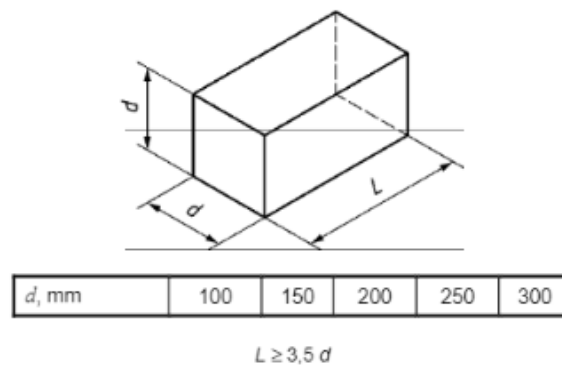
Figuur 39: Kubus drukproef [33, p. 6]

Cilindervormige proefstukken dienen te voldoen aan de eisen van eurocode NBN EN 12390-1 (2012). De mogelijke afmetingen van de cilinders zijn weergegeven in Figuur 40. De cilinders die voor dit onderzoek gebruikt zullen worden hebben als diameter  $d = 150 \text{ mm}$  en als hoogte  $2d = 300 \text{ mm}$  [33].



Figuur 40: Cilinder splijttrekproef [33, p. 7]

Prismavormige proefstukken moeten voldoen aan de eisen van eurocode NBN EN 12390-1 (2012). De mogelijke afmetingen van de prisma's zijn weergegeven in Figuur 41. De in dit onderzoek gebruikte prisma's hebben als zijde  $d = 100 \text{ mm}$  en als lengte  $L = 500 \text{ mm}$  [33].



Figuur 41: Prisma 4-puntsbuigproef [33, p. 8]





## 3. Praktijk

### 3.1 Benodigde hoeveelheid nanotubes

Voor het nanovezelbeton gemaakt kan worden, is het nodig de hoeveelheid nanotubes te berekenen om deze te kunnen bestellen en verdelen in het beton. Er worden 4 reeksen nanovezelbeton gemaakt, waarbij iedere reeks bestaat uit 10 cilinders, 10 kubussen en 10 prisma's. Er wordt een reeks gemaakt met 0%, 0.05%, 0.07% en 0.1% nanotubes van het gewicht van het cement. Doordat de volumes van de verschillende proefstukken verschillen, moet men de benodigde hoeveelheden per proefstuk bepalen.

#### 3.1.1 Kubussen

De benodigde hoeveelheid nanotubes om 10 kubussen per reeks te kunnen maken, kan bepaald worden met het benodigde betonvolume:

$$0,15\text{m} \cdot 0,15\text{m} \cdot 0,15\text{m} = 0,003375 \text{ m}^3 \text{ per kubus}$$

$$0,003375\text{m} \cdot 10 = 0,03375 \text{ m}^3$$

Het gewicht van het benodigde beton wordt als volgt bepaald:

$$0,03375 \text{ m}^3 \cdot 2380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 80,325 \text{ kg}$$

Hiernaast is het gewicht van het cement ook nodig aangezien men het percentage nanotubes ten opzichte van het cementgewicht wil berekenen. Dit vindt men als volgt:

$$\frac{350 \text{ kg}}{2380 \text{ kg}} = 0,147059$$

$$0,147059 \cdot 80,325 \text{ kg} = 11,812 \text{ kg}$$

Hiermee kan het gewicht van de benodigde CNT's bepaald worden, voor kubusreeksen met 0,05%, 0,07% en 0,10% nanotubes van het cementgewicht:

$$0,05\% \cdot 11,812 \text{ kg} = 5,91 \text{ g}$$

$$0,07\% \cdot 11,812 \text{ kg} = 8,27 \text{ g}$$

$$0,1\% \cdot 11,812 \text{ kg} = 11,81 \text{ g}$$

#### 3.1.2 Cilinders

De benodigde hoeveelheid nanotubes om 10 cilinders per reeks te kunnen maken, kan bepaald worden met het benodigde betonvolume:

$$\pi \cdot 0,075^2 \cdot 0,30 = 0,00530143 \text{ m}^3 \text{ per cilinder}$$

$$0,00530143\text{m} \cdot 10 = 0,0530143 \text{ m}^3$$

Het gewicht van het benodigde beton wordt als volgt bepaald:

$$0,0530143 \text{ m}^3 \cdot 2380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 126,174 \text{ kg}$$

Hiernaast is het gewicht van het cement ook nodig aangezien men het percentage nanotubes ten opzichte van het cementgewicht wil berekenen. Dit vindt men als volgt:

$$\frac{350 \text{ kg}}{2380 \text{ kg}} = 0,147059$$

$$0,147059 \cdot 126,174 \text{ kg} = 18,56 \text{ kg}$$

Hiermee kan het gewicht van de benodigde CNT's bepaald worden, voor cilinderreeksen met 0,05%, 0,07% en 0,10% nanotubes van het cementgewicht:

$$0,05\% \cdot 18,56 \text{ kg} = 9,28 \text{ g}$$

$$0,07\% \cdot 18,56 \text{ kg} = 12,99 \text{ g}$$

$$0,1\% \cdot 18,56 \text{ kg} = 18,56 \text{ g}$$

### 3.1.3 Prisma's

De benodigde hoeveelheid nanotubes om 10 prisma's per reeks te kunnen maken, kan bepaald worden met het benodigde betonvolume:

$$0,10\text{m} \cdot 0,10\text{m} \cdot 0,50\text{m} = 0,005 \text{ m}^3 \text{ per prisma}$$

$$0,016875\text{m} \cdot 10 = 0,05 \text{ m}^3$$

Het gewicht van het benodigde beton wordt als volgt bepaald:

$$0,05 \text{ m}^3 \cdot 2380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 119 \text{ kg}$$

Hiernaast is het gewicht van het cement ook nodig aangezien men het percentage nanotubes ten opzichte van het cementgewicht wil berekenen. Dit vindt men als volgt:

$$\frac{350 \text{ kg}}{2380 \text{ kg}} = 0,147059$$

$$0,147059 \cdot 119 \text{ kg} = 17,5 \text{ kg}$$

Hiermee kan het gewicht van de benodigde CNT's bepaald worden, voor prismareeksen met 0,05%, 0,07% en 0,10% nanotubes van het cementgewicht:

$$0,05\% \cdot 17,5 \text{ kg} = 8,75 \text{ g}$$

$$0,07\% \cdot 17,5 \text{ kg} = 12,25 \text{ g}$$

$$0,1\% \cdot 17,5 \text{ kg} = 17,5 \text{ g}$$

## 3.2 Betonrecept

Voor het maken van de kubussen, cilinders en prisma's, is er gebruik gemaakt van het betonrecept weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Betonrecept voor 1m<sup>3</sup> beton

CEM I 52.5N	350 kg
Algemene mix zand en grind 0-16mm	1820 kg
W/C-factor 0.6	210 l
Totaal	2380 kg/m <sup>3</sup>

### 3.3 Aanmaak proefstukken

#### 3.3.1 Benodigde hoeveelheid grondstoffen

De theoretisch benodigde hoeveelheid beton voor 40 kubussen, 40 cilinders en 40 prisma's, is gelijk aan 0.547056m<sup>3</sup>. Dit komt neer op de hoeveelheden weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Theoretisch benodigde hoeveelheid grondstoffen

CEM I 52.5N	191.6 kg
Algemene mix zand en grind 0-16mm	996 kg
W/C-factor 0.6	114,96 l
Totaal	1302,56 kg

Per Reeks (10 kubussen, 10 cilinders en 10 prisma's), is er in totaal 0.136764m<sup>3</sup> beton nodig. Door de verliezen die tijdens het proces optreden, bijvoorbeeld beton dat in de mixer blijft hangen, wordt er per reeks 0,145m<sup>3</sup> beton gemaakt. Doordat de benodigde hoeveelheid beton niet in 1 keer in de mixer past, worden er per reeks 3 porties beton gemaakt. Het is belangrijk dat de mixer niet te vol wordt gedaan doordat deze anders niet goed meer zou mengen en dan zou er geen homogeen beton verkregen worden. Naast verliezen, moet er ook rekening gehouden worden met de vochtigheidsgraad van de aggregaten. Om de vochtigheidsgraad van de aggregaten te vinden, werd er 5kg van de aggregaatmix in een schaal gedaan voor deze in de verwarmingsoven werd gezet. Deze verwarmingsoven is te zien in Figuur 42 en Figuur 43.



Figuur 42: Foto verwarmingsoven



Figuur 43: Foto binnenkant verwarmingsoven

Nadat de aggregaatmix gedroogd was in de oven, werd het gewicht ervan opnieuw bepaald. Het gewicht na het drogen bedroeg nog 4.96kg. Dit betekent dat 0.8% van het gewicht van de aggregaten water is:

$$\left(1 - \frac{4,96}{5}\right) \cdot 100 = 0,8\%$$

Het gewicht van het water dat aanwezig is in 264,1kg aggregaten, is gelijk aan:

$$0.8 \cdot \frac{264,1}{100} = 2,11kg$$

Nu moet er dus 2,11 kg aggregaten meer toegevoegd worden, en 2,11 liter water minder. De praktisch benodigde hoeveelheden per reeks die in het labo zijn gebruikt bij de aanmaak van het nanovezelbeton, zijn weergegeven in Tabel 6 - Tabel 9.

