

EINDRAPPORT

MATERIAALSTUDIE UHSB



Opdrachtgever	:	Avans Hogeschool
Project	:	Materiaalstudie UHSB
Opgesteld	:	Rutger Mulder en Mathijs de Groot
Gecontroleerd	:	Michael van Nielen, Dennis Schoenmakers en Lee van Kessel
Versie	:	1.0
Status	:	Definitief
Datum	:	15 juni 2017



COLOFON

Document: Materiaalstudie UHSB - Eindrapport
Versie: 1.0
Datum: 15-06-2017

Namen:	Rutger Mulder	Mathijs de Groot
Studentnr.:	2072393	2082089
E-mail:	rm.mulder1@student.avans.nl	mc.degroot1@student.avans.nl
Telefoon:	06-15397893	06-18938347

Onderwijs:	Avans Hogeschool	
Opleiding:	Civiele Techniek	
Afdeling:	Academie voor Bouw en Infra	
Adres:	Onderwijsboulevard 215, 5223 DE 's-Hertogenbosch	
Begeleiders:	Michael van Nielen	Bart Dankers
E-mail:	mhm.vannielen@avans.nl	bf.dankers@avans.nl

Afstudeerbedrijf:	Adviesbureau voor Bouwconstructies Wagemaker B.V.	
Afdeling:	Constructief Ontwerp	
Adres:	Burgemeester Burgerslaan 44/30, 5245 NH Rosmalen	
Begeleiders:	Dennis Schoenmakers	Lee van Kessel
E-mail:	D.Schoenmakers@wagemaker.nl	L.vanKessel@wagemaker.nl

Akkoord:

.....

.....

.....

.....

Studenten:
Rutger Mulder
Mathijs de Groot

Bedrijfsbegeleiders:
Dennis Schoenmakers
Lee van Kessel

SAMENVATTING

Betonmengsels blijven zich ontwikkelen, hetgeen resulteert in hoger opneembare druksterktes en verhoogde duurzaamheid. Ultra Hoge Sterkte Beton is een materiaal dat voortkomt uit deze materiaaloptimalisaties. Deze ontwikkeling in de mengsels zorgt ervoor dat constructies steeds slanker geconstrueerd kunnen worden.

Het doel van dit onderzoek is het bekijken van de mogelijkheden van UHSB en dit af te wegen tegen conventionele betonsoorten. Hierbij is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

Wat zijn de mogelijkheden in het constructief ontwerp bij het toepassen van UHSB ten opzichte van conventioneel beton?

UHSB is een geoptimaliseerd betonmengsel wat geclassificeerd wordt door betondruksterktes tussen de 150 en 200 MPa. Het wordt gecreëerd door het optimaliseren van de pakkingdichtheid van het mengsel. Door silicafume toe te voegen worden bijna alle holle ruimtes in de constructie gevuld. Dit zorgt voor een geleidelijke verdeling van de belastingen door een betonnen constructie en voorkomt inwendige piekspanningen.

Voor het rekenen met VVUHSB zijn er geen algemeen geldende richtlijnen. Momenteel wordt er gewerkt aan een Europese norm, zoals de Eurocode. Op het moment van schrijven is de 'interim recommendations' de meest volledige richtlijn met betrekking tot VVUHSB. Deze is geschreven voor 3 specifieke mengsels door de Franse betonvereniging AFGC. De meest recente versie van de richtlijn van de AFGC is de 'Revised Version' van juni 2013 en in dit rapport is deze norm gebruikt voor de berekeningen met VVUHSB.

Zoals bij veel materialen wordt het beton brosser, naarmate de sterkte toeneemt. Dit zorgt ervoor dat de plastische tak van het materiaal afneemt en een bros bezwijkmechanisme sneller optreedt. Voor de veiligheid van de constructie is dit niet wenselijk. Om dit brose gedrag van het beton tegen te gaan worden vezels toegevoegd aan UHSB mengsels om de ductiliteit van het beton te verhogen.

De toevoeging van vezels zorgt voor een verhoogde treksterkte, een verhoogde elasticiteitsmodulus en een gunstiger scheurgedrag. Wanneer vezels worden toegevoegd aan een UHSB mengsel kunnen er zich twee gedragingen voordoen afhankelijk van de hoeveelheid en lengte van de vezels. Deze twee gedragingen zijn softening en hardening. Softening-gedrag wil zeggen dat bij het ontstaan van de eerste scheur de spanning die opgenomen kan worden door de betonmatrix plotseling afneemt en om deze reden wordt er gerekend met een afgeknot spanning-rekdiagram. In het geval van harding-gedrag zal bij het ontstaan van de eerste scheur de opneembare spanning nog toenemen tot een maximale scheurwijdte waarbij de vezels uit de betonmatrix worden losgetrokken.

Eerst is er een oefenberekening uitgewerkt met een rechthoekige balk. Uit dit voorbeeld blijkt dat er weinig winst te halen is in de momentweerstand en de doorbuiging ten opzichte van conventionele betonsoorten. Een groot voordeel ten opzichte van conventioneel beton is de enorme toename van de dwarskrachtcapaciteit door de toevoeging van vezels, doordat deze de functie van wapeningsbeugels kunnen vervullen. Daarnaast vindt er een gunstiger scheurgedrag plaats bij VVUHSB



ten opzichte van conventioneel beton. Door de vezels wordt de scheurafstand verkleind en ontstaan er meerdere kleine scheurtjes in plaats van een grote geconcentreerde scheur.

Na deze oefenberekening is een casus opgezet van een voetgangers-/ fietsbrug. Hierin is een brugdek uitgewerkt als dubbele T-ligger in twee verschillende soorten betonsterkteklassen, enerzijds een conventionele betonsoort met betonsterkteklasse C50/60 en anderzijds een VVUHSB met betonsterkteklasse C170/200. Wat opvalt bij deze casus is dat de benodigde hoeveelheid voorspanning bepalend is voor de constructiehoogte van het dek. De uiteindelijke constructiehoogte van VVUHSB valt lager uit dan van conventioneel beton. Dit komt doordat een hogere trekspanning mag worden toegelaten in de doorsnede, waardoor minder voorspanning benodigd is.

Kijkend naar de kosten van VVUHSB ten opzichte conventioneel beton blijkt het VVUHSB mengsel per kubieke meter ruim vijf keer duurder dan conventioneel beton. Echter kan er wel kleiner geconstrueerd worden. Uiteindelijk blijkt de constructie van het brugdek ruim anderhalf keer duurder te zijn in VVUHSB, hetgeen één van de belangrijke factoren is in het uitblijven van deze betonsoort.

SUMMARY

Concrete mixtures keep developing, which results in higher compressive strength and better durability and sustainability. Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is an optimisation of conventional concrete mixtures following from this development. Applying these developments makes it possible to design leaner constructions.

The goal of this research is to look into these possibilities and compare them with conventional concrete types. The following research question was drawn up to accomplish this:

What are the possibilities in the structural design by applying UHPC compared to conventional concrete types?

UHPC is an optimised concrete mixture which is classified by compressive strengths between 150 and 200 MPa. It is produced by optimising the density of the concrete mixture. By adding silicafume almost all the hollow spaces in the construction will be filled. This leads to the applied loads being evenly spread over the concrete construction and prevents peak stresses.

There are no general applicable standards to design constructions in UHPC. An European standard, similar to the currently existing Eurocode, is being written at this moment. At the moment of writing this thesis the most complete guideline for UHPC is the 'interim recommendations' written by the French concrete association AFGC. The most recent version of this guideline is the 'Revised Version' of June 2013. This version will be used in this thesis.

As is the case with a great amount of materials, concrete will get more brittle when the strength increases. This is caused by a decrease of the plastic section and will make it more likely that a brittle failure mechanism will occur. This is not desirable for the safety of the construction. Fibers are being added to the UHPC mixture to prevent brittle material behaviour and to increase the ductility of the construction. When fibers are added to the mixture the term Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC) is used.

Adding fibers also increases the tensile strength and the modulus of elasticity. Furthermore, it creates a more favorable crack behaviour. When fibers are being added to the UHPC mixture the construction can behave in two ways, depending on the amount and the length of the fibers. These two types of behaviour are softening and hardening. Softening behaviour will cause the concrete matrix to drop abruptly right after the first crack occurs. For this reason all calculations will be made with a truncated stress-strain curve. When hardening behaviour occurs the compressive strength increases after the first crack occurs. The compressive strength will keep increasing until the maximum crack width is reached and the fibers are pulled out of the concrete matrix.

First a practice calculation is conducted on a rectangular beam. This practice calculation shows that little gain is to be achieved in bending moment resistance and the resulting bending compared to conventional concrete types. A great advantage compared to conventional concrete is the enormous increase in shear force resistance. This is mostly because fibers are added to the mixture, they perform in the same manner as reinforcement stirrups. Also there will be a more favourable crack



behaviour. The fibers will decrease crack width and will increase the amount of small cracks instead of creating a single big crack.

After this practice calculation a casestudy was set up of a pedestrian and cyclist bridge. In this casestudy the deck of the bridge was designed as a double T-beam construction in two different types of concrete, one conventional type of concrete classified as C50/60 and one UHPFRC classified as C170/200. For this casestudy was found that the applicable height was determined by the amount of prestress that is needed in the construction. The construction height of the construction in UHPFRC ends up being lower than the construction in conventional concrete. This is because a higher tensile strength can be allowed in the cross section, which causes less prestress to be needed.

When the cost of the construction is assessed the construction designed in UHPFRC turns out to be over five times higher per cubic meter. However a more lean design can be achieved when using UHPFRC. Eventually this causes the construction costs of the bridge deck to be around one-and-a-half times higher than the construction costs with conventional concrete.



VOORWOORD

Voor u ligt de afstudeerscriptie Materiaalstudie UHSB. In het kader van het afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan de Avans Hogeschool te 's-Hertogenbosch, met als specialisatie constructief ontwerpen, is deze scriptie geschreven in samenwerking met ingenieursbureau Wagemaker. Hier zijn wij van februari 2017 tot en met juni 2017 bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van deze scriptie.

Tijdens het afstuderen zijn wij begeleid door de heren Lee van Kessel en Dennis Schoenmakers, en hebben wij samen met hen vorm gegeven aan de afstudeeropdracht. Bij dezen willen wij beide heren hartelijk danken voor de genomen moeite voor het begeleiden van de opdracht. Zij hebben op zowel technische als procesmatige gebieden ons ondersteund en waren altijd bereid hulp te bieden bij technische vraagstukken. Daarnaast willen wij Wagemaker bedanken voor het voorzien van een werkruimte en overige middelen.

Verder willen wij de begeleiders vanuit school bedanken voor de begeleiding in het afstudeerproces om tot het gewenste resultaat te komen. Respondenten willen wij ook graag bedanken, zonder hen kon het gewenste resultaat niet behaald worden.

Veel leesplezier toegewenst.

Mathijs de Groot en Rutger Mulder
Rosmalen, 15 juni 2017

BEGRIPSBEPALINGEN

<i>UHSB</i>	Ultra Hoge Sterkte Beton
<i>VVUHSB</i>	Vezel Versterkte Ultra Hoge Sterkte Beton
<i>Conventioneel beton</i>	Het 'normale' sterkte beton tot een kubusdruksterkte 65 MPa ($f_{ck,cube}$).
<i>HSB</i>	Hoge sterkte beton
<i>ZHSB</i>	Zeer hoge sterkte beton
<i>UGT</i>	Uiterste grenstoestand
<i>BGT</i>	Bruikbaarheidsgrenstoestand
<i>MPa</i>	Megapascal, staat gelijk aan 1 miljoen Pascal of 1 N/mm ² .
<i>w/c-ratio</i>	Water/cementfactor is de verhouding van de hoeveelheid water ten opzichte van de hoeveelheid cement.
<i>AFGC</i>	' <i>Association Française de Génie Civil</i> ' een Franse samenwerking tussen ingenieurs, studenten, docenten, aannemers, etc. Een werkgroep van deze AFGC heeft de 'interim recommendations' geschreven, op het moment de meest leidende ontwerprichtlijn met betrekking tot UHSB.
<i>fib</i>	International Federation for Structural Concrete. Een internationale samenwerking met als doel de wetenschappelijke en praktische kennis te ontwikkelen. Momenteel is de fib bezig met een norm m.b.t. UHSB.

