

2013•2014  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: bouwkunde*

## Masterproef

Buigtreksterkte van ultra hoge sterkte beton met synthetische vezels

Promotor :  
ir. Jan GOFFA

Copromotor :  
dr. ing. Bram VANDOREN

Promotor :  
ir. NIKI CAUBERG

Jonas Claes , Tom Hoydongs

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

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2013•2014  
Faculteit Industriële  
ingenieurswetenschappen  
*master in de industriële wetenschappen: bouwkunde*

## Masterproef

Buigtreksterkte van ultra hoge sterkte beton met  
synthetische vezels

Promotor :  
ir. Jan GOFFA

Copromotor :  
dr. ing. Bram VANDOREN

Promotor :  
ir. NIKI CAUBERG

Jonas Claes , Tom Hoydongs

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

## **Voorwoord**

Voor de totstandkoming van deze masterproef zouden wij graag enkele personen in het bijzonder willen bedanken.

In de eerste plaats willen wij het WTCB bedanken voor het aanleveren van de nodige materialen. In het bijzonder ir. Cauberg N. voor zijn rol als promotor bij het opvolgen van dit eindwerk.

Daarnaast willen wij ook onze oprechte dank betuigen aan onze interne promotoren. Namelijk dr. ing. Vandoren B. en ir. Goffa J. voor hun vrijgemaakte tijd om zo deze thesis te kunnen voltooien. Hun raadgevingen, adviezen en eerlijke feedback zijn een grote hulp geweest.

Tot slot zijn wij de Universiteit Hasselt dankbaar voor het ter beschikking stellen van het labo en ing. Steensels R. voor zijn hulp tijdens het uitvoeren van de labo's.



## **Abstract Nederlands**

Deze studie onderzoekt de mogelijkheid om staalvezels te vervangen door synthetische/organische vezels in ultra hoge sterkte beton. Hierbij wordt gestreefd naar een samenstelling waarbij de mechanische eigenschappen niet verminderen. De reden om de vezels te vervangen is de toepassing van architectonisch beton. Zo is er een groter aanbod van kleuren bij de synthetische vezels. Verder voorkomen deze vezels een oppervlakteverkleuring door het optreden van roestvorming en kwetsuren of schade door mogelijke uitstekende staalvezels.

Allereerst zal er een vezelselectie uitgevoerd worden door een vergelijking te maken van de specifieke voor- en nadelen van verschillende vezelsoorten. Vervolgens kan de vezelwerking beproefd worden door gebruik te maken van één vaste referentiesamenstelling, waarin de vezels worden toegevoegd. Van deze mengsels worden na veertien dagen de druksterkte en de buigsterkte bepaald a.d.h.v. een drukproef en een driepuntbuigproef. Uiteindelijk worden de resultaten beoordeeld en vergeleken volgens de CUR-Aanbeveling 36 en het Technical Report No. 63 (Concrete Society).

Uit de vezelselectie blijkt dat polypropyleen- en polyvinylalcoholvezels de beste mechanische eigenschappen vertonen. De beste resultaten werden bekomen bij een samenstelling van twee procent PP-vezels en één procent PVA-vezels. Hierbij werd er een gelijk buigspanningsverloop bekomen bij grotere doorbuigingen, maar bij kleinere doorbuigingen blijken de vezels niet efficiënt genoeg, waardoor de maximale buigsterkte niet volledig wordt geëvenaard.



## **Abstract English**

This study investigates the possibility of replacing steel fibers with synthetic/organic fibers in ultra high strength concrete. The goal is to achieve a composition that does not reduce the mechanical properties. The application of architectural concrete is the reason for replacing the fibers. Firstly there is a greater range of colours in the synthetic fibers. Furthermore, these fibers will prevent both surface discolouration when corrosion occurs and possible injury or damage by steel fibers which could stick out.

First of all, a fiber selection will be carried out by comparing the specific advantages and disadvantages of the different fiber types. Subsequently, the fiber performance can be tested by using a reference composition, in which the fibers are added. The compressive strength and the flexural strength of these mixtures can be determined after fourteen days by utilising a pressure test and a three-point bending test. Finally the results are evaluated and compared according to CUR Recommendation 36 and the Technical Report No. 63 (Concrete Society).

Polypropylene and polyvinyl alcohol fibers are found to have the best mechanical properties. In an ultra high performance mixture were the best results obtained by using a composition consisting of two-percent PP-fibers and one percent PVA-fibers. These results show an equal bending stress gradient when deflections are larger. However at smaller deflections, the fibers are not efficient enough and the maximum bending strength is not fully matched.



# Inhoudsopgave

Voorwoord .....	1
Abstract Nederlands.....	3
Abstract English .....	5
Lijst van afkortingen en symbolen .....	9
Lijst van figuren .....	11
Lijst van tabellen .....	15
1. Inleiding.....	17
1.1 Doelstellingen .....	18
2. Literatuurstudie.....	19
2.1 Geschiedenis en achtergrond .....	19
2.1.1 Ontwikkeling van UHSB.....	19
2.1.2 Soorten UHSB.....	19
2.1.3 Huidige normen en voorschriften UHSB.....	20
2.2 Materiaal en microstructuur .....	20
2.2.1 Principe samenstelling UHSB .....	21
2.2.2 Typische samenstelling UHSB .....	23
2.2.3 Bestanddelen UHSB.....	24
2.3 Vezelselectie.....	30
2.3.1 Vezeltypes .....	31
2.3.2 Eindconclusie .....	39
2.4 Referentiesamenstelling .....	40
3. Beoordelingscriteria .....	43
3.1 Druksterkte .....	43
3.1.1 Gedrag UHSB onder drukspanning.....	44
3.1.2 Voorspelling druksterkte .....	45
3.2 Buigproef .....	45
3.2.1 Gedrag UHSB onder buiging .....	46
3.2.2 Voorspelling buigsterkte.....	50
3.2.3 Breukenergie .....	50
3.2.4 NBN EN 14651 .....	51
3.2.5 Technical Report No. 63 .....	51
3.2.6 CUR-Aanbeveling 36.....	54
3.3 Verwerking resultaten.....	55

4.	Resultaten .....	57
4.1	Opmerkingen labo's .....	57
4.2	Druksterkte .....	59
4.3	Buigtreksterkte .....	61
4.3.1	Referentiesamenstelling .....	61
4.3.2	Samenstelling met PP-vezels .....	64
4.3.3	Samenstelling met PVA-vezels .....	70
4.3.4	Hybride samenstelling overwegend PVA-vezels .....	76
4.3.5	Hybride samenstelling overwegend PP-vezels .....	81
4.4	Globale vergelijking .....	85
4.5	Conclusie van de resultaten .....	90
5.	Conclusie en toekomstvisie .....	91
	Referenties .....	93

## Lijst van afkortingen en symbolen

BSI	Béton Spècial Industriel
COV	Coefficient of variation
CRC	Compact Reinforced Concrete
HSR	High Shrinkage Resistant
LA	Low Alkali
LOP	Limit of proportionality
MOR	Modulus of rupture
MSCC	Multi-Scale Cement Composite
PP	Polypropyleen
PVA	Polyvinylalcohol
RPC	Reactive Powder Concrete
UHSB	Ultra Hoge Sterkte Beton
w/c-factor	Water-cementfactor
w/b-factor	Water-bindmiddelfactor

<b>Grootheid</b>	<b>Omschrijving</b>	<b>Eenheid</b>
$f, \sigma$	Spanning	MPa
$\delta$	Doorbuiging	mm
$P$	Kracht	N
$W$	Arbeid	J
$G$	Breukenergie	J/m <sup>2</sup>
$M$	Moment	kNm
$R_e$	Buigtaaiheidswaarde	-
$E$	Elasticiteitsmodulus	N/mm <sup>2</sup>
$\Delta$	Afwijking	%

<b>Grootheid</b>	<b>Omschrijving</b>	<b>Eenheid</b>
$f_m$	Gemiddelde spanning	MPa
$f_b$	Trekspanning	MPa
$f_{cd}$	Design druksterkte	MPa
$f_{td}$	Design treksterkte	MPa
$f_{cm}$	Gemiddelde betondrukspanning	MPa
$f_{ctm}$	Gemiddelde betontrekspanning	MPa
$f_{ctm,fl}$	Gemiddelde betonbuigtrekspanning	MPa
$f_{ctk,fl}$	Karakteristieke betonbuigtrekspanning	MPa
$f_{fcteqi,fl}$	Equivalenten buigtreksterkte bij doorbuiging 1,5/3 mm	MPa
$f_{R,i}$	Residuele buigspanning met $i = 1, 2, 3$ of $4$	MPa
$G_f$	Specifieke breukenergie	J/m <sup>2</sup>
$M_{rd}$	Ontwerpmoment	kNm
$M_{ry}$	Vloeimoment van een doorsnede	kNm
$R_{e,i}$	buigtaaiheidswaarde bij doorbuiging van 1,5/3 mm	-
$W_f$	Benodigde arbeid voor breuk	J

## Lijst van figuren

Figuur 1: Overkapping Stade Jean Bouin .....	17
Figuur 2: Ontwikkeling betonsterkte in de voorbije eeuw (Voort, 2008) [62].....	19
Figuur 3: Vergelijking scheurpatroon tussen conventioneel beton en UHSB [8].....	21
Figuur 4: Krachtsoverdracht bij a) conventioneel beton en b) UHSB (Walraven 2002) [63] .....	22
Figuur 5: a) Appollonian packing b) Spacing packing c) 3D spacing packing [62 & 57] ..	23
Figuur 6: Relatieve dichtheid t.o.v. w/b-verhouding (Richard en Cheyrezy, 1995) [43]..	27
Figuur 7: Belasting-doorbuiging diagram voor gewoon beton en vezelbeton (ERMCO, 2012) [18] .....	28
Figuur 8: Werkingsgebied van micro- en macrovezels [38] .....	29
Figuur 9: Schematische voorstelling invloed vezeltype en betonsamenstelling (Cauberg, 2013) [10] .....	29
Figuur 10: Horizontaal gieten versus verticaal gieten [52] .....	30
Figuur 11: Macro staalvezel .....	32
Figuur 12: Glasvezel .....	32
Figuur 13: Aramidevezel.....	33
Figuur 14: Koolstofvezel .....	34
Figuur 15: PP-vezel.....	35
Figuur 16: Nylonvezel .....	36
Figuur 17: Polyethyleenvezel .....	36
Figuur 18: Polyestervezel .....	37
Figuur 19: PVA-vezel .....	38
Figuur 20: Vlasvezel .....	38
Figuur 21: Gebruikte vezels in de studie.....	40
Figuur 22: Mengprocedure met a) droog mengen b) voormengen microsilica, water en superplastificeerder c) toevoeging vezels d) eindresultaat .....	41
Figuur 23: Foto testbank .....	43
Figuur 24: Typisch spanning-rek verloop van UHSB a) zonder vezels en b) met vezels [57].....	44
Figuur 25: Voorstelling driepuntsbuigproef en aanduiding aanbrengen notch [36].....	45
Figuur 26: Foto testbank .....	46
Figuur 27: Mogelijke kracht-doorbuigingskarakteristieken [28].....	46
Figuur 28: Referentiecurve van het referentiemengsel na 28 dagen .....	47
Figuur 29: Buigtrekspanning in functie van het vezeltype [60] .....	48

Figuur 30: Weergave van de spanningsverdeling in een verticale doorsnede in functie van het kracht-doorbuigingskarakteristiek [60] .....	48
Figuur 31: Spanningsblok voorgesteld door Hannant [56].....	49
Figuur 32: Beoordeling residuele buigtreksterkte [10] .....	51
Figuur 33: Vereenvoudigd Spanningsblok TR 63 [55] .....	52
Figuur 34: Vereenvoudigd spanningsblok JSCE-SF4 [55] .....	53
Figuur 35: Werkelijk en equivalent spanningsblok CUR 36 [14] .....	54
Figuur 36: Zichtbare micro staalvezels aan oppervlak .....	57
Figuur 37: Slechte verdeling PP-vezel .....	57
Figuur 38: Klontervorming in het breukvlak bij PP1 en PVA1 .....	59
Figuur 39: Resultaten drukproeven van de verschillende series .....	60
Figuur 40: Spanning-doorbuigingskarakteristieken referentiemengsel .....	61
Figuur 41: Vergelijking staalvezelverdeling in breukvlak met links een slechte en rechts een goede verdeling .....	62
Figuur 42: Vergelijking referentiecurve labo's met referentiecurve WTCB.....	63
Figuur 43: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP1 .....	65
Figuur 44: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP1,5.....	66
Figuur 45: Vergelijking hoeveelheid PP-vezels in breukvlak met links slechte en rechts normale hoeveelheid.....	67
Figuur 46: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP2 .....	68
Figuur 47: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken samenstellingen met PP-vezels .....	69
Figuur 48: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PVA1 .....	71
Figuur 49: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PVA1,5.....	72
Figuur 50: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PVA1,5.....	74
Figuur 51: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken samenstellingen met PVA-vezels .....	75
Figuur 52: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP0,3-PVA0,7 .....	77
Figuur 53: Spanning-doorbuigingskarakteristiek PP0,45-PVA1,05 .....	78
Figuur 54: Spanning-doorbuigingskarakteristiek PP0,6-PVA1,4 .....	79
Figuur 55: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken samenstellingen met overwegend PVA-vezels.....	80
Figuur 56: Spanning-doorbuigingskarakteristiek PP2-PVA0,5.....	82
Figuur 57: Vergelijking vezelverdeling in breukvlak balk 5 en balk 3 .....	82
Figuur 58: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP2-PVA1 .....	83
Figuur 59: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken met overwegend PP-vezels .....	84

Figuur 60: Vergelijking gemiddeldes van samentellingen met 1% vezels .....	86
Figuur 61: Vergelijking gemiddeldes van samentellingen met 1,5% vezels.....	87
Figuur 62: Vergelijking gemiddeldes van samentellingen met 2% vezels .....	88
Figuur 63: Vergelijking gemiddeldes van geoptimaliseerde samentellingen .....	89



## Lijst van tabellen

Tabel 1: Vergelijking typische samenstellingen van de belangrijkste betonsoorten (Spasojevic, 2008 [51]; Maca, 2013 [31]) .....	24
Tabel 2: Ondergrens, gemiddelde waarde en bovengrens van w/b- en w/c-factor in UHSB .....	27
Tabel 3: Vergelijking micro- en macrovezels .....	28
Tabel 4: Belangrijkste eigenschappen van verschillende vezelsoorten [54] .....	31
Tabel 5: Vergelijking productgroepen Ductal® .....	39
Tabel 6: Referentiesamenstelling M2 .....	40
Tabel 7: Gebruikte vezels met belangrijkste eigenschappen .....	41
Tabel 8: Benaming verschillende geteste mengsels met de respectievelijke vezeldosering .....	42
Tabel 9: Vloeimaat van de verschillende mengsels .....	58
Tabel 10: Resultaten drukproeven van de verschillende series .....	59
Tabel 11: Resultaten referentiesamenstelling .....	62
Tabel 12: Referentiewaarden voor de resultaten met de synthetische vezels .....	62
Tabel 13: Berekening verwachte elasticiteitsmodulus .....	64
Tabel 14: Resultaten PP1 .....	65
Tabel 15: Resultaten PP1,5 .....	67
Tabel 16: Resultaten PP2 .....	68
Tabel 17: Vergelijking resultaten referentiesamenstelling en resultaten met PP-vezels ..	70
Tabel 18: Resultaten PVA1 .....	72
Tabel 19: Resultaten PVA1,5 .....	73
Tabel 20: Resultaten PVA2 .....	74
Tabel 21: Vergelijking resultaten referentiesamenstelling en resultaten met PVA-vezels	75
Tabel 22: Resultaten PP0,3-PVA0,7 .....	77
Tabel 23: Resultaten PP0,45-PVA1,05 .....	78
Tabel 24: Resultaten PP0,6-PVA1,4 .....	79
Tabel 25: Vergelijking resultaten samenstellingen met overwegend PVA-vezels .....	80
Tabel 26: Resultaten PP2-PVA0,5 .....	83
Tabel 27: Resultaten PP2-PVA1 .....	84
Tabel 28: Vergelijking resultaten referentiesamenstelling met overwegend PP-vezels ..	85
Tabel 29: Vergelijking resultaten samenstellingen met 1% vezels .....	86
Tabel 30: Vergelijking resultaten samenstellingen met 1,5% vezels .....	87

Tabel 31: Vergelijking resultaten samenstellingen met 2% vezels.....	88
Tabel 32: Vergelijking resultaten van geoptimaliseerde samentellingen .....	89

# 1. Inleiding

Om de steeds meer exotisch wordende concepten van architecten bouwtechnisch uit te kunnen voeren, is er een constante vraag naar materialen met hogere mechanische en duurzamere eigenschappen. Zo is er in de voorbije decennia een constante evolutie geweest in het onderzoek naar cementachtige materialen. Deze evolutie heeft geleid tot de ontwikkeling van nieuwe betonsoorten, zoals bijvoorbeeld ultra hoge sterkte beton. Dit is een bouw materiaal waarvan er vooral realisaties in het buitenland bekend zijn. Frankrijk is hierbij een van de koplopers, vooral door de toepassing van gepatenteerde UHSB-types (bv. Ductal®). Een uitzonderlijk project is de nieuwe overkapping van het Stade Jean Bouin in Parijs. De toepassing van UHSB in België wordt voornamelijk nog afgeremd door het gebrek aan aanbevelingen voor het ontwerp [9].



**Figuur 1: Overkapping Stade Jean Bouin**

In de interim aanbevelingen van het AFGC (2002) [4] wordt een duidelijke definitie weergegeven voor het UHSB, welke later door Graybeal (2006) [22] uitgebreid werd. Ultra hoge sterkte beton verwijst naar materialen met een cementmatrix en een karakteristieke druksterkte van meer dan 150 MPa. Het bevat staalvezels (ook polymeervezels kunnen worden toegepast) om een ductiel gedrag te bekomen bij trekspanningen en, indien nodig, om passief wapeningsstaal te vermijden. Het bevat een hoog gehalte aan bindmiddel met speciale aggregaten. Bovendien heeft het UHSB een zeer laag watergehalte en kan het toch voldoende vloeibare eigenschappen bereiken door de combinatie van een geoptimaliseerde korrelverdeling en de toevoeging van waterreducerende hulpstoffen.

Voor de toepassing van beton kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee toepassingsgebieden, namelijk structureel beton en architectonisch beton. Ook bij UHSB kan dit onderscheid gemaakt worden, waarbij de keuze voor een bepaald type vezels van belang is. Dit onderscheid werd overzichtelijk samengevat door de FEHR Groupe, waarbij de belangrijkste voordelen worden opgesomd [19]:

## **Voor structuur – Staalvezels**

- Elimineert de nood aan wapeningsstaal
- Tot tien keer grotere druksterkte dan conventioneel beton
- Zeer grote weerstand tegen slijtage
- Corrosie-ongevoelig, bestand tegen agressieve omgevingen, vries-dooi cycli en UV-stralen

## **Voor architectuur – Synthetische/organische vezels**

- Een grote vrijheid voor vorm en textuur
- Een groot aanbod aan kleuren

Zo wordt het onderwerp bekomen van deze masterproef, namelijk de toepassing van synthetische vezels in UHSB. Hierbij wordt er nagegaan of er met deze vezeltypes in UHSB de mechanische eigenschappen van een UHSB met staalvezels benaderd kan worden. Het gebruik van synthetische vezels heeft enkele belangrijke voordelen t.o.v. staalvezels. Zo kunnen er geen kleurvervormingen voorkomen t.g.v. roestvorming van de vezels. Verder kunnen de vezels in dezelfde kleuren geleverd worden als het te realiseren beton. Tot slot kan het mogelijk zijn dat er enkele vezels uitsteken. Indien dit de scherpe staalvezels zijn, kan dit resulteren in schade aan materialen of verwondingen van personen. Deze verschillende oorzaken zijn de aanleiding voor het gebruik van synthetische vezels in architectonische betontoepassingen.

### **1.1 Doelstellingen**

De beoogde doelstellingen van deze masterproef bevatten volgende punten:

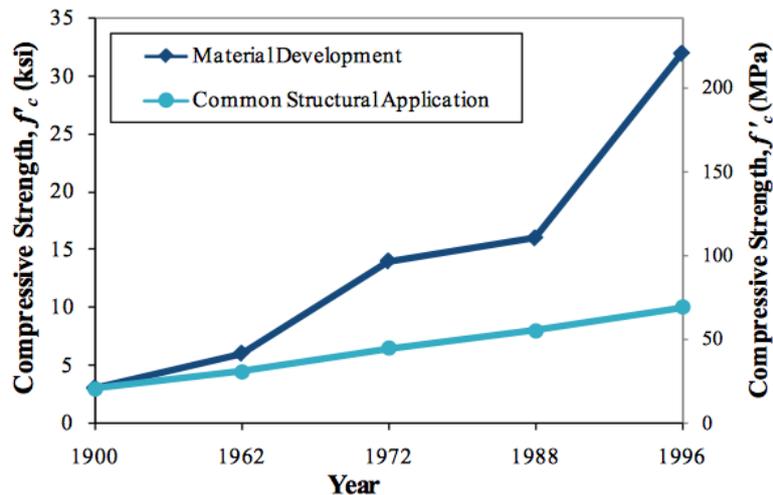
- Maken van een vezelselectie voor het uitvoeren van de proeven.
- Bepalen van de buigtreksterkte van de verschillende vezelsoorten met een vaste referentiesamenstelling van UHSB.
- Evalueren van de bekomen resultaten met het oog op het selecteren van de verschillende soorten vezels die de sterkte-eigenschappen van UHSB met staalvezels het best benaderen.

## 2. Literatuurstudie

### 2.1 Geschiedenis en achtergrond

#### 2.1.1 Ontwikkeling van UHSB

De opkomst van ultra hoge sterkte en UHSB is een relatief recente ontwikkeling in de betontechnologie. In figuur 2 wordt duidelijk dat de sterkte van het beton gebruikt in structurele toepassingen, steeds achterblijft in vergelijking met de ontwikkeling ervan (Tang, 2004) [53]. Dit is te wijten aan toenemende materiaalkosten en een algemeen wantrouwen bij het gebruik van nieuwe materialen. Om de kloof tussen de materiële ontwikkeling en de toepassing ervan te dichten, moet met behulp van onderzoek, het gebruik van UHSB in constructieve ontwerpen geoptimaliseerd worden.



Figuur 2: Ontwikkeling betonsterkte in de voorbije eeuw (Voort, 2008) [62]

#### 2.1.2 Soorten UHSB

Er zijn verschillende types van UHSB ontworpen door verschillende bedrijven in verschillende landen. Het belangrijkste verschil tussen deze types UHSB is het type en de hoeveelheid van de gebruikte vezels. Volgens Voort (2008) zijn er vier soorten UHSB: Béton Spécial Industriel (BSI), Compact Reinforced Concrete (CRC), Multi-Scale Cement Composite (MSCC) en Reactive Powder Concrete (RPC) [62]. Nu volgt een korte samenvatting van de verschillen tussen deze soorten van UHSB.

Het eerste type UHSB, BSI, bevat ook grove granulaten, die geëlimineerd worden in de andere vormen van UHSB (Jungwirth, 2004) [25]. De bekendste merknaam van dit type is Ceracem<sup>®</sup>, dat ontwikkeld werd door Eiffage in samenwerking met Sika. Twee andere types UHSB, CRC en MSCC, maken beide gebruik van hogere hoeveelheden staalvezels

(ongeveer zeven procent) dan RPC, waarbij de staalvezels ongeveer twee procent van het betonvolume bevatten. Een voorbeeld van MSCC is CEMTEC<sup>®</sup>, dat ontwikkeld werd door het Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Parant 2004) [39] en van CRC is het Deense bedrijf CRC<sup>®</sup> Technology een voorbeeld [13]. RPC is uitgegroeid tot een van de belangrijkste vormen van UHSB. De bekendste merknaam van RPC is Ductal<sup>®</sup>, dat ontwikkeld werd door de Franse bedrijven Lafarge, Bouygues en Rhodia.

Omdat RPC de meest gebruikte vorm is van UHSB en aangezien deze werd gebruikt voor de labo's in deze studie, refereert in de volgende delen van deze studie de term "UHSB" uitsluitend naar RPC.

### **2.1.3 Huidige normen en voorschriften UHSB**

De eerste aanbevelingen die opgesteld werden in Europa in verband met vezel versterkt UHSB dateren van 2002 (AFGC, 2002). Deze werden opgesteld door het AFGC en werden *Interim Recommendations for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete* genoemd. Deze aanbevelingen zijn bedoeld als referentie-document dat als basis dient voor het gebruik van UHSB in de civiele techniek. Dit document integreert feedback van ervaringen met de eerste industriële toepassingen en experimentele structuren, evenals tien jaar laboratoriumonderzoek. Vergelijkbare normen werden buiten Europa ontwikkeld in Japan (JSCE 2008) en Australië (SAI 1994) [17].

Voor het beproeven van de vezelbetonsoorten werd oorspronkelijk vooral gebruik gemaakt van de Japanse balk test JCI-SF4. De Amerikaanse tegenhanger hiervan werd de ASTM C 1018, die is voortgevloeid in de ASTM C 1399. Ook enkele Europese landen stelden later hun aanbevelingen op zoals bijvoorbeeld de CUR 35 en de RILEM TC-162 TDF. Het is deze laatste die bijna volledig opgenomen werd in de huidige Europese norm, namelijk EN 14651 [55].

Naast de Franse aanbevelingen volgden er nog verschillende aanbevelingen voor het ontwerp met vezelbetonsoorten. Zo verschenen er in Nederland de CUR 36 specifiek voor betonvloeren. Verder werden er in Engeland het Technical Report No. 63 voor staalvezelbeton en Technical Report No. 65 voor vezelbeton met synthetische vezels uitgebracht. Het zijn deze aanbevelingen die verderop gebruikt zullen worden voor het beoordelen van de resultaten.

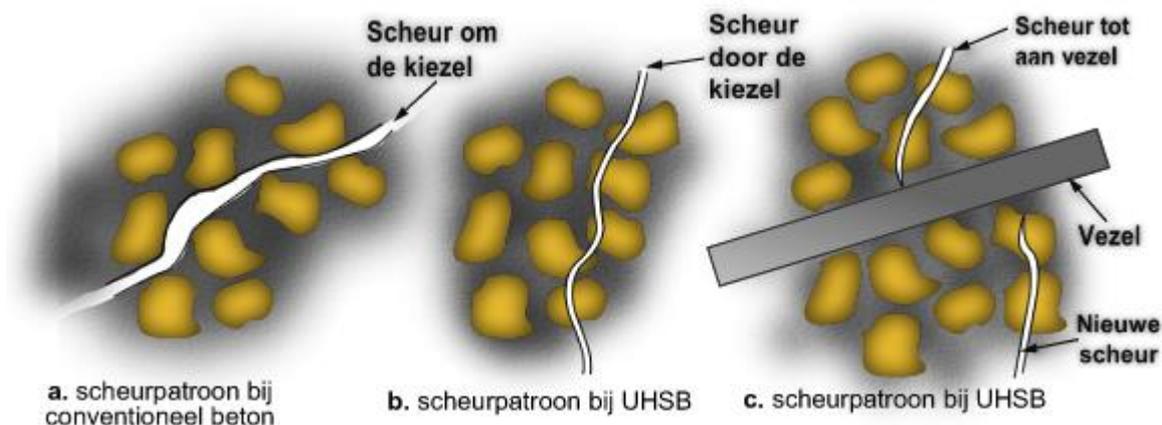
## **2.2 Materiaal en microstructuur**

Sobolev (2003) oordeelde dat volgens de polystructurele theorie, de eigenschappen van beton worden beschouwd als een functie van de eigenschappen op zowel macroniveau (bestaande uit aggregaten en cement) als op microniveau (inclusief de gewijzigde cementpasta met chemische en minerale toeslagstoffen). Het microniveau representeert de sterkte eigenschappen en het vloeigedrag van het cement-microsilica-superplastificeerder systeem. Daarom is het nuttig om de verschillende componenten van een typisch UHSB-mengsel van naderbij te bekijken [49].

### 2.2.1 Principe samenstelling UHSB

Aïtcin (2000) beschreef hoe UHSB in staat is om dergelijke hoge sterkte waarden te bereiken. Er is de mogelijkheid om 150 MPa beton op een industriële basis te maken. Omdat bij dergelijk niveau van sterkte de granulaten de zwakste schakel in het beton worden, is het nodig om de grove granulaten uit het mengsel te elimineren om een RPC te maken van 200 MPa. Door dit RPC door dunwandige buizen van roestvrij staal te omhullen, kan de druksterkte verhoogd worden tot 375 MPa. Wanneer het zand vervangen wordt door een metaalpoeder, kan de druksterkte van het beton stijgen tot 800 MPa [2].

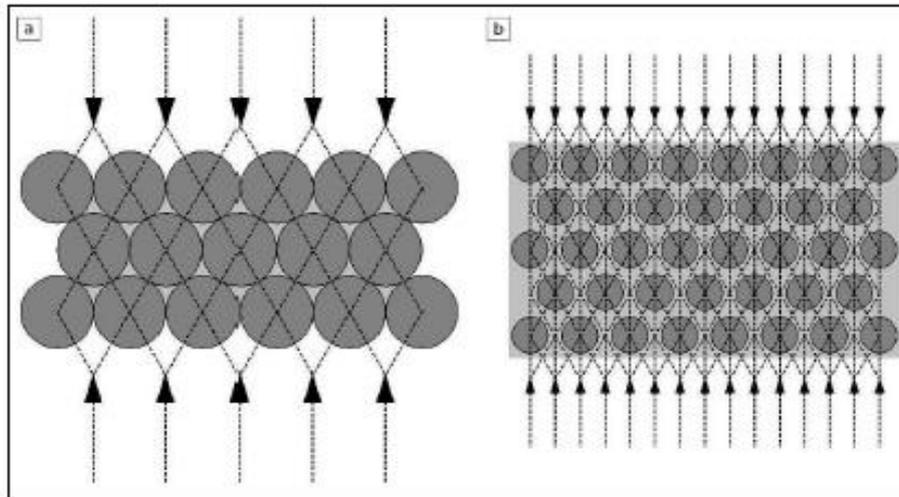
Deze verklaring geeft niet alleen een beeld van de potentiële sterkte van UHSB, maar ook blijkt dat typische HSB samenstellingen geen hoge sterktes kunnen bereiken door de aanwezigheid van grove granulaten. Deze stelling wordt voorgesteld in figuur 3 waarbij het scheurpatroon vergeleken wordt tussen conventioneel beton en UHSB. Toch is het volledig weglaten van kleinere granulaten niet gunstig. Granulaten zorgen nu eenmaal voor een beperkend effect van de cementpasta. Volgens Larrard (1994) daalt de druksterkte van het materiaal namelijk wanneer de dikte van de cementpasta tussen de granulaten te groot wordt. Hierdoor zijn fijnere granulaten nodig in UHSB om een zo groot mogelijke druksterkte te kunnen bereiken [29].



**Figuur 3: Vergelijking scheurpatroon tussen conventioneel beton en UHSB [8]**

Beton is een heterogeen materiaal waarin de granulaten (zand en grind) een skelet van aaneengesloten granulaire elementen vormen in een cementgebonden pasta (cement, additieven en water). De mechanische sterkte van zowel conventioneel beton als HSB wordt beïnvloed door een verschil in de samengestelde materialen. De granulaten en de cementpasta hebben namelijk een aanzienlijk verschil in elasticiteitsmodulus. Volgens Gao et al. (2006) wordt dit verschil in UHSB geëlimineerd door materialen met vergelijkbare elasticiteitsmoduli te selecteren [20]. Verder bevindt zich er volgens Dowd (1996) ook een zwakke overgangszone in het grensvlak tussen de granulaten en de cementpasta bij het conventionele beton en het HSB [15].