Tabel 6: Praktisch benodigde hoeveelheden voor reeks 0.05%

CEM I 52.5N	50,75 kg
Algemene mix zand en grind 0-16mm	$(264,1 + 2,11) \text{ kg} = 266,21 \text{ kg}$
Water	$(17,73 - 2,11) \text{ l} = 15,62 \text{ l}$
Rhenofit	12,72 l

Tabel 7: Praktisch benodigde hoeveelheden voor reeks 0.07%

CEM I 52.5N	50,75 kg
Algemene mix zand en grind 0-16mm	$(264,1 + 2,11) \text{ kg} = 266,21 \text{ kg}$
Water	$(12,43 - 2,11) \text{ l} = 10,32 \text{ l}$
Rhenofit	18,03 l

Tabel 8: Praktisch benodigde hoeveelheden voor reeks 0.10%

CEM I 52.5N	50,75 kg
Algemene mix zand en grind 0-16mm	$(264,1 + 2,11) \text{ kg} = 266,21 \text{ kg}$
Water	$(5,00 - 2,11) \text{ l} = 2,89 \text{ l}$
Rhenofit	25,45 l

Tabel 9: Praktisch benodigde hoeveelheden voor referentiebeton

CEM I 52.5N	50,75 kg
Algemene mix zand en grind 0-16mm	$(264,1 + 2,11) \text{ kg} = 266,21 \text{ kg}$
Water	$(30,45 \text{ l} - 2,11) \text{ l} = 28,34 \text{ l}$

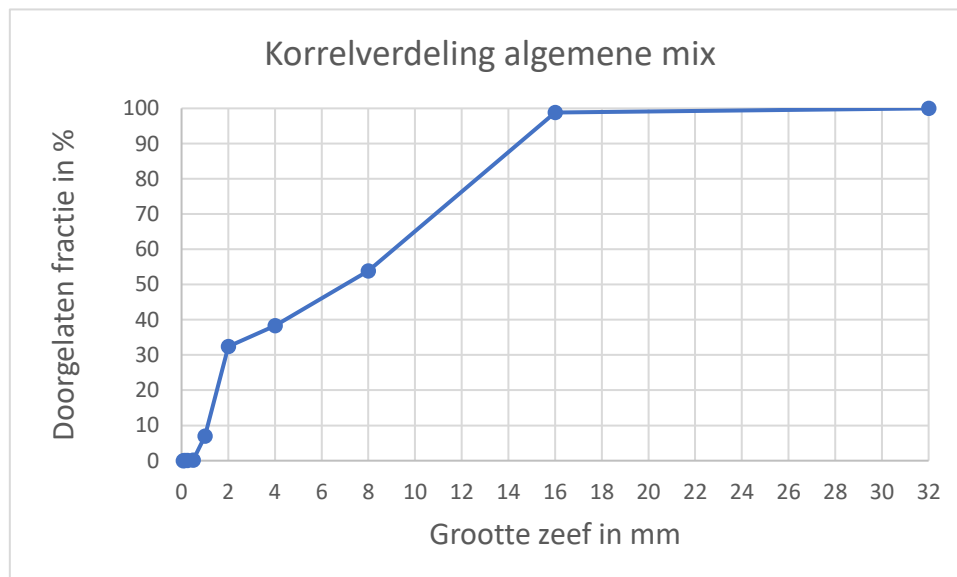
### 3.3.2 Zeefproef

Tijdens de proeven is er gewerkt met een algemene mix van zand en grind. Op deze mix is een zeefproef uitgevoerd om de korrelverdeling zichtbaar te maken. Hierbij is er 14,921 kg van de mix in de zeefpannen gedaan. Aan de hand van de hoeveelheden die op de zeefpannen bleven liggen, kan de korrelverdeling bepaald worden. De resultaten van de zeefproef worden weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Resultaten zeefproef

Korrelgrootte (mm)	Hoeveelheid (kg)	Percentage
>16	0.182	1.22
8-16	6.709	44.96
4-8	2.313	15.50
2-4	0.888	5.95
1-2	3.795	25.43
0.5-1	1.011	6.78
0.25-0.5	0.019	0.13
0.125-0.25	0.003	0.02
0.063-0.125	0.001	0.01
Totaal	14,921	100

De korrelverdeling van de mix kan weergegeven worden volgens Figuur 44.



Figuur 44: Korrelverdeling algemene mix

### 3.3.3 Aanmaak nanovezelbeton

De nanotubes zijn geleverd in tonnen van 25 liter zoals te zien is in Figuur 45 en Figuur 46. Hieruit zijn, na even te roeren om de homogeniteit te bevorderen, de juiste hoeveelheden gehaald om het beton aan te maken.



*Figuur 45: Geleverde tonnen(25 liter) rhenofitmengsel*



*Figuur 46: Rhenofitmengsel*

De hoeveelheden van de aggregaten, het cement en het water zijn emmer per emmer afgewogen en bij elkaar gezet per portie. Dit is te zien in Figuur 47 en Figuur 48.



*Figuur 47: Hoeveelheden 1 portie referentiebeton*



*Figuur 48: Hoeveelheden 1 portie 0.10% nanovezelbeton*



Hierna zijn alle grondstoffen samengevoegd in de betonmixer van Figuur 49 en Figuur 50. Hierbij is eerst het rhenofitmengsel in de mixer gedaan, waarna het water, de aggregaten en het cement in deze volgorde werden toegevoegd. Het is belangrijk dat het rhenofitmengsel eerst werd toegevoegd en daarna pas het water. De reden hiervoor is dat de homogeniteit van het mengsel in het gedrang komt wanneer we het rhenofitmengsel in het water gieten. Het rhenofitmengsel wordt geleidelijk vermengd met het water zodat er geen agglomeratie van de nanotubes zal optreden. Het nanovezelbeton werd minimaal 15 minuten in de mixer gedraaid, totdat het mengsel er goed gemengd uitzag.



*Figuur 49: Betonmolen*



*Figuur 50: Legen van betonmolen*

### 3.3.4 Vullen van de mallen

Nadat het nanovezelbeton gemengd was in de mixer, werd de betonspecie in de mallen van Figuur 51 en Figuur 52 gedaan. De mallen zijn bewerkt met een ontkistingsolie zodat de proefstukken makkelijk uit de mallen kunnen komen na het uitharden en zodat deze niet beschadigd zouden worden bij het ontkisten. Hierna werden de gevulde mallen getrild op de triltafel van in Figuur 53 en Figuur 54.



*Figuur 51: Gevulde mallen prisma's en kubussen (0.07% nanovezelbeton)*



*Figuur 52: Gevulde mallen cilinders (0.07% nanovezelbeton)*





*Figuur 53: Triltafel*



*Figuur 54: Triltafel in werking*

### 3.3.5 Consistentie

#### 3.3.5.1 Schudmaat

Bij de schudmaatproef is de consistentie van de betonspecie getest zoals besproken in 2.9.5. De gebruikte kegel had een bovendiameter gelijk aan 13cm en een onderdiameter gelijk aan 20.5cm. De opstelling en de resultaten van de schudmaatproef voor het referentiebeton en voor het 0.10% nanovezelbeton zijn weergegeven in Figuur 55 tot en met Figuur 60.



*Figuur 55: Opstelling schudmaatproef referentiebeton*



*Figuur 56: Schudmaatkegel gevuld met referentiebeton*



*Figuur 57: Resultaat schudmaatproef referentiebeton*



*Figuur 58: Schudmaatkegel gevuld met 0.10% nanovezelbeton*



*Figuur 59: 0.10% nanovezelkegel voor het uitvoeren van de schudmaatproef*



*Figuur 60: 0.10% nanovezelkegel na het uitvoeren van de schudmaatproef*

De resulterende diameters na deze proef worden weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11: Resultaten zetmaat

Nanotubepercentage	0%	0.05%	0.07%	0.1%
Diameter 1	59cm	27cm	25cm	23cm
Diameter 2	49cm	26cm	25cm	22cm

Er is te zien dat de consistentie van de betonspecie stijver wordt naarmate het nanotubepercentage stijgt. De consistentie van het referentiebeton is zeer vloeibaar en kan zijn vorm niet behouden terwijl de vorm van het nanovezelbeton met 0.10% nanovezels bijna niet verandert.

### 3.3.5.2 Zetmaat

Via de zetmaatproef is er ook getracht de consistentie van de betonspecie te testen, zoals weergegeven in Figuur 61 tot en met Figuur 63.



Figuur 61: Proefopstelling kegel van Abraham



Figuur 62: Resultaat zetmaatproef met referentiebeton



Figuur 63: Resultaat zetmaatproef met 0.10% nanovezelbeton

De resulterende hoogtes van deze proef zijn weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Resultaten zetmaatproef

Nanobuispercentage	0%	0.05%	0.07%	0.1%
Beginhoogte	30.5cm	30.5cm	30.5cm	30.5cm
Eindhoogte na 2 min.	10cm	30.5cm	30.5cm	30.5cm

Door de stijve structuur van de betonspecie is deze proef niet geschikt, want de hoogte bleef, bij de verschillende percentages, na 2 minuten wachten gelijk aan de beginhoogte.