VEEL GEBRUIKTE SYMBOLEN

Latijnse Symbolen

A	oppervlakte van de doorsnede
A_c	oppervlakte van de betondoorsnede
A_{fv}	effectieve vezelgebied
A_p	oppervlakte van het voorspanstaal in de doorsnede
A_s	oppervlakte van de wapening in de doorsnede
$A_{s,min}$	minimumoppervlakte van de wapening in de doorsnede
A_{sw}	oppervlakte van de dwarskrachtwapening in de doorsnede
$E_{c,eff}$	effectieve elasticiteitsmodulus van beton
E_{cm}	elasticiteitsmodulus van beton
E_s	elasticiteitsmodulus van betonstaal
F	belasting
I	kwadratisch oppervlaktemoment
K	vezeloriëntatiefactor
K_{global}	vezeloriëntatiefactor voor globale effecten
K_{local}	vezeloriëntatiefactor voor locale effecten
M	buigend moment
M_{Ed}	rekenwaarde van het optredende buigend moment
N	normaalkracht
N_c	normaalkracht in het beton
N_{Ed}	rekenwaarde van de optredende normaalkracht
N_f	normaalkracht in de vezels
N_s	normaalkracht in het betonstaal
P	voorspankracht
P_0	aanvangskracht van de voorspanning
S	statisch moment
V	dwarskracht
V_{Ed}	rekenwaarde van de optredende dwarskracht
V_{Rd}	rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand
$V_{Rd,c}$	rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand van het betonaandeel
$V_{Rd,f}$	rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand van de vezels
$V_{Rd,s}$	rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand van de dwarskrachtwapening
$V_{Rd,max}$	rekenwaarde van de begrenzing van bezwijken betondrukdiagonalen
b	breedte van de doorsnede
b_w	kleinste breedte van de doorsnede in de zone onder trek
c_{dev}	uitvoeringstolerantie dekking

d	nuttige hoogte
f_{cd}	rekenwaarde cilinderdruksterkte
$f_{cd,fat}$	rekenwaarde van de vermoeiingsdruksterkte
$f_{ck,cube}$	karacteristieke kubusdruksterkte
f_{ck}	karacteristieke cilinderdruksterkte
f_{ctd}	rekenwaarde treksterkte
$f_{ct,eff}$	gemiddelde waarde treksterkte op het tijdstip van scheuren
f_{ctfm}	gemiddelde maximale na-scheur treksterkte
$f_{ctk,el}$	karacteristieke treksterkte in elastische toestand
$f_{ctm,el}$	gemiddelde maximale treksterkte in elastische toestand
f_{yd}	rekenwaarde van de vloeigrens van betonstaal
f_{ywd}	rekenwaarde van de vloeigrens van de dwarskrachtwapening
h	hoogte
k	coëfficiënt
l	lengte
l_c	karacteristieke lengte om de rek te berekenen uit de scheurwijdte
l_f	vezellengte
s	hart-op-hartafstand wapening
$s_{r,max}$	maximale scheurafstand
$w_{1\%}$	scheurwijdte van 1% van de doorsnedehoogte
w_k	scheurwijdte
w_{max}	maximale scheurafstand
x	afstand tot de neutrale lijn
x_u	hoogte betondrukzone
z	hefboomsarm van snedekrachten

Griekse symbolen

α_{cc}	coëfficiënt voor langeduureffecten op betondruksterkte
$\beta_{cc}(t)$	coëfficiënt die afhangt van de ouderdom t van het beton
γ_c	partiële factor beton
γ_{cf}	partiële factor vezels
γ_E	partiële factor vanwege onzekerheden
ε	rekwaarde
ε_{c3}	betonstuik
ε_{cm}	is de gemiddelde betonrek tussen scheuren
ε_{cu3}	grenswaarde van de betonstuik
$\varepsilon_{u,el}$	rekwaarde elastische zone in UGT



$\varepsilon_{u,lim}$	maximale rekwaarde waarbij vezelparticipatie niet meer in rekening wordt gebracht in UGT
$\varepsilon_{u,peak}$	rekwaarde bij een scheurwijdte van 0,3 mm
ε_s	rek in wapeningsstaal
ε_{sm}	gemiddelde rek in de wapening
φ	kruipcoëfficiënt
$\rho_{p,eff}$	verhouding wapening in effectieve betonoppervlakte
$\sigma_f(w)$	spanning in relatie tot scheurwijdte
σ_{cp}	betondrukspanning ten gevolge van de voorspanning
$\sigma_{Rd,f}$	rekenwaarde van de restwaarde van de treksterkte van een vezelversterkte doorsnede
σ_s	gemiddelde staalspanning in de wapening
θ	hoek betondrukdiagonaal

INHOUDSOPGAVE

INHOUD

COLOFON	II
SAMENVATTING	III
SUMMARY	V
VOORWOORD	VII
BEGRIPSBEPALINGEN	VIII
VEEL GEBRUIKTE SYMBOLEN	IX
1. INLEIDING	1
1.1. AANLEIDING	1
1.2. PROBLEEMSTELLING	1
1.3. DOELSTELLING	1
1.4. KADER	2
1.5. AANPAK	2
1.6. STRUCTUURBESCHRIJVING/LEESWIJZER	2
2. ONDERZOEKSMETHODE	4
2.1. LITERATUURSTUDIE	4
2.2. CASUSSTUDIE	5
2.3. CONCLUSIE	5

Deel 1: Literatuurstudie

3. ALGEMEEN	7
3.1. CLASSIFICATIE	7
3.2. SAMENSTELLING	7
3.3. VERSCHILLEN CONVENTIONEEL BETON EN UHSB	10
3.4. VEZELTYPES IN UHSB (VVUHSB)	10
3.4.1. Formaat vezels	11
3.4.2. Materiaal vezels	12
3.4.3. Vezelpercentage	12
3.4.4. Vezeloriëntatie	13
3.5. SOFTENING EN HARDENING	13
3.6. NABEHANDELING	14
3.7. DUURZAAMHEID	16
3.7.1. Levensduur	16
3.7.2. Onderhoud	16
3.7.3. Milieubelasting	17
3.7.4. Kostenbeoordeling	18

3.7.5. Sociale aspecten	18
4. EIGENSCHAPPEN	19
4.1. SPANNING-REKRELATIE	19
4.1.1. Invloed betonsterkteklasse op spanningsdiagram	19
4.1.2. Spanning-rekdiagram VVUHSB belast op druk	20
4.1.3. Spanning-rekdiagram VVUHSB belast op trek	22
4.2. ELASTICITEITSMODULUS	25
4.3. KRIMP	25
4.4. KRUIP	27
4.5. VERMOEIING	27
4.6. DUCTILITEIT	29
5. REKENMETHODES	30
5.1. MOMENTWEERSTAND	30
5.2. DWARSKRACHTCAPACITEIT	32
5.3. SCHEURWIJDTE	35
6. BALKBEREKENING CONVENTIONEEL BETON VS. (VV)UHSB	36
6.1. UITGANGSPUNTEN	36
6.2. RESULTATEN	37
6.3. CONCLUSIE	38
6.3.1. Momentweerstand	38
6.3.2. Dwarskrachtweerstand	38
6.3.3. Scheurwijdte	39
6.3.4. Doorbuiging	40

Deel 2: Casusstudie

7. SAMENVATTING CASUS	42
7.1. LOCATIE	42
7.2. TE VERGELIJKEN BETONSOORTEN	43
7.3. UITVOERING	43
7.4. CONSTRUCTIE	44
7.5. BELASTINGEN	45
8. DIMENSIONERING DEKCONSTRUCTIE	46
8.1. CONVENTIONEEL BETON	46
8.1.1. Langsrichting	46
8.1.2. Dwarsrichting	46
8.1.3. Benodigde wapening	46
8.2. VVUHSB	47
8.2.1. Ductiliteitsgrens	47
8.2.2. Langsrichting	47
8.2.3. Dwarsrichting	48
8.2.4. Benodigde wapening	48



8.3.	CONCLUSIE	49
9.	KOSTEN.....	50
9.1.	PRODUCTIE.....	50
9.2.	PROJECTKOSTEN	50
10.	CONCLUSIE	53
11.	DISCUSSIE	56
12.	AANBEVELINGEN	58
13.	BIBLIOGRAFIE.....	59

BIJLAGEN

BIJLAGE A	VOORSPANNING
BIJLAGE B	TOEPASSINGEN CIVIELE TECHNIEK
BIJLAGE C	OEFENBEREKENING
BIJLAGE D	CASUS UITWERKING
BIJLAGE E	UITWERKING KRACHTENSPEL
BIJLAGE F	BEREKENINGEN CASUS
BIJLAGE G	BEPALING BENODIGDE VOORSPANNING
BIJLAGE H	ALP CB INPUT
BIJLAGE I	ALP UHSB INPUT
BIJLAGE J	SCIA CB INPUT
BIJLAGE K	SCIA UHSB INPUT
BIJLAGE L	WAPENINGSTEKENING CB
BIJLAGE M	WAPENINGSTEKENING UHSB

1. INLEIDING

1.1. AANLEIDING

De infrastructurele markt ontwikkelt zich continu op materiaal-technisch gebied. Conventioneel beton wordt steeds vaker vervangen door een beton met hogere sterkte. Voordelen hiervan zijn esthetica (slankere constructies zijn mogelijk), reductie in materiaalgebruik, duurzaamheid van het materiaal en er is minder onderhoud nodig [1]. Het ontbreken van internationaal erkende normen en richtlijnen is een van de redenen dat de toepassing van UHSB nog beperkt blijft in infrastructurele projecten [2]. Daarnaast zorgt de viscositeit van UHSB voor beperkingen en is er een gebrek aan kennis met betrekking tot de uitvoering [3].

Ook Wagemaker heeft belang bij een onderzoek naar UHSB. Om het kennisgebied van innovaties binnen de markt te vergroten is het van belang om op de hoogte te zijn van de mogelijkheden van het gebruik van nieuwe materialen. Verder is het belangrijk om voldoende kennis in huis te hebben over nieuwe materialen, zodat daarmee gewerkt kan worden in nieuwe projecten.

1.2. PROBLEEMSTELLING

UHSB is een vernieuwende betonsoort die door hogere druksterktes en dichtheid veel potentie toont. Uit laboratorium onderzoeken blijkt dat druksterktes een factor 10 hoger kunnen zijn dan conventioneel beton. Echter zijn normen geschreven voor conventioneel beton, zoals Eurocode 2, niet rechtstreeks toepasbaar door de grote verschillen tussen UHSB en conventioneel beton. Doordat er nog geen internationaal erkende normen en richtlijnen zijn met betrekking tot UHSB is het lastig voor ingenieursbureau's, als Wagemaker, om te werken met het materiaal. Dit belemmert een echte doorbraak in het gebruik van UHSB.

1.3. DOELSTELLING

Het doel van dit onderzoek is het in kaart brengen van de ontwerp mogelijkheden bij het toepassen van UHSB ten opzichte van conventioneel beton.

Deze doelstelling is in onderstaande hoofdvraag geformuleerd:

Wat zijn de mogelijkheden in het constructief ontwerp bij het toepassen van UHSB ten opzichte van conventioneel beton?

Om deze hoofdvraag te beantwoorden is deze opgedeeld in onderstaande deelvragen:

- Wat is UHSB en wat zijn de huidige infrastructurele toepassingen?
- Wat zijn de materiaaltechnische eigenschappen van UHSB en hoe verhouden deze zich ten opzichte van conventioneel beton?
- Wat zijn de rekenregels en normen met betrekking tot UHSB?
- Welke vezels kunnen toegevoegd worden aan UHSB en wat zijn de gevolgen hiervan op de materiaaleigenschappen?
- Wat valt op bij het ontwerpen van de voorspanwapening bij gebruik van UHSB tegenover conventioneel beton?

- Hoe gaat het ontwerp van de casus eruit zien met het gebruik van UHSB?
- Wat zijn voor- en nadelen bij een ontwerp met UHSB ten opzichte van het huidige ontwerp?
- Welke bezwijkmechanismen zijn leidend in het ontwerp met UHSB?

1.4. KADER

Dit onderzoek legt de focus op de mechanische eigenschappen en de rekenmethodieken van UHSB. Momenteel zijn er nog geen internationaal erkende normen om constructieve berekeningen te maken met VVUHSB en dit is ook één van de belangrijkste redenen dat VVUHSB niet vaker wordt toegepast in de bouwwereld. Ook voor constructeurs van ingenieursbureaus die gespecialiseerd zijn in beton is er nog veel onbekend over de rekenmethodieken van VVUHSB. Voor de afdeling Constructief Ontwerp bij Wagemaker die gespecialiseerd is in betonconstructies is dit ook het meest belangrijke onderwerp met betrekking tot VVUHSB.

Momenteel zijn er enkele richtlijnen opgesteld door verschillende experts uit het vakgebied, welke houvast bieden voor een constructief ontwerp. Door ontwikkelingen op het gebied van UHSB en in het bijzonder VVUHSB worden deze richtlijnen regelmatig herzien. Dit heeft als gevolg dat er van de nieuwste richtlijn, 'Interim Recommendations' Revised Edition, June 2013, nog maar beperkte praktische uitwerkingen zijn. Oudere versies of andere richtlijnen zijn al vaker uitgewerkt in afstudeeronderzoeken of artikelen uit vakbladen. Van deze nieuwste richtlijn is dit nog beperkt.