Figuur 4 geeft een voorstelling weer van de krachtsoverdracht door conventioneel beton en UHSB. Bij conventioneel beton vormen de granulaten een stijf skelet. Als er een drukkracht wordt aangebracht, vormen er zich schuif- en trekspanningen tussen de grensvlakken van deze granulaten waardoor er scheuren ontstaan. Hiertegenover vormen bij UHSB de granulaten een reeks van insluitingen in een continue matrix (cementpasta) en worden de diameters ervan sterk gereduceerd. Hierdoor wordt een aangebrachte drukkracht verdeeld in de matrix in plaats van in het stijve skelet van granulaten. Zo dalen de ontwikkelde schuif- en trekspanningen op de grensvlakken tussen de cementpasta en de granulaten, wat het potentieel op scheuren bij de grensvlakken vermindert [62].

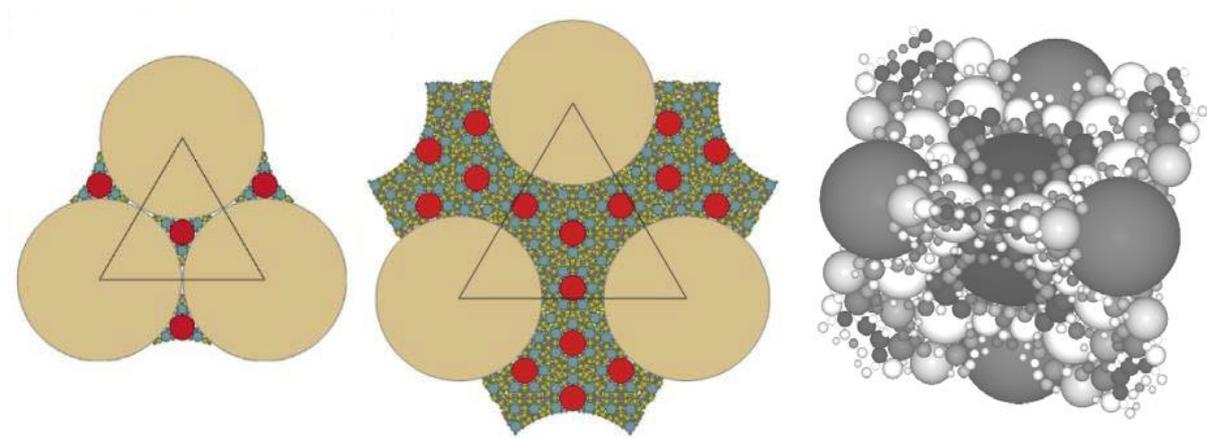


**Figuur 4: Krachtsoverdracht bij a) conventioneel beton en b) UHSB (Walraven 2002) [63]**

Om een continue matrix van de cementpasta te realiseren, wordt er bij UHSB gebruik gemaakt van de optimale pakkingsdichtheid. Het gebruik van fijnere aggregaten om de holtes te vullen tussen de zanddeeltjes, leidt tot een optimalisatie van de pakking, maar er zou nog steeds een stijf skelet van zanddeeltjes overblijven. Figuur 5 toont de verschillen tussen deze zogenaamde "Apollonian packing" en het "spacing packing", die in UHSB toegepast wordt. Bij spacing packing wordt de verdeling van de deeltjes zo gekozen dat er een grote spreiding is in de granulaire klassen. Op deze manier wordt ieder deeltje omgeven door meer dan één laag van de volgende kleinere deeltjesklasse. Zo wordt bijvoorbeeld elk zanddeeltje omgeven door tenminste twee lagen van cementdeeltjes en elk cementdeeltje op zijn beurt weer omringd door minstens twee lagen microsilicadeeltjes (Voort 2008) [62].

Een brede verdeling van de granulaire klassen is niet alleen noodzakelijk om een maximale dichtheid en een uniforme spanningsverdeling te kunnen bekomen, maar draagt ook bij tot de vloeibaarheid van het mengsel. De fijne deeltjes dienen als smeermiddel, waardoor de grotere deeltjes langs elkaar kunnen verplaatsen met een minimale wrijvingsweerstand (Voort 2008) [62]. Op deze manier kan UHSB meestal uitgevoerd worden als een zelf verdichtend beton, waarbij geen trillingen voor verdichting nodig zijn (Walraven 2002) [63]. Dit in tegenstelling met gewoon vezelbeton, waar de grove granulaten ongeveer dezelfde grootte hebben als de lengte van de vezels. Dit resulteert in een drastisch verminderde verwerkbaarheid. Bij UHSB zijn de grootste deeltjes ongeveer twintig keer kleiner dan de vezellengte, waardoor dergelijke

verminderde verwerkbaarheid niet voorkomt, tenzij zeer vezelrijke volumes worden gebruikt (Bonneau 1997) [6].



**Figuur 5: a) Appollonian packing b) Spacing packing c) 3D spacing packing [62 & 57]**

Verschillende auteurs hebben deze basisprincipes voor het samenstellen van UHSB (Bv. Ma, 2002 [30]; Richard, 1995 [43]) samengevat als:

- Verbetering van de homogeniteit door grove granulaten te elimineren.
- Verbetering van de pakkingsdichtheid door de optimalisatie van het granulaire mengsel door een brede spreiding van de poeders.
- Verbetering van de eigenschappen van de matrix door de toevoeging van een puzzolaan mengsel zoals microsilica.
- Verbetering van de eigenschappen van de matrix door het verminderen van de w/b verhouding.
- Verbetering van de microstructuur door warmtebehandeling.
- Verbetering van het brosse gedrag door de toevoeging van staalvezels.

Door de eerste vijf principes toe te passen, wordt er een matrix gevormd met een zeer hoge druksterkte, maar met een even brosse structuur als conventioneel beton. Door vezels aan de samenstelling toe te voegen, is het ook mogelijk om minder brosse eigenschappen te bekomen.

### **2.2.2 Typische samenstelling UHSB**

Een typisch UHSB mengsel bevat: zand, cement, microsilica, kwartspoeder, vezels, superplastificeerder en water. In tabel 1 worden de verschillende componenten in  $\text{kg/m}^3$  weergegeven, waarbij een vergelijking wordt gemaakt tussen de meest voorkomende betonsoorten. Verder wordt de w/c- en de w/b-factor weergegeven, net als de belangrijkste materiaaleigenschappen, die later in hoofdstuk 2.3 Materiaaleigenschappen besproken worden.

component		Normaal beton	vezelbeton	HSB	UHSB
<b>Cement CEM I</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	< 400	370	410	700-1000
<b>Grove granulaten</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	≈ 1000	1130	920	0-800
<b>Fijne granulaten</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	≈ 700	750	620	400-2000
<b>Microsilica</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	40	200-300
<b>Superplastificeerder</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	5	5	10-40
<b>Water</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	>200	175	100-150	110-200
<b>Staalvezels</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	50	-	>150
<b>W/C-factor</b>		>0,35	>0,35	0,28-0,38	<0,24
<b>W/B-factor</b>		-	-	< 0,38	<0,22
<b>Druksterkte</b>	[MPa]	<60	<60	60-100	>150
<b>Buigtreksterkte</b>	[MPa]	<6	<8	<14	>25
<b>Treksterkte</b>	[MPa]	<3	<5	<6	>8
<b>elasticiteitsmodulus</b>	[MPa]	≈ 30	≈ 30	<45	45-70

Tabel 1: Vergelijking typische samenstellingen van de belangrijkste betonsoorten (Spasojevic, 2008 [51]; Maca, 2013 [31])

### 2.2.3 Bestanddelen UHSB

In dit deel zullen de meest voorkomende componenten van een UHSB samenstelling meer in detail besproken worden. Hierbij worden eerst de bestanddelen die het stijve skelet vormen, besproken, gevolgd door die van de matrix. Het deel van de vezels wordt apart besproken, omdat dit een belangrijk onderwerp vormt in deze studie [57].

#### Zand

Zand is een granulaat welk deel uitmaakt van het stijve skelet en in ieder UHSB mengsel voorkomt. Zoals eerder aangehaald, zorgen de zandkorrels ervoor dat de cementpasta niet te dik wordt. Op deze manier kunnen er hogere sterktes bekomen worden. Meestal wordt er de voorkeur gegeven aan kwartzand omdat dit niet chemisch deelneemt aan het hydratatieproces van het cement op kamertemperatuur (Porteneuve et al. 2002) [42]. Alternatieven zijn kalkzandsteen of basalt zand vanwege hun hoge hardheid en oppervlakteruwheid.

## **Basalt of porfier**

Er bestaat ook de mogelijkheid om iets grovere granulaten dan zand te gebruiken. Voorbeelden zijn basalt en porfier. Eigenschappen waaraan deze moeten voldoen zijn dat ze over een grote sterkte moeten beschikken, indien mogelijk 100 N/mm<sup>2</sup>, een goede korrelvorm moeten hebben en een zeer goede hechting aan de cementpasta moeten verzekeren.

## **Cement**

Cement is één van de belangrijkste componenten van beton. In UHSB wordt er meestal gebruik gemaakt van portland cement (CEM I), maar ook hoogovencement (CEM III/A) mag toegepast worden. Hierbij wordt de sterkteklasse 52,5 R geprefereerd, maar ook sterkteklasse 42,5 R is mogelijk. Verder wordt er de voorkeur gegeven aan lage krimp cement (HSR) omdat grote hoeveelheden cement in UHSB het mengsel gevoeliger maken aan hoge krimp. Tot slot worden cementsoorten met lage alkali (LA) inhoud vooropgesteld.

De nodige hoeveelheid water voor het cement moet zo laag mogelijk zijn, waardoor niet al het cement in de matrix zal hydrateren. Terwijl het gehydrateerde cement als een bindmiddel zal fungeren, zullen de niet gehydrateerde cementkorrels optreden als een versterking van de matrix met een hoge elasticiteitsmodulus (120 GPa) (Vernet, 2004) [61].

## **Kwartspoeder**

Aangezien niet al het cement gehydrateerd is, kan een deel ervan vervangen worden door kwartspoeder. Onderzoek van Ma en Schneider (2002) heeft aangetoond dat tot 30 procent van het cementvolume door kwartspoeder vervangen kan worden zonder een verlies van druksterkte [30]. Buiten het verminderen van de hoeveelheid cement, verbetert het kwartzand ook de vloeibaarheid van een UHSB samenstelling. Deze verbeterde vloeibaarheid kan te wijten zijn aan het vuleffect, aangezien kwartspoederkorrels iets kleiner zijn dan de cementkorrels. Verder kan de vloeibaarheid verbeteren doordat er minder cementgebonden kristallen gevormd worden in de eerste minuten van het mengen.

## **Microsilica**

Microsilica is een bijproduct bij de productie van silicium. Het bestaat uit zeer fijne bolvormige deeltjes die in UHSB drie hoofdfuncties vervullen:

- Vullen van holtes van de volgende grotere granulaire klasse, in dit geval cement.
- Verbetering van de vloeibaarheid van het mengsel door de bolvorm van de deeltjes.
- Productie van secundaire hydraten door de puzzolane reactie met de producten uit de primaire hydratatie (Richard en Cheyrezy, 1995) [43].

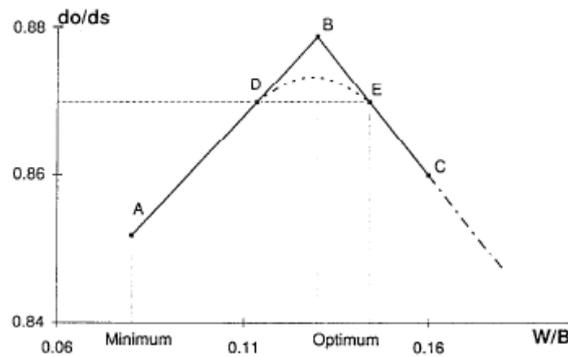
De eerste twee punten werden reeds eerder besproken, maar het derde punt is een nieuw gegeven. De puzzolane reactie is de reactie van het bindmiddel, microsilica, met het gehydrateerde cement (Ma en Schneider, 2002) [30]. Hierbij verlengt de microsilica de gehydrateerde cementkettingen, waardoor de betonsterkte zal stijgen (Porteneuve et al., 2001) [42]. Een ander belangrijk effect van het microsilica is de verbeterde hechting van de grensvlakken tussen het bindmiddel en de granulaten en tussen het bindmiddel en de staalvezels (Habel, 2006) [24].

Ook de hoeveelheid van de microsilica in een mengsel is van belang. Zoals gezegd heeft een grotere hoeveelheid microsilica een positief effect op de betonsterkte. Hiertegenover zal bij een te grote dosering de mix echter te viskeus en plakkerig worden. De typische hoeveelheid microsilica in een UHSB mix is rond de 25 procent van het totale bindmiddel (Matte en Moranville, 1999; Korpa en Trettin, 2004) [32 & 28]. De minimale theoretische hoeveelheid microsilica voor de reactie met de gehydrateerde cementkettingen bedraagt 18 procent. Ma (2002) oordeelde dat een percentage van 25 procent microsilica de dichtste mix oplevert. Voor het bereiken van de grootste druksterkte is er een percentage van 30 procent nodig [30]. Ook onderzoek naar de maximale bindingssterkte tussen de vezels en de matrix en de maximale breukenergie leverde een optimale dosis op tussen de 20 en 25 procent (Chan en Chu, 2004) [11].

## **Water**

Ook water is één van de belangrijkste componenten in beton. Hierbij heeft de hoeveelheid water invloed op zowel de sterkte, als op de verwerkbaarheid van het beton. De meest bekende term om de hoeveelheid water in een mengsel uit te drukken is de w/c-factor. Bij klassiek beton wordt deze term meestal gebruikt als indicator voor de betonsterkte. Hiertegenover kan volgens Schmidt et al. (2003) bij UHSB de druksterkte niet gekenmerkt worden door de w/c-factor alleen. Zij ontdekten dat UHSB ontwikkeld kan worden met een w/c-factor tot 0,4 zonder een reductie van de druksterkte, maar wel resulterend in een verhoogde porositeit. Hierdoor werd er geconcludeerd dat de w/c-factor niet de enige relevante factor is, maar dat ook de w/b-factor (water-bindmiddel) een relevante invloed heeft [46].

Het doel in een UHSB samenstelling is niet om de hoeveelheid water te minimaliseren, maar om de relatieve dichtheid te maximaliseren. Deze relatieve dichtheid wordt weergegeven door de verhouding  $d_0/d_s$ . Hierbij verwijst  $d_0$  naar de dichtheid bij ontkisting en  $d_s$  naar de dichtheid van het granulaire mengsel (geen lucht of water). Volgens Richard en Cheyrezy (1995) is de minimale w/b-factor 0,08 voor een verwerkbaar mengsel. Zoals in figuur 6 te zien is, is op dit niveau de maximale dichtheid niet bereikt. Als er nog water wordt toegevoegd, zal dit toegevoegde water de ingesloten lucht vervangen zonder een verhoging van het volume tot een w/b-factor van 0,13. Wordt er nog extra water toegevoegd, zal dit het volume wel vergroten en bijgevolg daalt de dichtheid van het mengsel. Het monster van punt E zorgt voor betere mechanische prestaties dan dat van punt D. Dit doordat het mengsel minder lucht bevat en meer water dat gedeeltelijk in de cementpasta wordt opgenomen na de hydratatie. Een bijkomend voordeel is dat een mengsel van punt E een betere verwerkbaarheid heeft dan één van punt D [43].



**Figuur 6: Relatieve dichtheid t.o.v. w/b-verhouding (Richard en Cheyrezy, 1995) [43]**

De conclusie van Richard en Cheyrezy (1995) was dat de optimale w/b-factor 0,14 is voor UHSB, wat overeenstemt met de studie van Larrard en Sedran (1994) [43 & 29]. Ook Gao et al. (2006) vormden een vergelijkbaar besluit van een optimale w/b-verhouding van 0,15 [20]. Tot slot wordt er in tabel 2 nog een overzicht gegeven van de toegepaste verhoudingen (Voort, 2008) [62].

Eigenschap	Ondergrens	Gemiddelde waarde	Bovengrens
w/b ratio	0,10	0,17	0,25
w/c ratio	0,13	0,22	0,37

**Tabel 2: Ondergrens, gemiddelde waarde en bovengrens van w/b- en w/c-factor in UHSB**

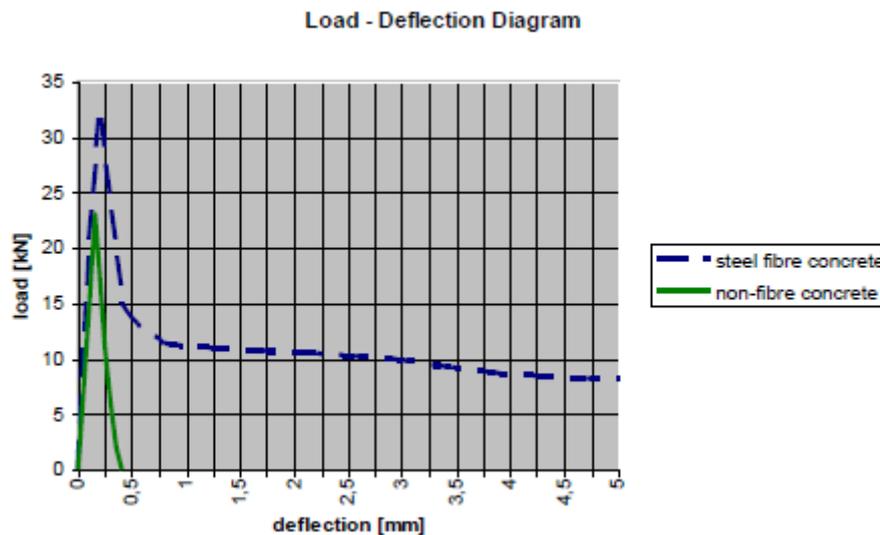
### Superplastificeerder

Door de lage w/c- en w/b-factor hebben UHSB mengsels een beperkte verwerkbaarheid. Om dit laag watergehalte te bekomen met een goede verwerkbaarheid, worden superplastificeerders gebruikt. Dit zijn sterke waterreducerende middelen op basis van sterke organische polymeren die de cement- en silicadeeltjes verspreiden. Over het algemeen worden superplastificeerders van de derde generatie gebruikt. Deze worden gemaakt van chemische producten als polycarboxylaten en polycarboxylatethers omdat deze zeer efficiënt zijn en geen beperkingen hebben voor lage w/c-factoren (Tronci, 2013) [57]. Door de lage w/c- en w/b-factor zal er een grote relatieve hoeveelheid superplastificeerder gebruikt worden. Fabrikanten van deze producten raden een minimale dosering aan van 2% ten opzichte van het cementgehalte [33].

### Vezels

Zoals al eerder werd aangehaald kan een samenstelling met de reeds beschreven componenten zeer hoge sterktes halen, maar is de structuur nog steeds zeer bros. Door vezels toe te voegen wordt de trekcapaciteit van het materiaal verbeterd, net als de ductiliteit. Hierbij zorgen de vezels voor een nascheurgedrag, waarbij deze energie opnemen. Een ander voordeel van de introductie van vezels is dat mogelijke wapeningsstaven weggelaten kunnen worden, wat een positieve invloed heeft op de

bouwtijd van constructies. In figuur 7 wordt een typisch belastings-doorbuigingsdiagram weergegeven voor een 4-puntsbuigproef. Het beton zonder vezels toont geen overblijvende buigsterkte na het bereiken van de maximale belasting. Indien er vezels in het beton gemengd worden, heeft dit wel nog een residuele buigsterkte. Dit wordt het softening-gedrag genoemd wat verder in deze studie besproken zal worden. Een typische dosering van staalvezels bedraagt rond de 2 procent.



**Figuur 7: Belastings-doorbuiging diagram voor gewoon beton en vezelbeton (ERMCO, 2012) [18]**

Op basis van de afmetingen kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee soorten vezels, namelijk microvezels en macrovezels, die weergegeven worden in tabel 3:

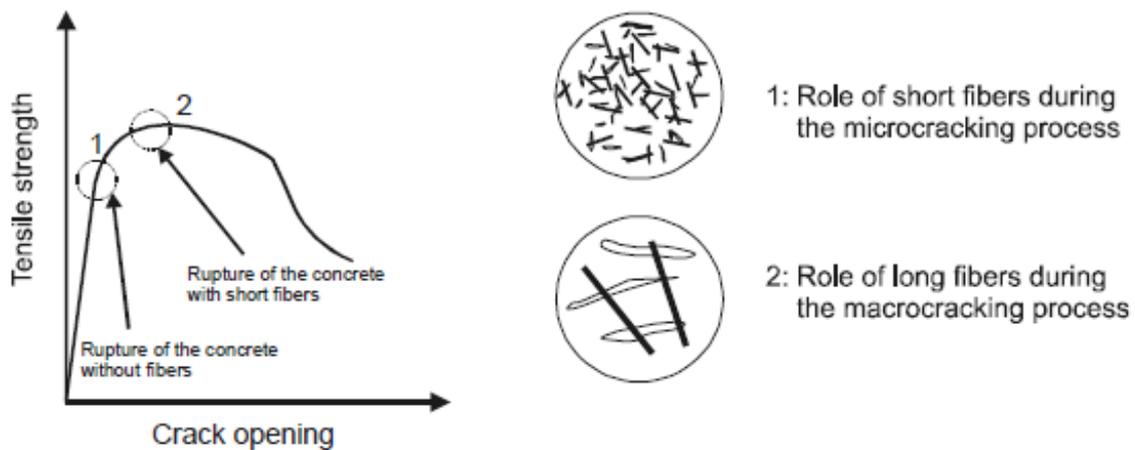
Type	Lengte	Diameter
<b>Microvezel</b>	< 20 mm	< 0,3 mm
<b>Macrovezel</b>	> 30 mm	> 0,3 mm

**Tabel 3: Vergelijking micro- en macrovezels**

Macrovezels, meestal staalvezels, worden hoofdzakelijk toegevoegd aan structurele toepassingen met het oog op een verhoging van de draagcapaciteit van een element. Met andere woorden zullen deze vezels invloed hebben op de kruipeigenschappen van het beton. Microvezels daarentegen, meestal synthetische of organische vezels, worden toegevoegd om de vorming van microscheuren in de plastische fase, ook krimp genaamd, te voorkomen. Verder kunnen microvezels een positieve invloed hebben op de brandwerendheid van de constructie.

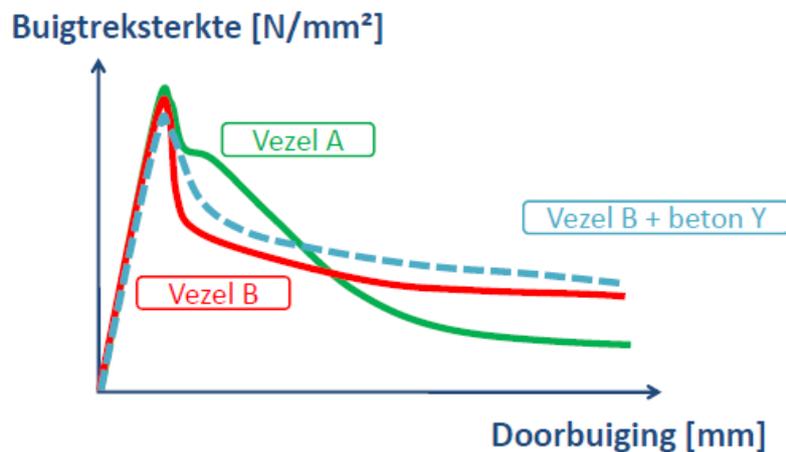
Als beide vezeltypes gecombineerd worden in een mengsel, dan zullen eerst de kortere vezels werken. Dit wordt weergegeven in figuur 8 waar de treksterkte van een UHSB wordt weergegeven in functie van de scheuropening (Orgass en Klug, 2004). Hier zullen deze korte vezels de voortplanting van kleine haarscheurtjes beperken om zo de vorming van macroscheuren te vertragen. Bijgevolg zal ook de spanningspiek groter kunnen zijn. Wanneer er een uniforme verdeling is van de microscheurtjes en een spanningsconcentratie leidt tot de vorming van macroscheuren, beginnen de macrovezels

te werken. Hierbij zullen de staalvezels de scheuropening overbruggen, zoals ook klassieke wapeningsstaven doen. Op deze manier kunnen er grotere vervormingen plaatsvinden en zal ook de spanningspiek weer hoger zijn. Zo kunnen er hogere druksterktes bekomen worden, maar vooral de trek- en buigsterkte zal sterk verbeteren door een grotere hoeveelheid geabsorbeerde energie [38].



**Figuur 8: Werkingsgebied van micro- en macrovezels [38]**

Ook de vorm van de vezels kan een invloed hebben op de uiteindelijke sterkte van de samenstelling. Dit werd reeds uitgebreid onderzocht en kan eenvoudig voorgesteld worden als de voorstelling in figuur 9. Hierbij wordt de buigsterkte gegeven in functie van de doorbuiging.



**Figuur 9: Schematische voorstelling invloed vezeltype en betonsamenstelling (Cauberg, 2013) [10]**

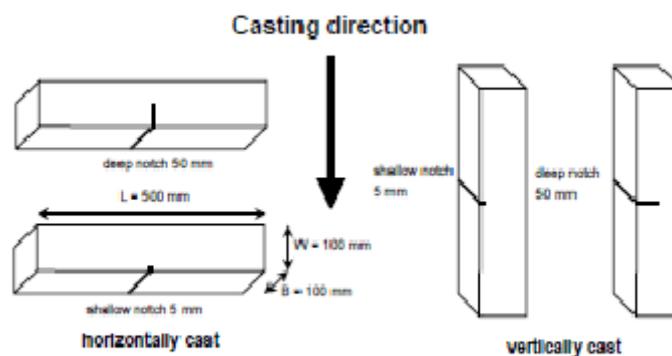
De uiteindelijke taatheid hangt dus van meerdere factoren af (Tronci, 2013) [57]:

- Vezelsoort en haar mechanische en fysische eigenschappen
- Dosering van de vezels
- Vezelgrootte
- Vezelvorm
- Bindingssterkte tussen matrix en vezels

Na het gieten van met vezel versterkt UHSB, hangen de eigenschappen ook af van andere factoren met betrekking tot mixen en gieten zoals (Tronci, 2013) [57]:

- Verdeling van de vezels
- Oriëntatie van de vezels
- Vorm en afmetingen van de structuur

De invloed van de oriëntatie werd onderzocht door Stiel et al. (2004). Zij concludeerden dat de druksterkte en elasticiteitsmodulus geen aanzienlijke invloed ondervinden van de vezeloriëntatie. Hiertegenover vertoonde de buigsterkte bij het horizontaal gieten een piekbelasting met een factor meer dan drie keer zo groot als bij het verticaal gieten [52].



**Figuur 10: Horizontaal gieten versus verticaal gieten [52]**

Tot slot kan er nog onderscheid gemaakt worden op basis van het type vezel. Zo zijn er zoals al eerder aangehaald enkele soorten, zoals staalvezels, synthetische vezels en organische vezels. Deze zullen later in deze studie meer in detail besproken worden bij de selectie van vezels voor het uitvoeren van de proeven.

## 2.3 Vezelselectie

Zoals reeds eerder werd aangehaald, wordt er in deze studie onderzoek gedaan naar het gebruik van synthetische en natuurlijke vezels in UHSB. In dit deel wordt er een selectie gemaakt van welke vezels uiteindelijk getest zullen worden.

### 2.3.1 Vezeltypes

Allereerst wordt er een overzichtstabel gegeven van de mogelijke vezelsoorten, namelijk tabel 4, met de meest voorkomende synthetische en organische vezels met enkele mechanische eigenschappen. Op basis van deze mechanische eigenschappen werd er al een eerste selectie gemaakt van potentiële vezels voor deze studie. De prijzen van de vezels zijn slechts richtwaarden, de uiteindelijke kostprijs kan sterk verschillen. Ze dienen louter als vergelijking tussen de verschillende vezels.

vezeltype	Treksterkte (MPa)	Elasticiteitsmodulus (GPa)	Uitme rek (%)	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	Smelt- of degradatie-temperatuur (°C)	Kostprijs (€/kg)
<b>Staal</b>	1800 - 3250	200	1 - 12	7850	1050	1,2 – 2,0
<b>E-glas</b>	3440	72	4,8	2580	840	1,0 – 1,2
<b>E-CR glas</b>	3440	80	4,8	2720	880	1,2 – 1,4
<b>S-glas</b>	4890	87	5,7	2460	1050	1,4 – 1,6
<b>Synthetische vezels</b>						
<b>Aramide HS</b>	2900	60	4,4	1440	480	20 – 30
<b>Aramide HM</b>	2350	115	2,5	1440	480	25 – 30
<b>Carbon, PAN HM</b>	2500 - 3000	380	0,5 - 0,7	1600-1700	400	28 - 40
<b>Carbon, PAN HT</b>	3450 – 4000	230	1 – 1,5	1600-1700	400	30 - 40
<b>Carbon, pitch GP</b>	480 – 790	27 – 35	2 – 2,4	1600-1700	400	20 - 30
<b>Carbon, pitch HP</b>	1500 – 3100	150 – 480	0,5 – 1,1	1800-2150	400	22 - 30
<b>Nylon</b>	400 - 970	5	20	1140	200 – 225	1,5 – 2,5
<b>Polyester</b>	230 - 1100	17	12 – 150	1340-1390	260	1,5 – 2,2
<b>Polyethyleen</b>	75 – 590	5	3 – 80	920-960	130	1,8 – 2,5
<b>Polypropyleen</b>	140 - 700	3,5 – 4,8	15	900-910	165	2,0 – 2,8
<b>Polyvinylalcohol</b>	800 - 1620	22 - 60	6 - 7	1290-1300	240	2,8 – 3,8
<b>Natuurlijke vezels</b>						
<b>Vlas</b>	840-1800	50-100	1,8 – 3,2	1500-1540	/	1,6 – 1,9

Tabel 4: Belangrijkste eigenschappen van verschillende vezelsoorten [54]

Om uiteindelijk nog slechts enkele vezels over te houden, worden deze vezels elk apart besproken waarbij de voor- en nadelen worden afgewogen.

## Staal

De meest gebruikte vezelsoort in UHSB zijn staalvezels. Dit door de grote kennis van het materiaal en de zeer goede mechanische eigenschappen. Zo hebben deze vezels een grote treksterkte, een grote elasticiteitsmodulus en een ductiele spannings-rek relatie.



**Figuur 11: Macro staalvezel**

Ondanks deze voordelen hebben staalvezels zeer grote nadelen in architectonisch zichtbeton. Zo kan er roestvorming optreden, wat kan resulteren in vlekken aan het oppervlak of stukken beton die afspatten. Een mogelijke oplossing kan het gebruik van roestvrije vezels zijn, maar deze zijn dan weer duurder. Een tweede groot nadeel is dat de grijze kleur van de staalvezels zichtbaar zou kunnen zijn aan het oppervlak, wat niet wenselijk is in gekleurde betontoepassingen.

## Glas

Een eerste soort alternatieve vezel zijn de glasvezels. Deze vezels worden getrokken uit gesmolten glas, wat hoofdzakelijk bestaat uit siliciumdioxide. De toepassing van glasvezels is vooral bekend door het gebruik van glasvezel versterkte polymeren. Verder kunnen we enkele soorten glasvezels onderscheiden, waarvan de drie belangrijkste soorten glasvezels E-glas, E-CR glas en S-glas zijn [3 & 59].