### 3.3.6 Ontkisten

Twee dagen na de aanmaak van de proefstukken, werden deze uit de mallen gehaald. Hierbij werd er gebruik gemaakt van luchtdruk om via een gat onderaan de mal, de proefstukken uit de mallen te blazen. Hierdoor worden de mallen niet beschadigd en kunnen ze opnieuw gebruikt worden in de toekomst, dit is te zien in Figuur 64.



*Figuur 64: Lege mallen na ontkisten*

De proefstukken na 2 dagen zagen eruit zoals in Figuur 65 en Figuur 66.



*Figuur 65: Proefstukken referentiebeton na ontkisten*



*Figuur 66: Proefstukken 0.10% nanovezelbeton na ontkisten*

### 3.3.7 Uitharden proefstukken

Na het ontkisten, werden de proefstukken in een waterbak opgeslagen zoals in Figuur 67 en Figuur 68. De temperatuur van de waterbak was gelijk aan de kamertemperatuur. De proefstukken konden 35 dagen uitharden in de waterbak voordat ze eruit gehaald werden om te testen.



*Figuur 67: Gevulde waterbak*

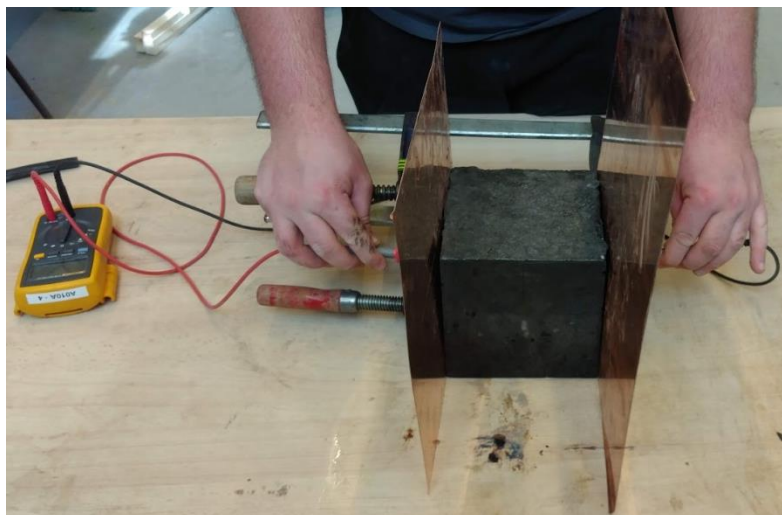


*Figuur 68: Proefstukken in de waterbak (rechts referentiebeton, links 0.10% nanovezelbeton)*

## 3.4 Uitvoering van de testen

### 3.4.1 Meting elektrische weerstand betonnen kubussen

Nadat de proefstukken zijn uitgeharden in het beton, worden de kubussen getest op hun elektrische weerstand. Deze weerstand wordt gemeten om een idee te krijgen van de dispersie van de nanotubes in het beton. Door de goede geleidbaarheid van de nanotubes, zou de elektrische weerstand van beton lager moeten worden bij een hoger percentage nanotubes. Om ervoor te zorgen dat de stroom doorheen het hele oppervlak van de kubus gaat, wordt er gebruik gemaakt van 2 koperen platen die door middel van sergeanten tegen de kubus gedrukt worden. Met een normale multimeter kan men de weerstand meten door de elektroden tegen de koperen platen te houden. Deze proefopstelling is weergegeven in Figuur 69.



*Figuur 69: Proefopstelling elektrische weerstand*

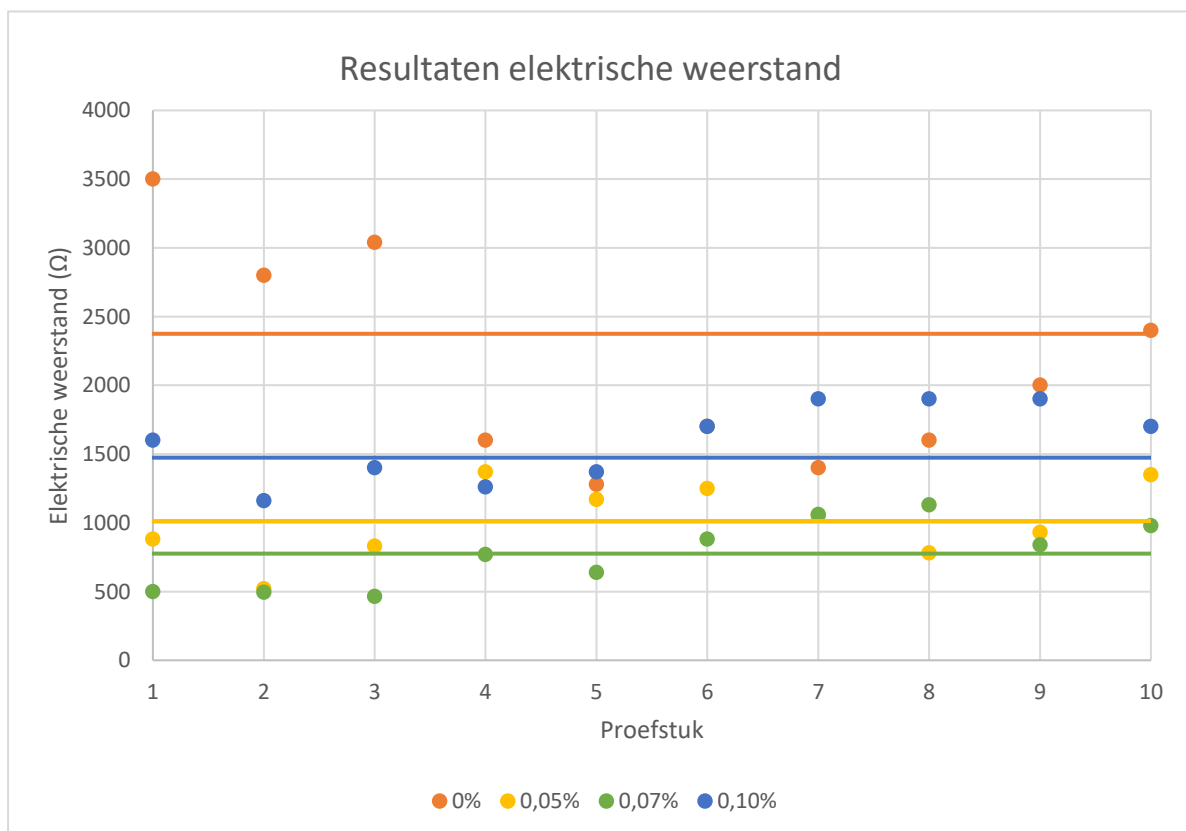
De resultaten van deze proef worden weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13: Resultaten elektrische weerstand betonnen kubussen

Proefstuk	0% ( $\Omega$ )	0.05% ( $\Omega$ )	0.07% ( $\Omega$ )	0.10% ( $\Omega$ )
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
<b>Gemiddeld</b>	<b>2375</b>	<b>1013</b>	<b>776</b>	<b>1474</b>

Er is te zien dat het referentiebeton een grotere weerstand heeft dan het vezelbeton. Dit was te verwachten door de geleidende eigenschappen van de nanotubes. De gebruikte proefopstelling om de elektrische weerstand te meten was echter niet heel nauwkeurig doordat er kleine luchtinsluitels waren tussen de koperen plaat en de betonkubus. Bij 0.10% is er echter een stijging te zien, dit kan komen door de stijvere structuur van het betonmengsel dat minder goed verdicht kon worden. Hierdoor waren er meerdere luchtinsluitels, waardoor de elektrische weerstand omhoog gaat. De elektrische weerstand is nog altijd aanzienlijk lager dan bij het referentiebeton, dus de nanotubes zitten goed verdeeld in het beton.

Figuur 70 geeft een visuele voorstelling van de spreiding van de elektrische weerstand voor het beton met verschillende percentages.



Figuur 70: Resultaten elektrische weerstand



### 3.4.2 Uitvoering drukproef

Na het meten van de elektrische weerstand van het beton, kon overgegaan worden tot de druktesten zelf. Hier werd de kubus in een drukproeftoestel geplaatst van Servo Plus Evolution. De kubus werd hierin aangebracht en de kopplaat ging omlaag om een druk uit te oefenen die steeg met 20kN per seconde. Het verloop van de drukproeven is weergegeven in Figuur 71-Figuur 73.



Figuur 71: Beginopstelling drukproef



Figuur 72: Einde drukproef



Figuur 73: Kubussen na het testen

De resultaten van de drukproeven zijn weergegeven in Tabel 14. Bij proefstuk nummer 7 met 0,07% nanotubes brak er in het begin van de proef een stuk af waardoor deze waarde niet representatief is. Deze waarde zal dus niet worden opgenomen in de analyse van de resultaten.