Om bovengenoemde redenen is ervoor gekozen om dit afstudeerscriptie meer te focussen op deze nieuwe rekenrichtlijn. Andere aspecten zoals bijvoorbeeld kosten en uitvoering worden minder uitgebreid aan het licht gebracht, aangezien deze in andere scripties al uitgebreid zijn behandeld.

1.5. AANPAK

Dit onderzoek is op twee manieren ingestoken. Eerst is er een literatuuronderzoek gedaan naar het materiaal. Na de vergaring van kennis over het materiaal en de toepassing ervan is er een casus uitgewerkt. In deze casus is er gekeken naar berekeningen en ontwerpmethodieken met de kennis die is uitgewerkt in het literatuuronderzoek. Een verdere uitwerking van deze aanpak is te vinden in Hoofdstuk 2.

1.6. STRUCTUURBESCHRIJVING/LEESWIJZER

Dit verslag bestaat uit twee hoofddelen. Het eerste deel is het literatuuronderzoek, waarna het tweede deel in gaat op de casus en de resultaten hiervan. Voor het literatuuronderzoek bevinden zich de hoofdstukken Inleiding en Onderzoeksmethode.

Het literatuuronderzoek bestaat uit 4 hoofdstukken. Het begint met hoofdstuk 3, welke ingaat op de samenstelling van UHSB en de verschillen met conventioneel beton. Daarna wordt in hoofdstuk 4 gekeken naar de eigenschappen van het materiaal en hoe het constructief reageert. Opvolgend wordt er in het vijfde hoofdstuk gekeken naar de rekenmethodiek en welke richtlijnen aangehouden gaan worden. Hoofdstuk 6 beschrijft een vergelijking tussen VVUHSB, UHSB en conventioneel beton middels een balkberekening.

Het tweede deel van dit rapport bevat de casusstudie en begint bij hoofdstuk 7. In dit hoofdstuk wordt eerst kort de opzet van de casus beschreven, deze is verder uitgewerkt in Bijlage D, Bijlage E en Bijlage



F. Na deze opzet worden de resultaten van de constructieve berekening behandeld in hoofdstuk 8 voor zowel conventioneel beton als VVUHSB. Aansluitend wordt een schatting van de kosten gemaakt in hoofdstuk 9. Het rapport wordt afgesloten met de conclusie, de discussie en de aanbevelingen in respectievelijk hoofdstuk 10, 11 en 12.

2. ONDERZOEKSMETHODE

Dit onderzoek is opgesplitst in twee delen en er zullen dus ook twee verschillende onderzoeksmethodes toegepast worden. Het eerste deel is de literatuurstudie en het tweede deel is de casusstudie. Het onderzoek omvat zowel kwalitatieve als kwantitatieve onderzoeksmethoden. Er is al veel literatuur beschikbaar over de toepassing van UHSB en op basis van deze literatuur is het mogelijk om het onderzoek uit te voeren.

2.1. LITERATUURSTUDIE

Er is begonnen met een literatuuronderzoek om zo een basis te maken voor de casusstudie. Omtrent het onderwerp UHSB zijn meerdere publicaties in vakbladen als Cement en Betoniek verschenen. Deze zijn bestudeerd om een beeld te krijgen van het gedrag van UHSB. Daarnaast zijn er ook een aantal theoretische onderzoeken uitgevoerd op diverse hogescholen of technische universiteiten naar bepaalde aspecten van UHSB. Ook vanuit deze bronnen is informatie vergaard ten behoeve van het literatuuronderzoek. Hiervan zijn alleen onderzoeken gebruikt van HBO afstudeerniveau of hoger. Het eerste deel van het literatuuronderzoek bestaat uit een kwalitatief onderzoek. Er is hierin gekeken naar de opvattingen en toepassingen van UHSB tot nu toe.

Om te kijken naar de toekomstige toepasbaarheid van het materiaal UHSB is er gekeken naar aspecten zoals duurzaamheid en kosten in dit onderzoek. Dit kostenaspect komt niet terug in het literatuuronderzoek, maar in de casusstudie.

Met betrekking tot de rekenmethodiek van UHSB is er gekeken naar de 'interim recommendations'. Dit zijn Franse normen opgesteld door de AFGC, welke is gebaseerd op de NEN-EN 1992-1-1. Ook zijn uit de verschillende afstudeerscripties methodes achterhaald om te rekenen met UHSB. Deze 'interim recommendations' is opgesteld voor een aantal specifieke UHSB mengsels. Een van deze mengsels is gekozen waarvan de materiaaleigenschappen worden beschouwd. De berekeningen die gemaakt zijn aan de hand van deze 'interim recommendations' zijn geverifieerd door middel van andere afstudeerscripties en logisch gedrag van het materiaal.

Aan de hand van het literatuuronderzoek is een berekening gemaakt en dit heeft een vergelijkend onderzoek naar voren gebracht. In de berekening is een constructief vergelijk gemaakt tussen verschillende betonsterkteklassen bij éénzelfde gewapende doorsnede. Wat voornamelijk hierin naar voren is gekomen zijn de sterke en zwakke punten van de toepassing van UHSB. Aan de hand hiervan is het ontwerpproces van de casus gericht op de leidende ontwerpaspecten.

In deze literatuurstudie is antwoord worden gegeven op de volgende deelvragen:

- Wat is UHSB en wat zijn de huidige infrastructurele toepassingen?
- Wat zijn de materiaaltechnische eigenschappen van UHSB en hoe verhouden deze zich ten opzichte van conventioneel beton?
- Wat zijn de rekenregels en normen met betrekking tot UHSB?
- Welke vezels kunnen toegevoegd worden aan UHSB en wat zijn de gevolgen hiervan op de materiaaleigenschappen?

2.2. CASUSSTUDIE

Na het literatuuronderzoek is een casusstudie opgezet. Deze casusstudie heeft het gebruik van UHSB onderzocht op een fictief project, een fietsbrug naast de Royal Welsch-brug in Den Bosch. Ondanks dat het project fictief is, is er al wel ruimte gereserveerd voor dit project in de toekomst. Dit heeft ervoor gezorgd dat de casusstudie die uitgevoerd is wel reëel is en een praktische uitvoering heeft. Daarnaast is de originele Royal Welsch-brug ontworpen door Wagemaker. Het randvoorwaardenkader is hierdoor eenvoudig en logisch opgesteld. Deze casus is doorgerekend met conventioneel beton en VVUHSB. Op deze wijze is een vergelijkend onderzoek en een ontwerpend onderzoek uitgevoerd. In de casusstudie is antwoord gegeven op de volgende deelvragen:

- Wat zijn de gevolgen van voorspanwapening in UHSB en in welke gevallen is toepassing hiervan raadzaam?
- Hoe gaat het ontwerp van de casus eruit zien met het gebruik van UHSB?
- Wat zijn voor- en nadelen bij een ontwerp met UHSB ten opzichte van het ontwerp met conventioneel beton?
- Welke bezwijkmechanismen zijn leidend in het ontwerp met UHSB?

Bij het uitwerken van deze casusstudie is gebruik gemaakt worden van de rekenprogramma's SCIA en ALP. De resultaten uit deze rekenprogramma's zijn geverifieerd door middel van handberekeningen. Als leidraad voor deze casusstudie is een ontwerprapport van Wagemaker gebruikt.

2.3. CONCLUSIE

De combinatie van het literatuuronderzoek en bovengenoemde casusstudie komt uiteindelijk samen in de conclusie, welke antwoord geeft op de hoofdvraag van het onderzoek namelijk:

Wat zijn de mogelijkheden in het constructief ontwerp bij het toepassen van UHSB ten opzichte van conventioneel beton?



Deel 1: Literatuurstudie

3. ALGEMEEN

In dit hoofdstuk wordt het materiaal UHSB behandeld. Eerst zal er gekeken worden naar de verschillende classificaties in betonsterkteklassen. Dit wordt opgevolgd door de samenstelling van een UHSB mengsel. Daarna worden de verschillen tussen conventioneel beton en UHSB kort toegelicht, deze zullen verder uitgewerkt worden in Hoofdstuk 4. Verder wordt de toevoeging van vezels en de invloed die dit heeft op het gedrag van het materiaal behandeld. Als laatste worden de nabehandelingmethoden uitgelicht. In Bijlage A is de basistheorie van voorspanning in betonconstructies uitgewerkt. In Bijlage B zijn een aantal civiel technische projecten uitgewerkt die eerder in UHSB zijn uitgevoerd.

In Betoniek wordt UHSB gedefinieerd als: *“Een beton met zeer goede mechanische eigenschappen gecombineerd met uitstekende duurzaamheid en verwerkbaarheid”* [4]. De Engelse term dekt deze lading beter, namelijk Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). UHSB vindt zijn oorsprong in 1981 toen Bache onderzoek deed naar de toevoeging van ultra-fijne deeltjes in de holle ruimtes van conventioneel beton en de gevolgen die dit heeft op de mechanische eigenschappen. Door deze toepassing werden de cementverbinding tussen de korrels sterker, waardoor hij een betonmengsel creëerde dat druksterktes bereikte variërend tussen 120 en 270 MPa [5].

3.1. CLASSIFICATIE

UHSB is een geoptimaliseerd betonmengsel wat geclassificeerd wordt door een druksterkte tussen 150 en 200 MPa, maar er zijn ook laboratorium onderzoeken geweest waarbij druksterktes van 500 MPa worden gehaald [2]. Door de grote verscheidenheid in druksterktes zijn de verschillende soorten beton opgedeeld in betonsterkteklassen. Deze classificatie op kubusdruksterkte is te zien in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 betonsterkteklassen [6]

Betonsterkteklasse	Kubusdruksterkte ($f_{ck,cube}$)
‘normale’ sterkte beton	tot 65 MPa
hogesterktebeton	van 65 tot 105 MPa
zeer-hogesterktebeton	van 105 tot 150 MPa
ultra-hogesterktebeton	Van 150 tot 200 MPa

3.2. SAMENSTELLING

Door de hogere druksterkte onderscheidt UHSB zich door de mogelijkheid tot slanker construeren of het overbruggen van grotere overspanningen ten opzichte van conventioneel beton. Daarnaast heeft UHSB een oppervlakte dat bijna ondoordringbaar is voor vloeistoffen. Dit leidt tot een langere levensduur, een vrijwel onderhoudsvrije constructie en een kleinere betondekking op de wapening. Het produceren van UHSB is een optimalisatie van conventioneel beton. Ten opzichte van conventioneel beton wordt er gewerkt met de volgende principes [6]:

- De maximum toeslagkorrel moet klein zijn;
- De pakking van de toeslagkorrels en de ‘fillers’ moet optimaal zijn;
- Na hydratatie van het cement moet er gezorgd worden dat er geen water overblijft.

De hoge druksterkte van UHSB wordt gegenereerd door de dichte structuur. Bij conventioneel beton zijn er holle ruimtes aanwezig in de korrelstructuur van het beton. In UHSB worden deze holle ruimtes geminimaliseerd. Dit komt door meerdere optimalisaties in de samenstelling van het mengsel. Dit is te zien in Tabel 3-2. De fijnere materialen, cement en zand, zijn in grotere hoeveelheden aanwezig, terwijl het grovere materiaal, grind, niet meer aanwezig is bij UHSB.

Een belangrijk punt is het verlagen van de w/c-ratio. Waar bij conventioneel beton een w/c-ratio tussen de 0,4 en 0,75 gebruikt wordt, is dit bij UHSB maximaal 0,25. Door een lagere w/c-ratio te gebruiken zal al het water kunnen reageren tijdens het hydratatieproces. Dit zorgt voor een hogere dichtheid van het mengsel. Een groot nadeel hiervan is dat het mengsel droog wordt, waardoor het minder vloeibaar is en dus slecht verwerkbaar. Dit zorgt ervoor dat de toevoeging van superplastificeerders noodzakelijk is.