**Figuur 12: Glasvezel**

E-glasvezels ("Electrical" of elektrisch geleidend) is het meest gebruikte type voor vezel versterkte polymeren. De belangrijkste voordelen zijn:

- + Lage kost
- + Grote treksterkte
- + Licht van gewicht (t.o.v. staal)
- + Goede chemische bestendigheid

De belangrijkste nadelen zijn:

- Zwaar van gewicht (t.o.v. de meeste andere vezels)
- Kleine rek
- Kan slijten door vaste deeltjes

Het tweede type, namelijk E-CR glasvezels ("Electrical" "Corrosion Resistant" of corrosie bestendig), is een vorm van E-glasvezels. Door de eliminatie van booroxide, is dit vezeltype beter bestand tegen afbraak in zeer zure omgevingen. Dit vezeltype wordt dus hoofdzakelijk gebruikt in chemische opslagtanks en leidingen. Tot slot is er nog de S-glasvezel ("Strength" of hoge sterkte), wat een verbeterde glasvezel is voor meer structurele toepassingen. Het heeft een aanzienlijk grotere treksterkte en een grotere

elasticiteitsmodulus, maar is ook stijver dan E-glasvezels. Deze stijve eigenschappen maken dit type zeer geschikt voor het gebruik in renovatie waar bv. glasvezelversterkte staven in metselwerk ingeboord worden.

Deze stijve en brosse kenmerken van de glasvezels hebben ook een belangrijk nadeel. Zo is er het risico dat de vezels tijdens het mixen breken of versplinteren. Dit resulteert later in minder goede prestaties van de vezels in het verharde beton. Choi en Yuan (2005) toonden in hun studie aan dat een beton met glasvezels een minder goede druk- en treksterkte bekomen kan worden als met polypropyleenvezels (zie verder) [12]. Om deze reden wordt dit vezeltype dan ook geschraapt.

## **Aramide**

Aramidevezels zijn kristallijne aromatische polyamides vervaardigd door het extruderen van een zure oplossing. We kunnen 2 soorten onderscheiden, namelijk aramide HS (High Strength) en aramide HM (High Modulus) vezels. Ook aramidevezels kennen hun toepassing in vezel versterkte kunststoflaminaten, maar zijn het bekendst door hun toepassing in kogelvrije vesten [54 & 59].

De belangrijkste voordelen zijn:

- + Grote treksterkte
- + Licht van gewicht
- + Grote impact weerstand
- + Uitstekende trillingsdemping

Hiertegenover zijn er ook enkele nadelen:

- Zeer lage druksterkte
- Afbreekbaar door UV-straling
- Hoge vochtopname
- Duur vezeltype
- Taai en moeilijk bewerkbaar materiaal
- Kleine rek



**Figuur 13: Aramidevezel**

Uchida en Takeyama (2010) onderzochten de toepassing van aramidevezels in UHSB. Hieruit bleek dat er een vergelijkbare buigsterkte en treksterkte bekomen kon worden als met staalvezels, maar dat de druksterkte tot 10% kleiner was. Uiteindelijk concludeerden ze dat er nog verder onderzoek nodig is voor het gebruik van dit vezeltype in UHSB [58]. Door de hoge kost worden aramidevezels vooral toegepast op plaatsen waar een hoge impactsterkte vereist is. Om de kost te drukken kan het in combinatie met andere vezeltypes gebruikt worden om zo de voordelen ervan te kunnen behouden. Voor de vervanging van staalvezels zal dit vezeltype toch geschraapt worden door zijn hoge kostprijs.

## Koolstofvezel

Koolstofvezels worden vervaardigd door het verkolen van de geschikte organische materialen in vezelachtige vorm op hoge temperatuur. Dit proces resulteert in gekristalliseerd grafiet dat warm getrokken wordt tot de uiteindelijke vezels. We kunnen een onderscheid maken in twee soorten koolstofvezel afhankelijk van hun basismateriaal. Koolstofvezels o.b.v. polyacrylonitril (PAN) vertonen de beste mechanische performantie, waarbij de keuze kan gemaakt worden tussen HM (High Modulus) en HT (High Tensile strength). De tweede vorm koolstofvezels (pitch) zijn o.b.v. aardolie en steenkool geproduceerd, met de keuze tussen GP (General Purpose) en HP (High Performance). Het grote voordeel is dat dit vezeltype goedkoper is, maar hiertegenover staan minder goede mechanische eigenschappen [54 & 59]. Samengevat zijn de belangrijkste algemene voordelen:

- + Grote treksterkte
- + Grote elasticiteitsmodulus
- + Grote vermoeiingsweerstand
- + Lage uitzettingscoëfficiënt
- + Licht van gewicht (t.o.v. staal)
- + Goede chemische bestendigheid



**Figuur 14: Koolstofvezel**

De belangrijkste nadelen zijn:

- Duur vezeltype
- Zeer kleine rek

Net als glasvezels en aramidevezels zijn carbonvezels ideaal als toepassing voor vezel versterkte kunststoflaminaten. De grote sterkte, grote stijfheid en het lage gewicht maken koolstofvezels het meest geschikte materiaal als gebruik van uitwendige wapening. Ook de toepassing als vezels in beton werd al onderzocht. Zo deden Giner et al. (2012) en Peyvandi et al. (2013) al onderzoek naar de toepassing van carbonvezels in vezelbeton. Giner verkreeg dezelfde prestaties met 0,5% carbonvezels in vergelijking met 1% staalvezels in gewoon vezelbeton [21]. Hiertegenover onderzocht Peyvandi het gebruik van carbonvezels in combinatie met staalvezels of PVA-vezels (zie verder) in UHSB mengsels. Hierbij vond hij voor de combinatie met staalvezels de beste prestaties voor 0,04% carbonvezels en 1,1% staalvezels. Mindere prestatie werden bekomen in combinatie met PVA-vezels, namelijk met 0,05% carbonvezels en 0,37% PVA-vezels [41]. Het algemene besluit hier is dat er nog verder onderzoek nodig is om koolstofvezels economisch toepasbaar te maken in UHSB toepassingen.

Hieruit blijkt dat de hoog performante synthetische vezels grotendeels wegens hun te hoge kostprijs minder geschikt zijn ter vervanging van staalvezels. Verderop zal de bruikbaarheid van minder performante synthetische vezels nagegaan worden.

## Polypropyleen

Polypropyleenvezels worden bekomen door de polymerisatie van propyleen gas. Er kunnen drie soorten polypropyleenvezels onderscheiden worden. Een eerste vorm zijn de zogenaamde monofilament of enkelvoudige vezels. Dit vezeltype wordt gekenmerkt door een slechte binding met de cementmatrix door het waterafstotende gedrag en de relatief kleine specifieke oppervlakte. Het tweede type betreft de multifilament vezel, waarbij enkelvoudige vezels in elkaar geweven worden. Tot slot zijn er nog de gefibrilleerde vezels, wat kan gezien worden als een net van vezels. Hierbij worden de vezels doorgesneden en uitgebreid tot een open netwerk, waardoor een groter specifiek oppervlak bekomen wordt [54]. Yap et al. (2013) toonden in hun studie aan dat er met de gefibrilleerde vezels minder goede prestaties bekomen worden dan met multifilament vezels in normaal vezelbeton [64].



**Figuur 15: PP-vezel**

De belangrijkste voordelen van polypropyleenvezels zijn:

- + Goedkoop vezeltype
- + Zeer licht van gewicht
- + Kleurvast
- + Slijtvast
- + Goede chemische bestendigheid
- + Gedrag bij brand: lage smeltemperatuur waardoor de vezels smelten bij brand. Hierdoor kan de opgewekte stoom in het beton ontsnappen en wordt afspatting vermeden.
- + Taai
- + Plastisch spannings-rek verloop

De belangrijkste nadelen zijn:

- Waterafstotend: slechte binding met cementmatrix
- Relatief kleine elasticiteitsmodulus
- Relatief kleine treksterkte

Ondanks deze nadelen blijkt polypropyleen toch een geschikt vezeltype om toe te passen in vezelbetonsoorten. Voor de brandveilige toepassing wordt een dosering van 1 tot 3 kg/m<sup>3</sup> aan microvezels vooropgesteld. Voor structurele doeleinden worden volgens Khoury en Willoughby (2008) doseringen tussen 3 en 9 kg/m<sup>3</sup> aan macrovezels aangeraden [26]. Patel et al. (2012) vonden optimale sterkte waarden bij een volumepercentage van 1,5%, wat overeenstemt met ongeveer 13,5 kg/m<sup>3</sup>, na 7 dagen en 2% of 18 kg/m<sup>3</sup> na 28 dagen in normaal vezelbeton [40]. Uit eerder onderzoek blijkt wel dat sterkte waarden van UHSB met polypropyleenvezels deze met staalvezels redelijk kunnen benaderen, maar niet evenaren. Voor de eenvoud zal in het verdere deel van deze studie gebruik gemaakt worden van de benaming PP-vezel.

## Nylon

De term nylon refereert naar een familie van polymeren, namelijk polyamides. Nylon is vooral bekend van het gebruik in kleding en veiligheidsgordels, maar kan ook in vezelvorm in beton toegepast worden. Voor deze betontoepassingen zijn er momenteel twee vormen, namelijk de monofilament en de multifilament vezeltypes.



**Figuur 16: Nylonvezel**

De belangrijkste voordelen ervan zijn:

- + Goedkoop vezeltype
- + Goede impact weerstand
- + Verbeterde buigstijfheid en versteviging na eerste scheur dan andere minder performante vezels.
- + Goede chemische bestendigheid
- + Hoge rek
- + Uitstekende slijtvastheid
- + Licht van gewicht
- + Licht waterabsorberend: Neemt kleine hoeveelheid water op waardoor een betere binding met de cementmatrix bekomen kan worden.

De belangrijkste nadelen zijn:

- Relatief kleine elasticiteitsmodulus
- Relatief kleine treksterkte
- Moeilijk verkrijgbaar

Ook nylon lijkt een geschikt vezeltype te zijn door de beperkte nadelen en de net iets betere treksterkte en elasticiteitsmodulus dan de polypropyleenvezels. Deze veronderstelling werd ook bevestigd door Yap et al. (2013). Zij concludeerden dat voor een gewoon vezelbeton na 28 dagen een betere druksterkte en treksterkte bekomen kon worden als met polypropyleenvezels. Op jongere leeftijd bleken de mengsels met polypropyleenvezels echter betere prestaties af te leveren [64]. Ook Song et al. (2005) toonden de betere prestaties na 28 dagen aan van de nylonvezels in vergelijking met de polypropyleenvezels [50].

## Polyethyleen

Net als polypropyleen wordt ook polyethyleen (Eigenlijk polyetheen) gemaakt door de polymerisatie van een gas, in dit geval etheen. Verder heeft polyethyleen ook ongeveer dezelfde eigenschappen als polypropyleen, namelijk:

- + Goedkoop vezeltype
- + Zeer licht van gewicht
- + Kleurvast
- + Slijtvast



**Figuur 17: Polyethyleenvezel**

- + Goede chemische bestendigheid
- + Gedrag bij brand: lage smelttemperatuur waardoor de vezels smelten bij brand. Hierdoor kan de opgewekte stoom in het beton ontsnappen en wordt afspatting vermeden.

De belangrijkste nadelen zijn:

- Waterafstotend: slechte binding met cementmatrix
- Kleine elasticiteitsmodulus
- Kleine treksterkte

Er zou dus verwacht kunnen worden dat in beton gelijke mechanische prestaties bekomen worden als met polypropyleen. Onderzoek van Missimer et al. (2010) toonden echter aan dat zowel de druksterkte als de buigsterkte, net als het gedrag bij brand van beton met polyethyleenvezels slechter zijn als met polypropyleenvezels [34]. Om deze reden schrappen we dan ook het gebruik van polyethyleenvezels.

## **Polyester**

Polyester wordt gevormd door de polycondensatiereactie van carboxzuren en alcoholgroepen. De meest bekende vorm van polyester in de bouw is ongetwijfeld het isolatiemateriaal polyurethaan of kortweg PUR.

De belangrijkste voordelen zijn:

- + Goedkoop vezeltype
- + Licht van gewicht
- + Slijtvast
- + Grotere treksterkte en elasticiteitsmodulus dan polypropyleen en nylon



**Figuur 18: Polyestervezel**

De belangrijkste nadelen:

- Waterafstotend: slechte binding met cementmatrix
- Relatief kleine elasticiteitsmodulus
- Relatief kleine treksterkte
- Minder goede chemische bestendigheid

Bolat et al. (2014) deden onderzoek naar het gebruik van polyestervezels in beton. Hierbij concludeerden ze dat met polyestervezels een betere druksterkte bekomen kan worden dan met polypropyleenvezels. Verder werd er wel een mindere oppervlaktehardheid bekomen [5]. Gewone polyestervezels kunnen niet toegepast worden in beton door de beperkte chemische bestendigheid, waardoor een nabehandeling van de vezels vereist is. Door de onzekerheid over het effect van deze nabehandeling op lange termijn, wordt ook dit vezeltype geschrapt.

## Polyvinylalcohol

Polyvinylalcohol wordt uit polyvinylacetaat gevormd door de behandeling met een alcoholische oplossing. Deze vezels, afgekort ook PVA-vezels genoemd, zijn enkel beschikbaar in de monofilament vorm.

De belangrijkste voordelen zijn:

- + Goedkoop vezeltype
- + Grote treksterkte t.o.v. minder performante synthetische vezels
- + Grote elasticiteitsmodulus t.o.v. minder performante synthetische vezels
- + Binding van de vezel met de cementmatrix
- + Licht van gewicht

De belangrijkste nadelen zijn:

- Beperkte druksterkte
- Relatief kleine treksterkte
- Relatief kleine elasticiteitsmodulus

Op basis van deze eigenschappen blijken ook PVA-vezels geschikt voor het gebruik in UHSB. Naast polypropyleen- en polyethyleenvezels werden er ook PVA-vezels getest door Missimer et al. (2010). Hierbij werden er mindere prestaties bekomen voor de druksterkte, maar bijna gelijkwaardige buigsterktes in vergelijking met polypropyleenvezels [34].



**Figuur 19: PVA-vezel**

Tot slot zijn er nog de natuurlijke vezels. Hierbij wordt enkel de vezel met de beste mechanische kenmerken besproken omdat de overige kenmerken ongeveer gelijkwaardig zijn. Zo absorberen de meeste natuurlijke vezels veel water tijdens het mixen en geeft het dit weer gradueel af tijdens het uitharden van de cement matrix. Bij het afgeven zal de diameter van de vezels weer afnemen, waardoor er een zwakke binding zal zijn tussen de vezels en de matrix. Hierdoor zijn er telkens vezelbehandelingen nodig om dit tegen te gaan. De vezel die besproken zal worden is vlas, maar andere mogelijkheden zijn sisal, hout, ...

## Vlas

Vlas is een gewas dat op weiden geteeld kan worden. De stengels ervan werden vroeger gezien als afval, maar vezels afkomstig van deze stengels vertonen goede mechanische eigenschappen. Het kan dus een vezelvorm zijn die een kleine ecologische voetafdruk heeft bij lokale teelt.



**Figuur 20: Vlasvezel**

De belangrijkste voordelen zijn:

- + Ecologische voetafdruk
- + Zeer kosten-efficiënt (Vooral waar middelen beperkt zijn)
- + Grote treksterkte t.o.v. minder performante synthetische vezels
- + Grote elasticiteitsmodulus t.o.v. minder performante synthetische vezels

De belangrijkste nadelen zijn:

- Onderzoek toont problemen aan op lange termijn
- Grotere hoeveelheid water nodig om homogeen mengsel te verkrijgen
- Vlasvezels zonder behandeling zijn zeer water absorberend, niet schimmelwerend, brandbaar, organische onzuiverheden kunnen hydratatieproces verstoren
- Slechte chemische bestendigheid
- Beperkte verwerkbaarheid

Sawsen et al. (2014) onderzochten de invloed van behandelde vlasvezels t.o.v. natuurlijke vlasvezels. Hierbij concludeerden ze dat met de behandelde vezels een betere hechting met de matrix bekomen kan worden, net als een betere buigsterkte van het beton [45]. Ook Snoeck en De Belie onderzochten de invloed van een vezelbehandeling en vergeleken deze met PVA-vezels. Een eerste conclusie was de beperkte verwerkbaarheid van de vlasvezels, waarbij er maximaal 1% in volume toegevoegd kan worden. Bij de vergelijking met de PVA-vezels werd er geconcludeerd dat met de behandelde vlasvezels een gelijkwaardige stijfheid, maar een mindere buigsterkte bekomen kan worden dan met de PVA-vezels [48]. Door deze mindere prestaties t.o.v. PVA-vezels en de onzekerheid van de prestaties op lange termijn, wordt ook dit vezeltype geschrapt. Toch is het toekomstgericht een interessant vezeltype voor verder onderzoek.

### 2.3.2 Eindconclusie

Door de kenmerkende voor- en nadelen van de verschillende vezeltypes tegen elkaar af te wegen kan er het volgende besluit gemaakt worden. Vooral polypropyleen- en polyvinylalcoholvezels zijn geschikt ter vervanging van staalvezels op een economisch verantwoorde manier. Dit besluit kan ook bevestigd worden door de verschillende producten van Ductal® [16]. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen drie productgroepen. Zo is er een onderscheid tussen structureel, brandwerend en architecturaal UHSB zoals weergegeven in tabel 5. Structureel UHSB bevat staalvezels, terwijl er voor de brandwerende UHSB-toepassing gebruik gemaakt wordt van een combinatie van staalvezels en polypropyleenvezels. Voor het architectonisch beton valt de keuze op PVA-vezels.

Type Ductal®	Structureel	Brandwerend	Architectonisch
Druksterkte [MPa]	150 – 180	140 - 160	100 – 140
Buigtreksterkte [MPa]	15 - 30	12 - 25	10 - 20

Tabel 5: Vergelijking productgroepen Ductal®

## 2.4 Referentiesamenstelling

Om de efficiëntie van een bepaald vezeltype te kunnen beoordelen, zal er een referentiesamenstelling gebruikt worden. Deze zogenaamde samenstelling 'M2' wordt voorgesteld in tabel 6 en is een zelf verdichtend betontype.

Component - Type	hoeveelheid	Soortelijk gewicht	Volume	Volume percentage
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[l]	[%]
<b>Cement - CEM I 42.5 R HSR LA</b>	830	3100	268	27
<b>Kwartspoeder - d<sub>gem</sub> = 7µm</b>	83	2650	31	3
<b>Kwartzand 0/0,5</b>	335	2650	126	13
<b>Porfier 1/4</b>	776	2700	287	29
<b>Microsilica - suspensie 50%</b>	332	1400	237	24
<b>Water</b>	12	1000	12	1
<b>Superplastificeerder</b>	24	1050	23	2
<b>vezels</b>	variabel	variabel	variabel	variabel

**Tabel 6: Referentiesamenstelling M2**

Voor deze samenstelling worden de principes gerespecteerd zoals beschreven in 2.2.1 Principe samenstelling UHSB. Zo worden er enkel kleine granulaire elementen gebruikt, namelijk porfier 1/4. Verder wordt er kwartzand 0/0,5 en zeer fijn kwartspoeder gebruikt voor een goede granulaire verdeling. Het gebruikte cement is een CEM I 42,5 R HSR LA en de microsilica is een waterachtige suspensie welke voor 50% gewicht uit water bestaat. Zo bedraagt de w/c-factor 0,21 en de w/b-factor 0,18. Om de zelf verdichtende eigenschappen te bekomen, wordt er een superplastificeerder toegevoegd. Dat is Sika Viscocrete 20 Gold en is speciaal voor betonsoorten met een hoge initiële sterkte [47]. Om de vloeibaarheid van het beton te testen wordt de vloeimaat bepaald, waarbij een richtwaarde van 700 mm wordt genomen. De toegevoegde vezels worden verderop besproken, maar zullen in gewicht afgetrokken worden van de granulaten.

In tabel 7 worden de gebruikte vezels weergegeven op basis van de vezelselectie (2.3 vezelselectie) met hun belangrijkste eigenschappen. Verder worden deze vezels weergegeven in figuur 21. Hierbij worden rechts de staalvezels weergegeven met bovenaan de macrovezels en onderaan de microvezels. Linksboven bevinden zich de macro polypropyleenvezels en linksonder worden de micro polyvinylalcoholvezels weergegeven.



**Figuur 21: Gebruikte vezels in de studie**

Vezeltype	Staal	Staal	PP	PVA
	Micro	Macro	Macro	Micro
<b>Naam</b>	Dramix OL 6/.16	Dramix RC 80-30 BN	Adfil Durus S300	Kuraray RF350
<b>Diameter [mm]</b>	0,16	0,38	0,9	0,2
<b>Lengte [mm]</b>	6	30	50	12
<b>Dichtheid [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7850	7850	910	1300
<b>Treksterkte [MPa]</b>	2000	3070	475	910
<b>E-modulus [GPa]</b>	200	200	4,5	30

Tabel 7: Gebruikte vezels met belangrijkste eigenschappen

Voor het mengen wordt een betonmolen met verticale as gebruikt, meer in detail één met vaste trommel en ronddraaiende schoepen. De mengprocedure verloopt telkens volgens een vast patroon. Zo wordt er allereerst droog gemengd (cement, porfier, zand en kwartspoeder) gedurende 2 minuten. Tijdens deze 2 minuten worden het water, de superplastificeerder en de suspensie microsilica apart handmatig gemengd tot een homogeen mengsel. Vervolgens wordt dit toegevoegd in de mixer. Na 6 minuten worden tot slot de vezels nog toegevoegd. Afhankelijk van de goede verdeling van de vezels wordt er gestopt na een totaal tijd van 9 tot 10 minuten.



Figuur 22: Mengprocedure met a) droog mengen b) voormengen microsilica, water en superplastificeerder c) toevoeging vezels d) eindresultaat

Een opmerking die hierbij gemaakt moet worden is dat bij twee reeksen deze mengprocedure nog niet gebruikt werd. Namelijk voor de serie PP1 en PVA1 (zie verder) werd eerst de microsilica en pas later de superplastificeerder toegevoegd. Dit resulteerde in klontvorming in het mengsel. Als oplossing werd de mengprocedure geoptimaliseerd door de superplastificeerder en de microsilica reeds vooraf te mengen. Zo is er voldoende smeermiddel aanwezig tussen de korrels om de klontvorming te voorkomen.

Om de efficiëntie van de synthetische vezels te kunnen beoordelen, zullen er allereerst testen worden uitgevoerd op een samenstelling met 1 volumeprocent staalvezels (Verkregen via het WTCB). Deze samenstelling is een hybride mengsel van 0,7% microvezels en 0,3% macrovezels. De samenstelling met synthetische vezels is proefondervindelijk bijgestuurd, maar er werd gestart met 1% PP-vezels en 1% PVA-vezels. Tabel 8 geeft de benaming van de mengsels weer met de volumepercentages van de vezels. In de benaming bevindt zich telkens het vezeltype gevolgd door het volumepercentage, op de staalvezels na welk het referentiemengsel 'ref' wordt genoemd. Tot slot wordt er ook nog een indicatieve kostprijs van de vezels gegeven gebaseerd op de prijzen uit tabel 4. Hierbij kan er opgemerkt worden dat de prijs van de synthetische vezels zich steeds onder deze van de staalvezels bevindt. Er zouden dus meer vezels kunnen toegevoegd worden om een gelijke prijs te bekomen. Later in deze studie zal toegelicht worden waarom dit niet werd gedaan.

Naam	% Staalvezel (macro)	% Staalvezel (micro)	Kg/m <sup>3</sup> staalvezel	Kostprijs vezels [€]	
ref	0,3	0,7	78,5	94-157	
Naam	% PP-vezel	Kg/m <sup>3</sup> PP-vezels	% PVA-vezel	Kg/m <sup>3</sup> PVA-vezels	Kostprijs vezels [€]
PP1	1	9,1			18-26
PP1,5	1,5	13,7			27-39
PP2	2	18,2			36-50
PVA1			1	13	36-50
PVA1,5			1,5	19,5	54-75
PVA2			2	26	72-100
PP0,3-PVA0,7	0,3	2,7	0,7	9,1	31-43
PP0,45-PVA1,05	0,45	4,1	1,05	13,7	46-64
PP0,6-PVA1,4	0,6	5,5	1,4	18,2	62-85
PP2-PVA0,5	2	18,2	0,5	6,5	55-76
PP2-PVA1	2	18,2	1	13	72-100

Tabel 8: Benaming verschillende geteste mengsels met de respectievelijke vezeldosering

### 3. Beoordelingscriteria

Om de doeltreffendheid van de geselecteerde vezels te onderzoeken, zullen er enkele proeven gedaan worden op de verschillende mengsels. Hiertoe zullen enkele mechanische eigenschappen getest worden na veertien dagen tijd. De testperiode duurt veertien dagen aangezien er bijgestuurd wordt voor de vezeldosering, maar ook omdat UHSB al een groot deel van zijn sterkte bekomen heeft na deze uithardtijd. Verder worden de proefstukken telkens na twee dagen ontkist en bewaard onder normale labo-omstandigheden. Omdat het om onderzoek gaat naar de ideale samenstelling en omdat er gebruikt gemaakt wordt van het beschikbare materiaal, zal er niet normatief gewerkt worden. Toch zal er in de mate van het mogelijke de norm gevolgd worden of zal er gewerkt worden met verhoudingen afgeleid uit de norm NBN EN 14651 [36].

#### 3.1 Druksterkte

Als een indicatie van de kwaliteit van het beton wordt er een drukproef uitgevoerd. Hiervoor worden per mengsel telkens twee kubussen met afmetingen 100x100x100 mm gedrukt. De gebruikte testbank, zie figuur 23, heeft twee frames, namelijk één voor de drukproef en één voor de buigproef. Voor de drukproef zijn er twee krachtkanalen waaruit gekozen kan worden. Zo gaat het ene krachtkanaal tot 500 kN en het andere tot 2000 kN, waarbij deze laatste ook gebruikt werd.

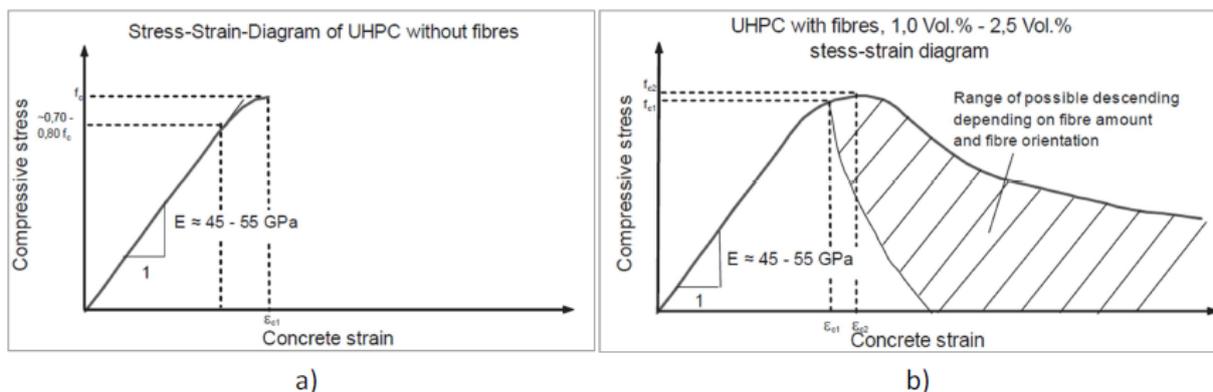


**Figuur 23: Foto testbank**

### 3.1.1 Gedrag UHSB onder drukspanning

In Figuur 24 wordt het typische verloop van de druksterkte in functie van de rek voor een UHSB met en zonder vezels weergegeven. Een UHSB zonder vezels wordt in druk gekenmerkt door [57]:

- Grote druksterkte na 28 dagen: > 150 MPa.
- Grote elasticiteitsmodulus van 45 tot 70 GPa in vergelijking met de 30 GPa van normaal beton.
- Overwegend lineair elastisch gedrag tot ongeveer 70 à 80% van de breuklast.
- Gevolgd door een niet-lineair verloop door het ontstaan van microscheurtjes aan de grensvlakken van de granulaten en cementpasta.
- Uiteindelijk resulterend in zeer brosse breuk, er is namelijk geen dalende tak in het spanning-rek diagram.



Figuur 24: Typisch spanning-rek verloop van UHSB a) zonder vezels en b) met vezels [57]

De toevoeging van vezels beïnvloedt nauwelijks de stijgende tak van het spannings-rek diagram. Zoals in figuur 24.b wordt weergegeven is de invloed van de vezels op de maximale druksterkte beperkt. Toch kunnen de vezels eventueel de gevormde scheuren overbruggen, wat kan resulteren in een iets hogere druksterkte. Het spreekt voor zich dat in dit geval vooral de microvezels het efficiëntst zijn voor het overbruggen van de microscheuren. Wel zorgen de vezels voor een dalende tak in het spannings-rek diagram. De vezels zorgen namelijk voor een ductieler beton en verminderen dus het brosse gedrag. Samengevat wordt een UHSB met vezels gekenmerkt door dezelfde punten als zonder vezels, enkel wordt de laatste vervangen door:

- Minder brosse breuk door het 'softening-gedrag' veroorzaakt door de vezels.

Voor dit onderzoek zal enkel de maximale druksterkte vergeleken worden om een beeld van de kwaliteit te hebben. De vorm van het spanning-rek diagram is dus niet van belang tijdens het verdere onderzoek.

### 3.1.2 Voorspelling druksterkte

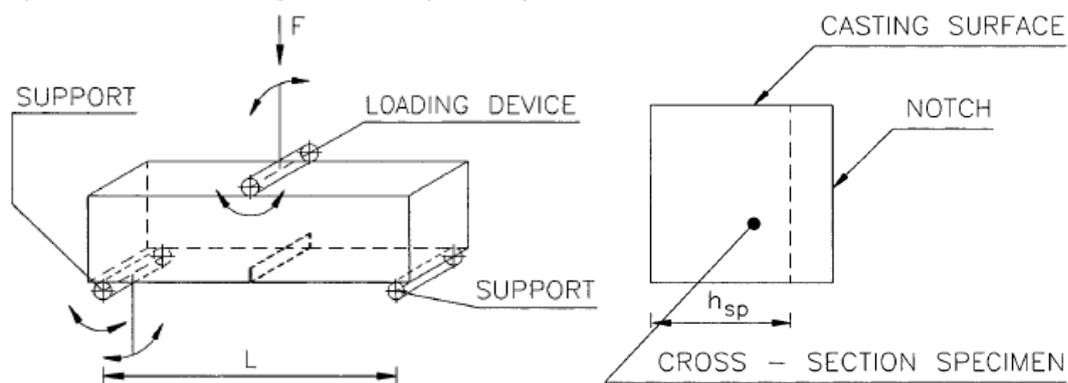
Om een richtwaarde te bekomen van de druksterkte wordt er beroep gedaan op eerder onderzoek van Tronchi (2013). Zij stelde een vergelijking op voor de druksterkte in functie van de tijd voor een UHSB met een identieke samenstelling en identieke hoeveelheid staalvezels (1%). Dit deed ze door het uitvoeren van een logaritmische regressie op basis van drukproeven en vond zo volgend resultaat [57]:

$$f_{cm}(t) = 25,35 \cdot \ln(t) + 54,12 \quad (1)$$

Na een tijd van 14 dagen betekent dit dat er als richtwaarde 121 MPa aangenomen kan worden. De opgestelde vergelijking werd dan wel bekomen met staalvezels, maar het type vezels hebben een beperkte invloed op de maximale druksterkte. Aangezien het om een richtwaarde gaat, zal ook deze waarde worden aangenomen voor iedere vezelsamenstelling.

### 3.2 Buigproef

Om de efficiëntie van de vezels te beoordelen, zal de buigtreksterkte bepaald worden met een driepuntsbuigproef. Voor deze proef, zoals voorgesteld in figuur 25, worden telkens 5 balken horizontaal gegoten met afmetingen 500x100x100 mm. Hierbij zal in het midden van de balk een notch (zaagsnede) van 5 mm handmatig worden aangebracht met een haakse slijper. Deze notch heeft als doel dat de scheur zich op een vooraf gedefinieerde sectie zal vormen en niet op de zwakste plaats van de balk. Voor het verdere verloop van dit onderzoek zal er worden aangenomen dat deze perfect vlak zijn. Tot slot bedraagt de overspanning  $L = 350$  mm.