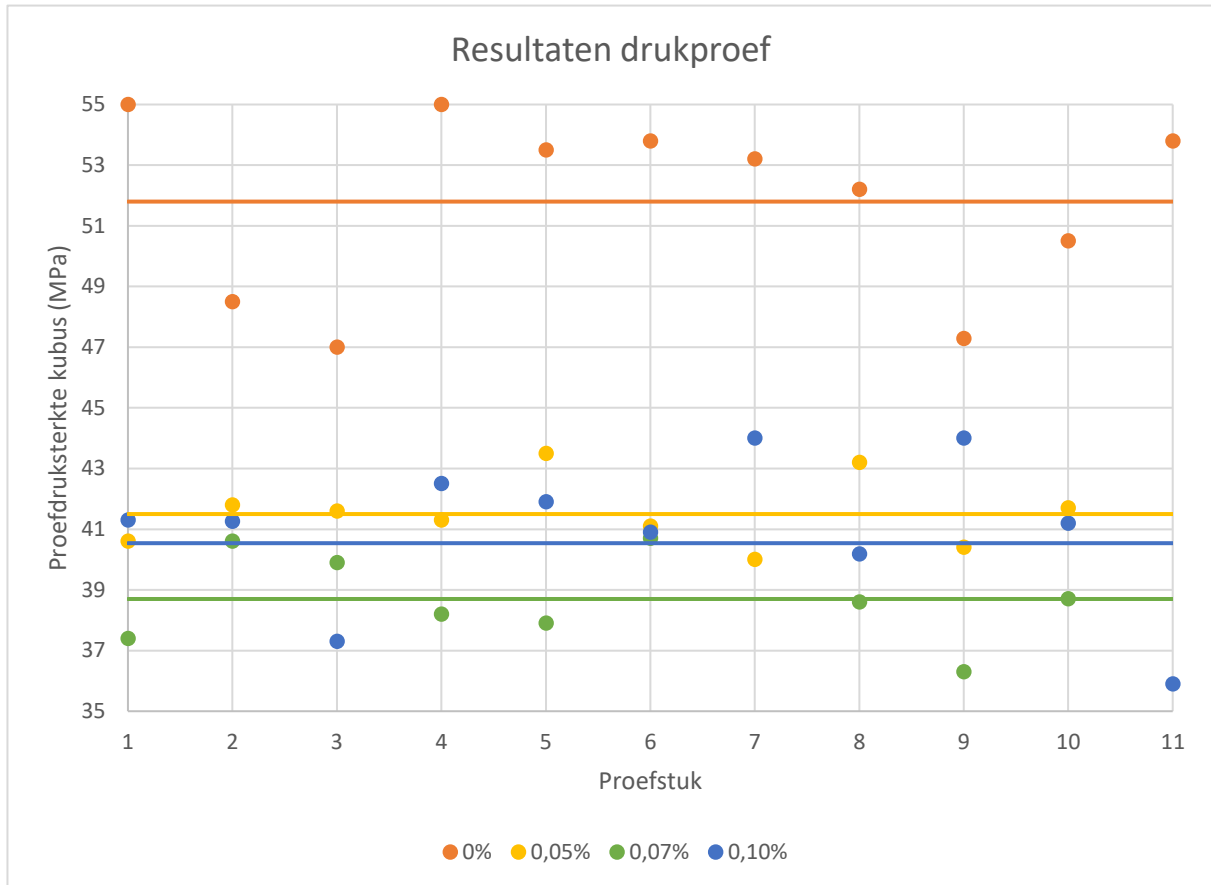
Tabel 14: Resultaten drukproef

Proefstuk	0% (MPa)	0.05% (MPa)	0.07% (MPa)	0.10% (MPa)
1	55	40,6	37,4	41,3
2	48,5	41,8	40,6	41,26
3	47	41,6	39,9	37,3
4	55	41,3	38,2	42,5
5	53,5	43,5	37,9	41,9
6	53,8	41,1	40,7	40,9
7	53,2	40,0	21,8	44
8	52,2	43,2	38,6	40,18
9	47,28	40,4	36,3	44
10	50,5	41,7	38,7	41,2
11	53,8	-	-	35,9
12	-	-	-	36
<b>Gemiddeld</b>	51,80	41,5	38,7(zonder 7)	40,54
<b>Standaardafwijking (% t.o.v. gemiddelde)</b>	3.34 (6.45%)	1.13 (2.72%)	1.46 (3.77%)	3.24 (7.99%)

Deze resultaten wijken af van de literatuur, waar een lichte stijging van de druksterkte waargenomen werd. Uit de resultaten blijkt, bij deze samenstelling van het beton, dat het nanotubemengsel de druksterkte aanzienlijk doet verminderen. Tussen de druksterkte van de verschillende percentages is er geen patroon te vinden doordat 0.05% een hogere druksterkte heeft dan 0.10%, maar 0.07% heeft een lagere druksterkte dan 0.10%. De druksterkte van het beton is omgekeerd evenredig met de W/C-factor, wat betekent dat minstens 1 van deze 2 factoren negatief beïnvloed wordt. De druksterkte neemt af wanneer het watergehalte stijgt, uit de consistentieproeven blijkt dat het vezelbeton veel stijver is en dus geen hoger watergehalte heeft. De druksterkte neemt ook af wanneer er minder

cement kan reageren. Het is mogelijk dat het dispersiemiddel het hydratatieproces hindert, waardoor niet al het cement gereageerd heeft met water en de druksterkte dus afneemt doordat er ongereageerd cement achterblijft. Het zou ook mogelijk kunnen zijn dat het dispersiemiddel een filmlaag vormt rond de aggregaten waardoor er minder samenhang is en de kubussen makkelijker breken.

Figuur 74 geeft een visuele voorstelling van de spreiding van de resultaten van de drukproeven voor beton met verschillende percentages.



Figuur 74: Resultaten drukproef

### 3.4.3 Uitvoering Splijttreksterkteproeven (Braziliaanse proef)

Bij de splijttreksterkteproeven werden de cilinders in hetzelfde toestel geplaatst als bij de drukproeven. Hier werden de bovenste rondvormige drukschijven vervangen door langere rechthoekige platen om over de gehele lengte van de cilinder te kunnen drukken. De cilinder werd dan in de machine aangebracht, waarbij er een houten latje met een dichtheid groter dan  $900\text{kg/m}^3$ , een dikte van  $(3\pm 1)$  mm en een breedte van  $(15\pm 1)$  mm tussen de cilinder en de platen aangebracht werd. Dan ging de bovenste plaat omlaag om een druk uit te oefenen die steeg met  $5\text{kN}$  per seconde. Het verloop van de splijttreksterkteproeven is weergegeven in Figuur 75-Figuur 77.



Figuur 75: Beginopstelling splijttreksterkteproef



Figuur 76: Einde splijttreksterkteproef



Figuur 77: Cilinders na het testen

De resultaten van de splijttreksterkteproeven zijn weergegeven in Tabel 15. Bij proefstuk nummer 1 met 0,05% nanotubes, spleet de cilinder niet open doordat de bovenste belastingsplaat niet helemaal recht hing. Hierdoor werd er meer druk uitgeoefend op 1 kant van de cilinder waardoor deze maar aan 1 kant brak. Deze niet-gespleten cilinder is linksonder in de kruiwagen van Figuur 77 te zien. Deze waarde is niet representatief en dus zal deze waarde niet worden opgenomen in de analyse van de resultaten.

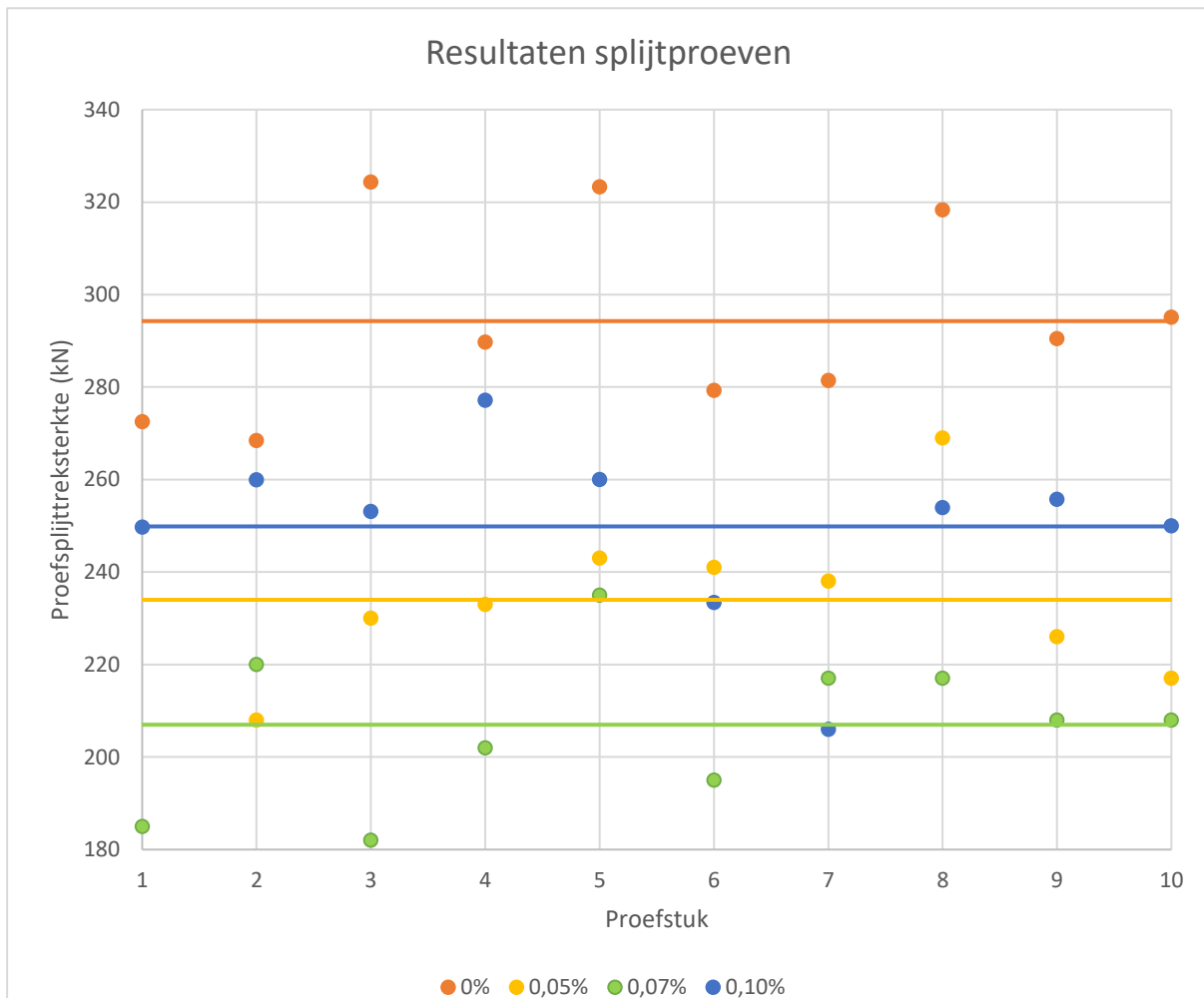
Tabel 15: Resultaten splijttreksterkteproef