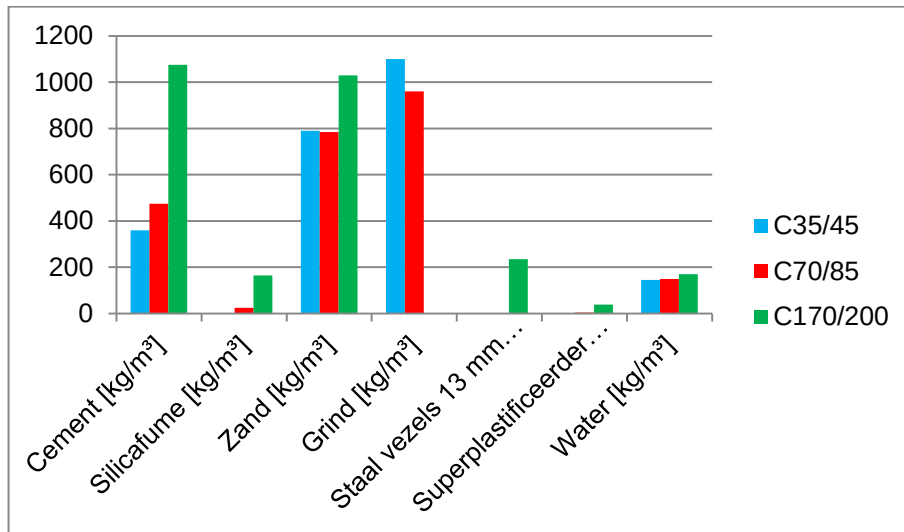
Superplastificeerders zorgen ervoor dat inwendige wrijvingskrachten in de betonspecie worden gereduceerd. Hierdoor zal het mengsel beter gaan vloeien en zullen de hoekige korrels in het mengsel zich beter gaan verdelen. Deze superplastificeerders zorgen voor een kortere verwerkingsduur. Daarom is het raadzaam, zeker bij in-situ projecten, om een vertrager aan het mengsel toe te voegen. Een vertrager zorgt weer voor een langere verwerkingsduur, zonder invloed te hebben op de positieve effecten die de superplastificeerder geeft.

Naast het verlagen van de w/c-ratio worden ook vulstoffen toegevoegd om de holle ruimtes te minimaliseren. In eerste instantie werd vermalen cement gebruikt als vulstof. Na verder onderzoek kwam microsilica in beeld. Deze stof is beter bekend als silicafume en bestaat uit zeer kleine siliciumoxide-bolletjes. Dit silicafume is 50 à 100 keer kleiner dan cement deeltjes. Door deze kleine omvang kunnen de silicafume deeltjes zich schikken tussen de cementkorrels. Het beste resultaat wordt behaald bij het toepassen van een combinatie van gemalen cement en silicafume. Dit geeft de meest efficiënte korrelstructuur en dus de hoogste dichtheid. De verschillen tussen conventionele betonmengsels en een UHSB mengsel is te zien in Tabel 3-2 en Figuur 3.1.

Tabel 3-2 Samenstelling betonmengsels [5]

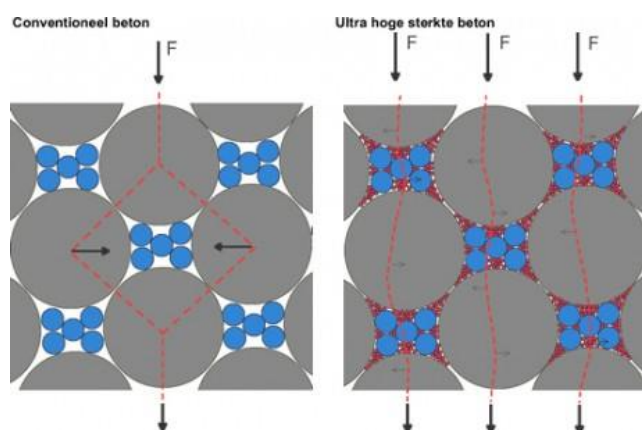
Component	C35/45	C70/85	C170/200
Cement [kg/m ³]	360	475	1075
Silicafume [kg/m ³]	-	25	165
Zand [kg/m ³]	790	785	1030
Grind [kg/m ³]	1100	960	-
Staal vezels 13 mm [kg/m ³]*	-	-	235
Superplastificeerder [kg/m ³]	0,5	4,6	39
Water [kg/m ³]	145	150	170
Volumieke massa [kg/m ³]	2405	2400	2810
Water/cement ratio [-]	0,4	0,3	0,16

**Toevoeging van vezels wordt behandeld in paragraaf 3.4.*



Figuur 3.1 Verhouding tussen samenstelling betonmengsels [5]

Bij conventioneel beton is het sterkste onderdeel de steenslag. De krachten worden via het grind afgedragen. Dit zorgt voor veel zijdelingse krachten en uiteindelijk bezwijkt de cementverbinding door deze zijdelingse krachten. Bij UHSB is geen grind aanwezig, de krachten worden hier afgedragen over de zandkorrels. Er wordt een homogener samenstelling gecreëerd van het mengsel, hetgeen ervoor zorgt dat de krachten door het gehele korrelskelet opgenomen worden en er dus nauwelijks zijdelingse krachten ontstaan. Hierdoor ontstaan er dus minder pieken in de krachtsverdeling. Dit zorgt ervoor dat de constructie hogere externe drukkrachten kan verwerken. Daarnaast is de cementverbinding (lijm) tussen de korrels sterker door de reactie van de silicafume korrels, wat ook weer zorgt voor hogere opneembare drukkrachten. Het principe van deze krachtswerking is te zien in Figuur 3.2. [7]



Figuur 3.2 Interne krachtwerving conventioneel beton vs. UHSB [7]

In Figuur 3.2 is bij conventioneel beton (links) de grootste korrel een grindkorrel met een gemiddelde grote van 9 millimeter. Bij UHSB zijn dit de zandkorrels met een gemiddelde grote van 1 millimeter. Het rechter figuur is dus 9 maal vergroot ten opzichte van het linker figuur. Dit toont ook aan dat UHSB een fijnere samenstelling heeft en een kleinere maximum toeslagkorrel.

3.3. VERSCHILLEN CONVENTIONEEL BETON EN UHSB

In deze paragraaf zullen de verschillen tussen conventioneel beton en UHSB kort toegelicht worden. UHSB is met zijn hoge druksterkte een erg bros materiaal, wat verder uitgewerkt is in paragraaf 4.1. Terwijl de druksterkte vele malen hoger is dan bij conventioneel beton, is de toename in treksterkte en elasticiteitsmodulus minder. Uit onderzoek volgt dat wanneer de druksterkte met 50% toeneemt, de treksterkte maar met 15% toeneemt en de elasticiteitsmodulus maar met 5%.

Druksterkte

Het meest duidelijke verschil is die in opneembare druksterktes (f_{ck}). In paragraaf 3.1 is het verschil in classificaties duidelijk weergegeven. Waar bij conventionele betonmengsels druksterktes tot 65 MPa op te nemen zijn is dit bij UHSB tussen de 150 en 200 MPa (en soms zelfs hoger).

Treksterkte

Naast druksterkte (f_{ck}) neemt ook de treksterkte van de mengsels toe. Bij een conventioneel betonmengsel C35/45 is er een opneembare treksterkte (f_{ctm}) van 3,2 MPa. Bij een C170/200 UHSB mengsel is de treksterkte 9 MPa.

Elasticiteitsmodulus

Ook de elasticiteitsmodulus (E_{cm}) neemt toe. Bij hetzelfde mengsel C35/45 is de elasticiteitsmodulus 34 GPa. Het UHSB mengsel heeft een elasticiteitsmodulus van 50 GPa.

Tabel 3-3 Verschillen tussen C35/45 en C170/200

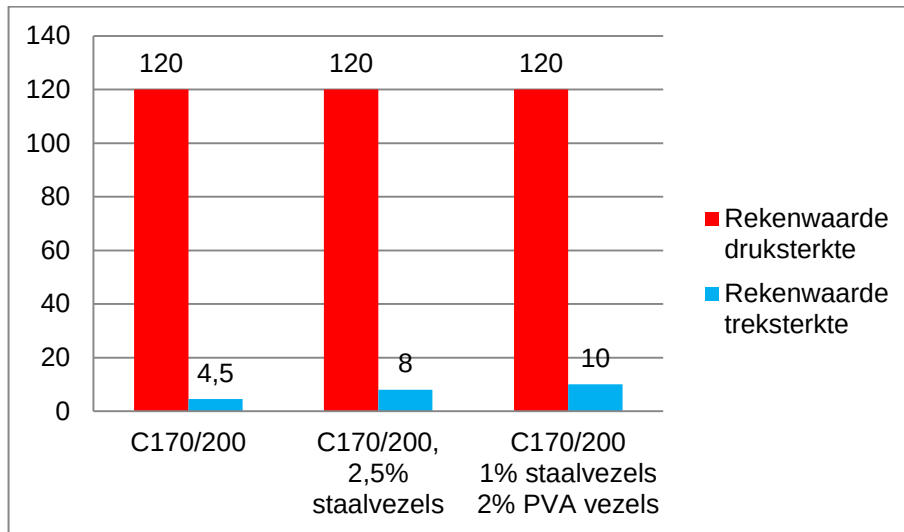
	C35/45	C170/200	Toename
Druksterkte (f_{ck})	35	170	486%
Treksterkte (f_{ctm})	3,2	9	281%
Elasticiteitsmodulus (E_{cm})	34	50	146%

Ductiliteit

De ductiliteit van UHSB is erg laag. Ductiliteit is de maat van taaiheid en rekbaarheid van het beton. De ductiliteit van een materiaal is te zien door het verschil tussen de ϵ_{c3} en de ϵ_{cu3} . Wanneer deze twee waarden dicht bij elkaar liggen heeft het materiaal een beperkt plastisch gedrag, waardoor er eerder een bros bezwijkmechanisme optreedt. De constructie zal plotsklaps bezwijken. Bij het mengsel C35/45 is het verschil tussen ϵ_{c3} en de ϵ_{cu3} 1,75‰ en bij een C170/200 mengsel is dit slechts 0,25‰.

3.4. VEZELTYPES IN UHSB (VVUHSB)

Om de treksterkte en de elasticiteit van UHSB te verhogen kunnen vezels toegevoegd worden. In sommige gevallen kan door de toevoeging van vezels voldoende trekspanningen opgenomen worden waardoor hoofdwapening niet meer nodig is [8]. De effecten op de treksterkte door het toevoegen van vezels aan een UHSB mengsel zijn te zien in Figuur 3.3. Wanneer vezels worden toegevoegd aan een UHSB mengsel wordt er gesproken van VVUHSB.



Figuur 3.3 Invloed van vezels op treksterkte [8]

3.4.1. Formaat vezels

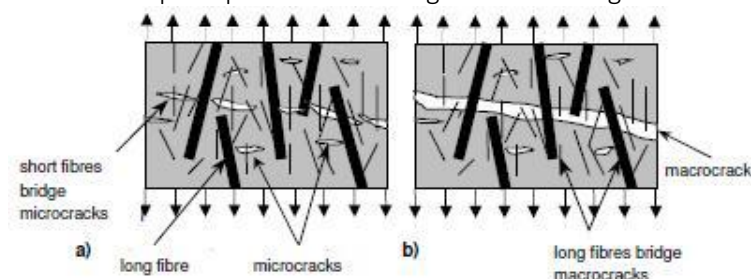
Het formaat van de vezels is van belang voor de invloed die de vezels hebben op de constructie. Het formaat van vezels is op te delen als is weergegeven in Tabel 3-4.

Tabel 3-4 Soorten vezels [8]

Soort	Formaat	Invloed
Kleine rechte vezels	Tot 6 mm	Microscheuren beperken en treksterkte verhogen
Grote gehaakte vezels	6 tot 60 mm	Overbruggen van macroscheuren en verhogen van de ductiliteit

Het verschil in formaat zorgt er voor dat de vezels verschillende scheuren beïnvloeden. De kleine rechte vezels beperken de microscheuren door de grote hoeveelheid en kleine diameter. Aangezien deze microscheuren de eerste symptomen zijn van het bezwijken van het beton, hebben de korte vezels veel invloed op de treksterkte van het beton.

De grote gehaakte vezels overbruggen de macroscheuren die ontstaan als de trekspanningen verder toenemen. Wanneer deze trekspanning toeneemt dan vormen meerdere microscheuren een enkele macroscheur. De grote vezels zijn niet ontworpen om te bezwijken, maar om uit het beton getrokken te worden. Dit zorgt ervoor dat er minder snel brosse breuken optreden en verhoogt de ductiliteit van de betonmatrix. Het principe van de werking van kleine en grote vezels is te zien in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Werking van kleine en grote vezels [5]

3.4.2. Materiaal vezels

Naast het formaat van de vezel is ook het materiaal van de vezel van belang. De meest gebruikte vezels in UHSB zijn staalvezels en Polyvinylalcohol-vezels (PVA). Daarnaast zijn er nog vezels te gebruiken voor specifieke toepassingen, zoals glasvezel, kunststofvezel, wollastonietvezel en basaltvezel. De staalvezels en de PVA vezels zullen hieronder verder toegelicht worden. [5]

Staalvezels

Staalvezels werken optimaal voor het vergroten van de trek- en buigsterkte. Dit komt doordat het materiaal zelf een grote trek- en druksterkte heeft, de staalvezels relatief grotere vezels zijn en dat er gevarieerd kan worden met de vorm van de vezels. Dit laatste zorgt voor een goede verankering in het beton. De vormen met de meeste weerstand zijn gedraaide of golvende vezels over de gehele lengte. De afmeting van de vezels varieert tussen 6 en 60 millimeter. Door deze grotere afmetingen zijn deze vezels het meest effectief tegen de macroscheuren in het beton. Op de microscheuren heeft het weinig invloed.