Figuur 25: Voorstelling driepuntsbuigproef en aanduiding aanbrengen notch [36]

Bij de testbank, weergegeven in figuur 26, kan er voor de buigproef ook tussen twee krachtkanalen gekozen worden, namelijk één tot 10 kN of één tot 100 kN. Om de doorbuiging te meten wordt een sensor gebruikt met een maximaal bereik van 10 mm, een nauwkeurigheid van 0,001 mm en een meetsnelheid van 20 Hz. Door de constructie van de testbank is het niet mogelijk om een frame op de betonbalk aan te brengen. Hierdoor werd de verticale verplaatsing gemeten van de zuiger van de testbank. Een

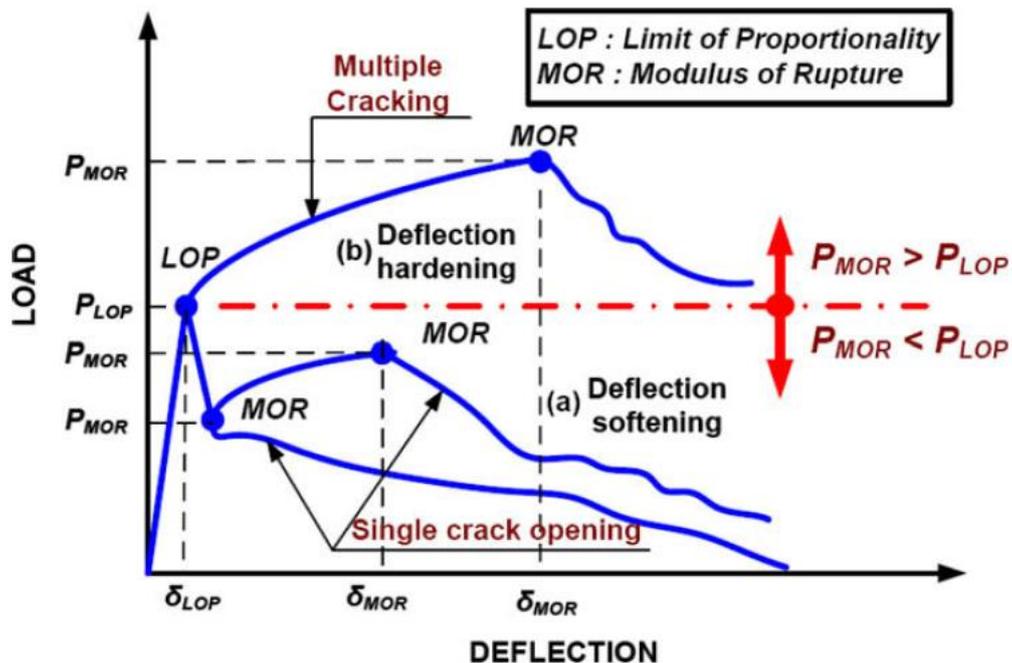
mogelijke fout die hiermee gemaakt wordt is dat de onderdelen van de testbank licht worden samengedrukt tijdens de proef. Als aanname zal er hierbij genomen worden dat er telkens een gelijkmatige zetting gebeurt tijdens elke proef om de resultaten te kunnen vergelijken. Een tweede gevolg door deze testopstelling is dat het niet mogelijk zal zijn om de elasticiteitsmodulus te bepalen. Deze zal echter veel kleiner zijn dan de werkelijke waarde.



Figuur 26: Foto testbank

### 3.2.1 Gedrag UHSB onder buiging

Het buiggedrag van vezelbetonsoorten kan algemeen ingedeeld worden als doorbuiging softening of doorbuiging hardening-gedrag, zie figuur 27.



Figuur 27: Mogelijke kracht-doorbuigingskarakteristieken [28]

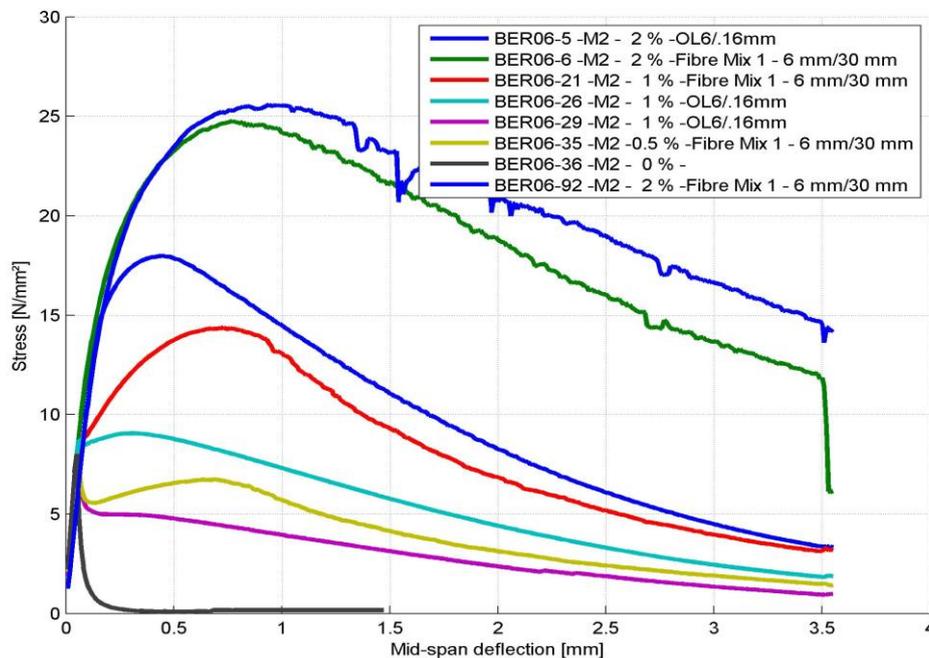
In vergelijking met normaal beton of bij het softening-gedrag, zal er bij het hardening-verloop een grotere buigweerstand bekomen worden na de eerste scheur. Deze eerste scheur wordt voorgesteld door de proportionaliteitsgrens, ook LOP (Limit of proportionality) genoemd. Deze LOP wordt gekenmerkt als het punt waar de kracht-doorbuigingskarakteristiek niet meer lineair verloopt. De belasting bij de proportionaliteitsgrens wordt  $P_{LOP}$  genoemd en de overeenkomstige doorbuiging  $\delta_{LOP}$ . Een tweede kenmerkend punt is de breukmodulus of de MOR (Modulus of rupture). Deze MOR is gedefinieerd als het punt waar het softening-gedrag begint op te treden na het LOP punt (Kim 2008) [28].

Volgens de norm NBN EN 14654 kan het belasting-doorbuigingsdiagram omgevormd worden tot een spanning-doorbuigingscurve met de formule:

$$f = \frac{3.P.l}{2.b.(h-a)^2} \quad (2)$$

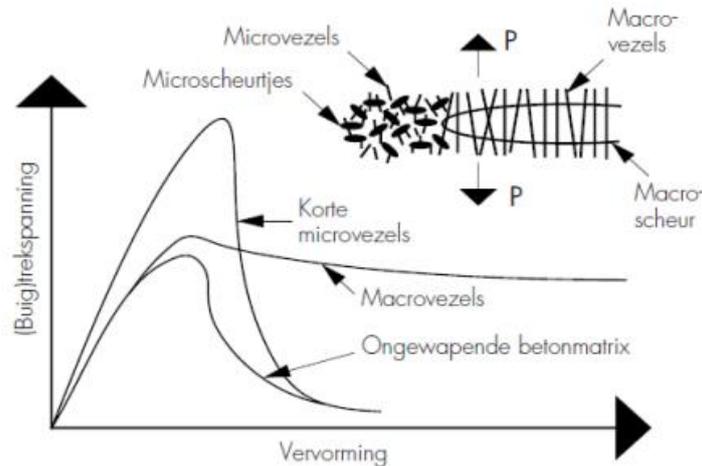
Met P de kracht in N en l de overspanning, b de breedte van de balk, h de hoogte van de balk en a de diepte van de notch in mm.

Voor de referentiesamenstelling werd er een referentiecurve bekomen via het WTCB. Deze is weergegeven in figuur 28, waarbij de rode curve als referentie gebruikt kan worden. Deze curve werd bekomen voor een UHSB met een identieke samenstelling en vezeldosering na een tijd van 28 dagen. Het enige verschil met de resultaten van het referentiemengsel is de ouderdom van namelijk 14 dagen in vergelijking met 28 dagen. Er kan dus verwacht worden dat er een gelijk verloop bekomen wordt, maar met kleinere waarden van de buigtrekspanning.



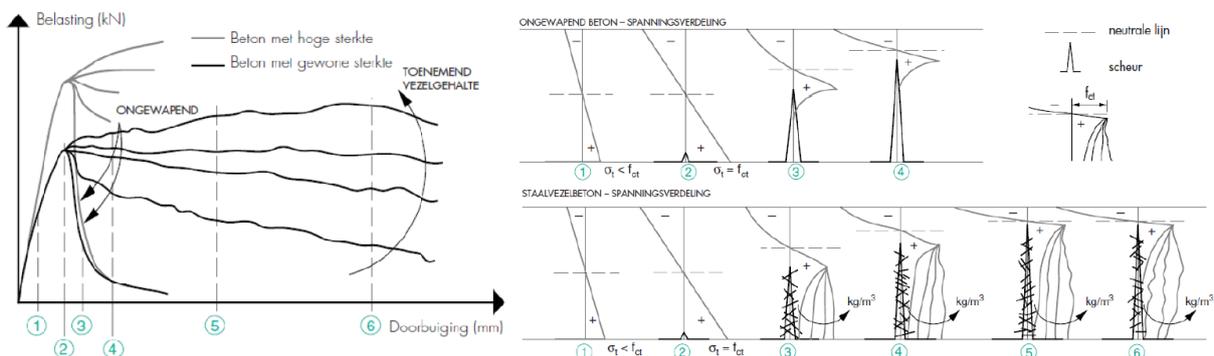
**Figuur 28: Referentiecurve van het referentiemengsel na 28 dagen**

Welk verloop er specifiek bekomen zal worden bij de synthetische vezels, hangt af van het gebruikte vezeltype. Zo zullen microvezels de maximale buigtrekspanning bij kleine vervormingen positief beïnvloeden, maar nog steeds een redelijke brosse breuk kennen door de beperkte lengte van de vezels. Hiertegenover zullen macrovezels pas in werking treden bij grotere scheuren en dus ook grotere doorbuigingen [60]. Deze stelling wordt grafisch weergegeven in figuur 29.



**Figuur 29: Buigtrekspanning in functie van het vezeltype [60]**

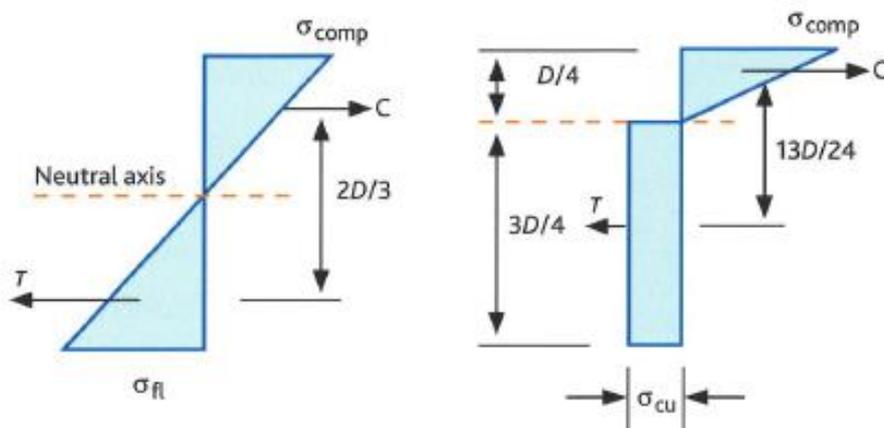
In figuur 30 wordt de spanningsverdeling in stappen van een verticale doorsnede van het proefstuk weergegeven. Zo is deze spanningsverdeling lineair tot de elastische of tweede fase, waar de eerste scheur wordt gevormd. Aangezien beton aanzienlijk sterker is in druk dan in trek, zal de neutrale vezel naar de drukzijde van de balk bewegen vanaf de plastische fase. In vergelijking met ongewapend beton, zullen de vezels bij vezelbeton trekkrachten opvangen zodat een residueel buigmoment opgenomen kan worden. Dit opneembare moment zal toenemen met een stijgend vezelgehalte in het beton [60].



**Figuur 30: Weergave van de spanningsverdeling in een verticale doorsnede in functie van het kracht-doorbuigingskarakteristiek [60]**

Verder zal de vorm van de curve afhankelijk zijn van het rekgedrag van de gebruikte vezel. Zo zal een vezeltype met een grote elasticiteitsmodulus al bij een kleine rek, en dus ook scheuropening, grote trekkrachten kunnen opvangen. Hiertegenover zullen vezels met een kleine elasticiteitsmodulus een veel grotere rek moeten ondergaan om gelijke trekkrachten op te kunnen vangen [60]. Deze stelling wordt ook bevestigd in het Technical Report No. 65, waar een vergelijking van de resultaten tussen staal- en synthetische vezels wordt gemaakt. Verder wordt er in dit document voorspeld dat de synthetische vezels een bepaalde slip zullen ondergaan net na de proportionaliteitsgrens. De fysische betekenis is het verankeren van de vezels in de cementmatrix, waardoor een kleine terugval van de buigspanning verwacht kan worden. Naast deze slip wordt de grootte van deze terugval ook beïnvloed door de elasticiteitsmodulus op gelijkaardige wijze als eerder aangehaald.

Door dit gedrag van vezelbetonsoorten kan er bij de berekeningen geen gebruik meer gemaakt worden van het klassieke spannings blok zoals links weergegeven in figuur 31. In de literatuur zijn er reeds veel alternatieve spanningsblokken in gebruik, maar één van de eerste werd voorgesteld door Hannant en wordt rechts weergegeven in figuur 31. Hierbij wordt verondersteld dat de neutrale as zich op een kwart van de hoogte van de doorsnede bevindt. Daarnaast veronderstelt de figuur dat de vezels verlengen bij een constante belasting over relatief kleine scheuropeningen [56].



**Figuur 31: Spanningsblok voorgesteld door Hannant [56]**

Om het gedrag van de vezels te beoordelen, zal er gebruik gemaakt worden van de huidige normen en aanbevelingen. Zo kan er een praktijkgerichte vergelijking gemaakt worden van de prestaties van de synthetische vezels met deze van de staalvezels. Tot slot nog een laatste opmerking: door de gemeten zetting van de machines zal de belasting  $P_{LOP}$  niet volgens de norm bepaald kunnen worden. Als aanname wordt gesteld dat de waarde  $P_{LOP}$  bekomen wordt als het maximum van het lineaire verloop bereikt wordt.

### 3.2.2 Voorspelling buigsterkte

Volgens het Technical Report No. 63 is de ontwerpwaarde van zowel de buigspanning als de trekspanning van vezelbeton gelijk aan deze van ongewapend beton [55]. Om deze reden zal er een richtwaarde berekend worden op basis van EC 2 [37]. De verwachte gemiddelde kubus druksterkte werd reeds eerder bepaald en bedraagt  $f_{cm,cube} = 121 \text{ MPa}$ .

Voor de berekening van de buigsterkte is de cilinder druksterkte nodig. Aangezien de norm geen eenduidige manier geeft voor de omzetting, wordt er hiervoor gebaseerd op onderzoek van Graybeal en Davis (2008) in samenwerking met Ductal-Lafarge. Zij onderzochten het verband tussen de cilinder- en kubusdruksterkte voor UHSB. Hierbij concludeerden ze dat er aangenomen mag worden dat de druksterkte van de kubus gelijk is aan de druksterkte van de cilinder [23]. Deze bewering werd ook bevestigd in het onderzoek van Tronci (2013), waarbij een identieke samenstelling gebruikt werd [57]. Op deze manier kan er voor de verwachte treksterkte het volgende resultaat bekomen worden:

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) = 5,4 \text{ MPa} \quad (3)$$

Vervolgens kan de buigsterkte bepaald worden als:

$$f_{ctm,fl} = \max\left\{\left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ctm}; f_{ctm}\right\} = 8,1 \text{ MPa} \quad (4)$$

Met  $h$  de totale hoogte van het element in mm. Op basis van EC 2 kan dus een buigsterkte van 8,1 MPa (LOP) verwacht worden. Al dient hierbij opgemerkt te worden dat EC 2 slechts normatief is voor sterkteklassen tot C90/105. Verder werd een aanname gemaakt voor het verband tussen de kubusdruksterkte en de cilinderdruksterkte. daardoor zal de richtwaarde hoogstwaarschijnlijk een overschatting zijn t.o.v. de experimenteel te bekomen waarden.

### 3.2.3 Breukenergie

Een eerste mogelijkheid om de vezelwerking te beoordelen is door de breukenergie te bepalen. Dit is een in literatuur veel gebruikt beoordelingscriterium en kan als volgt bepaald worden volgens de RILEM TC 50 FMC. Allereerst wordt de benodigde arbeid voor breuk  $W_f$  berekent met de formule:

$$W_f = \int_0^{\delta_u} P d\delta \quad (5)$$

Met  $P$  de belasting en  $\delta_u$  de uiteindelijke doorbuiging als de belasting tot nul is herleid. Vervolgens kan de uiteindelijke specifieke breukenergie  $G_f$  berekend worden met de formule:

$$G_f = \frac{W_f + m \cdot g \cdot \delta_u}{b \cdot (h - a)} \quad (6)$$

Waar  $m$  de massa tussen de steunpunten in kg is,  $g$  de valversnelling in  $\text{m/s}^2$ ,  $b$  de breedte van de balk,  $h$  de hoogte van de balk en  $a$  de diepte van de notch in meter. Deze

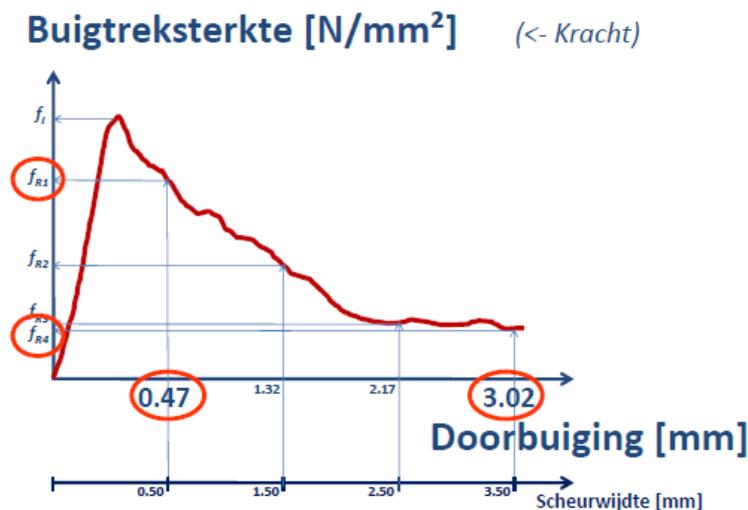
methode is dus afhankelijk van de afmetingen van de balk en wordt gebruikt als eenvoudige vergelijking tussen de verschillende samenstellingen. Zo betekent een grotere breukenergie een verhoogde weerstand van het materiaal tegen de vorming en het openen van de scheur. Wegens een veiligheid van de testopstelling, kan de proef niet uitgevoerd worden tot volledige breuk. Hiertoe zal de energie bepaald worden totdat de belasting terugvalt tot 10% van zijn maximale waarde.

### 3.2.4 NBN EN 14651

In de huidige Belgische norm voor het beproeven van de buigtreksterkte van staalvezelbeton wordt een aanbeveling gedaan voor de beoordeling van de resultaten [36]. In de eerste plaats wordt de LOP opgesteld van de verschillende resultaten. Naast de LOP is ook de residuele buigtreksterkte van belang. Om deze te beoordelen kunnen er vier residuele buigtrekspanningen vergeleken worden, namelijk  $f_j$  met  $j = 1, 2, 3$  en  $4$  (figuur 32) [10]. Deze vier waarden komen overeen met een CMOD van respectievelijk 0,5; 1,5; 2,5 en 3,5 mm of met een overeenkomstige doorbuiging van 0,47; 1,32; 2,17 en 3,02 mm. Het verband tussen de CMOD en de doorbuiging wordt gegeven door:

$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04 \quad (7)$$

Aangezien er met een gelijke verhouding wordt gewerkt van hoogte op lengte van de testopstelling, kan deze verhouding ook voor deze proef overgenomen worden.



Figuur 32: Beoordeling residuele buigtreksterkte [10]

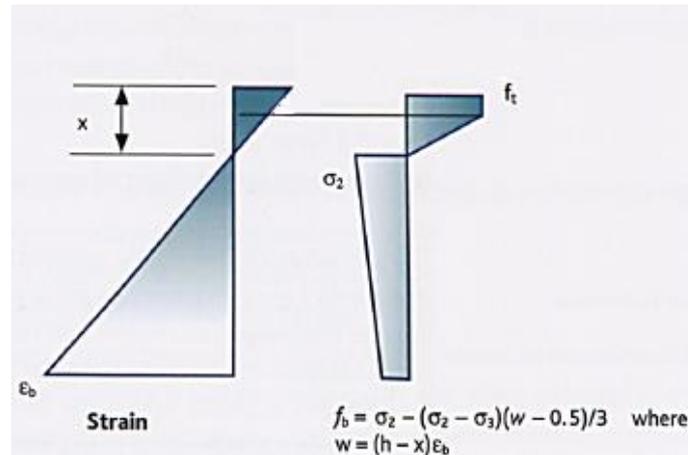
### 3.2.5 Technical Report No. 63

Het Technical Report No. 63 is een gids voor het ontwerp van staalvezelbeton [55]. Hierin worden aanbevelingen gedaan voor het ontwerp a.d.h.v. verschillende normen. Zo wordt er een aanbeveling gedaan op basis van de resultaten volgens de norm EN 14651. Hiervoor zullen er de belangrijkste onbekenden weergegeven worden voor de bepaling

van het ontwerpmoment  $M_{Rd}$ . Voor de overige berekeningen wordt er naar de aanbeveling zelf doorverwezen. Het ontwerpmoment  $M_{Rd}$  wordt gegeven door de vergelijking:

$$M_{Rd} = 0,5 \cdot f_b \cdot b \cdot (h - x) \left( h + \frac{x}{3} \right) + b \cdot (\sigma_2 - f_b)(h - x)(h + x)/6 \quad ( 8 )$$

Met  $b$  de breedte en  $h$  de hoogte van het constructiedeel in mm. Verder is  $x$  de afstand tot de neutrale vezel in mm. Tot slot is  $f_b$  de trekspanning onderaan de doorsnede en  $\sigma_2$  de trekspanning ter hoogte van de neutrale vezel zoals weergegeven in figuur 33.



Figuur 33: Vereenvoudigd Spanningsblok TR 63 [55]

Deze waarden kunnen berekend worden als:

$$f_b = \sigma_2 - (\sigma_2 - \sigma_3)(w - 0,5)/3 \quad ( 9 )$$

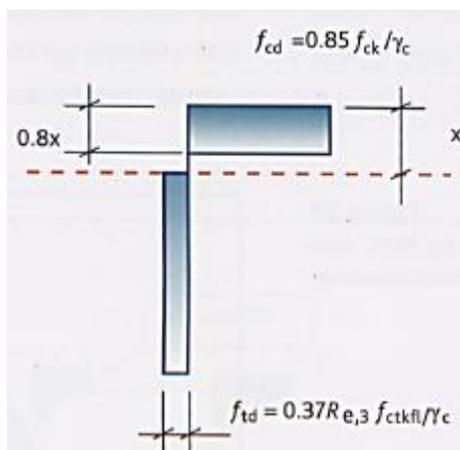
$$\sigma_2 = 0,45 \cdot f_{R1} \cdot k_h \quad ( 10 )$$

$$\sigma_3 = 0,37 \cdot f_{R4} \cdot k_h \quad ( 11 )$$

Hierbij stellen  $w$  de scheurbreedte in mm en  $k_h$  een vormfactor voor. Verder karakteriseren  $f_{R1}$  en  $f_{R4}$  de residuele buigsterkte voor zoals weergegeven in deel 3.2.4 NBN EN 14651. Hierbij kan er opgemerkt worden dat hoe groter deze waarden zijn, hoe groter het ontwerpmoment zal zijn en er bijgevolg een grotere belasting aangebracht kan worden. Aangezien enkel deze waarden uit de proeven van belang zijn voor de berekening, zullen  $f_{R2}$  en  $f_{R3}$  uit deel 3.2.5 NBN EN 14651 niet vergeleken worden bij de resultaten.

Als alternatief voor de ontwerpmethodede via de NBN EN 14651, geeft het Technical Report No. 63 een methode o.b.v. de Japanse testmethode JSCE-SF4. Hierbij wordt het ontwerpmoment gegeven door de vergelijking bepaald o.b.v. figuur 34:

$$M_{Rd} = 0,8 \cdot f_{cd} \cdot f_{td} \cdot b \cdot h^2 \cdot \left[ 0,5 + \frac{0,1 \cdot f_{td}}{0,8 \cdot f_{cd} + f_{td}} \right] / [0,8 \cdot f_{cd} + f_{td}] \quad ( 12 )$$



**Figuur 34: Vereenvoudigd spanningsblok JSCE-SF4 [55]**

Met  $f_{cd}$  de design druksterkte en  $f_{td}$  de design residuele treksterkte bepaald als:

$$f_{td} = 0,37 \cdot R_{e,3} \cdot f_{ctk,fl} / \gamma_c \quad (13)$$

Met  $f_{ctk,fl}$  de rekenwaarde van de buigtreksterkte van staalvezelbeton in MPa en  $\gamma_c$  de veiligheidsfactor voor staalvezelbeton, namelijk 1,5. Verder is  $R_{e,3}$  de buigtaaiheidswaarde van staalvezelbeton uitgaande van een doorbuiging van 3 mm. Met andere woorden karakteriseert deze waarde nascheurgedrag van het beton. De  $R_{e,3}$ -waarde kan berekend worden volgens de CUR-Aanbeveling 35 met de formule [14]:

$$R_{e,3} = \frac{f_{fctmeq3,fl}}{f_{fctm,fl}} \quad (14)$$

Hierbij is  $f_{fctmeq3,fl}$  de gemiddelde equivalente buigtreksterkte berekend uit de waarden van  $f_{fcteq3,fl}$  in MPa en  $f_{fctm,fl}$  de gemiddelde buigtreksterkte (LOP) berekend uit de waarden van  $f_{fct,fl}$ .

$$f_{fcteq3,fl} = \frac{D_{b3} \cdot l}{j \cdot b \cdot h^2} \quad (15)$$

Met  $D_{b3}$  de buigtaaiheid berekend als de oppervlakte onder de curve die de kracht-doorbuigingsrelatie weergeeft, tussen de doorbuigingsgrenzen 0 mm en 3 mm. Verder is  $j$  de doorbuigingsgrens van 3 mm,  $l$  de overspanning van de balk,  $b$  de breedte van de balk en  $h$  de hoogte van de balk in mm. Een opmerking die hierbij gemaakt moet worden is dat deze formule geldt voor een vierpuntbuigproef. Aangezien de testmethode in dit onderzoek gebaseerd is op een driepuntbuigproef, dient deze formule aangepast te worden volgens de norm NBN EN 12390-5 als [35]:

$$f_{fcteq3,fl} = \frac{3}{2} \cdot \frac{D_{b3} \cdot l}{3 \cdot b \cdot h^2} = \frac{D_{b3} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (16)$$

Met andere woorden is het dus van belang om de waarde  $R_{e,3}$  te bepalen. Hoe groter deze waarde zal zijn, hoe groter het uiteindelijke vloeimoment zal zijn. Een fysische verklaring voor deze waarde is als volgt. De  $R_{e,3}$ -waarde is recht evenredig met de  $D_{b3}$ -waarde. Met andere woorden zal dus de  $R_{e,3}$ -waarde stijgen bij een groter oppervlak onder de kracht-

doorbuigingscurve en dus groter zijn bij efficiëntere vezels. Hieruit kan er dus besloten worden dat deze waarde een maat kan vormen voor de ductiliteit van het beton. Namelijk hoe kleiner deze waarde is, hoe brosser de breuk zal verlopen en omgekeerd. Om deze reden zal ook deze  $R_{e,3}$ -waarde vergeleken worden bij de resultaten.

### 3.2.6 CUR-Aanbeveling 36

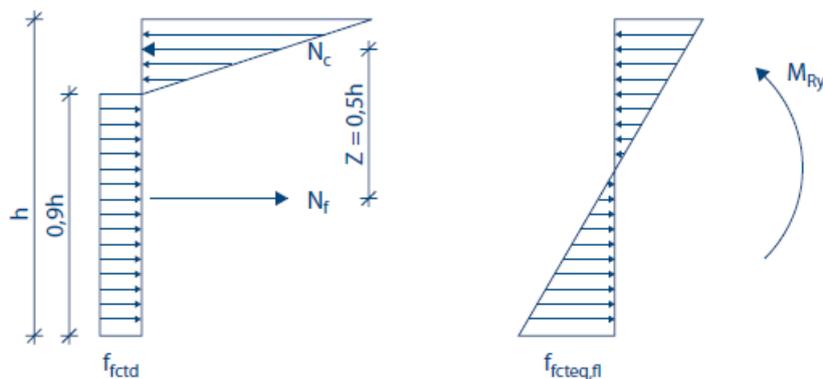
Naast de aanbevelingen zoals beschreven in 3.2.6 Technical Report No. 63, kan er ook berekend worden volgens de Nederlandse CUR-Aanbeveling 36:2011. Deze aanbeveling is specifiek voor het ontwerp van elastisch ondersteunde betonvloeren en -verhardingen [14]. Vloeren en verhardingen van staalvezelbeton mogen berekend worden volgens de vloeilijentheorie. Het vloeimoment van een doorsnede in kNm van staalvezelbeton wordt gegeven door:

$$M_{Ry} = (f_{cteq,fl} - \sigma_{r\Delta t}) \cdot \frac{b \cdot h^2 \cdot 10^{-6}}{6} \quad (17)$$

Met  $f_{cteq,fl}$  de equivalente waarde van de buigtreksterkte van staalvezelbeton in MPa,  $\sigma_{r\Delta t}$  de trekspanning in MPa t.g.v. krimp- en temperatuurbelastingen,  $b$  de breedte en  $h$  de hoogte van de doorsnede in mm. De equivalente buigsterkte kan worden berekend als:

$$f_{cteq,fl} = \frac{2,7 \cdot f_{fctd}}{1,4} \quad (18)$$

Met  $f_{fctd}$  de rekenwaarde van de treksterkte van staalvezelbeton in MPa. Deze verhouding tussen de equivalente buigsterkte en de treksterkte is gebaseerd op de veronderstelling van het spanningsblok zoals in figuur 35.