Proefstuk	0% (kN)	0.05% (kN)	0.07% (kN)	0.10% (kN)
1	272,5	153	185	249,7
2	268,4	208	220	259,9
3	324,3	230	182	253,1
4	289,7	233	202	277,1
5	323,3	243	235	260
6	279,3	241	195	233,4
7	281,4	238	217	206
8	318,3	269	217	253,9
9	290,5	226	208	255,7
10	295,1	217	208	250
<b>Gemiddeld</b>	294,28	234	207	249,88
<b>Standaardafwijking (% t.o.v. gemiddelde)</b>	20.7 (7.03%)	17.4 (7.44%)	16.4 (7.92%)	20 (8.0%)



Uit de resultaten blijkt dat, bij deze samenstelling van het vezelbeton, de slijttreksterkte lager is dan deze van het referentiebeton bij een maximaal nanotubepercentage van 0.10wt% t.o.v. het cementgewicht. Uit de resultaten blijkt dat de slijttreksterkte bij 0.10% groter is dan deze bij 0.05% en 0.07%, maar nog steeds kleiner dan bij het referentiebeton. Dit zou erop kunnen wijzen dat door toevoeging van een grotere hoeveelheid nanotubes, een verbetering van de slijttreksterkte zou kunnen optreden.

Figuur 78 geeft een visuele voorstelling van de spreiding van de resultaten van de slijtproeven voor beton met verschillende percentages.



Figuur 78: Resultaten slijtproeven

### 3.4.4 Uitvoering 4-puntsbuigproeven

Bij de 4-puntsbuigproeven werd er telkens een prisma op 2 steunpunten gelegd, waarbij er geleidelijk aan een kracht werd uitgeoefend op het prisma. Het verloop van de 4-puntsbuigproeven is weergegeven in Figuur 79-Figuur 81.



Figuur 79: Beginopstelling 4-puntsbuigproef

Figuur 80: Einde 4-puntsbuigproef

Figuur 81: Prisma's na het testen

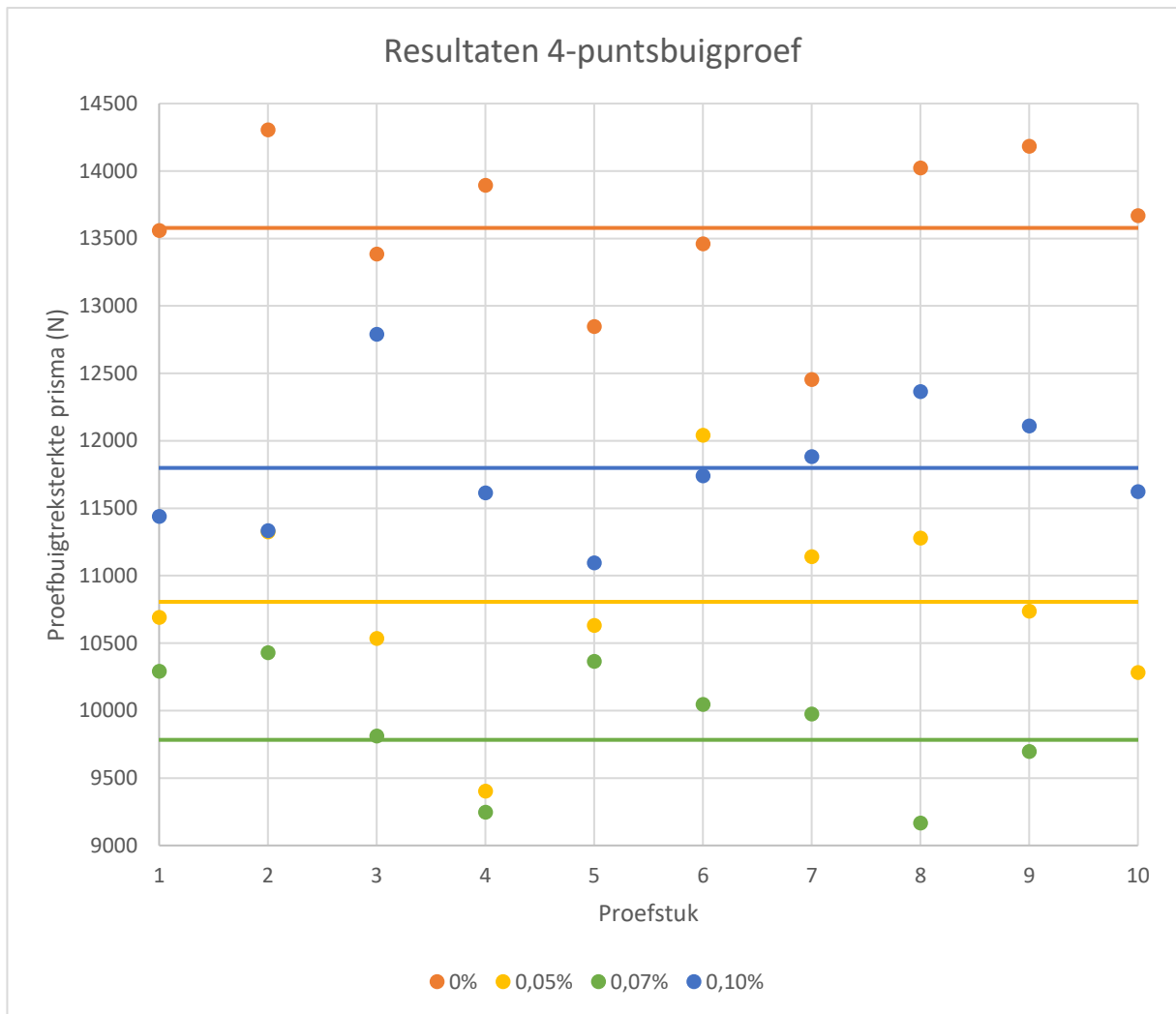
De resultaten van de 4-puntsbuigproeven zijn weergegeven in Tabel 16.

Tabel 16: Resultaten 4-puntsbuigproeven

Proefstuk	0% (N)	0.05% (N)	0.07% (N)	0.10% (N)
1	13559	10690	10292	11439
2	14304	11325	10428	11333
3	13385	10534	9812	12789
4	13895	9402	9246	11614
5	12846	10630	10365	11095
6	13461	12040	10045	11740
7	12454	11140	9974	11882
8	14022	11278	9167	12365
9	14184	10737	9696	12110
10	13668	10281	8802	11624
<b>Gemiddeld</b>	13578	10806	9783	11799
<b>Standaardafwijking (% t.o.v. gemiddelde)</b>	582 (4.29%)	707 (6.54%)	554 (5.66%)	507 (4.30%)

Uit de resultaten blijkt dat, bij deze samenstelling van het vezelbeton, de buigtreksterkte lager is dan deze van het referentiebeton bij een maximaal nanotubepercentage van 0.10wt% t.o.v. het cementgewicht. Uit de resultaten blijkt hetzelfde als bij de slijttreksterkte, namelijk dat de buigtreksterkte bij 0.10% groter is dan deze bij 0.05% en 0.07%, maar nog steeds kleiner dan bij het referentiebeton. Dit zou erop kunnen wijzen dat door toevoeging van een grotere hoeveelheid nanotubes, een verbetering van de buigtreksterkte zou kunnen optreden.

Figuur 82 geeft een visuele voorstelling van de spreiding van de resultaten van de 4-puntsbuigproeven voor beton met verschillende percentages.