Nadeel van staalvezels is dat de vezels gaan 'clusteren' wat zorgt voor een slechte menging van de vezels door het betonmengsel. Hierdoor zal er een aangepast betonmengsel gebruikt moeten worden. [8]

PVA-vezels

Deze PVA-vezels hebben een kleiner formaat en zijn vaak in grotere hoeveelheden aanwezig in het mengsel dan de eerdergenoemde staalvezels. De lengte van deze vezels is ook kleiner en ligt tussen 6 en 30 millimeter. De relatief kleinere afmeting van de vezels zorgt voor een goede spreiding door het mengsel en doordat het goed mengt met water zullen ze niet gaan clusteren zoals staalvezels doen. Het materiaal van deze vezels hecht van zichzelf goed aan het beton en om deze reden hoeven er geen speciale vormen aan de PVA-vezels gegeven te worden.

Een groot nadeel van PVA-vezels is dat ze bij brand smelten en geen bijdrage meer geven aan de constructie. [8]

3.4.3. Vezelpercentage

Vezels kunnen voor verschillende toepassingen worden toegevoegd aan het betonmengsel.

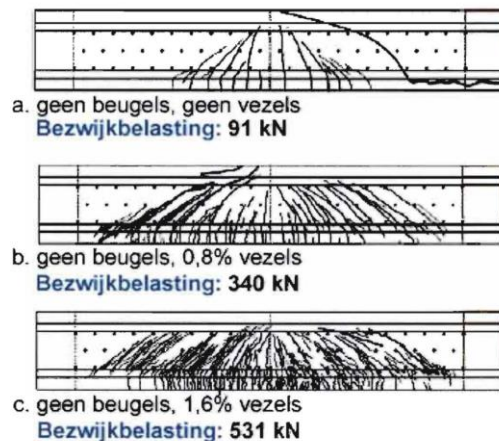
Afhankelijk van de toepassing dient er een percentage vezels toegevoegd te worden aan het mengsel. Als vezels toegepast worden als vervanging van traditionele wapening dient het vezelpercentage tussen de 2 en 3% te liggen.

Worden de vezels toegepast als aanvulling op traditionele wapening, om brosse breuk tegen te gaan of ter vervanging van dwarskrachtwapening dan dient het vezelpercentage rond de 1% te liggen.

Op de universiteit van Kassel is er onderzoek gedaan naar welke vezelverhouding de maximale sterkte van het materiaal veroorzaakt. Hieruit is naar voren gekomen dat een zogeheten "*fiber cocktail*" van staalvezels en PVA-vezels de beste optie is, waarbij een verhouding van 0,99% staalvezels met een lengte van rond de 17 millimeter met 2,00% PVA-vezels optimaal blijkt te zijn [8].

Op de TU Delft is er onderzoek gedaan naar het bezwijkgedrag van VVUHSB als het vezelpercentage verhoogd wordt. Hierbij is een balk op buiging belast tot bezwijken. Het bezwijkgedrag van de verschillende balken is te zien in Figuur 3.5. Buiten het feit dat de bezwijkbelasting aanzienlijk toeneemt bij de toevoeging van vezels valt nog meer op. Zo treedt er een ander scheurpatroon op. Naar mate het vezelpercentage toeneemt, duurt het langer voordat de microscheuren doorgroeien naar macroscheuren. Er zijn ook meer scheuren aanwezig voordat de balk bezwijkt. Er ontstaat een

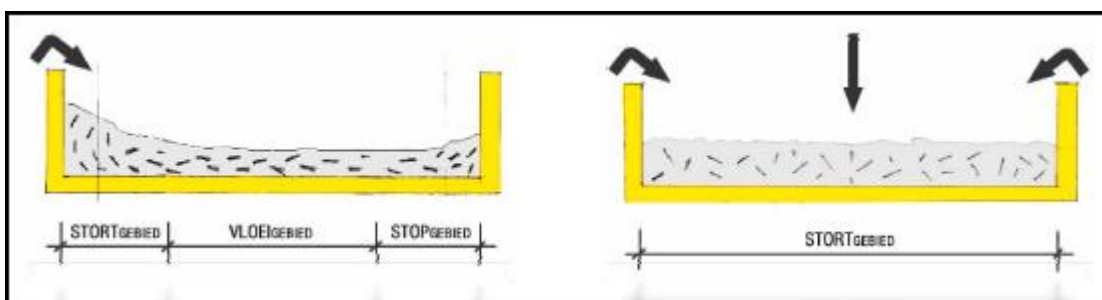
grotere 'scheurverzadiging'. [9] Dit genoemde gedrag is wenselijk in de constructie. Doordat er meerdere kleine scheuren ontstaan en deze niet doorgroeien naar grotere scheuren, zal er sneller voldaan worden aan de scheurwijdte toets. Deze toets is vaak leidend voor het ontwerpen met conventioneel beton.



Figuur 3.5 Bezwijkgedrag bij de toevoeging van vezels [9]

3.4.4. Vezeloriëntatie

Ook de oriëntatie van de vezels is van belang voor de effectiviteit van de vezels. Lappa heeft in haar onderzoek naar vermoeiing van UHSB geconstateerd dat verzelrichting en clustering van vezels voornamelijk invloed heeft op statische bezwijkmethoden. [10] Het optimale resultaat wordt behaald als de vezels parallel liggen aan de lengte (overspanningsrichting) van de constructie. Een goede techniek om dit te bereiken is de vloeimethode. Hierbij wordt er gestort vanaf één korte zijde. Dit zorgt ervoor dat het betonmengsel in de langsrichting naar de andere korte zijde gaat vloeien. In het midden zal de oriëntatie van de vezels dan in de juiste langsrichting liggen. De oriëntatie aan het begin en het uiteinde van de constructie is lastiger te beïnvloeden. In Figuur 3.6 is het verschil in vezeloriëntatie te zien tussen de vloeimethode en onregelmatig storten. Ook is duidelijk te zien dat aan het begin en het einde van de constructie de vezeloriëntatie onregelmatig is. [9]

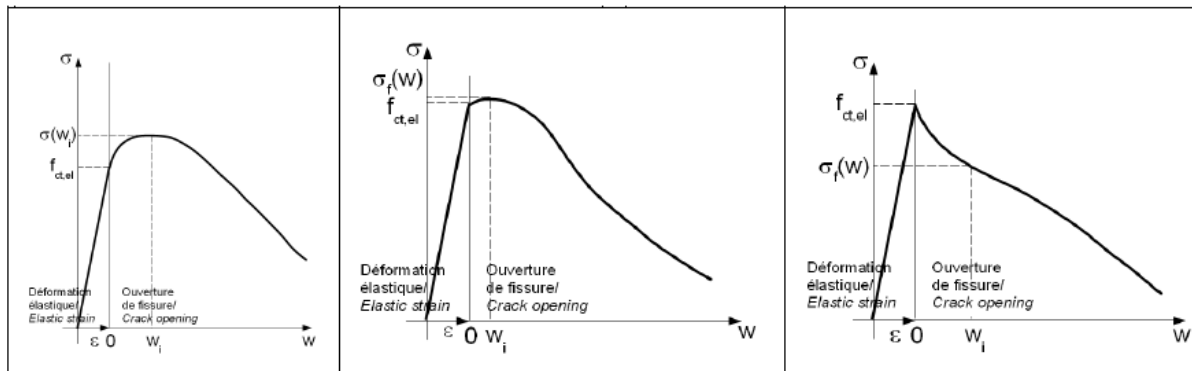


Figuur 3.6 Vezeloriëntatie bij de vloeimethode (links) en bij onregelmatig storten (rechts) [9]

3.5. SOFTENING EN HARDENING

Net zoals conventioneel beton kan UHSB trekspanningen opnemen tot een maximale waarde en gedraagt zich daarbij lineair elastisch tot een trekspanning $f_{ct,el}$, waarna scheurvorming van de betonmatrix optreedt. Door de toevoeging van vezels zal de trekspanning niet verdwijnen na het

bezuigen van de betonmatrix, doordat de vezels het overnemen van het beton. Afhankelijk van de hoeveelheid en lengte van de vezels zal het beton zich op verschillende manieren gedragen bij een belasting op trek. Zie Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Voorbeelden van Hardening (links), Softening (rechts) en tussenvorm (midden) van VVUHSB belast op trek.

In het geval van harding-gedrag zal bij het ontstaan van de eerste scheur de opneembare spanning nog toenemen bij blijvende vervorming. Dit verstevigingsgedrag wordt veroorzaakt doordat de vezels actief worden en houdt aan tot een maximale scheurwijdte waarbij de vezels uit de betonmatrix worden losgetrokken. Softening-gedrag wil zeggen dat bij het ontstaan van de eerste scheur de spanning die opgenomen kan worden door de betonmatrix plotseling afneemt en om deze reden wordt er gerekend met een afgeknot spanning-rekdiagram.

3.6. NABEHANDELING

Door nabehandeling toe te passen op beton kunnen druksterktes sneller bereikt worden en de uiteindelijke druksterktes worden verhoogd. Ook kan de totale krimp van de constructie beperkt worden. Door nabehandeling toe te passen op VVUHSB kan het uitvoerings- en het ontwerpproces geoptimaliseerd worden, doordat de constructie sneller hogere druksterktes bereikt.

Warmtebehandeling

Als nabehandeling is het mogelijk om het beton te verhitten. Door het verwarmen van het beton worden druksterktes sneller bereikt, krimp en kruip effecten worden gereduceerd en de duurzaamheid van het materiaal wordt verbeterd. Er zijn twee varianten warmtebehandeling. [11] De eerste variant wordt uitgevoerd in de eerste paar uur na het storten van het beton. Deze warmtebehandeling wordt op relatief lage temperatuur (65°C) uitgevoerd. Bij het gebruiken van temperaturen lager dan 65°C wordt voorkomen dat er vertraagde ettringiet vorming optreedt. Ettringiet vormt zich door een chemische reactie in het beton, waarbij een forse volumevergroting ontstaat. Wanneer dit snel en ongecontroleerd gebeurt kan het beton beschadigen.

De tweede variant van warmtebehandeling vindt plaats nadat het beton is uitgehard en wordt op een hogere temperatuur van rond de 90°C uitgevoerd. Ook wordt het beton vochtig gehouden tot de verzadigingsgraad tot een paar uur na het storten. Het doel van deze variant is ontwikkelen van nieuwe hydrataten om zo de mechanische sterkte verder te ontwikkelen en vertraagde vervormingen te voorkomen. Daarnaast zorgt deze variant van hittebehandeling dat de eindsterkte van het beton eerder wordt bereikt en de druk- en treksterkte toeneemt met 10%.

In Figuur 3.8 is een stoombehandeling, een methode van hitte- en vochtbehandeling, te zien van een VVUHSB element. [12]



Figuur 3.8 Stoombehandeling [12]

Uit onderzoek blijkt dat warmtebehandelingen voornamelijk effect hebben op de sterkteontwikkeling op korte termijn. De gevolgen op lange termijn zijn aanzienlijk minder. In Tabel 3-5 is dit effect duidelijk te zien. Met warmtebehandeling blijkt de druksterkte met 60% toe te nemen na 7 dagen, terwijl deze toename na 6 jaar slechts 12% is.

Tabel 3-5 Effecten van warmtebehandeling [12]

	Druksterkte na 7 dagen	Druksterkte na 28 dagen	Druksterkte na 6 jaar
Zonder warmtebehandeling	125 MPa	160 MPa	250 MPa
Met warmtebehandeling	200 MPa	225 MPa	280 MPa

Relatieve vochtigheid

Ook de relatieve vochtigheid van de omgeving tijdens het nabehandelen heeft invloed op de eigenschappen van VVUHSB. Onderzoek heeft aangetoond dat veranderingen van de relatieve vochtigheid, bij een gelijkblijvende temperatuur, ervoor zorgt dat de krimp van het beton drastisch afneemt. Wanneer er krimp ontstaat in de constructie dan ontstaan er scheuren in het oppervlak van het beton, daarnaast zal er meer voorspanverlies ontstaan.