**Figuur 35: Werkelijk en equivalent spanningsblok CUR 36 [14]**

De rekenwaarde van de buigtreksterkte van staalvezelbeton voor elastisch ondersteunde vloeren kan berekend worden met de formule:

$$f_{fctd} = f_{ctd} \cdot \left[ 1 + \frac{R_{e,1,5} - 0,3}{0,7} \right] \text{ voor } 0,3 \leq R_{1,5} \leq 1,0 \quad (19)$$

Met  $f_{ctd}$  de rekenwaarde van de treksterkte van ongewapend beton in MPa en  $R_{e,1,5}$  de buigtaaiheidswaarde van staalvezelbeton uitgaande van een doorbuiging van 1,5 mm. De

opgelegde grenzen betekenen te bros wanneer kleiner dan 0,3 en een te ductiel karakter bij een waarde groter dan 1. Deze waarde kan analoog berekend worden aan de  $R_{e,3}$ -waarde als:

$$R_{e,1,5} = \frac{f_{fctmeq1,5,fl}}{f_{fctm,fl}} \quad (20)$$

Hierbij is  $f_{fctmeq1,5,fl}$  de gemiddelde equivalente buigtreksterkte berekend uit de waarden van  $f_{fcteq1,5,fl}$  in MPa. Ook voor de equivalente buigsterkte moet de formule aangepast worden door het gebruik van de driepuntbuigproef waardoor ze er als volgt uitziet:

$$f_{fcteq1,5,fl} = \frac{3}{2} \cdot \frac{D_{b1,5} \cdot l}{j \cdot b \cdot h^2} = \frac{D_{b1,5} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (21)$$

Met  $D_{b1,5}$  de buigtaaiheid tussen de doorbuigingsgrenzen 0 mm en 1,5 mm. Ook hier heeft een grotere  $R_{e,1,5}$ -waarde een positieve invloed op het vloeimoment, bijgevolg zal ook deze waarde vergeleken worden bij de resultaten.

### 3.3 Verwerking resultaten

Om de druksterkte van een serie te bepalen, zal telkens het gemiddelde bepaald worden. Om de spreiding van de resultaten aan te geven, zal hierbij de variatiecoëfficiënt (COV) gegeven worden. Deze COV is een statistische maat voor de relatieve spreiding van de resultaten en wordt bepaald door de verhouding van de standaardafwijking tot het rekenkundig gemiddelde.

Ook bij de resultaten van de buigproef zal van een analoge weergave gebruik gemaakt worden. Om de geldigheid van de resultaten te beoordelen, zal er gewerkt worden volgens de criteria zoals vermeldt in de CUR-Aanbeveling 35 [14]. Het resultaat van een buigproef is ongeldig indien:

- Een equivalente buigtreksterkte van een proefstuk meer dan 35% afwijkt van de gemiddelde waarde van alle proefresultaten van de serie. Indien een resultaat ongeldig is, behoeft de geldigheidstoets niet opnieuw voor dezelfde serie te worden toegepast.
- De buigtreksterkte (LOP) van een proefstuk meer dan 20% afwijkt van de gemiddelde waarde van alle proefresultaten van de serie. Indien een resultaat ongeldig is, behoeft deze geldigheidstoets niet opnieuw voor dezelfde serie te worden toegepast.

Indien blijkt dat a.d.h.v. deze criteria een proefresultaat niet geldig is, zal dit geverifieerd worden door een onderzoek te doen naar het breukvlak van de desbetreffende balk.



## 4. Resultaten

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de laboproeven onderzocht worden. Allereerst zullen er enkele opmerkingen besproken worden die tijdens de labo's werden waargenomen. Hierbij zal ook de vloeimaat van de verschillende samenstellingen weergegeven worden. Vervolgens zal de druksterkte beoordeeld en vergeleken worden. Hierna worden de resultaten van de buigproeven uitvoerig besproken. Dit deel van de studie maakt een onderscheid tussen de samenstellingen met staalvezels, PP-vezels, PVA-vezels en de hybridesamenstellingen. Uiteindelijk zal er een vergelijking volgen, die alle resultaten samenvat.

### 4.1 Opmerkingen labo's

Tijdens de labo's werden er enkele vaststellingen gemaakt, die eerst besproken zullen worden. De eerste opmerkingen tonen de nadelen van het gebruik van staalvezels in architectonisch beton aan. Het eerste visuele nadeel na het ontkisten van de balken en kubussen waren de zichtbare micro staalvezels aan het oppervlak. Dat was daarentegen niet het geval met de synthetische vezels. Het tweede nadeel waren de scherpe uitstekende staalvezels, die in de praktijk wonden of schade kunnen veroorzaken.



**Figuur 36: Zichtbare micro staalvezels aan oppervlak**

Ook de polypropyleenvezels hebben een zeer belangrijk nadeel. Dit ontstaat als een gevolg van het lage soortelijk gewicht van de PP-vezels en het gebruik van zelfverdichtend beton. Zo drijven de vezels op in het verse beton, waardoor er een heterogene vezelverdeling ontstaat. Dit is duidelijk weergegeven in figuur 37, waarbij in het breukvlak de vezels grotendeels aan de linkerkant (bovenkant balk) verdeeld zijn.



**Figuur 37: Slechte verdeling PP-vezel**

Zoals in tabel 8 werd meegegeven, zijn er mengsels met verschillende vezeldoseringen getest. Deze worden weergegeven in tabel 9, waarbij de vloeimaat per mengsel gegeven is. Een eerste opmerking die gemaakt kan worden, is dat bij een stijgende hoeveelheid vezels de vloeimaat daalt. Verder tonen deze resultaten het grote nadeel van de PVA-vezels aan, namelijk een veel slechtere verwerkbaarheid. De reden van deze verminderde verwerkbaarheid kwam reeds aan bod in deel 2.2.1 Principe samenstelling UHSB. Daar werd namelijk gesteld dat er nog een goede verwerkbaarheid bekomen kan worden, als de grootste deeltjes ongeveer 20 keer kleiner zijn dan de vezellengte. Wel kan de verwerkbaarheid terugvallen bij vezelrijke volumes (Bonneau 1997) [6].

Er kon gekozen worden om superplastificeerder toe te voegen, zodat iedere samenstelling ongeveer een gelijke schudmaat bekam. De reden waarom dit niet gedaan werd is gebaseerd op de technische fiche van de gebruikte superplastificeerder, namelijk Sika Viscocrete-20 Gold [47]. Hierin wordt vermeld dat er een maximum van twee procent superplastificeerder toegevoegd mag worden t.o.v. het cementgewicht. Verder staat er dat overdoseringen mogelijk zijn. Uit tabel 6 blijkt echter dat er bijna drie procent van het cementgewicht superplastificeerder wordt toegevoegd. Met andere woorden is dit al meer dan de maximaal toegestane hoeveelheid. Om deze reden werd er dan ook gekozen om geen extra superplastificeerder toe te voegen.

Om de specifieke voor- en nadelen van de PP- en PVA-vezels te combineren, werden er ook enkele hybridemengsels getest. Zo wordt de verwerkbaarheid verbeterd t.o.v. de mengsels met PVA-vezels en wordt er een uniforme vezelverdeling t.o.v. de mengsels met PP-vezels bekomen. Zoals uit tabel 8 ook bleek, konden er meer synthetische vezels toegevoegd worden om een gelijke kostprijs te bekomen als met de staalvezels. Toch werden geen grotere hoeveelheden vezels getest door de te kleine vloeimaat.

Naam	Vloeimaat [cm]	Naam	Vloeimaat [cm]
<b>Ref</b>	63	<b>PVA2</b>	40
<b>PP1</b>	64	<b>PP0,3-PVA0,7</b>	57
<b>PP1,5</b>	62	<b>PP0,45-PVA1,05</b>	51
<b>PP2</b>	59	<b>PP0,6-PVA1,4</b>	49
<b>PVA1</b>	58	<b>PP2-PVA0,5</b>	56
<b>PVA1,5</b>	51	<b>PP2-PVA1</b>	46

**Tabel 9: Vloeimaat van de verschillende mengsels**

Tot slot konden er in de breukvlakken van samenstellingen PP1 en PVA1 een licht grijze klontervorming waargenomen worden. Deze worden weergegeven in figuur 38. Zoals besproken in hoofdstuk 2.4 Referentiesamenstelling, werd er voor deze reeksen nog geen gebruik gemaakt van de geoptimaliseerde mengprocedure. Hierdoor is het mogelijk dat het beton niet homogeen vermengd werd, wat kan resulteren in een mindere optimale pakking. Zoals in hoofdstuk 2.2.1 Principe samenstelling UHSB werd beschreven, is deze optimale pakking van belang voor een goede krachtoverdracht. Zo kan een niet optimale pakking resulteren in een minder goede krachtoverdracht. Dit resulteert in grotere schuif- en trekspanningen op de grensvlakken tussen de granulaten en de cementpasta, met een verhoogd potentieel van scheurvorming op de grensvlakken tot gevolg.



**Figuur 38: Klontervorming in het breukvlak bij PP1 en PVA1**

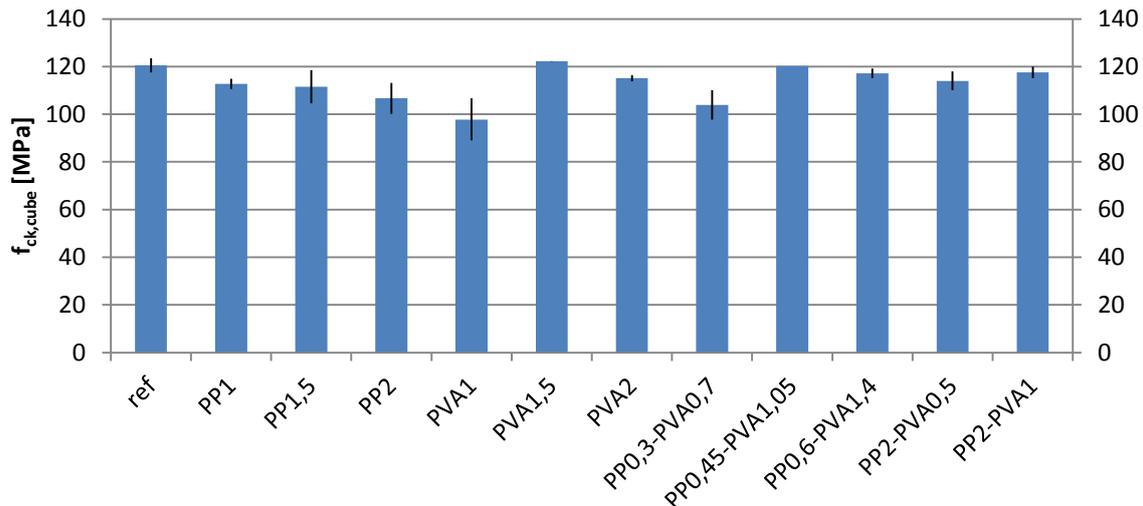
## 4.2 Druksterkte

De drukproeven werden uitgevoerd op twee kubussen per serie met zijden van 100 mm na een tijd van 14 dagen. In tabel 10 worden de resultaten van de druksterkte weergegeven van de verschillende aangemaakte series. Grafisch wordt dit weergegeven in figuur 39. Een eerste opmerking die gemaakt moet worden is dat het referentiemengsel werd getest na 13 dagen. Ten tweede is de druksterkte van het mengsel PP0,45-PVA1,05 slechts gebaseerd op 1 waarde. Bij één kubus werd er namelijk een knik opgemerkt in enkele zijden, wat ook resulteerde in een druksterkte van slechts 89 MPa. Om deze reden werd dit resultaat geschrapt.

Naam mengsel	$f_{cm,cube}$ [MPa]	COV [%]
ref	120,5	3%
PP1	112,7	3%
PP1,5	111,5	9%
PP2	106,7	9%
PVA1	97,8	13%
PVA1,5	122,2	0%
PVA2	115,1	2%
PP0,3-PVA0,7	103,9	8%
PP0,45-PVA1,05	120,3	-
PP0,6-PVA1,4	117,2	2%
PP2-PVA0,5	114	5%
PP2-PVA1	117,6	3%

**Tabel 10: Resultaten drukproeven van de verschillende series**

Een algemene opmerking die gemaakt kan worden is dat een deel van de resultaten de richtwaarde van 121 MPa goed evenaren of benaderen, zelfs met een kleine spreiding van de resultaten. Toch zijn er ook enkele samenstellingen met een lagere druksterkte en een grotere spreiding van de resultaten.



**Figuur 39: Resultaten drukproeven van de verschillende series**

In de eerste plaats kunnen de mindere resultaten van de mengsels PP1 en PVA1 worden verklaard door de mindere betonkwaliteit. Zoals in hoofdstuk 4.1 Opmerkingen labo's werd besproken en weergegeven in figuur 38, kon er in de breukvlakken een klontervorming waargenomen worden. Hierdoor kan een verminderde betonkwaliteit bekomen worden, wat de verminderde druksterkte verklaard.

Bij het mengsel PP0,3-PVA0,7 werd er gebruik gemaakt van licht geklonterd cement. Dit kan een mogelijke verklaring zijn voor de beperkte druksterkte, doordat ook hier de optimale pakking niet meer gerespecteerd wordt.

Verder kunnen er betere druksterktes bij een gelijk volumepercentage van de mengsels met PVA-vezels t.o.v. de mengsels met PP-vezels vastgesteld worden. De verklaring hiervoor kan teruggevonden worden in deel 3.1.1 Gedrag UHSB onder drukspanning en figuur 24. Dat deel stelde namelijk dat microvezels een betere invloed kunnen hebben op de druksterkte dan macrovezels door het overbruggen van de microscheuren.

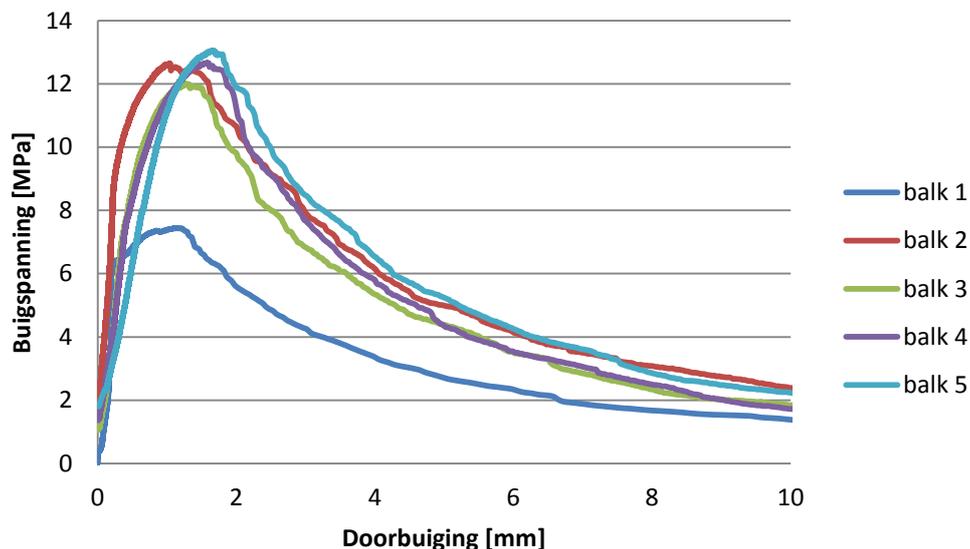
Een laatste verklaring voor een verminderde druksterkte kan toegewezen worden aan de invloed van de vezels. Het effect van de vezels werd reeds in verschillende studies onderzocht, met als voorbeeld dat van Boulekbache et al. (2012) [7]. Er kan algemeen worden geconcludeerd dat een stijgend volumepercentage van vezels een negatieve invloed heeft op de druksterkte. Dit kan verklaard worden door de introductie van holtes, wat de porositeit van het beton zal benadelen. Een tweede mogelijk probleem ontstaat bij grotere volumepercentages. Zo kunnen er vezelbolletjes ontstaan in het beton. Ook dit fenomeen kan de optimale pakking verstoren en resulteren in een verminderde druksterkte.

## 4.3 Buigtreksterkte

In dit deel zullen de resultaten van de driepuntbuigproeven besproken worden, met een onderscheid tussen de verschillende vezelverdelingen. Zoals eerder vermeld, werden er voor iedere serie telkens vijf balken getest. Deze hadden als afmetingen 500x100x100 mm, een notch van 5 mm en een overspanning van 350 mm op de testbank. Hierbij zal telkens de buigtrekspanning grafisch weergegeven worden in functie van de doorbuiging, waarbij de nodige getalwaarden in tabelvorm zullen worden bijgevoegd.

### 4.3.1 Referentiesamenstelling

De verschillende resultaten van het referentiemengsel worden grafisch weergegeven in figuur 40 tot een maximale doorbuiging van 10 mm.



**Figuur 40: Spanning-doorbuigingskarakteristieken referentiemengsel**

Een eerste opmerking op basis van deze verlopen van de buigspanning is dat het hardening gedrag duidelijk zichtbaar is. Verder kan er opgemerkt worden dat de resultaten van balk één sterk afwijken van de overige resultaten. Hierdoor wordt er ook een grote variatiecoëfficiënt bekomen van de verschillende criteria. Als de breukvlakken van de beproefde balken nader onderzocht worden, kan er worden vastgesteld dat er in de onderste helft van de balk zeer weinig vezels zitten. Deze vaststelling wordt weergegeven in figuur 41. Op deze linkse foto is duidelijk een mindere hoeveelheid vezels vast te stellen in vergelijking met de rechtse foto.



**Figuur 41: Vergelijking staalvezelverdeling in breukvlak met links een slechte en rechts een goede verdeling**

Uit de karakteristieken kunnen ook de nodige beoordelingscriteria afgeleid worden, zoals weergegeven in tabel 11. Ook hier kunnen de sterk afwijkende resultaten van balk één worden vastgesteld in verhouding tot de overige resultaten. Aangezien de equivalente buigtreksterkte 35 % afwijkt van het gemiddelde, zal dit resultaat geschrapt worden voor verdere berekeningen.

nummer	$f_{LOP}$	$\Delta f_{LOP} \%$	$f_{R1}$	$f_{R4}$	$G_f$	$f_{fcteq1,5,fl}$	$\Delta f_{ct1,5} \%$	$f_{fcteq3,fl}$	$\Delta f_{ct3} \%$
	[MPa]		[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[MPa]		[MPa]	
1	6,4	18	6,7	4,2	6432	6,36	27	5,84	35
2	8,6	10	10,7	7,9	11170	10,69	23	10,31	16
3	7,1	9	8,4	6,8	9644	9,06	4	9,04	2
4	7,4	5	7,8	7,6	10117	9,07	4	9,63	8
5	8,1	4	5,4	8,4	10937	8,25	5	9,63	8
<b>gemiddelde</b>	7,5		7,8	7,0	9660	8,69		8,89	
<b>COV</b>	11%		25%	24%	20%	18%		20%	

**Tabel 11: Resultaten referentiesamenstelling**

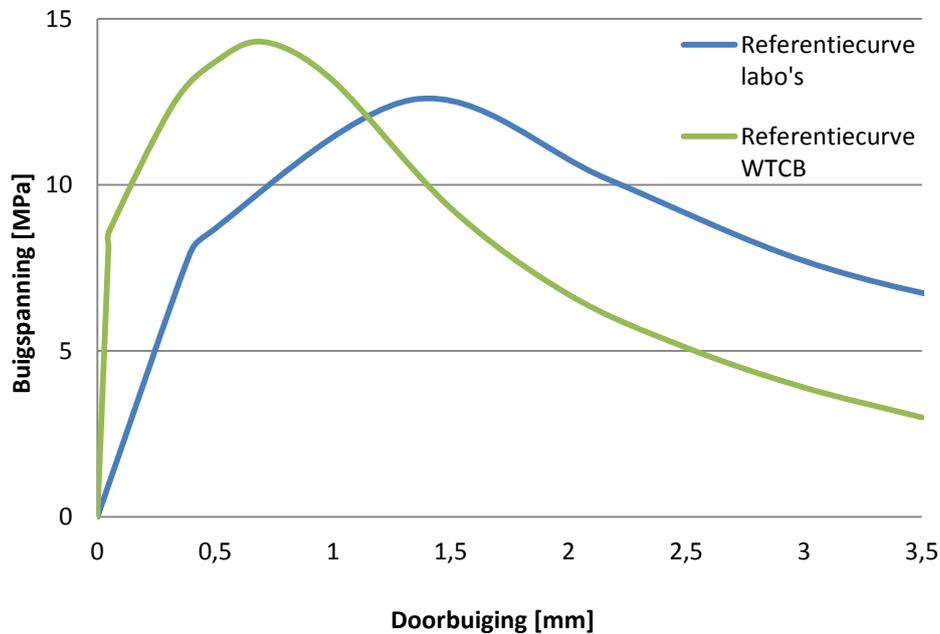
Op deze manier kunnen de gemiddelde referentiewaarden bekomen worden voor de samenstellingen met synthetische vezels zoals weergegeven in tabel 12. Door het verwijderden van de resultaten van balk één, daalt ook de variatiecoëfficiënt sterk, wat tussen haken wordt weergegeven. Tot slot kan uit beide buigtaaiheidswaarden afgeleid worden dat de proefstukken zeker niet bros breken, maar een ductieler karakter vertonen doordat de waarde groter is dan één.

Naam	$f_{m,LOP}$	$f_{m,R1}$	$f_{m,R4}$	$G_f$	$R_{e,1,5}$	$R_{e,3}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
<b>ref</b>	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24

**Tabel 12: Referentiewaarden voor de resultaten met de synthetische vezels**

Op basis van de gemiddelde referentieresultaten kan er ook een gemiddelde referentiecurve opgesteld worden. Deze wordt voorgesteld in figuur 42, waarbij een vergelijking wordt gemaakt met de referentiecurve verkregen bij het WTCB (zie figuur 28). De lagere waarden van de curve worden verklaard door het aantal dagen waarna

getest werd, namelijk 13 i.p.v. 28. Verder kan er een grotere doorbuiging opgemerkt worden voor het bereiken van de proportionaliteitsgrens in vergelijking met de curve van het WTCB. De reden hiervoor werd reeds toegelicht in deel 3.2 Buigproef en kan worden verklaard door de testopstelling. De verplaatsingssensor zal namelijk ook de samendrukking van de machineonderdelen meten.



**Figuur 42: Vergelijking referentiecurve labo's met referentiecurve WTCB**

Om te bevestigen dat het verschil te wijten is aan het samendrukken van de machineonderdelen, zal dit worden aangetoond via de elasticiteitsmodulus. De elasticiteitsmodulus zal namelijk variëren bij een verschillende ouderdom van het beton. Een eerste methode is via Eurocode 2 [37]. Hierin wordt een formule voorgesteld om de elasticiteitsmodulus te berekenen i.f.v. de tijd met de formule:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (22)$$

Waarin  $E_{cm}(t)$  en  $f_{cm}(t)$  de waarden zijn op een ouderdom van  $t$  dagen en  $E_{cm}$  en  $f_{cm}$  de waarden bepaald op een ouderdom van 28 dagen. Volgens de Eurocode kan  $f_{cm}(t)$  berekend worden als:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (23)$$

Met  $\beta_{cc}(t)$  een coëfficiënt die afhangt van de ouderdom  $t$  van het beton:

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{\frac{1}{2}}\right)} \quad (24)$$

Met  $s$  een coëfficiënt die afhangt van de soort cement. Voor CEM 42,5 R betekent dit 0,2.

Zo kan het volgende verband bekomen worden:

$$E_{cm}(13) = 0,972 \cdot E_{cm}$$

Een tweede methode is ook gebaseerd op de formule voor de elasticiteitsmodulus in functie van de tijd, maar hierin worden de gekende druksterktes op de respectievelijke dagen ingevuld. Uit onderzoek van Tronci (2013), gebaseerd op een gelijke beton- en vezelsamenstelling, werd er een druksterkte na 28 dagen van 158,4 MPa bekomen [57]. Uit eigen onderzoek (hoofdstuk 4.2 druksterkte) blijkt de druksterkte na 13 dagen 120,5 MPa. Op deze manier kan als verband gevonden worden dat:

$$E_{cm}(13) = 0,921 \cdot E_{cm}$$

Deze tweede methode kan als nauwkeuriger worden beschouwd aangezien de druksterkte rechtstreeks wordt ingevuld. De elasticiteitsmodulus kan uit een driepuntbuigproef voor een balk met rechthoekige doorsnede bepaald worden worden met de formule:

$$E_c = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{dP}{d\delta} \quad (25)$$

Waarin L de lengte tussen de opleggingen bedraagt, b de breedte en h de hoogte van de balk in mm. De verhouding  $dP/d\delta$  geeft de helling van het lineaire deel weer van de kracht-doorbuigingskarakteristiek. De elasticiteitsmodulus zal bepaald worden op basis van de referentiecurve van het WTCB. Op basis van deze gegevens, die worden weergegeven in tabel 13, kan de verwachte elasticiteitsmodulus na 13 dagen  $E_{cm}(13)$  bepaald worden.

WTCB	$E_{cm}$	$E_{cm}(13)$
	[GPa]	[GPa]
<b>Methode 1</b>	45	43,8
<b>Methode 2</b>	45	41,5

**Tabel 13: Berekening verwachte elasticiteitsmodulus**

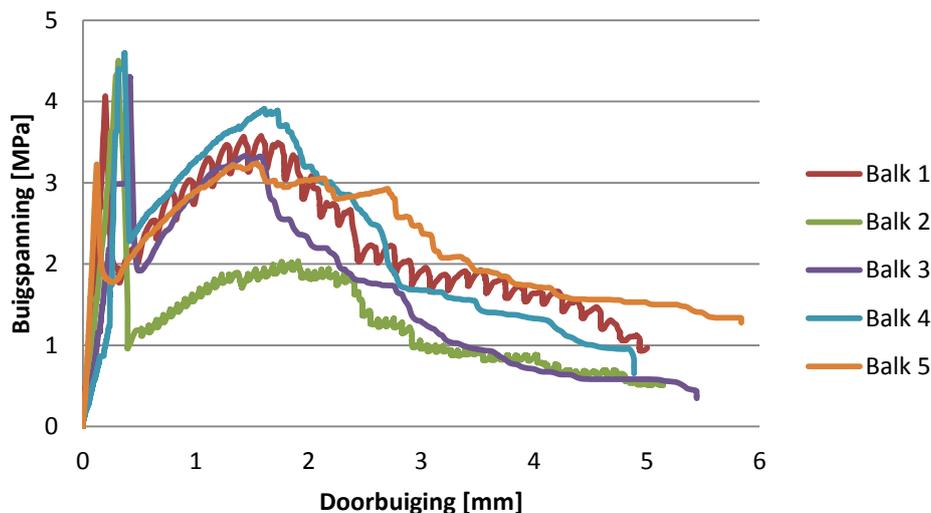
Als vervolgens  $E_{cm}(13)$  van de zelf geteste proefstukken wordt bepaald, blijkt deze slechts 4,2 GPa te bedragen. Aangezien deze ongeveer tien keer kleiner is dan de te verwachten elasticiteitsmodulus, kan er volgend besluit gevormd worden: ondanks de iets kleinere stijfheid van het beton, zal de grotere doorbuiging bij LOP hoofdzakelijk verklaard kunnen worden door het meten van het zetten en samendrukken van de machineonderdelen. Door deze vaststelling zal de elasticiteitsmodulus in het verdere deel van dit onderzoek niet bepaald worden.

#### 4.3.2 Samenstelling met PP-vezels

Als eerste alternatief voor de staalvezels, worden er PP-vezels getest. Zoals eerder vermeld, bedragen de volumepercentages 1; 1,5 en 2%. De resultaten zullen telkens apart besproken worden en uiteindelijk met elkaar vergeleken worden in een samenvatting.

## PP1

In figuur 43 worden de resultaten weergegeven van het mengsel PP1. Een eerste opmerking is de lage proportionaliteitsgrens van de vijfde balk. Vervolgens kan er een algemeen softening-verloop herkend worden, wat niet voldoende is in vergelijking met de staalvezels. Dit softening-verloop wordt wel bevestigd door de technische fiche van de PP-vezel voor lagere vezeldoseringen. Er wordt gesteld dat bij een vezeldosering van 5 kg/m<sup>3</sup>, de minimale buigsterkte 1,9 MPa bedraagt bij een doorbuiging van 0,47 mm. Voor een doorbuiging van 3,02 mm zou de minimale buigsterkte minstens 2,2 MPa moeten bedragen [1]. Een opmerking die hierbij gemaakt moet worden, is dat deze resultaten gelden voor 28 dagen. Aangezien er na 14 dagen werd getest, wordt er een grotere buigsterkte verwacht, zodat deze referentiewaarden zeker gehaald worden.



Figuur 43: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP1

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	4,1	1	2,2	2	2055	2,67	11	2,66	11
2	4,5	9	1,2	1	1254	1,74	27	1,69	29
3	4,3	4	2	1,3	1639	2,54	6	2,33	2
4	4,6	11	4,4	1,7	2080	2,66	11	2,86	20
5	3,2	23	2,2	2,4	2380	2,53	5	2,71	14
<b>gemiddelde</b>	4,1		2,4	1,7	1882	2,4		2,4	
<b>COV</b>	14%		50%	33%	23%	18%		21%	

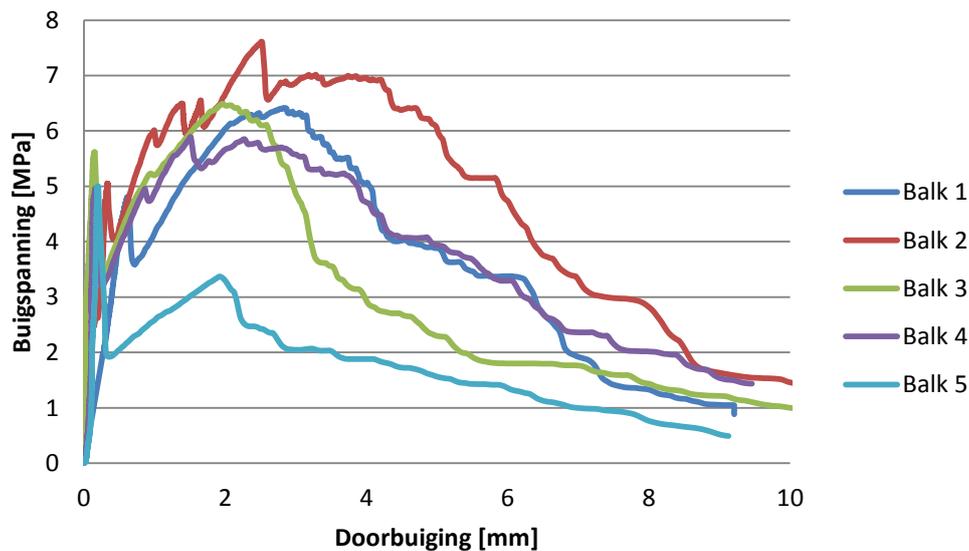
Tabel 14: Resultaten PP1

Vervolgens worden in tabel 14 de beoordelingscriteria weergegeven, bepaald o.b.v. de spanning-doorbuigingskarakteristieken. Ook hier blijkt de proportionaliteitsgrens sterk af te wijken van de overige resultaten. Aangezien deze meer dan 20% afwijkt van het gemiddelde, zal het resultaat geschrapt worden. Een reden voor deze kleinere waarde kan verklaard worden door de mindere kwaliteit van het beton. Deze mindere kwaliteit

werd reeds aangetoond in hoofdstuk 4.2 Druksterkte door de klontervorming zoals voorgesteld in figuur 38. In vergelijking met de overige balken was deze klontervorming in grotere mate waar te nemen in balk nummer vijf.

## PP1,5

Zoals in deel 3.2.1 gedrag UHSB onder buigspanning beschreven werd, kan de residuele buigtreksterkte beïnvloed worden door het vezelpercentage te veranderen. Om deze reden werd er voor een hoger vezelpercentage gekozen, om het hardening-verloop van de staalvezels proberen te benaderen. De resultaten van deze serie worden weergegeven in figuur 44.



Figuur 44: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP1,5

Ook hier is er een resultaat waar te nemen dat sterk afwijkt van de overige resultaten, namelijk deze van balk vijf. De reden hiervoor is een beperkte hoeveelheid vezels zoals weergegeven in figuur 45. Hier is in de linkse foto duidelijk een tekort aan vezels in vergelijking met de rechtse foto waar te nemen. Verder kan er weer de slechte vezelverdeling vastgesteld worden zoals in 4.1 opmerkingen labo's werd aangehaald.

Deze afwijking wordt ook weergegeven in tabel 15, waarin de uitgewerkte resultaten van de verschillende proeven worden weergegeven. Aangezien ook de equivalente buigsterkte van deze balk telkens meer dan 35% afwijkt van het gemiddelde, wordt dit resultaat geschrapt bij het opstellen van de gemiddelde waarden.