Figuur 82: Resultaten 4-puntsbuigproef

## 3.5 Berekeningen

### 3.5.1 Berekening druksterkte referentiebeton

Om de druksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de drukproef gebruikt. Uit deze resultaten wordt de betonklasse bepaald en dus ook de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$ . De druksterkte die op de kubussen gemeten werd tijdens de proeven, wordt voorgesteld door  $f_{c,cub150}$ .

De gemiddelde druksterkte van het beton kan gevonden worden door Formule (1) in te vullen:

$$f_{cm} = \frac{55 + 48.5 + 47 + 55 + 53.5 + 53.8 + 53.2 + 52.2 + 47.28 + 50.5 + 53.8}{11} = 51,79 \text{ MPa}$$

Met behulp van de gemiddelde druksterkte kan de karakteristieke druksterkte van het beton gevonden worden door Formule (2):

$$f_{ck} = 51,79 - 1,48 \cdot 3,34 = 46,85 \text{ MPa}$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(55-40.54)^2+(48.5-40.54)^2+(47-40.54)^2+(55-40.54)^2+(53.5-40.54)^2+(53.8-40.54)^2+(53.2-40.54)^2+(52.2-40.54)^2+(47.28-40.54)^2+(50.5-40.54)^2+(53.8-40.54)^2}{11-1}} = 3,34 \text{ MPa}$$

De representatieve betondruksterkte wordt gevonden door Formule (4):

$$f_{fcrep} = 0,85 \cdot 46,85 = 39,82 \text{ MPa}$$

### 3.5.2 Berekening druksterkte 0.05% nanovezelbeton

Om de druksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de drukproef gebruikt. Uit deze resultaten wordt de betonklasse bepaald en dus ook de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$ . De druksterkte die op de kubussen gemeten werd tijdens de proeven, wordt voorgesteld door  $f_{c,cub150}$ .

De gemiddelde druksterkte van het beton kan gevonden worden door Formule (1) in te vullen:

$$f_{cm} = \frac{40,6 + 41,75 + 41,6 + 41,3 + 43,5 + 41,1 + 39,96 + 43,17 + 40,42 + 41,67}{10} = 41,5 \text{ MPa}$$

Met behulp van de gemiddelde druksterkte kan de karakteristieke druksterkte van het beton gevonden worden door Formule (2):

$$f_{ck} = 41,5 - 1,48 \cdot 1,13 = 39,83 \text{ MPa}$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(40,6-41.5)^2+(41,75-41.5)^2+(41,6-41.5)^2+(41,3-41.5)^2+(43,5-41.5)^2+(41,1-41.5)^2+(39,96-41.5)^2+(43,17-41.5)^2+(40,42-41.5)^2+(41,67-41.5)^2}{10-1}} = 1,13 \text{ MPa}$$

De representatieve betondruksterkte wordt gevonden door Formule (4):

$$f_{fcrep} = 0,85 \cdot 39,83 = 33,85 \text{ MPa}$$

### 3.5.3 Berekening druksterkte 0,07% nanovezelbeton

Om de druksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de drukproef gebruikt. Uit deze resultaten wordt de betonklasse bepaald en dus ook de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$ . De druksterkte die op de kubussen gemeten werd tijdens de proeven, wordt voorgesteld door  $f_{c,cub150}$ .

De gemiddelde druksterkte van het beton kan gevonden worden door Formule (1) in te vullen:

$$f_{cm} = \frac{37,35+40,57+39,87+38,2+37,85+40,66+38,58+36,33+38,66}{9} = 38,7 MPa$$

Met behulp van de gemiddelde druksterkte kan de karakteristieke druksterkte van het beton gevonden worden door Formule (2):

$$f_{ck} = 38,7 - 1,48 \cdot 1,46 = 36,54 MPa$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(37,35-38,7)^2+(40,57-38,7)^2+(39,87-38,7)^2+(38,2-38,7)^2+(37,85-38,7)^2+(40,66-38,7)^2+(38,58-38,7)^2+(36,33-38,7)^2+(38,66-38,7)^2}{9-1}} = 1,46 MPa$$

De representatieve betondruksterkte wordt gevonden door Formule (4):

$$f_{fcrep} = 0,85 * 36,54 = 31,06 MPa$$

### 3.5.4 Berekening druksterkte 0,10% nanovezelbeton

Om de druksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de drukproef gebruikt. Uit deze resultaten wordt de betonklasse bepaald en dus ook de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$ . De druksterkte die op de kubussen gemeten werd tijdens de proeven, wordt voorgesteld door  $f_{c,cub150}$ .

De gemiddelde druksterkte van het beton kan gevonden worden door Formule (1) in te vullen:

$$f_{cm} = \frac{41,3+41,26+37,3+42,5+41,9+40,9+44+40,18+44+41,2+35,9+36}{12} = 40,54 MPa$$

Met behulp van de gemiddelde druksterkte kan de karakteristieke druksterkte van het beton gevonden worden door Formule (2):

$$f_{ck} = 40,54 - 1,48 \cdot 3,24 = 35,74 MPa$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(41,3-40,54)^2+(41,26-40,54)^2+(37,3-40,54)^2+(42,5-40,54)^2+(41,9-40,54)^2+(40,9-40,54)^2+(44-40,54)^2+(40,18-40,54)^2+(44-40,54)^2+(41,2-40,54)^2+(35,9-40,54)^2+(36-40,54)^2}{12-1}} = 3,24 MPa$$

De representatieve betondruksterkte wordt gevonden door Formule (4):

$$f_{fcrep} = 0,85 * 35,74 = 30,38 MPa$$

### 3.5.5 Berekening slijttreksterkte referentiebeton

Om de slijttreksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de slijttrekproef gebruikt.

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$f_m = \frac{272,5+268,4+324,3+289,7+323,3+279,3+281,4+318,3+290,5+295,1}{10} = 294,28 \text{ kN}$$

Met behulp van de gemiddelde uitgeoefende kracht, kan de karakteristieke uitgeoefende kracht op het beton gevonden worden. Wanneer Formule (33) ingevuld wordt, bekomt men:

$$f_k = 294,28 - 1,48 * 20,7 = 263,644 \text{ kN}$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(272,5-294,28)^2+(268,4-294,28)^2+(324,3-294,28)^2+(289,7-294,28)^2+(323,3-294,28)^2+(279,3-294,28)^2+(281,4-294,28)^2+(318,3-294,28)^2+(290,5-294,28)^2+(295,1-294,28)^2}{9}} = 20,7 \text{ kN}$$

De formule voor de slijttreksterkte vindt men via Formule (38):

$$f_{ct} = \frac{2 * 263\ 644}{\pi * 150 * 300} = 3,73 \frac{N}{mm^2} = \mathbf{3,73 \text{ MPa}}$$

### 3.5.6 Berekening slijttreksterkte 0.05% nanovezelbeton

Om de slijttreksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de slijttrekproef gebruikt.

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$f_m = \frac{208+230+233+243+241+238+269+226+217}{9} = 233,89 \text{ kN}$$

Met behulp van de gemiddelde uitgeoefende kracht, kan de karakteristieke uitgeoefende kracht op het beton gevonden worden. Wanneer Formule (33) ingevuld wordt, bekomt men:

$$f_k = 233,9 - 1,48 * 17,4 = 208,148 \text{ kN}$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(208-233,89)^2+(230-233,89)^2+(233-233,89)^2+(243-233,89)^2+(241-233,89)^2+(238-233,89)^2+(269-233,89)^2+(226-233,89)^2+(217-233,89)^2}{8}} = 17,4 \text{ kN}$$

De formule voor de slijttreksterkte vindt men via Formule (38):

$$f_{ct} = \frac{2 * 208\ 148}{\pi * 150 * 300} = 2,94 \frac{N}{mm^2} = \mathbf{2,94 \text{ MPa}}$$

### 3.5.7 Berekening slijptreksterkte 0,07% nanovezelbeton

Om de slijptreksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de slijptrekproef gebruikt.

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$f_m = \frac{185+220+182+202+235+195+217+217+208+208}{10} = 206,9 \text{ kN}$$

Met behulp van de gemiddelde uitgeoefende kracht, kan de karakteristieke uitgeoefende kracht op het beton gevonden worden. Wanneer Formule (33) ingevuld wordt, bekomt men:

$$f_k = 206,9 - 1,48 * 16,4 = 182,628 \text{ kN}$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(185 - 206,9)^2 + (220 - 206,9)^2 + (182 - 206,9)^2 + (202 - 206,9)^2 + (235 - 206,9)^2 + (195 - 206,9)^2 + (217 - 206,9)^2 + (217 - 206,9)^2 + (208 - 206,9)^2 + (208 - 206,9)^2}{9}} = 16,4 \text{ kN}$$

De formule voor de slijptreksterkte vindt men via Formule (38):

$$f_{ct} = \frac{2 * 182\,628}{\pi * 150 * 300} = 2,58 \frac{N}{mm^2} = \mathbf{2,58 \text{ MPa}}$$

### 3.5.8 Berekening slijptreksterkte 0,10% nanovezelbeton

Om de slijptreksterkte van het nanovezelversterkt beton te bepalen, worden de resultaten van de slijptrekproef gebruikt.