In een onderzoek zijn er VVUHSB proefstukken in een klimaatkamer gezet waarbij onderscheid werd gemaakt tussen een standaard milieu (20°C en 65 % relatieve vochtigheid) en een vochtig milieu (20 °C en > 95 % relatieve vochtigheid). Hieruit is gebleken dat bij de proefstukken bewaard in het standaard milieu, de totale krimp na 60 dagen kon oplopen tot 1700 $\mu\text{m}/\text{m}$. Dit is erg extreem in perspectief tot bijvoorbeeld een standaard C30/37 mengsel waarbij een krimp na 60 dagen van ongeveer 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ wordt verwacht. Daarnaast is gebleken dat bij de proefstukken in een vochtig milieu er een vermindering van de totale krimp van 40% is gemeten. [13]

Conventionele oplossingen

Naast de warmtebehandeling zijn er andere vormen van nabehandeling, die ook gebruikt worden bij conventioneel beton. Het doel hierbij is meestal om uitdroging van het beton te voorkomen. Als de oppervlaktelaag uitdroogt dan kan de chemische reactie tussen het cement en het water niet voltooiën. De eenvoudigste manier is het laten zitten van de bekisting van het beton. Daarnaast kan het beton afgedekt worden met folie of een jute deken. Ook kan het beton met water beneveld worden of kan er zelfs een curing compound opgespoten worden. Een curing compound is een vloeistof die op het betonoppervlak gespoten wordt en voorkomt dat water verdampt. [14]

3.7. DUURZAAMHEID

Duurzaamheid is een ruim begrip en heeft een groot gebied van onderwerpen. In het geval van bouwmaterialen wordt er bij het begrip duurzaamheid vooral gekeken naar de onderwerpen als levensduur, onderhoud en het energieverbruik voor de vervaardiging van het materiaal.

3.7.1. Levensduur

De levensduur van een materiaal wordt hoofdzakelijk bepaald door de weerstand tegen omgevingsomstandigheden. Door zijn dichtgepakte poriestructuur en scheur dichtende vezels is VVUHSB zo goed als ondoordringbaar. Door zijn verhoogde dichtheid is de weerstand tegen aantasting door schadelijke gassen, vloeistoffen, chloride-ionen en dooizouten verbeterd ten opzichte van conventioneel beton. De indringing van bijvoorbeeld chloride-ionen (chloride-ion diffusie coëfficiënt) is significant gereduceerd ten opzichte van conventioneel beton en zorgt er voor dat het materiaal een ideale toepassing is in een corrosieve omgeving, zoals sluisprojecten en havenprojecten [15].

Aan de hand van de aanbevelingen van de AFGC is een vergelijking gemaakt van de weerstand tegen chemische invloeden van VVUHSB ten opzichte van lagere betonsterkteklassen [11], welke zijn weergegeven in Tabel 3-6.

Tabel 3-6 weerstand tegen chemische invloeden

		Conventioneel beton [C30/37]	HSB [C90/105]	VVUHSB [C170/200]
Water porositeit	[%]	14-20	10-13	1,5-5
Zuurstof permeabiliteit	[m ²]	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	<10 ⁻¹⁹
Chloride-ion diffusie coëfficiënt	[m ² /s]	>10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³

3.7.2. Onderhoud

De ondoordringbaarheid van het materiaal heeft directe gevolgen voor het onderhoud in de tijd. Doordat het materiaal minder doordringbaar is treedt er minder corrosie van de wapening op en kan de dekking verminderd worden zonder kans te lopen op corrosie van de wapening. Daarnaast zal er bij VVUHSB minder slijtage plaatsvinden in de tijd dan bij andere betonsterkteklassen [11]. Deze weerstand tegen ondehoudsbehoevende situaties is weergegeven in Tabel 3-7.

Tabel 3-7 weerstand tegen onderhoudsbehoevende situaties

		Conventioneel beton [C30/37]	HSB [C90/105]	VVUHSB [C170/200]
Corrosiegraad van de passieve wapening	[$\mu\text{m}/\text{year}$]	1,2	0,25	<0,01
Vries/dooi massaverlies	[kg/m^2]	3,12-3,32	0,12	0,004-0,007
CNR coëfficiënt ¹		4	2,8	0,8-1,3

Uit de tabel blijkt dat het materiaal slijtvaster is en daardoor minder snel beschadigd. Daarnaast zijn er nog enkele andere factoren die het onderhoud verminderen, welke zijn weergegeven in Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Voordelen qua onderhoud van VVUHSB [16]

3.7.3. Milieubelasting

Wat duurzaamheid betreft is het belangrijkste aspect het energieverbruik van het materiaal in de tijd, namelijk de hoeveelheid milieubelasting. Op dit aspect kent VVUHSB een aantal voordelen en nadelen ten opzichte van andere betonsoorten.

Voordelen	Nadelen
Reductie materiaalgebruik onderbouw door lichtere constructie	Minder hergebruik door de toevoeging van vezels, doordat deze lastig uit het materiaal te halen zijn.
Langere levensduur zorgt voor reductie CO ₂ uitstoot per jaar	Hogere CO ₂ uitstoot per kubieke meter materiaal.
Lichtere constructie zorgt voor een vermindering van het transport en de CO ₂ uitstoot die hier bij komt kijken	

¹ Resultaten verkregen uit een CNR test, waarin de mate van slijtage wordt gemeten. Er wordt een vergelijk gemaakt van de afdruk die gevormd wordt in het beton bij het spuiten van zand met een druk van 2,5 bar tegen het beton.

In de praktijk blijkt de CO₂ uitstoot bij een VVUHSB hoger te liggen per kubieke meter dan bij conventioneel beton. Echter door de verbeterde materiaaleigenschappen kan er slanker worden geconstrueerd. Bij gebruikelijke constructie, zoals liggerbruggen met kleine overspanningen, wordt de hoeveelheid beton in sommige gevallen drie maal zo klein en zal de belasting op de aarde inzake de CO₂ uitstoot gelijk of zelfs beter zijn dan die van conventioneel beton [11]. Deze mate van materiaalreductie is echter geen zekerheid en dient per situatie bekeken te worden.

3.7.4. Kostenbeoordeling

Voor eenzelfde hoeveelheid materiaal zullen de kosten voor VVUHSB aanzienlijk hoger liggen dan voor conventionele betonsoorten. Echter door de reductie van de hoeveelheid materialen voor de vervaardiging van een kunstwerk zullen de kosten in de praktijk lichtelijk hoger uitvallen dan de kosten voor conventioneel beton. Met oog op de verbeterde levensduur en vermindering van het onderhoud kunnen de totale kosten voor de constructie over de tijd lager uitvallen dan bij conventioneel beton.

3.7.5. Sociale aspecten

Wanneer sociale aspecten worden meegenomen in duurzaamheid werkt VVUHSB gunstig op de volgende aspecten:

- Met VVUHSB kunnen slanke en vormrijke betonnen constructies worden ontworpen, hetgeen de esthetica en inpassing in het landschap ten goede komt;
- Betere werkomstandigheden door zijn zelfverdichtende eigenschappen;

4. EIGENSCHAPPEN

In dit hoofdstuk worden de verschillende materiaaleigenschappen behandeld die van toepassing zijn voor betonberekeningen. In komend hoofdstuk worden de mechanische eigenschappen van VVUHSB bepaald en vergeleken met die van conventioneel beton.

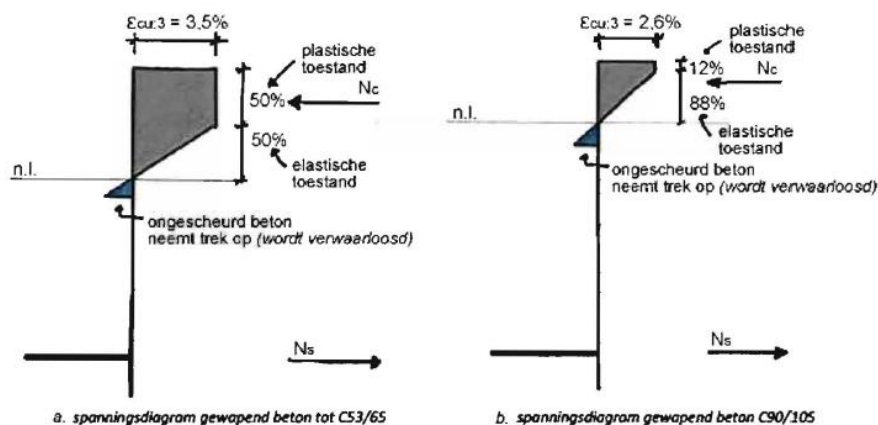
4.1. SPANNING-REKRELATIE

Een spanning-rek diagram wordt gebruikt om het gedrag van een materiaal inzichtelijk te maken bij een zekere belasting. Middels dit diagram kan de relatie worden afgelezen tussen de optredende spanning bij een bepaalde betonrek en kunnen doorsnede berekeningen gemaakt worden voor een materiaal.

Het spanning-rek diagram van VVUHSB verschilt ten opzichte van conventioneel beton. Zo blijkt dat de drukzijde van het spanningsdiagram verandert bij het toenemen van de betonsterkteklasse en deze trend zal bij VVUHSB nog sterker toenemen. Daarnaast valt er ook een verschil op te merken in de trekzijde van het spanning-rekdiagram van VVUHSB ten opzichte van conventioneel beton. In deze paragraaf worden de verschillende waarden toegelicht van de diagrammen voor VVUHSB en conventioneel beton voor belasting op druk en op trek.

4.1.1. Invloed betonsterkteklasse op spanningsdiagram

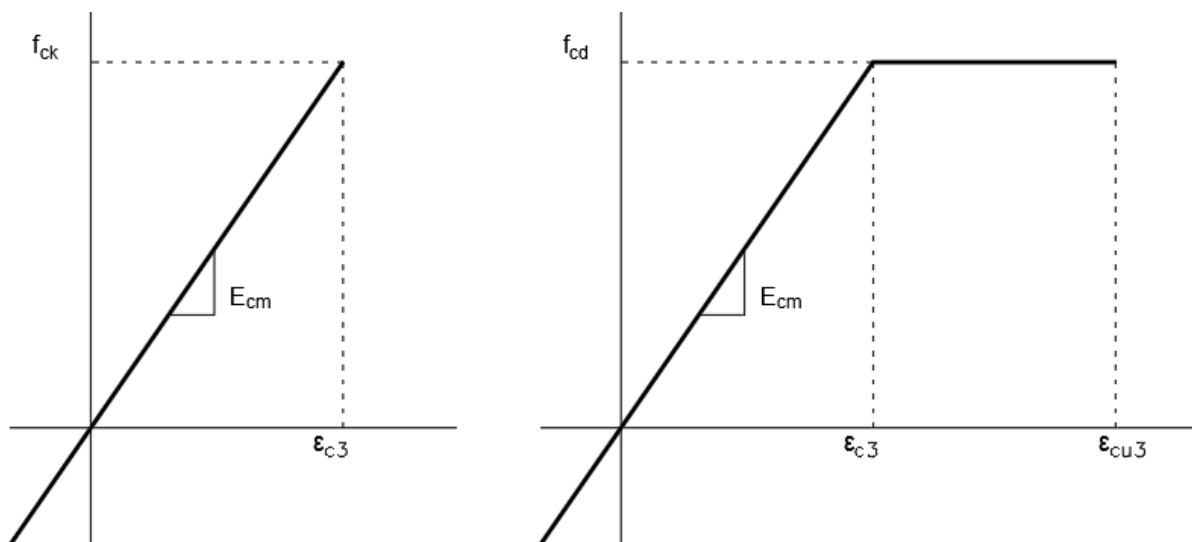
Uit Figuur 4.1 blijkt dat een hogere betonsterkteklasse invloed heeft op het spanningsdiagram van een traditioneel gewapende doorsnede. Wanneer een betondorsnede belast wordt ontstaan er trek- en drukspanningen respectievelijk onder en boven de neutrale lijn. In een gewapende betonnen doorsnede neemt de betondrukzone evenveel kracht op als de wapening, waardoor geldt N_s is N_c . Uit de figuur blijkt dat wanneer de betonsterkteklasse toeneemt de neutrale lijn van de doorsnede zich omhoog verplaatst, hetgeen een gunstig effect heeft op het opneembare moment van de doorsnede in de UGT. Namelijk de wapening komt verder van de neutrale lijn te liggen en daarmee wordt de arm en dus het opneembaar moment groter [17]. Ook blijkt uit de figuur dat de verhouding tussen de elastische toestand en de plastische toestand verandert. Dit duidt op het broos worden van beton bij hogere betonsterkteklassen, vanaf C50/60 [18]. De capaciteit van een ongescheurde doorsnede om trekspanningen op te nemen wordt in de NEN-EN1992-1-1 verwaarloosd, hetgeen ook in de figuur te zien is.



Figuur 4.1 Veranderend verloop spanningsdiagram bij toename betonsterkteklasse

4.1.2. Spanning-rekdiagram VVUHSB belast op druk

De algemene spanning-rekrelatie van beton belast op druk is weergegeven in Figuur 4.2. Het verloop van dit diagram geldt voor zowel conventioneel beton als voor VVUHSB en heeft slechts andere waarden per betonsterkteklasse.