**Figuur 45: Vergelijking hoeveelheid PP-vezels in breukvlak met links slechte en rechts normale hoeveelheid**

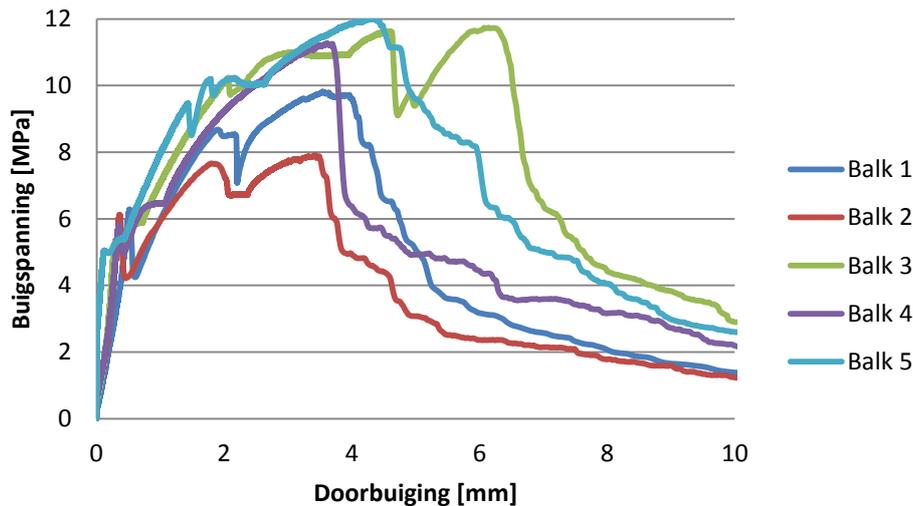
nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	4,8	6	3,8	6,3	6190	3,59	11	4,82	2
2	5	2	4,1	6,9	8762	4,87	21	5,84	11
3	5,6	10	4	4,8	5544	4,76	18	5,41	3
4	5	2	3,8	5,6	6368	4,41	9	5,02	5
5	5	2	2	2	2925	2,51	38	2,60	51
<b>gemiddelde</b>	5,1		3,5	5,1	5958	4,03		4,74	
<b>COV</b>	6%		25%	37%	35%	25%		27%	

**Tabel 15: Resultaten PP1,5**

## PP2

Om een nog beter hardening-verloop te bekomen dat deze van de staalvezels benadert, werd er een mengsel geproduceerd met 2% PP-vezels. De resultaten van deze proeven worden weergegeven in figuur 46.

Bij deze resultaten kan er een grote spreiding waargenomen worden bij grotere doorbuigingen, maar voldoen alle resultaten aan de geldigheidscriteria bij de kleinere doorbuigingen. Bij het verloop kan er telkens een terugval van de buigspanning opgemerkt worden op grote sterkte, waarna de buigspanning weer verder stijgt. Deze terugval kan twee oorzaken hebben. Zo is het in de eerste plaats mogelijk dat de testbank niet snel genoeg kan reageren na het begeven van enkele vezels. Een tweede mogelijkheid werd reeds besproken in hoofdstuk 3.2.1 Gedrag UHSB onder buigspanning. Door de kleine elasticiteitsmodulus van de PP-vezels is het mogelijk dat de vezels nog niet voldoende grote krachten kunnen opvangen. Bijgevolg zal er eerst een kleine rek van de vezel nodig zijn, gevolgd door een grotere doorbuiging van de balk, om een verder hardening-verloop te bekomen. Dit fenomeen kan voorkomen als een reeks vezels het begeven en de volgende reeks vezels nog niet voldoende gerokken is om de krachten over te kunnen nemen.



**Figuur 46: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP2**

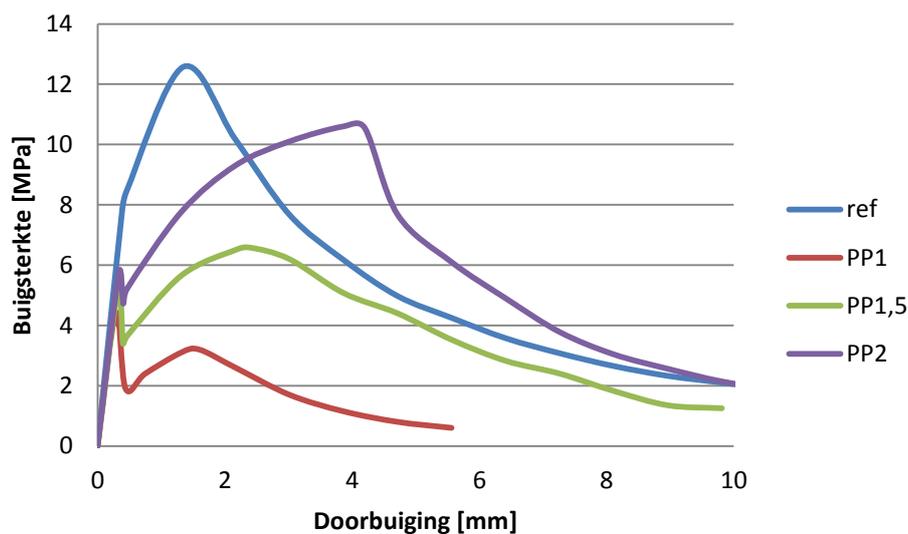
Tot slot worden de resultaten van het mengsel PP2 weergegeven in tabel 16. Ook hier kan op basis van de breukenergie de grote spreiding van de resultaten vastgesteld worden. Toch kunnen alle resultaten aanvaard worden door de aanvaardbare procentuele afwijking t.o.v. de gemiddelde waarden.

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	6,3	10	5,6	9,4	8908	4,81	13	6,54	10
2	6,1	6	4,2	7,7	7133	4,93	11	5,99	18
3	5,4	6	5,6	11	13937	5,80	5	8,15	12
4	5,8	1	5,1	10,7	10089	5,48	1	7,40	2
5	5,1	11	5,6	10,9	13186	6,73	21	8,24	13
<b>gemiddelde</b>	5,7		5,2	9,9	10651	5,55		7,26	
<b>COV</b>	9%		12%	14%	27%	14%		14%	

**Tabel 16: Resultaten PP2**

### Samenvatting resultaten PP-vezels

Door telkens de gemiddelde spanning-doorbuigingskarakteristieken te bepalen van de weerhouden resultaten, kan er een vergelijking gemaakt worden met de referentiecurve. Dit wordt grafisch weergegeven in figuur 47.



**Figuur 47: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken samenstellingen met PP-vezels**

Algemeen kan er geconcludeerd worden dat een groter vezelvolume in het beton logischerwijs een positieve invloed heeft op de beoordelingscriteria. Verder tonen de grafieken dat de curves zich gedragen zoals voorspeld werd volgens figuur 29 en 30. Op basis van de grafische weergave blijken de resultaten van PP2 het best de resultaten van het referentiemengsel te benaderen.

Een opmerking die hierbij gemaakt kan worden is dat de maximale buigspanning, zoals eerder de breukmodulus genaamd, bij verschillende doorbuigingen voorkomt in vergelijking met ref. Ook dit kan verklaard worden a.d.h.v. een verschil in elasticiteitsmodulus van de vezels. Zo hebben de PP-vezels een grotere rek nodig om gelijke krachten op te kunnen vangen. Deze stelling wordt ook bevestigd in het Technical Report No. 65 [56].

Wordt de terugval in detail bekeken, kan er opgemerkt worden dat de terugval kleiner wordt bij een stijgend vezelpercentage. Dit toont de stelling aan uit deel 3.2.1 Gedrag UHSB onder buigspanning o.b.v. het Technical Report No. 65. Hier werd namelijk vermeld dat de terugval te wijten is aan de nodige slip van de gekartelde vezels om zich vast te zetten in de cementmatrix. Naast deze slip kan ook de elasticiteitsmodulus van de vezels een invloed spelen door de grotere nodige rek van de PP-vezel. Doordat er meer vezels aanwezig zijn, kan een gelijke kracht over meer vezels verdeeld worden. Hierdoor kan een gelijke kracht opgenomen worden bij reeds een kleinere terugval en doorbuiging van de balk.

Worden de resultaten in detail bekeken in tabel 17, kan er geconcludeerd worden dat er grotere afwijkingen zijn bij kleinere doorbuigingen in vergelijking met de referentieresultaten. Zo wijken de gemiddelde resultaten van de verschillende mengsels sterk af. Dit kan verklaard worden door de kleine elasticiteitsmodulus van de PP-vezel in vergelijking met de staalvezel, wat resulteert in een grotere nodige doorbuiging om de optimale vezelwerking te bekomen. De proportionaliteitsgrens zou echter een gelijke waarde moeten kennen voor iedere samenstelling aangezien deze onafhankelijk is van de gebruikte vezels. Het grote verschil hiertussen kan verklaard worden door de gemaakte

aanname voor het bepalen van deze waarde. Zoals vermeld in hoofdstuk 3.2.1 Gedrag UHSB onder buigspanning, wordt deze bepaald door het nemen van de maximale waarde na het lineaire verloop. Op deze manier kan er een inschattingfout gemaakt worden, welke de afwijking kan verklaren.

Naam	$f_{m,LOP}$	$f_{m,R1}$	$f_{m,R4}$	$G_f$	$R_{e,1,5}$	$R_{e,3}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PP1	4,4 (5%)	2,5 (56%)	1,5 (29%)	1757 (22%)	0,55	0,55
PP1,5	5,1 (7%)	3,9 (4%)	5,9 (15%)	6716 (21%)	0,86	1,03
PP2	5,7 (9%)	5,2 (12%)	9,9 (14%)	10651 (27%)	0,97	1,27

**Tabel 17: Vergelijking resultaten referentiesamenstelling en resultaten met PP-vezels**

Voor de beoordelingscriteria met grotere doorbuigingen, blijken de resultaten van PP2 gunstiger te zijn dan deze van ref. Op basis van de breukenergie blijken de resultaten ongeveer gelijkwaardig. Tot slot kan er o.b.v. de buigtaaiheidswaarden besloten worden dat het mengsel PP1 een redelijk bros karakter heeft. Hiertegenover geeft deze waarde voor PP2 een veel ductieler resultaat.

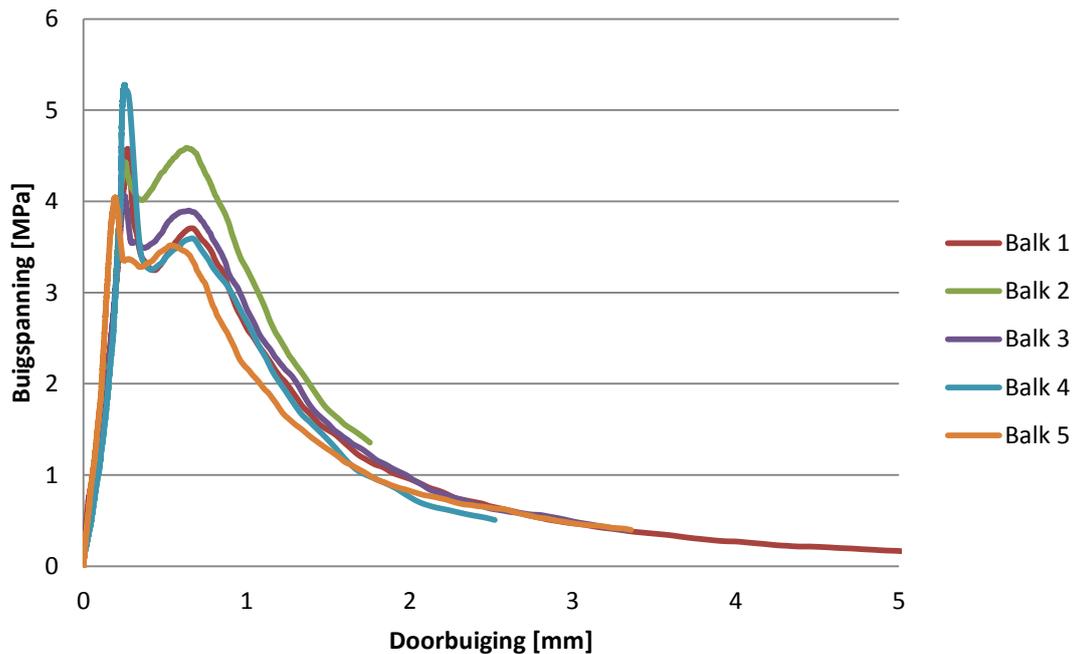
Afhankelijk voor welke beoordelingscriteria er gekozen zal worden, zal het mengsel met PP-vezels of met staalvezels het gunstigst zijn. Wordt er ontworpen o.b.v. de de CUR-Aanbeveling 36:2011, zal het resultaat met staalvezels gunstiger zijn dan met de PP-vezels. Wordt er ontworpen o.b.v. de Japanse testmethode JSCE-SF4, zal er met het mengsel met de PP-vezels een net iets voordeliger resultaat bekomen worden. Een ontwerp via de norm NBN EN 14651 kan voor beide mengsels voordelig zijn afhankelijk van de doorslaggevende factor.

### 4.3.3 Samenstelling met PVA-vezels

Als tweede alternatief voor de staalvezels, werd er voor PVA-vezels gekozen. Deze vezels werden eveneens toegevoegd aan het beton met volumepercentages van 1; 1,5 en 2%. De verschillende mengsels zullen apart besproken worden en nadien met elkaar vergeleken worden.

#### PVA1

Allereerst werd er een samenstelling met één volumeprocent aan PVA-vezels getest, waarvan de resultaten worden weergegeven in figuur 48.



**Figuur 48: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PVA1**

Dit mengsel was samen met PP1 één van de eerste mengsels die gemaakt werd. Zoals in hoofdstuk 2.4 Referentiesamenstelling werd vermeld, werd er hierbij nog geen gebruik gemaakt van de geoptimaliseerde mengprocedure. Het gevolg hiervan is een minder goede menging van het mengsel dat kan leiden tot een klontervorming. Deze klontervorming werd weergegeven in figuur 38 en kan leiden tot een mindere betonkwaliteit. Zoals in hoofdstuk 4.2 Druksterkte werd aangetoond, bleek deze betonkwaliteit ook effectief slechter. Dit kan als oorzaak gegeven worden voor de mindere buigsterkte bij de proportionaliteitsgrens.

Net als bij PP1, kan ook hier softening-gedrag vastgesteld worden. Er kan dus geconcludeerd worden dat een volumepercentage van één procent van de gebruikte synthetische vezels onvoldoende is om een hardening-verloop te kunnen bekomen. In vergelijking met de resultaten van het mengsel PP1 zoals weergegeven in figuur 43, kan een vaststelling gedaan worden voor de breukmodulus. Zo wordt bij PVA1 de breukmodulus bij een reeds kleinere doorbuiging bereikt in vergelijking met PP1. Dit werd reeds aangehaald bij figuur 29 en kan verklaard worden door de vezellengte.

Tot slot blijkt de curve van balk twee (groen) licht af te wijken van de overige resultaten. Worden de breukvlakken nader onderzocht, kan er visueel geen afwijking vastgesteld worden. De vezels zijn echter te klein en in te grote hoeveelheden aanwezig om visueel een onderscheid te kunnen maken. Zoals er bij de samenstellingen met PP-vezels geconcludeerd werd, zal ook hier de afwijking verklaard kunnen worden door de vezelverdeling. Wel kan er vermoed worden dat er een homogene vezelverdeling bekomen wordt, in tegenstelling tot bij de PP-vezels. Vervolgens kunnen de beoordelingscriteria o.b.v. de spanning-doorbuigingskarakteristieken bepaald worden zoals weergegeven in tabel 18.

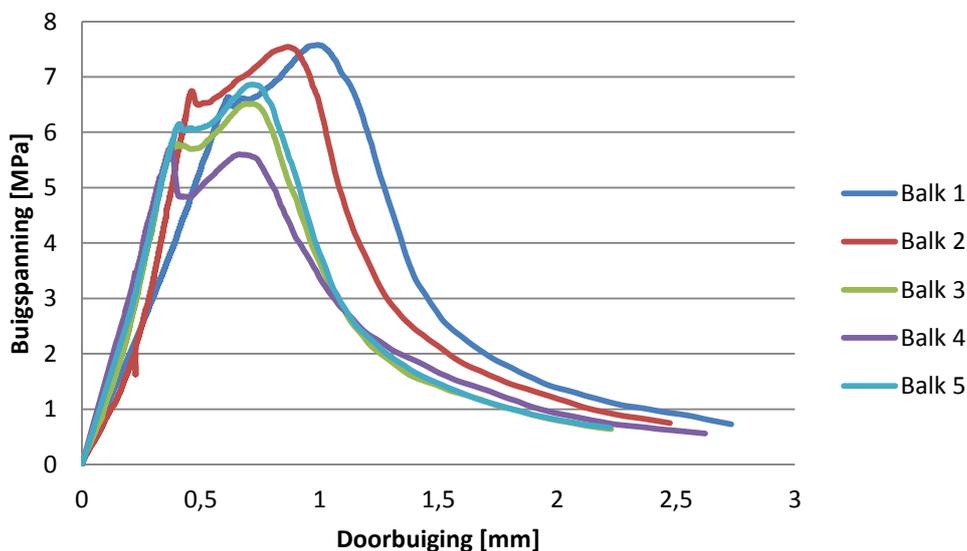
nummer	$f_{LOP}$	$\Delta f_{LOP} \%$	$f_{R1}$	$f_{R4}$	$G_f$	$f_{fcteq1,5,fl}$	$\Delta f_{ct1,5} \%$	$f_{fcteq3,fl}$	$\Delta f_{ct3} \%$
	[MPa]		[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[MPa]		[MPa]	
1	4,6	3	3,3	0,4	1124	2,72	2	1,78	3
2	4,4	2	4,3	-	954	3,20	15	1,73	1
3	4,1	8	3,6	0,5	1054	2,82	1	1,84	7
4	5,3	18	3,3	-	945	2,69	4	1,62	6
5	4	11	3,4	0,4	944	2,52	10	1,64	5
gemiddelde	4,5		3,6	0,4	1004	2,8		1,7	
COV	12%		12%	13%	8%	9%		5%	

Tabel 18: Resultaten PVA1

Ook hieruit blijken alle resultaten te voldoen aan de geldigheidscriteria. Verder is niet voor iedere test een resultaat gekend voor de buigspanning van  $f_{R4}$ . Worden de curves in detail bekeken, kan er vermoed worden dat voor  $f_{R4}$  alle waarden rond het gemiddelde van 0,4 MPa zullen liggen.

### PVA1,5

Bij de samenstellingen met PP-vezels werd geconstateerd dat het vermeerderen van het aantal vezels een positief effect heeft op de residuele buigsterkte. Dit werd theoretisch voorspeld in deel 3.2.1 Gedrag UHSB onder buigspanning en kan ook worden vastgesteld in figuur 49, waar de resultaten van PVA1,5 worden weergegeven.



Figuur 49: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PVA1,5

Net als bij PP1,5 kan er een hardening-verloop vastgesteld worden bij een volumepercentage van anderhalf procent. Ook hier kan er vermoed worden dat de

spreiding van de buigspanning verklaard kan worden door het aantal vezels in het breukvlak. Net als bij PVA1 kan er geen visueel verschil opgemerkt worden van de microvezels. De vastgestelde spreiding van de doorbuiging kan toegewezen worden aan de testopstelling. Er kan namelijk vooral bij de eerste twee geteste balken een grotere afwijking vastgesteld worden. Dit kan verklaard worden doordat er bij de eerste proeven een extra zetting van een machineonderdeel plaatsvond en na de twee proeven deze niet meer voorkwam wegens volledig gezet. Of de spreiding aanvaardbaar blijft, wordt weergegeven in tabel 19.

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	6,6	6	5	-	1539	4,65	15	2,88	20
2	6,7	8	6,7	-	1464	4,59	14	2,69	12
3	5,8	6	5,7	-	1135	3,75	7	2,10	12
4	5,7	8	4,9	-	1180	3,34	17	2,13	11
5	6,2	0	6,1	-	1192	3,84	5	2,18	9
<b>gemiddelde</b>	6,2		5,7	-	1302	4,0		2,4	
<b>COV</b>	7%		12%	-	14%	14%		15%	

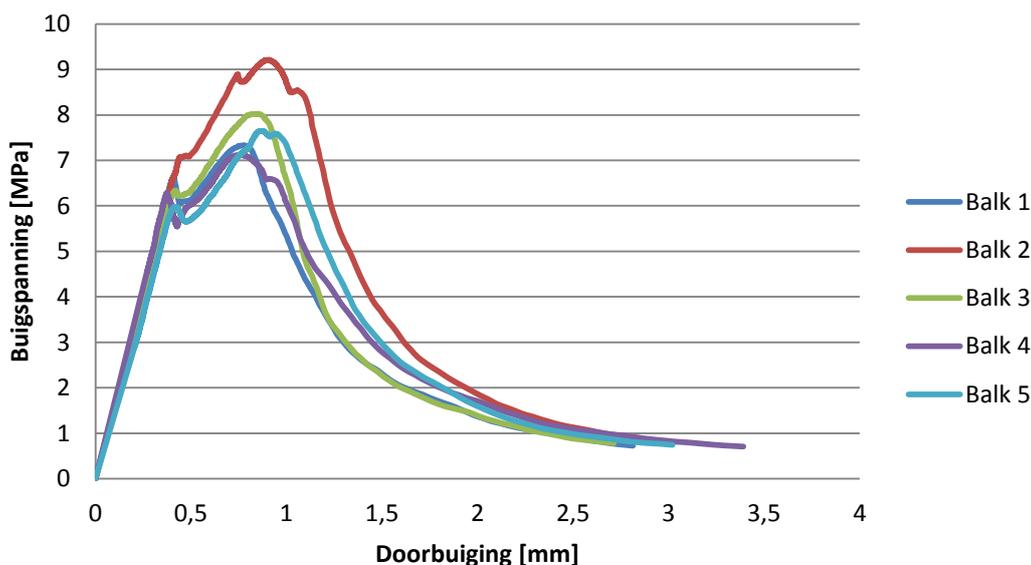
**Tabel 19: Resultaten PVA1,5**

Uit deze tabel blijkt dat alle resultaten aanvaard kunnen worden. De resultaten van  $f_{R4}$  ontbreken in deze tabel doordat de machine stopt met registreren na 90% van de maximale geregistreerde buigspanning. Worden de curves van PVA1,5 bekeken, kan er wel vermoed worden dat het gemiddelde zich rond de 0,5 of 0,6 MPa zal bevinden. Hierbij kan al vastgesteld worden dat de microvezels niet efficiënt genoeg zijn om bij grotere doorbuigingen grotere buigspanningen aan te kunnen. De breukmodulus wordt echter al bij een redelijk beperkte doorbuiging bereikt.

## PVA2

Om de betere resultaten bij kleinere doorbuigingen te proberen te verbeteren, werd er ook een mengsel met twee procent vezels getest. De resultaten worden weergegeven figuur 50.

Net als bij de vorige samenstellingen met PVA-vezels kan er hier vermoed worden dat de afwijking van balk twee (rood) verklaard kan worden door het aantal vezels in het breukvlak. Voor de overige resultaten kan er een kleinere spreiding van de resultaten opgemerkt worden. Dit kan verklaard worden door een goede homogene vezelverdeling in het mengsel.



**Figuur 50: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PVA1,5**

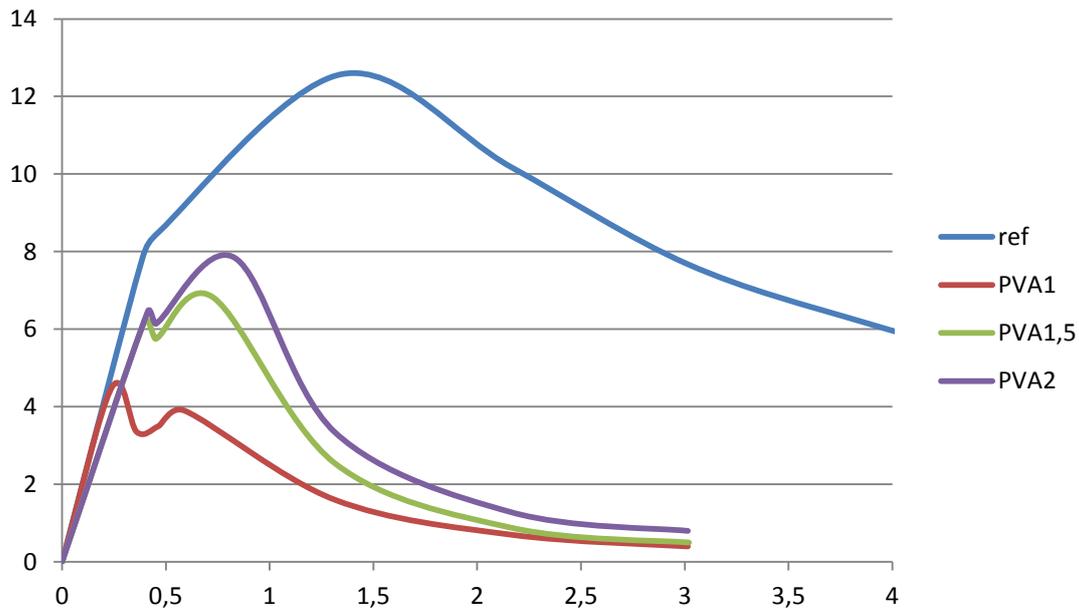
Vervolgens kunnen de resultaten in detail bekeken zoals weergegeven in tabel 20. Hieruit blijkt dat de karakteristiek van balk 2 aanvaard kan worden volgens de geldigheidscriteria. Vervolgens kan er voor enkele testen weer vastgesteld worden dat er geen resultaat bekomen werd voor  $f_{R4}$ . Wegens de kleine spreiding van de resultaat kan ook hier vermoed worden dat het gemiddelde zich effectief rond 0,8 MPa zal bevinden.

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	6,6	2	6,1	-	1598	4,66	10	2,90	10
2	7,1	10	6,3	-	2091	6,24	21	3,88	21
3	6,3	2	6,3	-	1642	4,96	4	3,01	6
4	6,3	2	5,9	0,8	1797	4,92	5	3,00	7
5	6	7	5,7	0,8	1758	5,11	1	3,26	1
<b>gemiddelde</b>	6,5		6,1	0,8	1777	5,2		3,2	
<b>COV</b>	6%		4%	0%	11%	12%		12%	

**Tabel 20: Resultaten PVA2**

### Samenvatting resultaten PVA-vezels

Nu de drie mengsels met respectievelijk 1; 1,5 en 2% aan PVA-vezels besproken zijn, kan er een onderlinge vergelijking gemaakt worden. Vervolgens kunnen deze resultaten vergeleken worden met het referentiemengsel zoals weergegeven in figuur 51.



**Figuur 51: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken samenstellingen met PVA-vezels**

In het algemeen kan er vastgesteld worden dat de curves zich gedragen zoals voorspeld werd volgens figuur 29 en 30. Door de kleine vezellengte zal de breukmodulus reeds bij een kleinere doorbuiging plaatsvinden in vergelijking met de PP-vezels. Net als bij de PP-vezels blijkt een groter vezelvolume een positieve invloed te hebben op de residuele buigsterkte van de proefstukken. Toch kan er bijna een stagnatie opgemerkt worden van de resultaten van de samenstelling PVA2 t.o.v. PVA1,5. De conclusie luidt dus dat er bijna een verzadiging bereikt werd van de gebruikte microvezel in het beton bij een volumepercentage van twee procent. Ook de veel slechtere verwerkbaarheid zoals weergegeven in tabel 9 kan deze stelling bevestigen.

Zoals bij de samenstellingen met PP-vezels kan er ook hier een gelijke conclusie gemaakt worden van de terugval na de proportionaliteitslimiet. Een stijgende hoeveelheid vezels resulteert namelijk in een kleinere terugval tot de nodige slip en rek zijn opgetreden. Tot slot blijkt o.b.v. de curves dat het mengsel PVA2 het best aansluit bij het referentiemengsel, maar presteert dit vezeltype ondermaats.

Naam	$f_{m,LOP}$	$f_{m,R1}$	$f_{m,R4}$	$G_f$	$R_{e,1.5}$	$R_{e,3}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PVA1	4,5 (12%)	3,6 (12%)	0,4 (13%)	1004 (8%)	0,62	0,38
PVA1,5	6,2 (7%)	5,7 (12%)	-	1302 (14%)	0,65	0,39
PVA2	6,5 (6%)	6,1 (4%)	0,8 (0%)	1777 (11%)	0,8	0,5

**Tabel 21: Vergelijking resultaten referentiesamenstelling en resultaten met PVA-vezels**

Worden de resultaten samengevat, zoals weergegeven in tabel 21, kunnen er enkele besluiten gevormd worden. Zo kan er geconcludeerd worden dat PVA2 het referentiemengsel het best benaderd, maar toch grote afwijkingen vertoont. Vooral bij de

beoordelingscriteria van een iets grotere doorbuiging, blijken de resultaten ondermaats. Dit kan, zoals eerder vermeld, verklaard worden door de beperkte vezellengte. Ook bij de kleinere doorbuigingen blijken de resultaten ondermaats in vergelijking met het referentiemengsel.

Op basis van de spanning-doorbuigingskarakteristieken werd er vermoed dat bij een vezelvolumen van twee procent bijna een verzadiging werd bereikt. Toch kan er via de buigtaaiheidswaarde vastgesteld worden dat dit nog niet het geval is en er nog een redelijke progressie gemaakt werd t.o.v. PVA1,5. De bijna gelijke buigtaaiheidswaarden van PVA1 en PVA1,5 kunnen verklaard worden door de mindere betonkwaliteit van het mengsel PVA1 zoals werd vastgesteld in 4.1 Opmerkingen labo's en 4.2 Druksterkte. Aangezien de proportionaliteitsgrens omgekeerd evenredig is met de buigtaaiheidswaarde, betekent dit dat de buigtaaiheidswaarde van PVA1 waarschijnlijk overschat werd.

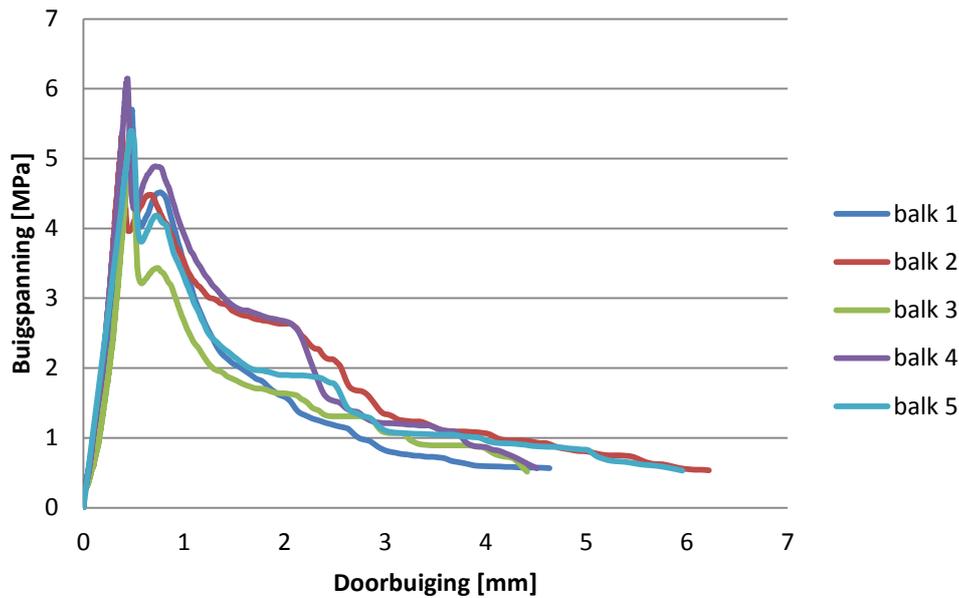
#### **4.3.4 Hybride samenstelling overwegend PVA-vezels**

Zoals in vorig deel besproken werd, hebben de mengsels met PVA-vezels enkele nadelen. Zo is er een slechte verwerkbaarheid van het verse beton. Naast de mindere verwerkbaarheid konden er ook slechte prestaties vastgesteld worden bij grotere doorbuigingen. Om deze nadelen te proberen te verbeteren, zullen er combinaties gemaakt worden met PP- en PVA-vezels. Hiervoor wordt er een gelijke verhouding gebruikt als bij het referentiemengsel, namelijk 30% macro- en 70% microvezels. Deze verhouding wordt toegepast voor totale volumepercentages van respectievelijk 1%; 1,5% en 2% vezels.