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$f_m = \frac{249,7+259,9+253,1+277,1+260+233,4+206+253,9+255,7+250}{10} = 249,98 \text{ kN}$$

Met behulp van de gemiddelde uitgeoefende kracht, kan de karakteristieke uitgeoefende kracht op het beton gevonden worden. Wanneer Formule (33) ingevuld wordt, bekomt men:

$$f_k = 249,98 - 1,48 * 20 = 220,38 \text{ kN}$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking. Deze kan berekend worden met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(249,7-249,98)^2+(259,9-249,98)^2+(253,1-249,98)^2+(277,1-249,98)^2+(260-249,98)^2+(233,4-249,98)^2+(206-249,98)^2+(253,9-249,98)^2+(255,7-249,98)^2+(250-249,98)^2}{9}} = 20 \text{ kN}$$

De formule voor de slijptreksterkte vindt men via Formule (38):

$$f_{ct} = \frac{2 * 220\,380}{\pi * 150 * 300} = 3,12 \frac{N}{mm^2} = \mathbf{3,12 \text{ MPa}}$$

### 3.5.9 Berekening buigtreksterkte referentiebeton

$f_{ct,L}^f$  kan bekomen worden met Formule (34):

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_r \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot 12\,717 \cdot 500}{2 \cdot 150 \cdot 150^2} = \mathbf{2,83\,MPa}$$

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$F_m = \frac{13559+14304+13385+13895+12846+13461+12454+14022+14184+13668}{10} = 13578\,N$$

Via Formule (37) bekomt men:

$$F_{r,k} = 13578 - 1,48 \cdot 582 = 12\,717\,N$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking die berekend wordt met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(13559-13578)^2+(14304-13578)^2+(13385-13578)^2+(13895-13578)^2+(12846-13578)^2+(13461-13578)^2+(12454-13578)^2+(14022-13578)^2+(14184-13578)^2+(13668-13578)^2}{9}} = 582\,N$$

### 3.5.10 Berekening buigtreksterkte 0,05% nanovezelbeton

$f_{ct,L}^f$  kan bekomen worden met Formule (34):

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_r \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot 9\,760 \cdot 500}{2 \cdot 150 \cdot 150^2} = \mathbf{2,17\,MPa}$$

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$F_m = \frac{10690+11325+10534+9402+10630+12040+11140+11278+10737+10281}{10} = 10\,806\,N$$

Via Formule (37) bekomt men:

$$F_{r,k} = 10\,806 - 1,48 \cdot 707 = 9\,760\,N$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking die berekend wordt met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(10690-10806)^2+(11325-10806)^2+(10534-10806)^2+(9402-10806)^2+(10630-10806)^2+(12040-10806)^2+(11140-10806)^2+(11278-10806)^2+(10737-10806)^2+(10281-10806)^2}{9}} = 707\,N$$



### 3.5.11 Berekening buigtreksterkte 0,07% nanovezelbeton

$f_{ct,L}^f$  kan bekomen worden met Formule (34):

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_r \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot 8963 \cdot 500}{2 \cdot 150 \cdot 150^2} = \mathbf{1,99 MPa}$$

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$F_m = \frac{10292+10428+9812+9246+10365+10045+9974+9167+9696+8802}{10} = 9782,7 N$$

Via Formule (37) bekomt men:

$$F_{r,k} = 9782,7 - 1,48 \cdot 553,53 = 8963 N$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking die berekend wordt met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(10292 - 9782,7)^2 + (10428 - 9782,7)^2 + (9812 - 9782,7)^2 + (9246 - 9782,7)^2 + (10365 - 9782,7)^2 + (10045 - 9782,7)^2 + (9974 - 9782,7)^2 + (9167 - 9782,7)^2 + (9696 - 9782,7)^2 + (8802 - 9782,7)^2}{10}} = 553,53 N$$

### 3.5.12 Berekening buigtreksterkte 0,10% nanovezelbeton

$f_{ct,L}^f$  kan bekomen worden met Formule (34):

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_r \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot 11\,049 \cdot 500}{2 \cdot 150 \cdot 150^2} = \mathbf{2,46 MPa}$$

De gemiddelde uitgeoefende kracht op het beton kan gevonden worden met Formule (36):

$$F_m = \frac{11439+11333+12789+11614+11095+11740+11882+12365+12110+11624}{10} = 11799 N$$

Via Formule (37) bekomt men:

$$F_{r,k} = 11799 - 1,48 \cdot 507 = 11\,049 N$$

Hierbij is  $s$  de standaardafwijking die berekend wordt met Formule (3):

$$s = \sqrt{\frac{(11439-11799)^2+(11333-11799)^2+(12789-11799)^2+(11614-11799)^2+(11095-11799)^2+(11740-11799)^2+(11882-11799)^2+(12365-11799)^2+(12110-11799)^2+(11624-11799)^2}{9}} = 507 N$$

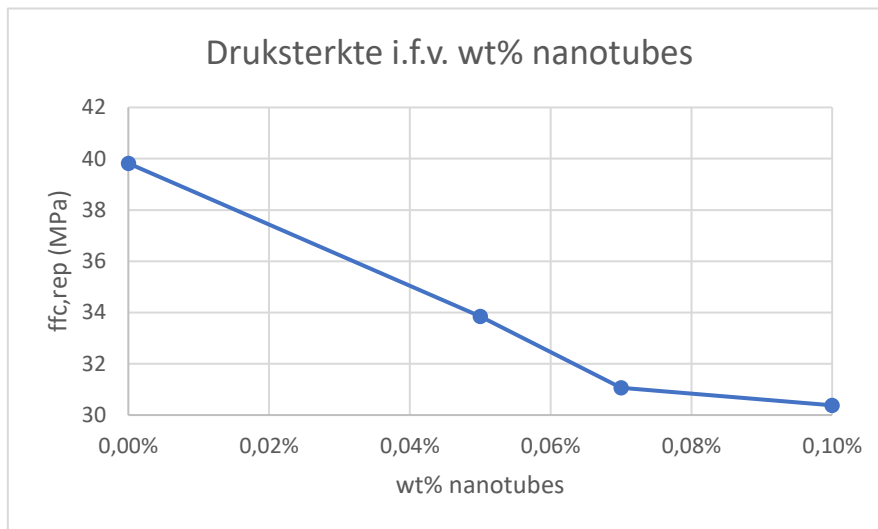
### 3.5.13 Resultaten berekeningen

In Tabel 17 worden de resultaten van de berekeningen in het kort weergegeven.

Tabel 17: Samenvatting resultaten berekeningen

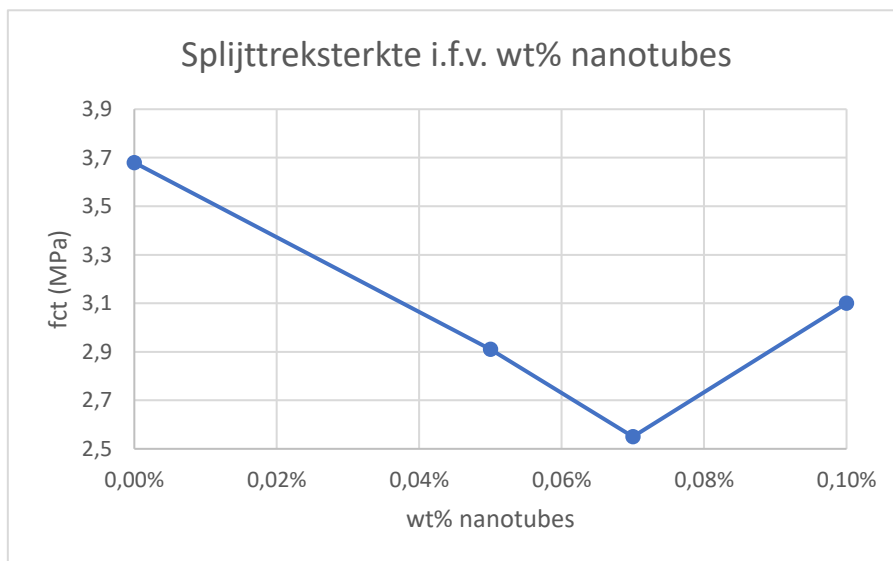
	0,0%	0,05%	0,07%	0,10%
$f_{fc,rep}$ (MPa)	39,82	33,85	31,06	30,38
$f_{ct}$ (MPa)	3,68	2,91	2,55	3,1
$f_{ct,L}^f$ (MPa)	2,83	2,17	1,99	2,46

Figuur 83 toont de relatie tussen de druksterkte en het percentage nanotubes ten opzichte van het cementgewicht.