Figuur 4.2 spanning-rek diagram beton belast op druk in BGT (links) en UGT (rechts) [11]

Beton vervormt lineair elastisch totdat de karakteristieke druksterkte f_{ck} is bereikt en de daarbij behorende betondrukrek ϵ_{c3} . Wanneer de belasting wordt opgevoerd bereikt beton de plastische fase en zal de betondruksterkte gelijk blijven bij een toenemende rek, totdat het materiaal bezwijkt bij de grenswaarde voor betonstuik ϵ_{cu3} .

Uit de figuur blijkt:

In de BGT:

$$\epsilon_{c3} = \frac{f_{ck}}{E_{cm}} \quad (4.1)$$

In de UGT:

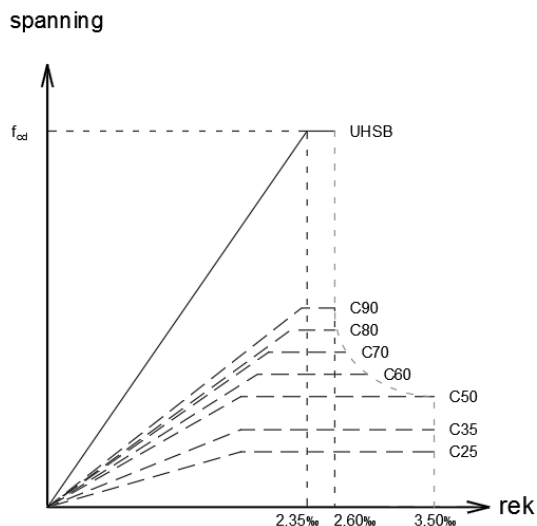
$$\epsilon_{c3} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} \quad (4.2)$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}^2}{\gamma_{cm}} \quad (4.3)$$

Kijkend naar de spanning-rekrelatie van beton belast op druk van verschillende betonsterkteklassen, zoals weergegeven in Figuur 4.3, vertoont hoge sterkte beton afwijkend gedrag ten opzichte van

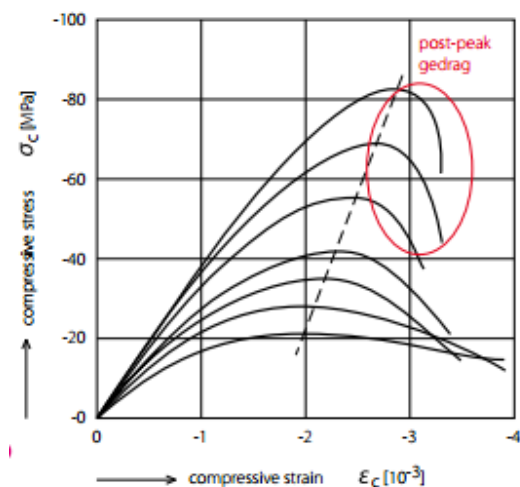
² Volgens de AFGC dient er gerekend te worden met een $\alpha_{cc} = 0,85$. In de berekeningen is er uitgegaan van een $\alpha_{cc} = 1,0$.

conventioneel beton. Uit de figuur blijkt dat de rek bij plastische vervorming (ϵ_{c3}) en daarmee de elastische fase, toeneemt en dat de grenswaarde van de betonstuik (ϵ_{cu3}) afneemt. Bij UHSB belast op druk zal de elastische vervorming van het materiaal doorlopen tot ongeveer 95% procent van het bezwijkmoment. Dit wijst erop dat UHSB een enorm bros materiaal is, waardoor vezeltoevoeging gewenst is om de ductiliteit van het materiaal te verhogen en brose breuk te voorkomen.



Figuur 4.3 spanning-rekrelatie drukzone in UGT diverse betonsterkteklassen

Een bekend gedrag van VVUHSB is het zogenoemde post-peak gedrag. Dit gedrag, dat kenmerkend is voor hoge betonsterkteklassen, toont aan dat bij een sterke teruggang van de opneembare drukspanning de rek nog in geringe mate toeneemt en is weergegeven in Figuur 4.4. Vanaf een betonsterkteklasse van C55 treedt dit gedrag op en de betonstuik neemt vanaf deze klasse af tot een waarde van 2,60 % bij een C80. Vanaf de betonsterkteklasse C80 blijft deze stuikwaarde gelijk. In de praktijk blijkt dat de experimenteel gevonden waarden voor VVUHSB veelal een gering verschil te vertonen met de rek bij betonstuik volgens de NEN-EN1992-1-1, namelijk 3,00‰ in plaats van 2,60‰, en er wordt om deze reden gerekend met de grenswaarde van 2,60 ‰.



Figuur 4.4 Post-peak gedrag beton [18]

4.1.3. Spanning-rekdiagram VVUHSB belast op trek

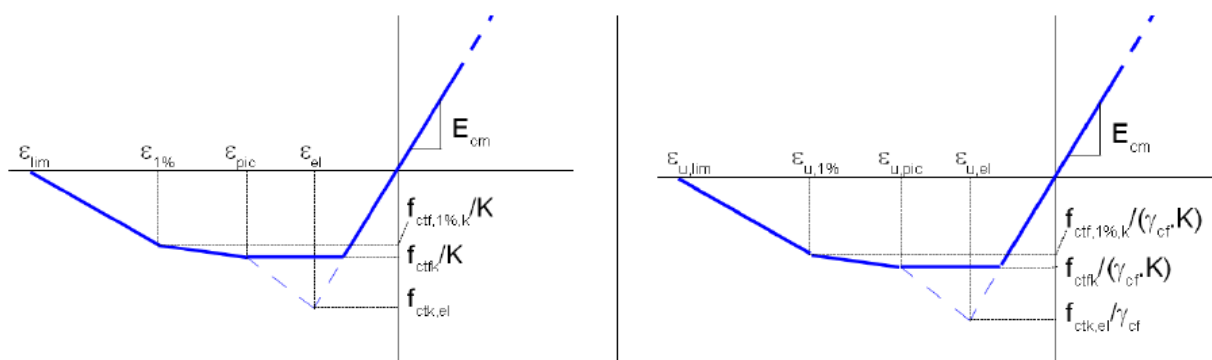
Het grote verschil met conventioneel beton zit aan de trekzijde van het spanning-rekdiagram. Net zoals bij belasting op druk heeft VVUHSB een hogere karakteristieke treksterkte (f_{ctk}). Door de toevoeging van vezels behoudt een VVUHSB doorsnede zijn treksterkte na het scheuren van de betonmatrix en zodoende wordt de capaciteit om trekspanningen op te nemen niet verwaarloosd bij ontwerpberekeningen, hetgeen wel gedaan wordt bij conventioneel beton zoals in de vorige paragraaf vermeld is. Afhankelijk van de hoeveelheid en het type vezels treedt bij een VVUHSB hardening of softening gedrag op.

Softening

De gesimplificeerde spanning-rekrelatie van een VVUHSB met softening gedrag van een doorsnede belast op trek is weergegeven in Figuur 4.5.

Voor het verloop van het diagram geldt het volgende:

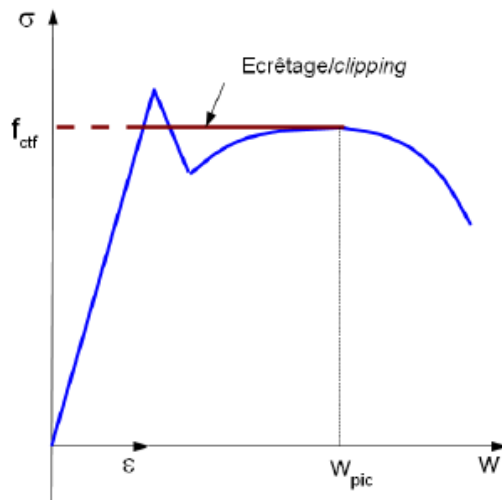
- Het eerste deel van de grafiek omvat de elastische vervorming van de betonmatrix tot het bereiken van de rek waarbij de betonmatrix begint te scheuren (ϵ_{el}).
- In het tweede deel van de grafiek begint de betonmatrix te scheuren en gaan de vezels meewerken in het opnemen van trekspanningen. In deze fase neemt het scheurpatroon toe totdat de vezels bezwijken bij een waarde ϵ_{peak} (in de afbeelding ϵ_{pic}).
- In het derde deel neemt de scheurwijdte toe tot 1% van de hoogte van de doorsnede. Bij het bereiken van $\epsilon_{1\%}$ voltrekt zich een volledig scheurpatroon.
- Het vierde deel toont dat de rek dusdanig groot wordt dat de vezels uit het beton getrokken worden en de betonddoorsnede bereikt zijn maximale rek (ϵ_{lim}). De doorsnede is bezweken en neemt geen spanningen meer op.



Figuur 4.5 Strain-softening spanning-rekdiagram in BGT (links) en UGT (rechts) [11]

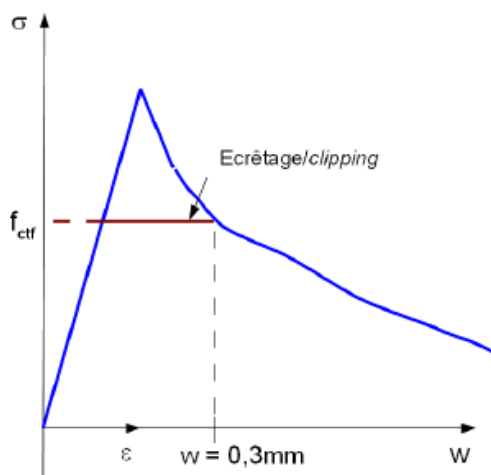
In de figuur is te zien dat een gesimplificeerd diagram ontstaat door het afknotten van het werkelijke diagram. De waarde van f_{ctf} kan gevonden worden op een tweetal manieren, waarbij er onderscheid wordt gemaakt in low strain-hardening en strain-softening.

Figuur 4.6 toont aan dat na het intreden van de eerste scheur de spanning afneemt bij blijvende vervorming. Echter vindt bij aanhoudende vervorming nog enige mate van versterigingsgedrag plaats en ontstaat er een lokale piek. De waarde van f_{ctf} wordt gevonden op de maximale rekwaarde van deze lokale piek.



Figuur 4.6 transformatie werkelijke diagram naar gesimplificeerde afgeknotte diagram in het geval van low strain-hardening [14]

Wanneer bij blijvende vervorming een absolute piekwaarde wordt gevonden, wordt de waarde van f_{ctf} verkregen door het afknotten van de grafiek bij een rekwaarde die correspondeert met een scheurwijdte van 0,3 mm, zoals is weergegeven in Figuur 4.7.



Figuur 4.7 transformatie werkelijke diagram naar gesimplificeerde afgeknotte diagram in het geval van strain-softening [11]

Uit Figuur 4.5 blijkt voor de BGT:

$$\varepsilon_{el} = \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{peak} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \varepsilon_{el} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \varepsilon_{el} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4 \cdot l_c} \quad (4.7)$$

met:

$$w_{0,3} = 0,3 \text{ mm} \quad (4.8)$$

$$l_c = \frac{2}{3} H \quad (4.9)$$

$$w_{1\%} = \frac{1}{100} H \quad (4.10)$$

Uit Figuur 4.5 blijkt voor de UGT:

$$\varepsilon_{u,el} = \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} E_{cm}} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{u,peak} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \varepsilon_{u,el} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{u,1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \varepsilon_{u,el} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{u,lim} = \frac{l_f}{4 \cdot l_c} \quad (4.14)$$

met:

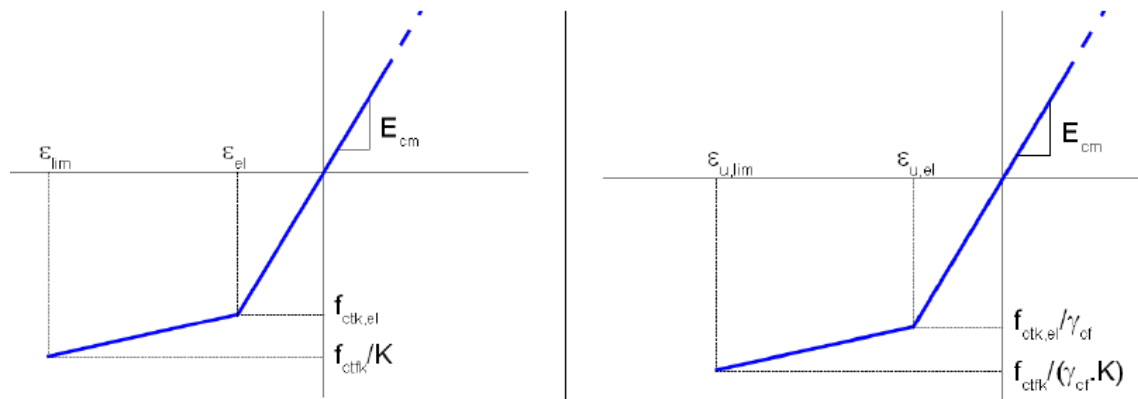
$$w_{0,3} = 0,3 \text{ mm} \quad (4.15)$$

$$l_c = \frac{2}{3} H \quad (4.16)$$

$$w_{1\%} = \frac{1}{100} H \quad (4.17)$$

Hardening

De gesimplificeerde spanning-rekrelatie met hardening-gedrag van een VVUHSB doorsnede belast op trek is weergegeven in Figuur 4.8.