#### **PP0,3-PVA0,7**

Als eerste worden de resultaten besproken met een volumepercentage van 1% aan vezels, die weergegeven worden in figuur 52.

Een eerste opmerking is dat bij balk drie de terugval na de proportionaliteitslimiet groter is en de breukmodulus kleiner in vergelijking met de overige resultaten. Wordt het breukvlak onderzocht en vergeleken met de overige breukvlakken, kan er niet echt een verschil vastgesteld worden. De PP-vezels zijn evenredig verdeeld bij de verschillende breukvlakken en de PVA-vezels zijn te klein en te talrijk aanwezig om een visueel verschil te kunnen vaststellen. Op basis van de resultaten en conclusies bij de samenstellingen met PP-vezels, kan er gesteld worden dat de afwijking ook hier te verklaren is door een kleinere hoeveelheid aan PVA-vezels. Alle resultaten zoals weergegeven in tabel 22 voldoen wel aan de geldigheidscriteria.



Figuur 52: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP0,3-PVA0,7

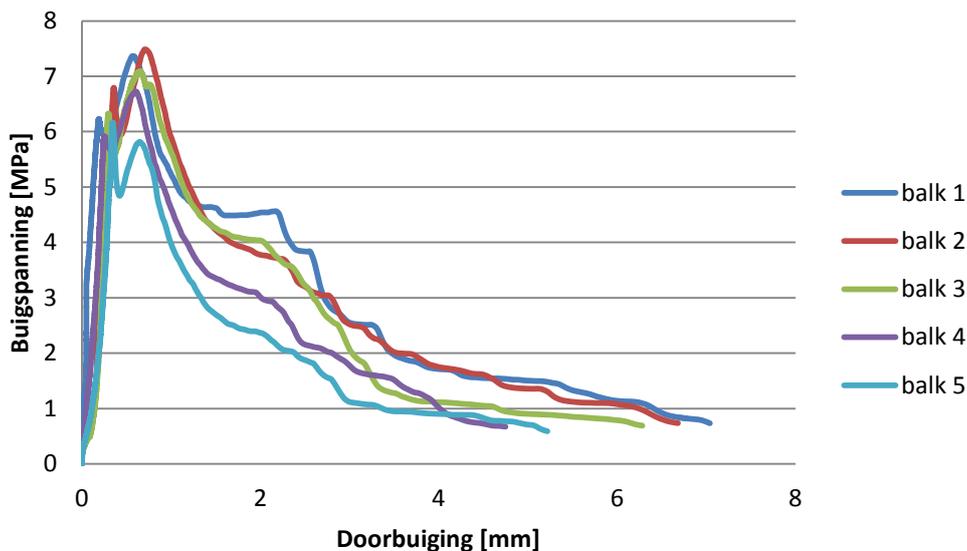
nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	5,7	2	5,6	0,8	1460	3,16	3	2,26	6
2	5,4	3	4	1,3	2074	3,37	10	2,80	16
3	5,3	5	5,2	1,1	1339	2,59	16	2,03	16
4	6,1	9	4,9	1,2	1852	3,66	19	2,86	18
5	5,4	3	5,4	1,1	1646	2,60	16	2,15	11
gemiddelde	5,6		5,0	1,1	1674	3,08		2,42	
COV	6%		12%	17%	18%	15%		16%	

Tabel 22: Resultaten PP0,3-PVA0,7

### PP0,45-PVA1,05

Om een hardening-verloop te kunnen bekomen, werd er ook een reeks met een totaal van 1,5% van de gebruikte vezelcombinatie aangemaakt. De resultaten van deze combinatie worden weergegeven in figuur 53.

Hierbij kan het te realiseren hardening-verloop vastgesteld worden. Toch vindt er weer een redelijk brosse breuk plaats na slechts een beperkte doorbuiging. Dit kan verklaard worden door de beperkte hoeveelheid aan PP-vezels, namelijk slechts 0,45%. Bij de resultaten met enkel PP-vezels werd echter vastgesteld dat er bijna anderhalf volumepercentage aan PP-vezels nodig zijn om een hardening-verloop te kunnen bekomen bij grotere doorbuigingen. Er kan dus al geconcludeerd worden dat de toegepaste vezelverhouding niet performant genoeg is bij grotere vezelpercentages. De resultaten worden tot slot nog weergegeven in tabel 23. Hierbij blijken alle resultaten te voldoen aan de beoordelingscriteria.



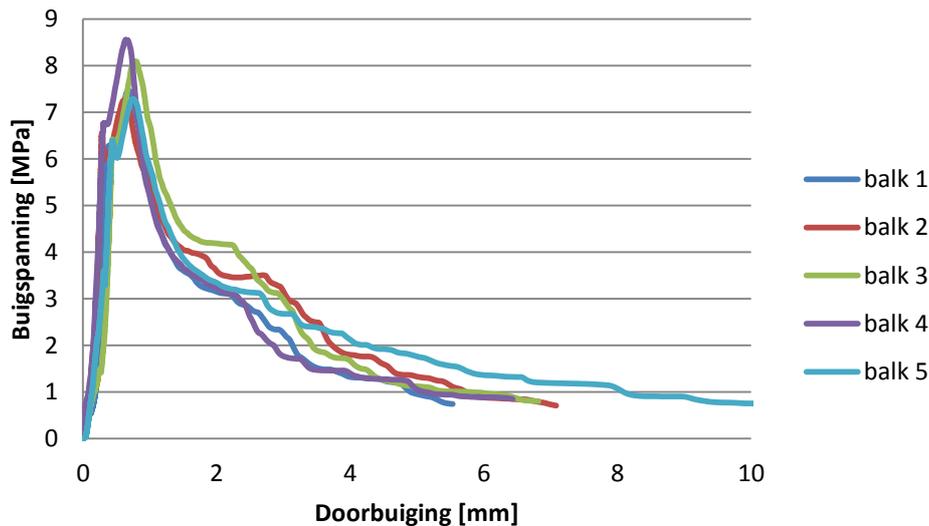
**Figuur 53: Spanning-doorbuigingskarakteristiek PP0,45-PVA1,05**

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
<b>1</b>	6,3	3	6,2	2,2	2636	4,54	6	3,72	7
<b>2</b>	6,6	2	6,5	3,1	3319	4,87	1	4,19	4
<b>3</b>	6,4	2	6,3	2,9	3311	4,92	2	4,32	7
<b>4</b>	6,8	5	7,4	1,8	2909	5,15	7	3,98	1
<b>5</b>	6,4	2	6,3	2,7	3975	4,64	4	3,91	3
<b>gemiddelde</b>	6,5		6,5	2,5	3230	4,82		4,02	
<b>COV</b>	3%		8%	21%	16%	5%		6%	

**Tabel 23: Resultaten PP0,45-PVA1,05**

### PP0,6-PVA1,4

Bij de samenstelling PP0,45-PVA1,05 werd reeds geconcludeerd dat deze vezelverhouding niet performant genoeg is voor de gebruikte synthetische vezels. Toch is er de mogelijkheid dat bij een volumepercentage van twee procent vezels er betere resultaten bekomen worden voor ontwerp via de CUR aanbevelingen. De resultaten van PP0,6-PVA1,4 worden weergegeven in figuur 54.



**Figuur 54: Spanning-doorbuigingskarakteristiek PP0,6-PVA1,4**

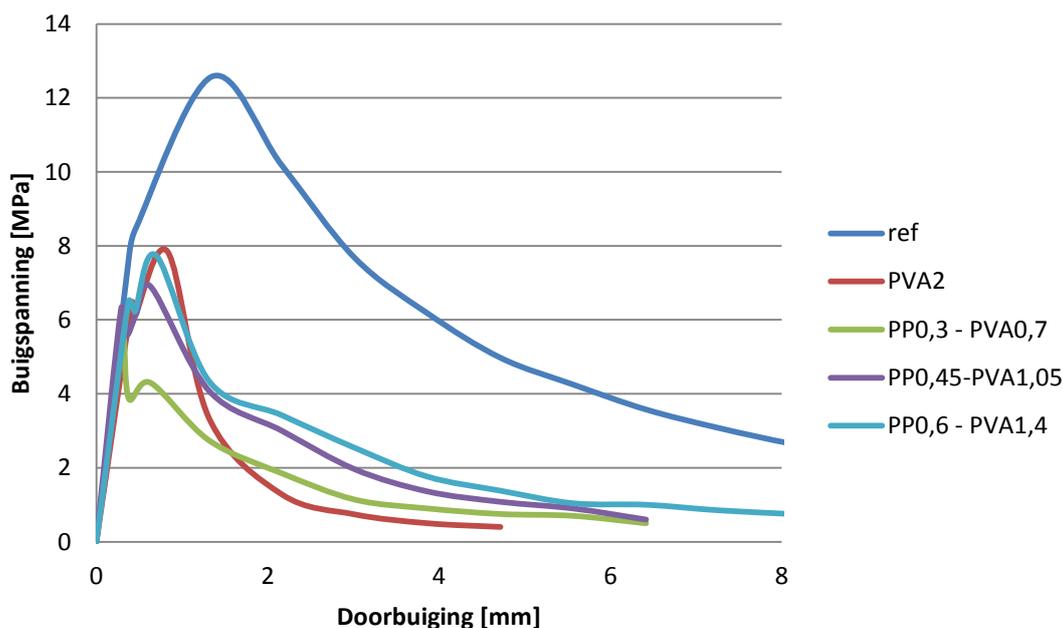
Ook hier kunnen dezelfde conclusies gevormd worden als bij de vorige samenstelling, namelijk een hardening-verloop met nog steeds een brosse breuk na het bereiken van de breukmodulus. Alle resultaten voldoen aan de beoordelingscriteria, zoals weergegeven in tabel 24.

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
<b>1</b>	6,3	3	6,2	2,2	2636	4,54	6	3,72	7
<b>2</b>	6,6	2	6,5	3,1	3319	4,87	1	4,19	4
<b>3</b>	6,4	2	6,3	2,9	3311	4,92	2	4,32	7
<b>4</b>	6,8	5	7,4	1,8	2909	5,15	7	3,98	1
<b>5</b>	6,4	2	6,3	2,7	3975	4,64	4	3,91	3
<b>gemiddelde</b>	6,5		6,5	2,5	3230	4,82		4,02	
<b>COV</b>	3%		8%	21%	16%	5%		6%	

**Tabel 24: Resultaten PP0,6-PVA1,4**

### **Samenvatting resultaten hybride samenstelling met overwegend PVA-vezels**

Ook hier wordt er een globale vergelijking gemaakt van de gemiddelde resultaten met het referentiemengsel. Het doel was de grotere initiële sterkte van de mengsels met enkel PVA-vezels te behouden, maar om ook grotere residuele buigspanningen te bekomen. Daarom wordt ook de gemiddelde curve van PVA2 mee voorgesteld in figuur 55.



**Figuur 55: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken samenstellingen met overwegend PVA-vezels**

Indien de spanning-doorbuigingskarakteristieken bekeken worden, lijkt het dat er deels aan de oorspronkelijke doelstelling van deze vezelverhouding voldaan werd. Zo worden er ook grotere buigspanningen bekomen bij grotere doorbuigingen. Verder werd er een betere verwerkbaarheid bekomen bij PP0,6-PVA1,4 t.o.v. PVA2, zoals er werd weergegeven in tabel 9. Toch blijkt de residuele buigsterkte niet groot genoeg in vergelijking met de referentiesamenstelling.

Naam	$f_{m,LOP}$ [MPa]	$f_{m,R1}$ [MPa]	$f_{m,R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$R_{e,1,5}$ [-]	$R_{e,3}$ [-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PVA2	6,5 (6%)	6,1 (4%)	0,7 (7%)	1777 (11%)	0,8	0,5
PP0,3-PVA0,7	5,6 (6%)	5 (12%)	1,1 (17%)	1674 (18%)	0,55	0,43
PP0,45-PVA1,05	6,3 (5%)	6,2 (11%)	2 (30%)	2810 (24%)	0,75	0,62
PP0,6-PVA1,4	6,5 (3%)	6,5 (8%)	2,5 (21%)	3230 (16%)	0,74	0,62

**Tabel 25: Vergelijking resultaten samenstellingen met overwegend PVA-vezels**

Vervolgens kunnen de resultaten in detail bekeken worden en vergeleken, zoals weergegeven in tabel 25. Net als bij de samenstelling met enkel PVA-vezels kan er een stagnatie opgemerkt worden van de resultaten van de buigtaaiheidswaarde. Ook hier kan dus een verzadiging opgemerkt worden van de PVA-vezels in de UHSB-samenstelling. Wordt het mengsel PP0,6-PVA1,4 vergeleken met PVA2, kan er in het algemeen geconcludeerd worden dat PP0,6-PVA1,4 beter presteert. Enkel de buigtaaiheidswaarde bij een doorbuiging van 1,5 mm is net iets kleiner. Er kan dus al besloten worden dat deze hybridesamenstelling betere prestaties geeft dan de samenstelling met enkel PVA-vezels.

Wordt er dan een vergelijking gemaakt met het referentiemengsel, blijken de hybridesamenstellingen voor elke waarde minder te presteren. Zo blijkt de verhouding 70 procent microvezels en 30 procent macrovezels met de gebruikte synthetische vezels niet geschikt ter vervanging van de staalvezels. De reden waarom deze verhouding wel goed werkt bij de staalvezels kan verklaard worden door de gebruikte synthetische vezels. Zoals weergegeven in tabel 7, is de treksterkte van de macro staalvezels de helft groter dan deze van de micro staalvezels. Hiertegenover bedraagt de treksterkte van de macro PP-vezels slechts de helft van deze van de micro PVA-vezels. Hierdoor bezitten de synthetische macrovezels niet voldoende capaciteit om de trekkrachten over te nemen van de microvezels bij grotere scheuropeningen, in vergelijking met de staalvezels.

#### **4.3.5 Hybride samenstelling overwegend PP-vezels**

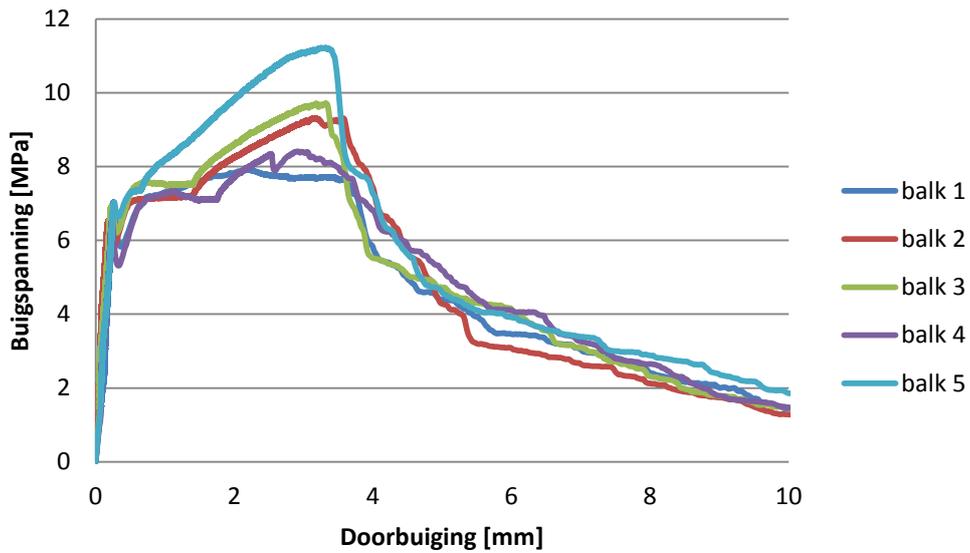
Op basis van het besluit in vorig deel, hoofdstuk 4.3.4 Hybride samenstelling overwegend PVA-vezels, kan er gekozen worden voor een andere hybride samenstelling. Hierbij zal er gekozen worden voor een vezelsamenstelling waarbij de zwakste vezel een groter volumepercentage zal innemen. Hoofdstuk 4.3.2 Samenstelling met PP-vezels concludeerde dat een volumepercentage van 2% PP-vezels goede resultaten gaf voor grotere doorbuigingen. Het nadeel ervan waren de minder goede prestaties bij kleine doorbuigingen. Verder werd er een slechte vezelverdeling vastgesteld in het breukvlak zoals weergegeven in figuur 37. Om de nadelen proberen te verbeteren van het mengsel PP2, zullen er PVA-vezels worden toegevoegd. De volumepercentages ervan bedragen respectievelijk 0,5 en 1 procent.

#### **PP2-PVA0,5**

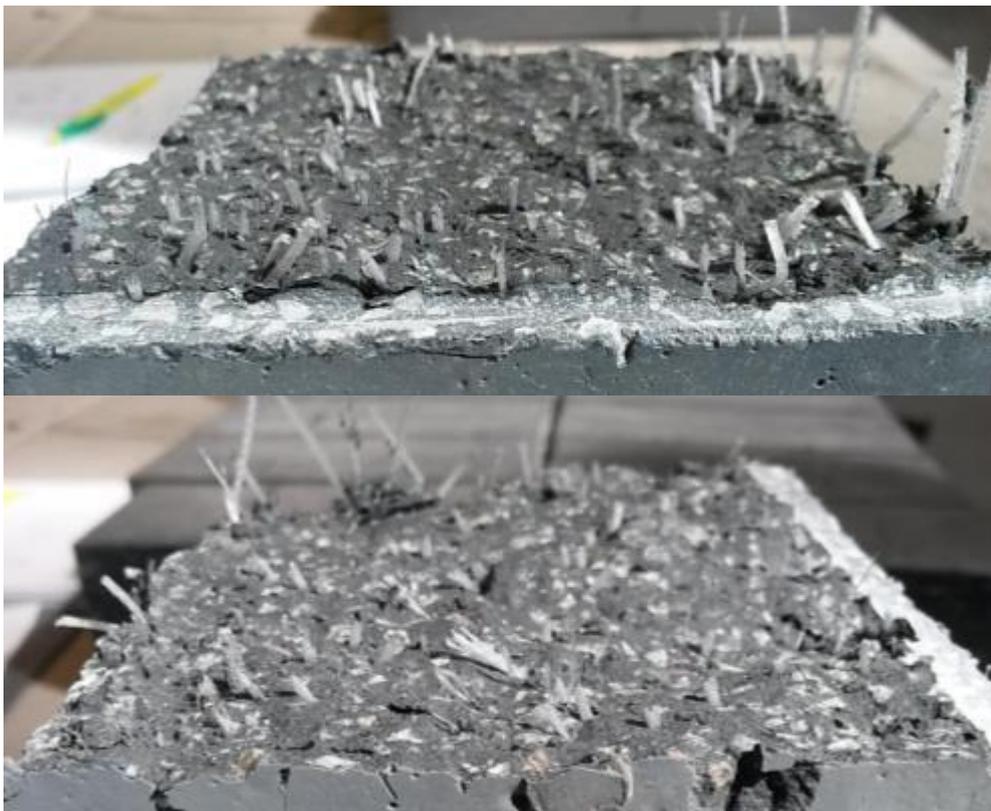
In een eerste poging om betere resultaten te bekomen bij kleinere doorbuigingen en om een homogene vezelverdeling te bekomen, werd er aan het mengsel PP2 een halve procent PVA-vezels toegevoegd. De resultaten tonen één uitschieter, zoals weergegeven in figuur 56.

Uit de karakteristiek van balk vijf blijkt dat er grotere buigspanningen opgenomen kunnen worden tot een doorbuiging van ongeveer 3,5 mm in vergelijking met de andere resultaten. Ook deze afwijking kan eenvoudig verklaard worden door het aantal vezels in het breukvlak. Zoals in figuur 57 weergegeven is, kan er aan de notch-zijde van de balk een duidelijk verschil opgemerkt worden voor de PP-vezels. Zo is er op de bovenste foto (balk 5) een grotere hoeveelheid PP-vezels op te merken dan op de onderste foto (balk 3) aan de kant van de notch. Een visueel besluit vormen over de PVA-vezels is onmogelijk, omdat ze hiervoor te klein zijn. Er kan wel opgemerkt worden dat de PP-vezels bij deze samenstelling wel een redelijk goede homogene verdeling vertonen.

Net als bij het mengsel PP2 kan ook hier een hardening-verloop herkend worden. Ook de terugval na de proportionaliteitslimiet en de brosse breuk na de breukmodulus lijken weer vergelijkbaar met de eerder waargenomen resultaten.



**Figuur 56: Spanning-doorbuigingskarakteristiek PP2-PVA0,5**



**Figuur 57: Vergelijking vezelverdeling in breukvlak balk 5 en balk 3**

Worden de resultaten in detail bekeken in tabel 26, kan er geconcludeerd worden dat alle resultaten voldoen aan de geldigheidscriteria. Worden de resultaten vergeleken met deze van PP2 in tabel 16, kan er besloten worden dat de gemiddelde waarden over het algemeen verbeterd zijn. Vooral de waarden van  $f_{LOP}$  en  $f_{R1}$  werden sterk verbeterd. Worden de resultaten echter vergeleken met het referentiemengsel in tabel 12, blijken

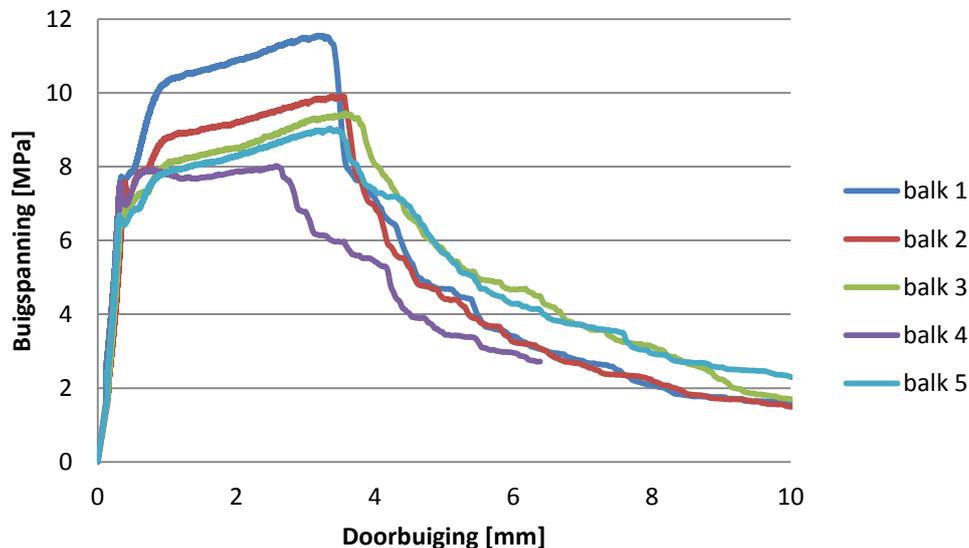
deze buigspanningen bij kleinere doorbuigingen nog niet voldoende groot. Om deze reden zal er ook een mengsel met één procent PVA-vezels worden uitgetest.

nummer	$f_{LOP}$	$\Delta f_{LOP} \%$	$f_{R1}$	$f_{R4}$	$G_f$	$f_{fcteq1,5,fl}$	$\Delta f_{ct1,5} \%$	$f_{fcteq3,fl}$	$\Delta f_{ct3} \%$
	[MPa]		[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[MPa]		[MPa]	
1	7	3	6,5	7,7	8648	6,62	4	7,18	8
2	6,5	4	7	9,2	9128	6,77	2	7,65	2
3	6,9	1	7,4	9,6	9327	7,10	3	8,01	3
4	6,6	3	6,4	8,4	9175	6,46	6	7,18	8
5	7	3	7,3	11,1	10473	7,56	10	8,92	15
gemiddelde	6,8		6,9	9,2	9350	6,90		7,79	
COV	3%		7%	14%	7%	6%		9%	

Tabel 26: Resultaten PP2-PVA0,5

### PP2-PVA1

Om de waarden van het referentiemengsel met een kleinere doorbuiging beter te benaderen, wordt er een mengsel met één procent PVA vezels toegevoegd bij de twee procent PP-vezels. De resultaten van deze vezelsamenstelling worden grafisch weergegeven in figuur 58.



Figuur 58: Spanning-doorbuigingskarakteristieken PP2-PVA1

Ook hier kan er weer één resultaat (balk 1) met een grotere buigsterkte waargenomen worden. Hiernaast is er ook een resultaat waarbij het softening-gedrag na breukmodulus reeds bij een kleinere doorbuiging optreedt. Ook deze verlopen kunnen weer verklaard worden door de vezelverdeling, net zoals in eerdere gevallen. Uit de resultaten in tabel 27 blijkt wel dat deze afwijkende resultaten aanvaard kunnen worden. Een tweede

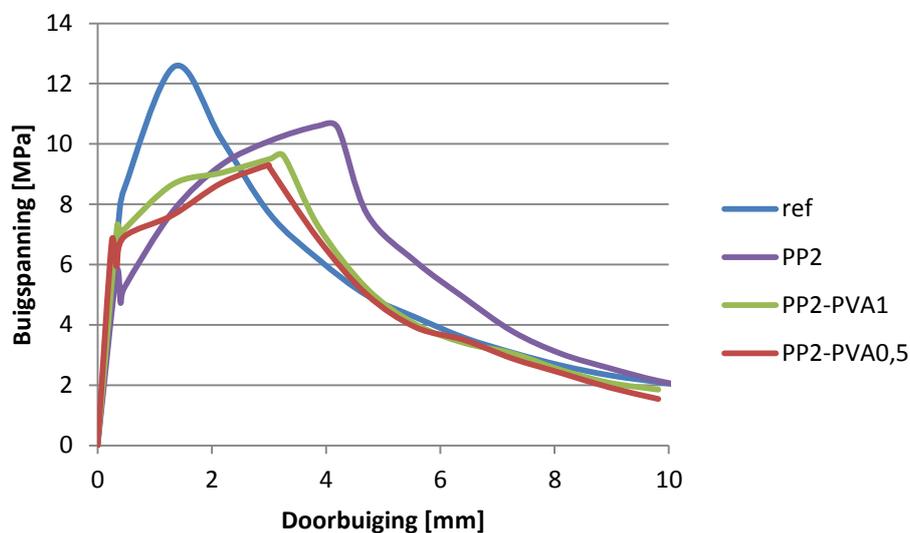
opmerking o.b.v. de grafieken is dat de terugval na de proportionaliteitslimiet minder tot niet voorkomt in vergelijking met PP2-PVA0,5. Op deze manier lijkt het gedrag van de referentiesamenstelling met staalvezels het best benaderd.

nummer	$f_{LOP}$ [MPa]	$\Delta f_{LOP}$ %	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$f_{fcteq1,5,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct1,5}$ %	$f_{fcteq3,fl}$ [MPa]	$\Delta f_{ct3}$ %
1	7,7	5	7,8	11,5	10510	8,22	17	9,62	20
2	7,6	4	7,2	9,8	9545	7,04	0	8,20	2
3	7	4	6,9	9,3	10133	6,62	6	7,66	5
4	7,5	3	7,2	6,7	8033	6,75	4	7,25	10
5	6,7	8	6,7	8,9	10074	6,53	7	7,49	7
gemiddelde	7,3		7,2	9,2	9659	7,03		8,04	
COV	6%		6%	19%	10%	10%		12%	

Tabel 27: Resultaten PP2-PVA1

### Samenvatting resultaten hybridesamenstelling met overwegend PP-vezels

Op basis van de resultaten lijken de hybridesamenstellingen met overwegend PP-vezels over het algemeen de referentiesamenstelling te benaderen. Om na te gaan of dit ook effectief zo is, worden de resultaten in de eerste plaats weergegeven in figuur 59. Om na te gaan of het oorspronkelijke doel van deze hybridesamenstelling gehaald werd, wordt in deze figuur ook het resultaat van PP2 weergegeven.



Figuur 59: Vergelijking spanning-doorbuigingskarakteristieken met overwegend PP-vezels

Een eerste conclusie die gevormd kan worden, is dat het oorspronkelijke doel van deze hybridesamenstelling behaald werd. Zo werd er een homogene verdeling van de vezels bekomen en kunnen er grotere buigspanningen opgenomen worden bij reeds kleinere doorbuigingen. Toch blijken de prestaties bij grotere doorbuigingen iets minder dan bij

deze van PP2. In vergelijking met de referentiesamenstelling lijken de resultaten echter nog niet voldoende. Een tweede opmerking is dat de relatie doorbuiging-buigspanning ongeveer gelijk verloopt voor de reeksen PP2-PVA0,5 en PP2-PVA1 bij grotere doorbuigingen. Dit is ook logisch, aangezien het volumepercentage macrovezels constant blijft en enkel deze vezels hier in werking treden. Tot slot kan er een verschil van maximale buigspanning worden vastgesteld tussen de hybridemengsels en PP2. Hierbij zou er een gelijk verloop verwacht worden bij grotere doorbuigingen doordat er telkens evenveel macrovezels werden toegevoegd. Aangezien de gemiddelde curve van PP2 slechts gebaseerd is op vijf proeven en er een heterogene vezelverdeling werd vastgesteld, kan hier geen duidelijk besluit gevormd worden.

Naam	$f_{m,LOP}$	$f_{m,R1}$	$f_{m,R4}$	$G_f$	$R_{e,1,5}$	$R_{e,3}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
<b>ref</b>	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
<b>PP2</b>	5,7 (9%)	5,2 (12%)	9,9 (14%)	10651 (27%)	0,97	1,27
<b>PP2-PVA0,5</b>	6,8 (3%)	6,9 (7%)	9,2 (14%)	9350 (7%)	1,02	1,15
<b>PP2-PVA1</b>	7,3 (6%)	7,2 (6%)	9,2 (19%)	9659 (10%)	0,96	1,1

**Tabel 28: Vergelijking resultaten referentiesamenstelling met overwegend PP-vezels**

Op basis van de resultaten in tabel 28, kan er ook geconcludeerd worden dat de buigspanning bij de kleinere doorbuigingen verbeterd is t.o.v. PP2. Toch is de buigtaaiheidswaarde bij een doorbuiging van 1,5 mm amper verbeterd. Voor de waarde van  $f_{m,R4}$  kan er nog steeds een verbeterd resultaat vastgesteld worden t.o.v. het referentiemengsel, maar een iets minder resultaat t.o.v. PP2. Ook bij de buigtaaiheidswaarde bij een doorbuiging van 3 mm lijkt er een minder resultaat bekomen.