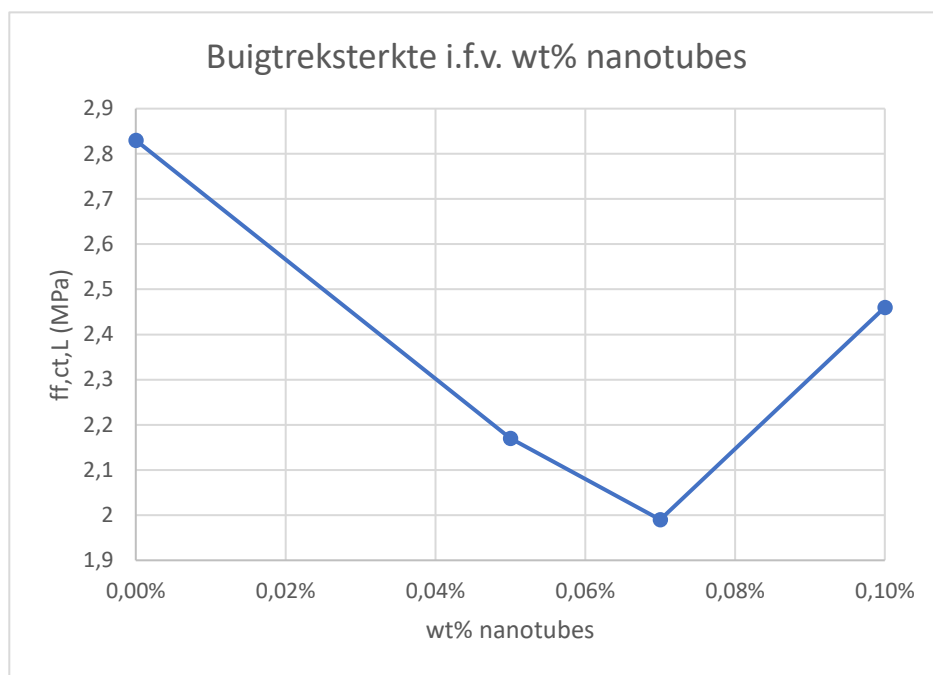
Figuur 83: Druksterkte i.f.v. wt% nanotubes

Figuur 84 toont de relatie tussen de splijttreksterkte en het percentage nanotubes ten opzichte van het cementgewicht.



Figuur 84: Splijttreksterkte i.f.v. wt% nanotubes

Figuur 85 toont de relatie tussen de slijttreksterkte en het percentage nanotubes ten opzichte van het cementgewicht.



Figuur 85: Buigtreksterkte i.f.v. wt% nanotubes

## 4. Besluit

Er kan besloten worden dat de resultaten afwijken van de literatuur. Uit de resultaten blijkt, bij deze samenstelling van het beton, dat het nanotubemengsel bij een concentratie van 10 wt% bij alle proeven minder sterk is dan het referentiebeton. In de literatuur werd er immers een verbetering van de verschillende eigenschappen aangegeven. Er is dus verder onderzoek nodig doordat er niet geweten is wat de oorzaak van de slechtere eigenschappen is. De druksterkte is omgekeerd evenredig met de W/C-factor, wat betekent dat 1 van deze 2 factoren de oorzaak kan zijn voor de lagere druksterkte. Doordat de consistentie veel stijver was bij het nanovezelversterkt beton, kan besloten worden dat de druksterkte niet negatief beïnvloed werd door een teveel aan water. Deze proeven moeten in de toekomst herhaald worden, waarna er een petrografisch onderzoek moet gebeuren om te kijken of er een film wordt gevormd en of er ongereageerd cement voorkomt, want dit zou de sterkte verlagen. Doordat dit afhankelijk is van het dispersiemiddel, kunnen er ook proeven gedaan worden met verschillende dispersiemiddelen om te kijken wat het effect ervan is op de sterkte van het beton. Doordat er bij de buig- en slijttreksterkte een stijging waar is te nemen volgens een toenemend nanotubepercentage, moet er ook onderzoek worden gedaan met een grotere concentratie aan nanotubes.



## Bibliografie

- [1] M. W. & S. Jonas, „Berekenen van elementen in vezelversterkt,” KHBO, Oostende, 2009.
- [2] „TUBALL OCSiAl SWCNT's for global industry,” *Brochure*, p. 44, 2018.
- [3] F. Daneshvar, „Carbon nanotube/metal corrosion issues for nanotube coatings and inclusions in a matrix,” 3 november 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1812.03815>. [Geopend 03 maart 2019].
- [4] M. Enotiades, „TUBALL™ OVERVIEW,” Luxembourg, 2018.
- [5] E. C. B. E. C. B. C. F. B. Bruno Ribeiro, „Carbon nanotube buckypaper reinforced polymer composites: a review,” Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brazilië, 2016.
- [6] „Product catalog June 2018,” vol. 2018, nr. Juni, p. 39, 2018.
- [7] R. Kostecki, „NEXT GENERATION ANODES FOR LI-ION BATTERIES,” 2016. [Online]. Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/es262\\_kostecki\\_2016\\_o\\_web.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/es262_kostecki_2016_o_web.pdf). [Geopend 3 maart 2019].
- [8] N. Cusatis, „Defining Tensile Strength, Elongation, and Modulus for Rubber and Cast Polyurethane Materials,” 25 maart 2016. [Online]. Available: <https://molddimensions.com/blog/defining-tensile-strength-elongation-and-modulus-for-rubber-and-cast-polyurethane-materials/>. [Geopend 03 maart 2019].
- [9] J. Luis Fraga, J. M. del Campo en J. Á. García, „Carbon Nanotube-Cement Composites in the Construction Industry: 1952-2014. A State of the Art Review,” 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Londen, 2014.
- [10] N. Quoc, Y. Toshishige, S. Makoto en Y. Y. Cary, „Structural and Electrical Characterization of Carbon Nanofibers for Interconnect Via Applications,” IEEE Transactions on Nanotechnology, 2007.
- [11] F. Faezeh en A. Ashraf, „STRUCTURAL BEHAVIOUR OF FIBER REINFORCED STEEL CONCRETE COMPOSITE WALLS,” City University London, London, UK, 2015.
- [12] M. d. B. B. V. T. K. R. H. O. S. R. K. Maarten van Luffelen, „Beton,” Fontys Hogescholen, Tilburg, 2015.
- [13] „portlandcement,” 2016. [Online]. Available: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/portlandcement.shtml>. [Geopend 04 12 2018].
- [14] „Vezelbeton,” Joostdevree, 2016. [Online]. Available: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/vezelbeton.shtml>. [Geopend 01 12 2018].
- [15] W. J. F. T. I. Y. W. G. L. Y. L. F. X. Weiwen Li, „Nano-Silica Sol-Gel and Carbon Nanotube Coupling,” MDPI, China, 2017.
- [16] M. Kohl, „Lanxess,” [Online]. Available: <http://cnt.ext.lanxess.com/wp-content/uploads/sites/7/2017/09/Rhenofit-CNT-Introduction.pdf>. [Geopend 1 maart 2019].

- [17] „Lanxess,” 31 maart 2017. [Online]. Available: [http://cnt.ext.lanxess.com/wp-content/uploads/sites/7/2017/09/TDS-Rhenofit\\_CNT-3\\_EN\\_v2.pdf](http://cnt.ext.lanxess.com/wp-content/uploads/sites/7/2017/09/TDS-Rhenofit_CNT-3_EN_v2.pdf). [Geopend 28 februari 2019].
- [18] S. Schaerlaekens en J. Vyncke, „STAALVEZELBETON,” *WTCB tijdschrift*, vol. 2000, nr. 4, p. 12, 2000.
- [19] A. v. d. Bos, „Constructieonderdelen beoordeeld op hun,” *Cement: Rekenen aan staalvezelbeton*, p. 6, 2011.
- [20] „Staalvezelbeton bedrijfsvloeren op palen - Dimensionering en uitvoering,” *CUR Bouw en infra*, p. 24, 2007.
- [21] WTCB, „Beoordeling van beton in situ bij geschillen,” *WTCB-Dossiers*, vol. 2008, nr. 4, p. 4, 2008.
- [22] M. Hermans, „pure.tue,” 2011. [Online]. Available: <https://pure.tue.nl/ws/files/47006651/711248-3.pdf>. [Geopend 03 12 2018].
- [23] NBN, „NBN bureau voor normalisatie,” [Online]. Available: <https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=nl&dtype=concrete&doc=12390-6.pdf>. [Geopend 15 11 2018].
- [24] A. Media, „Beton Lexicon hét woordenboek voor de betonwereld,” [Online]. Available: <http://betonlexicon.nl/D/Drukproef/>. [Geopend 20 Februari 2019].
- [25] „NBN bureau voor normalisatie,” Mei 2015. [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/538129?l=N> . [Geopend 20 Februari 2019].
- [26] „NBN Beproeving van verhard beton- Deel 5 : Buigsterkte van proefstukken,” april 2009. [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/324149?l=E>. [Geopend 20 februari 2019].
- [27] K. Henriouille, „Sterkteleer 1 - Theorie,” p. 94, 2017.
- [28] „NBN Splijttreksterkte van proefstukken,” februari 2010. [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/341054?l=E>. [Geopend 20 februari 2019].
- [29] A. Media. [Online]. Available: <http://betonlexicon.nl/T/Treksterkte/>. [Geopend 20 februari 2019].
- [30] „NBN bureau voor normalisatie,” februari 2010. [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/341054?l=E>. [Geopend 20 februari 2019].
- [31] „Bouwmaterialen: Betontechnologie,” p. 234, 2017.
- [32] „NBN Beproeving van betonspecie- Deel 5: schudmaat,” mei 2009. [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/327022?l=E>. [Geopend 22 februari 2019].

[33] „NBN bureau voor normalisatie,” april 2001. [Online]. Available:  
<https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/ro/466992?l=E> . [Geopend 20 februari  
2019].