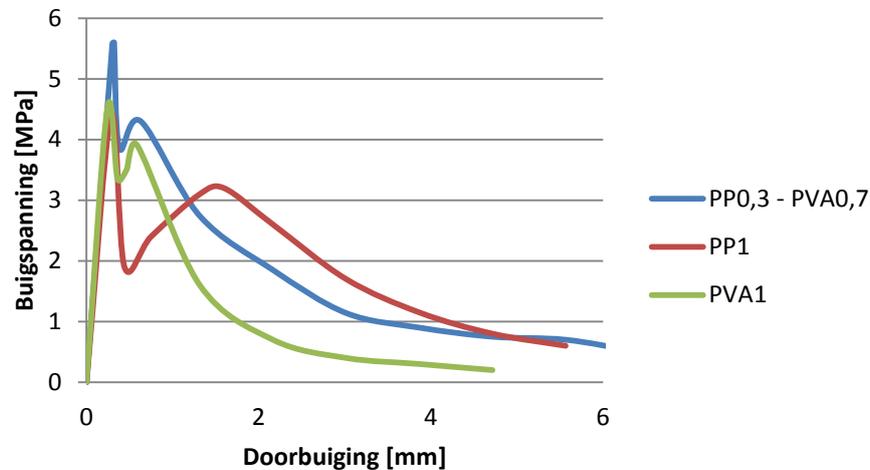
## 4.4 Globale vergelijking

Als overzicht volgt er nog een korte samenvatting van de resultaten en bevindingen zoals besproken in de vorige delen. Hierbij zal er eerst het resultaat van de referentiesamenstelling gegeven worden, zoals voorgesteld werd in figuur 40 en tabel 11. Hierbij werd er een vergelijking gemaakt ter validatie met een referentiecurve van een gelijke samenstelling, getest na 28 dagen door het WTCB. De conclusie luidde dat de grotere doorbuiging voor het bereiken van de proportionaliteitslimiet verklaard kon worden door de meetopstelling. Zo werd de doorbuiging van de balk gemeten, alsook de samendrukking van de onderdelen van de testopstelling zoals verklaard werd in deel 3.2 Buigproef.

Vervolgens werden er samenstellingen getest met synthetische vezels. Allereerst wordt er een vergelijking gemaakt van de resultaten met een kleiner vezelgehalte, namelijk deze van één procent. De resultaten worden weergegeven in figuur 60.

In de eerste plaats kan er een grotere buigspanning opgemerkt worden bij de proportionaliteitslimiet. Zoals eerder besproken in hoofdstuk 4.1 Opmerkingen labo's kan dit verklaard worden door de mindere betonkwaliteit, wat ook vastgesteld werd in deel

4.2 Druksterkte. Verder kan er telkens een softening-verloop vastgesteld worden. De terugval kan verklaard worden door de nodige slip en rek zoals beschreven in 3.2.1 Gedrag UHSB onder buigspanning.



**Figuur 60: Vergelijking gemiddeldes van samentellingen met 1% vezels**

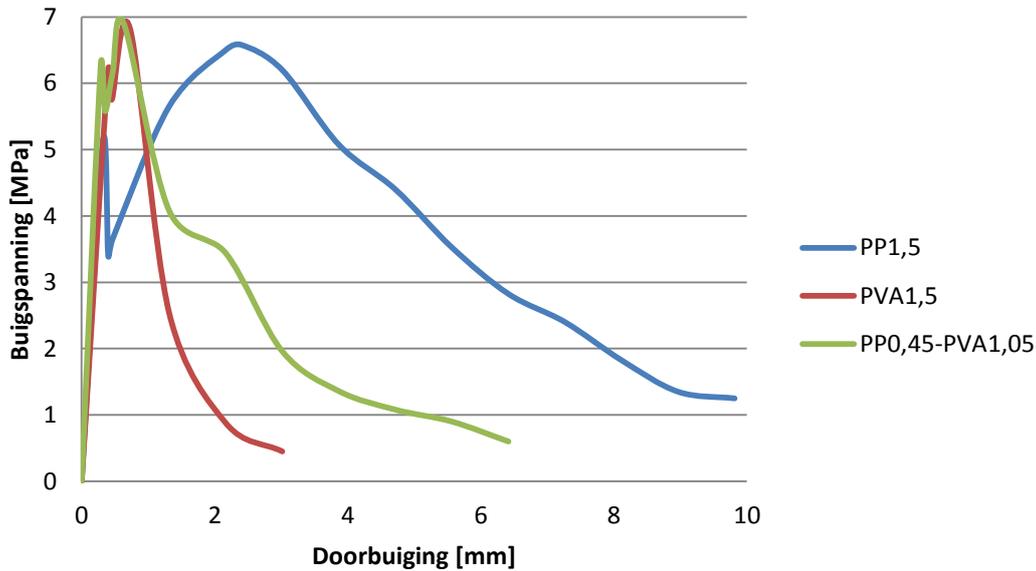
De verlopen van PP1 en PVA1 kunnen verklaard worden door de vezellengte zoals beschreven in figuur 29. Voor de hybride samenstelling kan er, net als bij de samenstellingen met PVA-vezels, vastgesteld worden dat de breukmodulus al bij een kleinere doorbuiging bereikt wordt. Hierna vindt er wel een minder brosse breuk plaats als gevolg van de toegevoegde PP-vezels. Op deze manier wordt het verloop van de samenstelling met enkel PP-vezels beter benaderd. Deze stellingen waren het oorspronkelijke doel van deze hybride vezelcombinatie. Toch kan er algemeen geconcludeerd worden dat bij een volumepercentage van één procent synthetische vezels geen goede resultaten bekomen worden in vergelijking met het referentiemengsel, zoals weergegeven in tabel 29.

Naam	$f_{m,LOP}$ [MPa]	$f_{m,R1}$ [MPa]	$f_{m,R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$R_{e,1,5}$ [-]	$R_{e,3}$ [-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PP1	4,4 (5%)	2,5 (56%)	1,5 (29%)	1757 (22%)	0,55	0,55
PVA1	4,5 (12%)	3,6 (12%)	0,4 (13%)	1004 (8%)	0,62	0,38
PP0,3-PVA0,7	5,6 (6%)	5 (12%)	1,1 (17%)	1674 (18%)	0,55	0,43

**Tabel 29: Vergelijking resultaten samenstellingen met 1% vezels**

Om deze reden werden er samenstellingen getest met anderhalf procent aan vezels, waarvan de resultaten worden weergegeven in figuur 61. Hierbij kan telkens het hardening-verloop vastgesteld worden. Uit tabel 30 blijkt echter wel dat dit vezelvolume nog steeds niet voldoet in vergelijking met het referentiemengsel. Toch kan er vermoed worden dat vooral de samenstelling met PP-vezels het referentiemengsel zal benaderen. Verder kan er nog een afwijking vastgesteld worden bij de proportionaliteitslimiet van PP1,5 t.o.v. de overige curves. Dit kan verklaard worden door de aanname voor de

bepaling van de proportionaliteitsgrens. Zoals vermeld in deel 3.2.1 Gedrag UHSB onder buigspanning, wordt de proportionaliteitslimiet bepaald als het maximum voor de terugval. Uit deze resultaten blijkt echter dat hier ook een beperkte vezelwerking mee werd inbegrepen, aangezien deze normaal voor de verscheidene mengsels gelijk zou moeten zijn. Er kan dus ook vermoed worden dat de resultaten van de buigtaaiheidswaarde minder representatief zijn, aangezien de buigspanning bij LOP en de buigtaaiheidswaarde omgekeerd evenredig zijn.



**Figuur 61: Vergelijking gemiddeldes van samentellingen met 1,5% vezels**

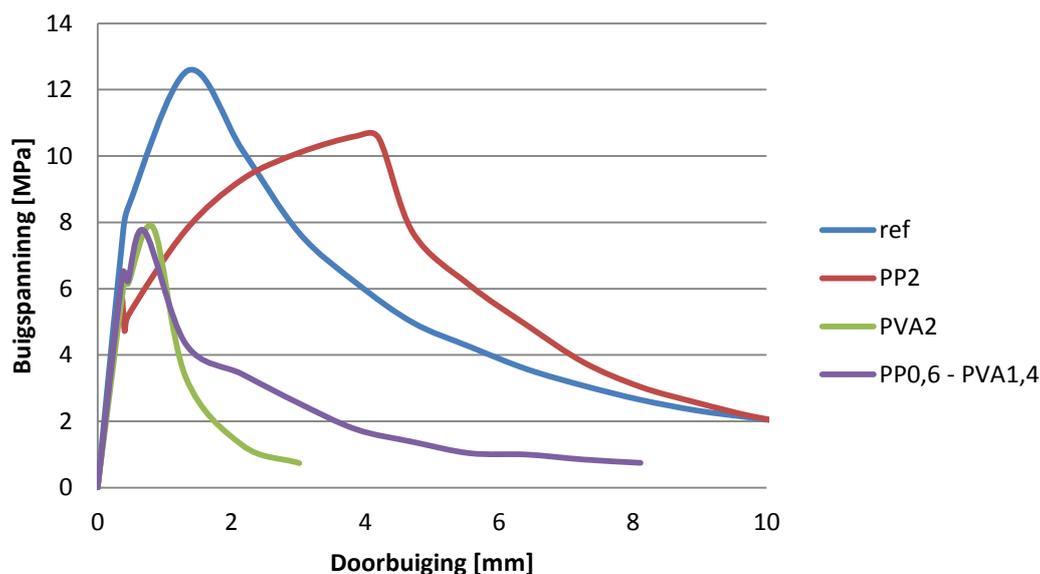
Naam	$f_{m,LOP}$ [MPa]	$f_{m,R1}$ [MPa]	$f_{m,R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$R_{e,1,5}$ [-]	$R_{e,3}$ [-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PP1,5	5,1 (7%)	3,9 (4%)	5,9 (15%)	6716 (21%)	0,86	1,03
PVA1,5	6,2 (7%)	5,7 (12%)	-	1302 (14%)	0,65	0,39
PP0,45-PVA1,05	6,3 (5%)	6,2 (11%)	2 (30%)	2810 (24%)	0,75	0,62

**Tabel 30: Vergelijking resultaten samentellingen met 1,5% vezels**

Aangezien er nog verbeteringen verwacht werden bij hogere volumepercentages, werden er samentellingen getest met twee procent aan vezels, zoals weergegeven in figuur 62. Aangezien deze samentellingen het best het referentiemengsel benaderen, worden ook de resultaten van het referentiemengsel hierbij weergegeven.

Hierbij kan geconcludeerd worden dat de micro PVA-vezels niet efficiënt zijn voor structurele doeleinden. Dit wordt bevestigd in verschillende studies zoals onder andere die van Khoury en Willoughby (2008). Zo wordt er gesteld dat de microvezels vooral efficiënt presteren bij kleinere volumepercentages in vergelijking met de macrovezels. Een bekende toepassing ervan is het gebruik van microvezels voor de reductie van krimp scheuren en het voorkomen van ontmenging in zelfverdichtend beton [26].

Om deze reden werd er dan ook een hybridemengsel getest met een gelijke verhouding van het volume microvezel (70%) tot macrovezel (30%) als bij het referentiemengsel. Er kan geconcludeerd worden dat er betere prestaties bekomen worden ten opzichte van de PVA-vezels, maar absoluut geen voldoende residuele buigsterkte in vergelijking met het referentiemengsel. Waarom de vezelverhouding efficiënter is bij de staalvezels, werd verklaard door de mechanische eigenschappen van de vezels, zoals weergegeven in tabel 7. Zo is de treksterkte van de microstaalvezel ongeveer de helft van de macrostaalvezel. Hiertegenover is de treksterkte van de micro PVA-vezel ongeveer het dubbel van de macro PP-vezel. Daardoor bezitten de synthetische macro-vezels niet voldoende capaciteit om de trekkrachten van de microvezels over te nemen.



**Figuur 62: Vergelijking gemiddeldes van samentellingen met 2% vezels**

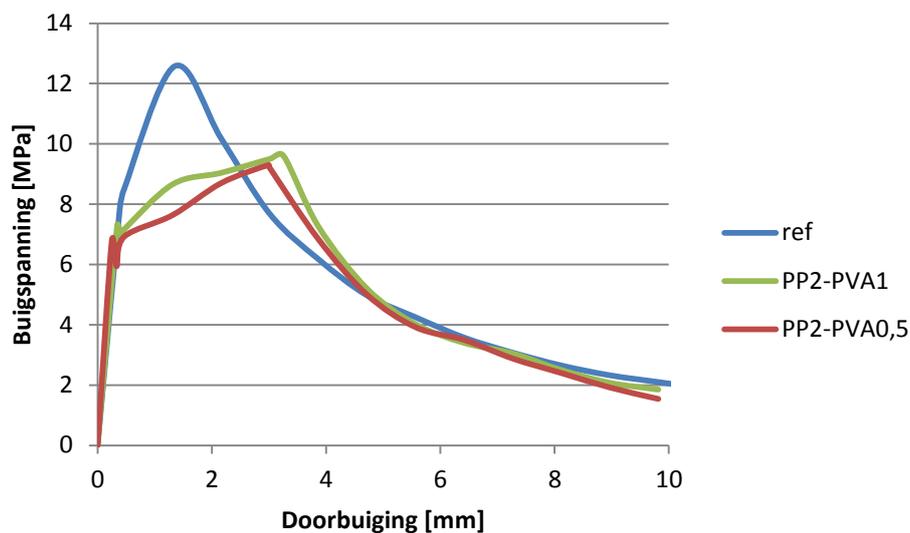
De samenstelling met twee procent PP-vezels blijkt het best de resultaten van het referentiemengsel te benaderen. In tegenstelling tot de microvezels, die het efficiëntst presteren bij de kleine vezelvolumes, behalen de macrovezels goede resultaten bij grotere vezelvolumes. De grotere doorbuiging bij de breukmodulus werd verklaard door de kleinere elasticiteitsmodulus van de PP-vezel in vergelijking met de staalvezels.

Al deze waarnemingen worden ook weergegeven in tabel 31. Ook hieruit blijkt het vermoeden dat bij de bepaling van de proportionaliteitsgrens vooral een deel van de microvezelwerking wordt gemeten.

Naam	$f_{m,LOP}$	$f_{m,R1}$	$f_{m,R4}$	$G_f$	$R_{e,1,5}$	$R_{e,3}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PP2	5,7 (9%)	5,2 (12%)	9,9 (14%)	10651 (27%)	0,97	1,27
PVA2	6,5 (6%)	6,1 (4%)	0,8 (0%)	1777 (11%)	0,8	0,5
PP0,6-PVA1,4	6,5 (3%)	6,5 (8%)	2,5 (21%)	3230 (16%)	0,74	0,62

**Tabel 31: Vergelijking resultaten samenstellingen met 2% vezels**

Indien deze proeven normatief uitgevoerd willen worden, zou er een homogene vezelverdeling bekomen moeten worden. Aangezien dit niet het geval is bij de PP-vezels doordat deze lijken op te drijven in het beton, werden er PVA-vezels toegevoegd om een betere verdeling te bekomen. Verder kunnen deze microvezels de prestaties bevorderen bij kleinere doorbuigingen, die bij het mengsel PP2 te klein zijn in vergelijking met de referentiesamenstelling. Zo werd er een halve procent, maar ook één procent PVA-vezels getest in combinatie met twee procent PP-vezels. De resultaten hiervan worden weergegeven in figuur 63 en tabel 32.



**Figuur 63: Vergelijking gemiddeldes van geoptimaliseerde samentellingen**

Hierbij werd er effectief een goede vezelverdeling bekomen, net als de verbeterde prestaties bij kleinere doorbuigingen. De buigtaaiheidswaarde lijkt minder te zijn als bij PP2, maar dit is te verklaren door de veel grotere buigsterkte bij de proportionaliteitslimiet. Verwacht wordt dat deze buigtaaiheidswaarde dus zeker beter is door de betere resultaten van de andere criteria.

Naam	$f_{m,LOP}$ [MPa]	$f_{m,R1}$ [MPa]	$f_{m,R4}$ [MPa]	$G_f$ [J/m <sup>2</sup> ]	$R_{e,1,5}$ [-]	$R_{e,3}$ [-]
ref	7,8 (9%)	8,1 (27%)	7,7 (9%)	10467 (7%)	1,19	1,24
PP2-PVA0,5	6,8 (3%)	6,9 (7%)	9,2 (14%)	9350 (7%)	1,02	1,15
PP2-PVA1	7,3 (6%)	7,2 (6%)	9,2 (19%)	9659 (10%)	0,96	1,1

**Tabel 32: Vergelijking resultaten van geoptimaliseerde samentellingen**

Nog een algemene opmerking, die bij alle vezelvolumes kan gemaakt worden op basis van de breukenergie. Deze kan namelijk ook een beeld geven van de spreiding van de verschillende individuele resultaten per samenstelling. Er kan opgemerkt worden dat de COV bij de mengsels met enkel PP-vezels telkens groter zijn dan bij de overige samenstellingen. Vermoedelijk kan dat verklaard worden door de heterogene verdeling van de PP-vezels in het breukvlak, waardoor grotere afwijkingen bekomen kunnen worden.

## 4.5 Conclusie van de resultaten

In een vergelijking tussen de druksterkte met staalvezels en synthetische vezels kan er volgende vaststelling gedaan worden. Van de goede samenstellingen kan er van deze met PVA-vezels vastgesteld worden dat er een maximale reductie van de druksterkte bekomen wordt van minder dan zes procent. Indien er enkel PP-vezels getest worden, kan een maximale reductie tot twaalf procent vastgesteld worden.

Op basis van de buigspanning-doorbuigingskarakteristieken kunnen er enkele besluiten gevormd worden in verband met de gebruikte synthetische vezels. Zo blijkt het niet mogelijk om de resultaten van het UHSB met staalvezels volledig te benaderen. Bij grotere doorbuigingen blijken de macro PP-vezels een goede efficiëntie te behalen bij een volumepercentage van twee procent. Hiertegenover presteren de vezels echter ondermaats bij het optreden van de eerste scheur. Verder wordt er een heterogene vezelverdeling bekomen door het kleine soortelijke gewicht van de vezel. De toevoeging van één procent micro PVA-vezel resulteerde in een homogene vezelverdeling, maar beïnvloedde ook de buigsterkte na de scheurvorming positief. Toch bleken deze vezels niet efficiënt genoeg om de resultaten van de staalvezels volledig te benaderen bij kleine doorbuigingen.

Door het vergelijken van de buigtaaiheidswaarden kan er besloten worden dat er een benadering gemaakt kan worden met de resultaten van de referentiesamenstelling. Toch dienen deze resultaten met de nodige voorzichtigheid beoordeeld te worden. Door de aanname van de proportionaliteitslimiet, zou het mogelijk zijn dat er een bepaalde vezelwerking meegerekend werd. Er is dus nog een normatieve test nodig om de resultaten te kunnen verifiëren. Een tweede opmerking die bij deze resultaten gemaakt moet worden is dat de beoordelingscriteria enkel gebaseerd zijn op berekening in de uiterste grenstoestand. Bij de aanbevelingen wordt echter telkens vermeld dat ontwerp in de gebruikersgrenstoestand naar eigen inzicht bepaald moet worden.

Als oplossing voor de vastgestelde problemen kunnen er enkele voorstellen gedaan worden. In de eerste plaats kunnen er hoogwaardige vezels getest worden. Zoals uit tabel 4 blijkt, zijn er namelijk vezels van hetzelfde type met een betere treksterkte en een grotere elasticiteitsmodulus op de markt dan de gebruikte vezels in deze studie. Verder kan er gekozen worden voor een superplastificeerder, welke grotere volumes toelaat t.o.v. het cementgehalte. Op deze manier kan de verwerkbaarheid van de mengsels verbeteren, zodat eventueel grotere volumes microvezel kunnen worden toegevoegd.

Tot slot kan er nog in vraag gesteld worden of het effectief nodig is om gelijke sterkte waarden te bekomen met architectonisch beton t.o.v. structureel beton. Zo is het belangrijkste doel van structureel beton om de stabiliteit van een constructie te verzekeren. Hiertegenover zijn bij architectonisch beton vooral de esthetische eisen van belang zoals de kleur, de vorm, etc. Deze stelling wordt ook bevestigd door de gegevens in tabel 5. Deze tabel toont namelijk aan dat er voor architectonische of brandwerende UHSB-toepassingen, mindere mechanische eigenschappen aanvaard hoeven te worden.

## 5. Conclusie en toekomstvisie

Om ultra hoge sterkte beton toepasbaar te maken in architectonische betontoepassingen, moeten er synthetische vezels worden toegevoegd. Het doel van deze studie was om met deze synthetische vezels op een kosten-efficiënte manier de buigsterkte te evenaren van een UHSB met staalvezels.

Uit de vezelselectie kan er geconcludeerd worden dat polypropyleen- en polyvinylalcoholvezels de beste mechanische eigenschappen vertonen. Problemen die bij deze vezeltypes voorkwamen waren echter een heterogene vezelverdeling door het lage soortelijke gewicht bij de polypropyleen macrovezels. Bij de polyvinylalcohol microvezels kon er een slechte verwerkbaarheid worden vastgesteld. Hiernaast kan er bij het aanmaken van een ultra hoge sterkte beton in een standaard betonmixer, een klontervorming worden vastgesteld. Als oplossing bleek het voldoende om vooraf de microsilica, het aanmaakwater en de superplastificeerder handmatig te mengen en dit toe te voegen na het droog mengen.

De resultaten van de drukproeven van de samenstellingen met de synthetische vezels kwamen goed overeen met deze van de staalvezels. Indien er polyvinylalcoholvezels aan het beton worden toegevoegd, bedraagt de maximale daling van de druksterkte minder dan zes procent. Bij een samenstelling met enkel de polypropyleenvezels wordt er een maximale reductie van de druksterktes tot twaalf procent vastgesteld.

Op basis van de spanning-doorbuigingskarakteristieken kan er besloten worden dat een volledige benadering van de curve van staalvezels met de gebruikte synthetische vezels niet mogelijk is. Wel kan er een benadering vastgesteld worden van de maximale buigsterkte met een volume van twee procent polypropyleenvezels. Al is er wel een grotere doorbuiging nodig om deze maximale buigsterkte te behalen in vergelijking met de staalvezels. Door de toevoeging van één procent polyvinylalcoholvezels aan deze samenstelling, kunnen er ook grotere buigspanningen bekomen worden na de vorming van de eerste scheur. Toch bleken deze vezels niet efficiënt genoeg om de resultaten van de staalvezels volledig te benaderen bij kleine doorbuigingen. Door het vergelijken van de buigtaaiheidswaarden kan er besloten worden dat ook hier een benadering kan worden vastgesteld.

De beoordelingscriteria van het UHSB met staalvezels wordt dus het best benaderd door de samenstelling met twee procent PP-macrovezels en één procent PVA-microvezels. Toch is er een normatieve verificatie nodig van de bekomen resultaten, om zo de gemaakte veronderstellingen te kunnen elimineren. Verder zijn de resultaten enkel gebaseerd op berekening in de uiterste grenstoestand. Bij de aanbevelingen wordt echter telkens vermeldt dat ontwerp in de gebruikersgrenstoestand naar eigen inzicht bepaald moet worden. Ook hiervoor zou toekomstgericht naar een oplossing gezocht kunnen worden.



## Referenties

- [1] Adfill. Specification for SYNTEC/Durus S300. Geraadpleegd op 3 maart 2014. [www.betongroep.nl/EN/pdf/Specifications-SYNTEC-S300.pdf](http://www.betongroep.nl/EN/pdf/Specifications-SYNTEC-S300.pdf).
- [2] Aïtcin, P.C. (2000). Cements of yesterday and today – Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1349-1359.
- [3] AGY (2006). Technical paper High Strength Glass Fibers.
- [4] Association Française de Génie Civil (2002). Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations.
- [5] Bolat, H., Simsek, O., Cullu, M., Durmus, G., Can, O. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites: part B*, 61, 191-198.
- [6] Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aïtcin, P.C. (1997). Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes. *ACI Materials Journal*, 94(4), 286-290.
- [7] Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M. Amziane, S. (2012). Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete. *Construction and building materials*, 27, 6-45.
- [8] CAE NEDERLAND BV. Gedrag (vv)UHSB belast op schuifspanningen. Geraadpleegd op 5 december 2013, <http://www.uhsb.nl/?p=392>.
- [9] Cauberg, N., Piérard, J., Parmentier, B. (2013). Ultrahogesterktebeton: na het onderzoek ook toepassingen in België?. *WTCB-Contact*, 10(3), 5.
- [10] Cauberg, N. (2013). Vezelversterkt beton. *Les uitvoeringstechnieken 14 maart 2013*.
- [11] Chan, Y.W., Chu, S.H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167-1172.
- [12] Choi, Y., Yuan, R.L. (2005). Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. *Cement and Concrete Research*, 35, 1587-1591.
- [13] CRC-Tech. Introduction. geraadpleegd op 4 december 2013, <http://www.crc-tech.com/Introduction-197.aspx>.
- [14] CUR bouw & infra (2011). CUR-Aanbeveling 36:2011 Ontwerpen van elastisch ondesteunde betonvloeren en -verhardingen.
- [15] Dowd, W.M., Dauriac, C.E. (1996). Reactive Powder Concrete. *Construction Specifier*, 49(12), 47-52.

- [16] Ductal-Lafarge. Mechanical Performances. Geraadpleegd op 15 maart 2014. [http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/6\\_5-Mechanical\\_performances#editoEncartLock0000000000021235](http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/6_5-Mechanical_performances#editoEncartLock0000000000021235)
- [17] Ductal-Lafarge. Standards & calculation methods. Geraadpleegd op 17 december 2013. [http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/6\\_6-Standards\\_and\\_design\\_codes](http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/6_6-Standards_and_design_codes).
- [18] European Ready Mixed Concrete Organization ERMCO (2012). Guidance to fibre concrete: Properties, Specification and Practice in Europe.
- [19] Fehr-groupe. An exceptional material offering numerous advantages. Geraadpleegd 2 december 2013. <http://www.fehr-groupe.com/en/uhpc/uhpc-the-creative-material.html>.
- [20] Gao, R., Liu, Z.M., Zhang, L.Q., Stroeven, P. (2006). Static Properties of Reactive Powder Concrete Beams. *Key Engineering Materials*, Jan., Vol. 302-303 521-527.
- [21] Giner, V.T., Baeza, F.J., Ivorra, S., Zornoza, E., Galao, O. (2012). Effect of steel and carbon fiber additions on the dynamic properties of concrete containing silica fume. *Materials and design*, 34, 332-339.
- [22] Graybeal, B. (2006). Material property characterization of ultra-high performance concrete. FHWA-HRT-06-103.
- [23] Graybeal, B, Davis, M. (2008). Cylinder or Cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 105(6), 603-609.
- [24] Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., Brühwiler, E. (2006). Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC). *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1362-1370.
- [25] Jungwirth, J., Muttoni, A. (2004). Structural Behavior of Tension Members in UHPC.
- [26] Khoury, G.A., Willoughby B. (2008). Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behavior. *Magazine of concrete research*, 60(2), 125-136.
- [27] Kim, D.J., Naaman, A.E., El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, 30, 917-928.
- [28] Korpa, A., Trettin, R. (2004). The use of synthetic colloidal silica dispersions for making HPC and UHPC systems, preliminary comparison results between colloidal silica dispersions and silica fumes (SF). *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13–15, deel 3 p.155-164.
- [29] Larrard, de F., Sedran, T. (1994). Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the use of a Packing Model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 997-1009.
- [30] Ma, J., Schneider, H. (2002). Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER)*, No. 7, 25-32.

- [31] Máca, P., Sovják, R., Vavrinik, T. (2013). Experimental investigation of mechanical properties of UHPFRC. *Procedia Engineering*, 65, 14-19.
- [32] Matte, V., Moranville, M. (1999). Durability of Reactive Powder Composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder Pastes. *Cement & Concrete Composites*, 21(1), 1-9.
- [33] MC Bauchemie Romania. Technical data sheet MC Powerflow 3100. Geraadpleegd op 14 december 2013. <http://www.mc-bauchemie.nl/1855.aspx>.
- [34] Missimer, L., Ouedraogo, E., Malécot, Y. (2010). Effect of polymer fibres inclusion in fire spalling of ultra-high performance concrete.
- [35] NBN EN 12390-5 (2009). Beproevingmethode voor verhard beton – deel 5: Buigsterkte van proefstukken.
- [36] NBN EN 14651 (2007). Beproevingmethode voor staalvezelbeton – Meten van buigtreksterkte (proportionaliteitsgrens (LOP), reststerkte).
- [37] NBN EN 1992-1-1 (2005). Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen.
- [38] Orgass, M., Klug, Y. (2004). Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13–15, deel 3 p.637–647.
- [39] Parant, E., Rossi, P., Boulay, C. (2004). Fatigue behavior of multi-scale cement composite.
- [40] Patel, P.A., Desai, A.K., Desai, J.A. (2012). Evaluation of engineering properties for polypropylene fibre reinforced concrete. *International journal of advanced engineering technology*, vol. III Issue I, 42-45.
- [41] Peyvandi, A., Sbia, L.A., Soroushian, P., Sobolev, K. (2013). Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite. *Construction and building Materials*, 48, 265-269.
- [42] Porteneuve, C., Korb, J.P., Petit, D., Zanni, H. (2002). Structure-texture correlation in ultrahigh-performance concrete: A nuclear magnetic resonance study. *Cement and Concrete Research*, 32(1), 97-101.
- [43] Richard, P., Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.
- [44] Rossi, P. (2005). Development of New Cement Composite Materials for Construction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 219(L1), 67-74.
- [45] Sawsen, C., Fouzia, K., Mohamed, B., Moussa, G. (2014). Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. *Construction and building materials*, 54, 659-664

- [46] Schmidt, M., Fehling, E., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R. (2003). Ultra-High Performance Concrete: Perspective for the Precast Concrete Industry. *Concrete Precasting Plant and Technology*, 69(3), 16-29.
- [47] Sika. Technische fiche Viscocrete-20 gold. Geraadpleegd op 12 februari 2014. [http://bel.sika.com/nl/oplossingen\\_producten/document\\_library/technische\\_fiches/pds\\_sika\\_viscocrete.html](http://bel.sika.com/nl/oplossingen_producten/document_library/technische_fiches/pds_sika_viscocrete.html).
- [48] Snoeck, D., De Belie, N. (2012). Mechanical and self-healing properties of cementitious composites reinforced with flax and cottonised flax, and compared with polyvinyl alcohol fibres. *Biosystems engineering III*, 325-335.
- [49] Sobolev, K. (2003). The development of a new method for the proportioning of high performance concrete mixtures.
- [50] Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and concrete research*, 35, 1546-1550.
- [51] Spasojevic, A. (2008). Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design.
- [52] Stiel, T., Karihaloo, B.L., Fehling, E. (2004). Effects of Casting Direction on the Mechanical Properties of CARDIFRC®. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13–15, deel 3 p.481–493.
- [53] Tang, M.C. (2004). High Performance Concrete – Past, Present and Future. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13–15, deel 3 p. 3-9.
- [54] The Concrete Institute (2013). Fibre reinforced concrete.
- [55] The Concrete Society (2007). Technical Report No. 63 Guidance for the design of steel-fibre reinforced concrete.
- [56] The Concrete Society (2007). Technical Report No. 65 Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced concrete.
- [57] Tronci, C. (2013). Structural behavior of ultra high performance concrete prestressed girders.
- [58] Uchida, Y., Takeyama, T. (2010). Ultra high strength fiber reinforced concrete using aramid fiber.
- [59] Vectorply. Products – Reinforcement Fibers. Geraadpleegd op 24 februari 2014. <http://www.vectorply.com/ri-reinforcementfibers.html>.
- [60] Verburch, A. (2010). Onderzoek naar de grootte van de vormfactor bij staalvezelgewapend beton.
- [61] Vernet, C.P. (2004). Ultra-Durable Concretes: Structure at the Micro-and Nanoscale. *MRS Bulletin*, 29(5), 324-327.

- [62] Voort, Vande T., Suleiman, M., Sritharan, S. (2008). Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for Deep Foundations.
- [63] Walraven, J.C. (2002). From Design of Structures to Design of Materials. Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 Sept. London: 805-818.
- [64] Yap, S.P., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. (2013). Enhancement of mechanical properties in polypropylene- and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete. *Materials and design*, 49, 1034-1041.

## **Auteursrechtelijke overeenkomst**

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:  
**Buigtreksterkte van ultra hoge sterkte beton met synthetische vezels**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**  
Jaar: **2014**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

**Claes, Jonas**

**Hoydongs, Tom**

Datum: **5/06/2014**