Figuur 4.8 Strain-hardening spanning-rekdiagram in BGT (links) en UGT (rechts) [11]

Voor het verloop van het diagram geldt het volgende:

- Het eerste deel toont dat de matrix de trekkrachten opneemt tot een spanning van $f_{ctk,el}$ bij een betonrek van $\epsilon_{u,el}$.
- In het tweede deel begint de betonmatrix te scheuren en worden de vezels geactiveerd. Te zien is dat de vezels zorgen voor een versterking van de betonmatrix en een hogere treksterkte (f_{ctfk}). Deze treksterkte wordt bereikt bij een betonrek van $\epsilon_{u,lim}$.

4.2. ELASTICITEITSMODULUS

De elasticiteitsmodulus wordt gebruikt voor doorsnede-berekeningen en voor vervormingsberekeningen. De elasticiteitsmodulus is de mate van stijfheid van een materiaal en middels de elasticiteitsmodulus kan de mate van rek onder een bepaalde belasting worden bepaald.

De elasticiteitsmodulus voor VVUHSB kan uit proeven worden bepaald en ligt hoger dan die van conventioneel beton. Het nadeel aan betonsoorten met een hogere betonsterkte is dat er geen eenduidige formule kan worden opgesteld voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus [11]. De reden hiervoor is dat de factoren om een hoge druksterkte te verkrijgen verschillende invloeden hebben op de elasticiteitsmodulus en deze waarde dient daarom bepaald te worden aan de hand van proefondervindingen. De testresultaten van verschillende betonsamenstellingen wijzen erop dat de elasticiteitsmodulus van een VVUHSB ligt tussen de 40 en 80 GPa [5] [11] [19]. In het voorlopige ontwerpstadium raadt 'Interim Recommendation' aan om een elasticiteitsmodulus (E_{cm}) van 50 GPa te gebruiken bij het ontbreken van juiste testresultaten.

4.3. KRIMP

De uiteindelijke krimpverktorting van beton is afhankelijk van een verschillend aantal componenten, namelijk plastische krimp, verhardingskrimp, thermische krimp, autogene krimp en uitdrogingskrimp. Hierbij zijn autogene krimp en de uitdrogingskrimp de belangrijkste factoren voor de totale krimpverktorting van beton.

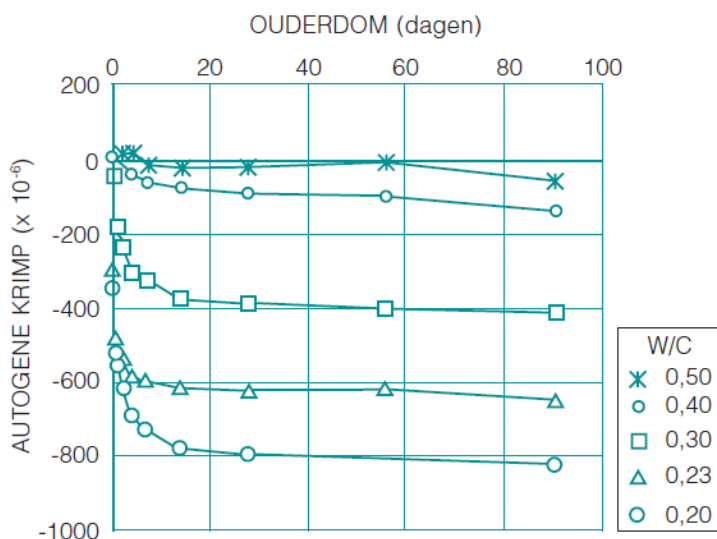
Het verschil in beide vormen van krimp zit hem in de wijze waarop het vochtgehalte vermindert in het beton. Bij autogene krimp is het waterverlies te verwijten aan de hydratatiereactie en bij uitdrogingskrimp aan verdamping. In het geval van VVUHSB zijn door de lage W/C-ratio en de hoge dichtheid van het materiaal de effecten van autogene krimp aanzienlijker dan de effecten van uitdrogingskrimp (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Krimpvergelijking tussen conventioneel beton en VVUHSB [20]

Betontype	W/C-ratio	Uitdrogingskrimp	Autogene krimp
Conventioneel beton	0,5	Aanzienlijk	Beperkt
VVUHSB	<0,4	Beperkt	Aanzienlijk

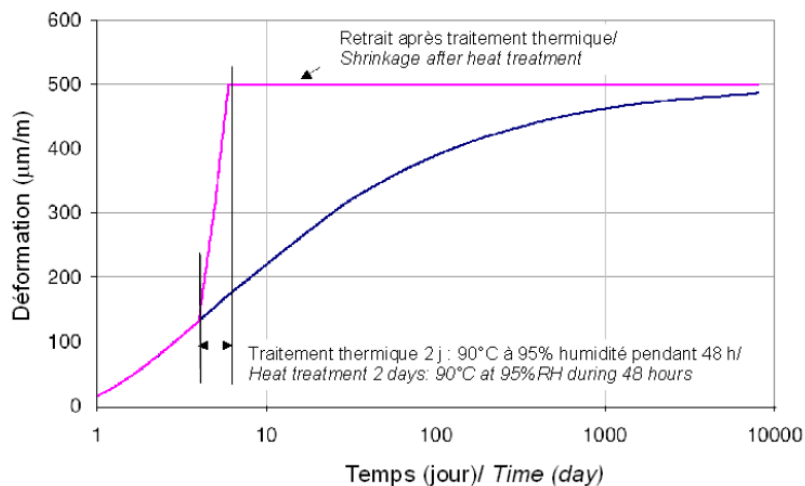
Uitdrogingskrimp wordt namelijk veroorzaakt door het verdampen van niet-gebonden water in het beton via capillaire poriën. Door de hoge dichtheid van VVUHSB speelt de krimp, die optreedt door het samentrekken van deze poriën, nauwelijks een rol van betekenis in de praktijk.

Autogene krimp wordt veroorzaakt door interne uitdroging ten gevolge van het hydratatieproces en neemt dus toe naarmate de w/c-ratio afneemt (Figuur 4.9). Immers het interne water wordt snel gebruikt voor deze hydratatiereactie [20]. Deze interne uitdroging zorgt ervoor dat er met lucht gevulde poriën ontstaan en veroorzaakt capillaire druk. Beton kan geen weerstand bieden tegen deze spanningen, wanneer het zijn uiteindelijke sterkte nog niet heeft bereikt, waardoor scheurvorming plaatsvindt in een vroeg stadium.



Figuur 4.9 Ontwikkeling van de autogene krimp in relatie tot de W/C-ratio [21]

Volgens de 'Interim Recommendations' zal er in het geval van hittebehandeling geen verdere krimp plaatsvinden in de tijd en zal alle krimp optreden tijdens de hittebehandeling. Zie Figuur 4.10. Hierdoor zal er minder scheurvorming plaatsvinden gedurende het uithardingsproces. De aanbeveling geeft als indicatieve waarde voor de krimpverkorting die plaatsvindt tijdens de hittebehandeling 550 $\mu\text{m/m}$ [11].



Figuur 4.10 Krimpverkorting met hittebehandeling (roze) en zonder (blauw) [19]

4.4. KRUIP

Kruip is de met de tijd toenemende en blijvende vormverandering van beton bij een gelijkblijvende belasting en wordt beïnvloed door de volgende factoren.

- Betonkwaliteit;
- Relatieve vochtigheid van de omgeving;
- Mate van hydratatie op tijdstip van belasten;
- Afmetingen doorsnede.

De mate van kruip is bij VVUHSB hetzelfde als bij HSB wanneer er geen hittebehandeling plaats vindt. Door het tweede type hittebehandeling kan kruip aanzienlijk worden verminderd. Volgens de 'Interim recommendations' kunnen de volgende indicatieve waarden, zoals weergegeven in Tabel 4-2, voor de langetermijn kruipcoëfficiënt φ worden aangehouden:

Tabel 4-2 kruipcoëfficiënt onder verschillende omstandigheden

	Geen hittebehandeling	Hittebehandeling type I	Hittebehandeling type II
φ	0,8	0,4	0,2

4.5. VERMOEING

Bij vermoeiing bezwijkt de constructie door langdurige dynamische belastingen op de constructie. Hierbij wordt de maximaal opneembare sterkte van het beton niet bereikt, maar bezwijkt de constructie eerder. Bij constructies met conventioneel beton is vermoeiing meestal geen bepalende

factor tijdens het ontwerp. Echter zal bij de toepassing van VVUHSB een lichtere en slankere constructie gemaakt worden, dit zorgt voor een constructie die meer gevoelig is voor vermoeiing. Vermoeiing is afhankelijk van de materiaaleigenschappen, de amplitude tussen de minimale en maximale spanningen en het aantal herhalingen.

Bij het construeren van slanke constructies, zoals bij VVUHSB vaak de doelstelling is, wordt vermoeiing een leidend ontwerpcriterium. Er dient goed gekeken te worden naar dynamische belastingen op de constructie en de mate waarin de constructie die op kan nemen.

Om de vermoeiingssterkte van VVUHSB te bepalen is onderstaande formule opgesteld:

$$f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right) \quad (4.18)$$

Bovenstaande formule is een wijziging op de Eurocode welke nodig is om een te grote onderschatting van de vermoeiingssterkte te voorkomen in het geval van een VVUHSB [22].

Lappa heeft haar promotieonderzoek gedaan naar vermoeiing van VVUHSB bij doorbuiging aan de TU Delft [10]. In dit onderzoek zijn onderstaande mengsels met elkaar vergeleken:

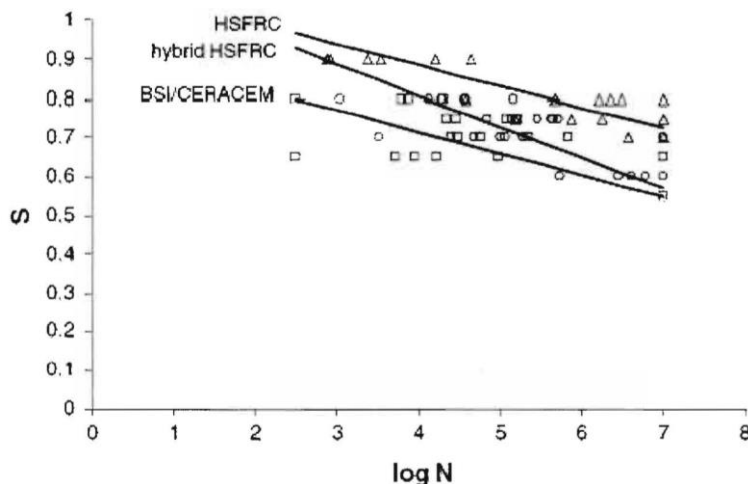
- HSFRC: high strength steel fibre reinforced concrete. Dit mengsel valt onder de klasse ZHSB door een karakteristieke druksterkte van gemiddeld 145 MPa. Hierin zijn alleen staalvezels toegevoegd.
- Hybrid HSFRC: hybrid high strength steel fibre reinforced concrete. Ook dit mengsel valt onder de klasse ZHSB. Dit mengsel heeft zowel staalvezels als PVA vezels. Dit maakt het een hybride mengsel.
- BSI/ CERACEM: is een commercieel mengsel geproduceerd door de bedrijven Sika en Eiffage. Dit mengsel kan wel als UHSB geclassificeerd worden door druksterktes boven de 200 MPa.

Met name het soort vezels dat is toegepast zorgt voor differentiatie in het gedrag op vermoeiing. Deze verschillende mengsels zijn te zien in Tabel 4-3.

Tabel 4-3 Verschillende VVUHSB mengsels

Soort Beton	Karakteristieke druksterkte (N/mm ²)	Vezelvolumen (%)	Vezelmaat (L/D)
HSFRC	145	1,6	12/0,16
Hybrid HSFRC	120	0,5 staal & 1,0 PVA	12/0,2 & 60/0,75
BSI/ CERACEM	220	2,5	20/0,3

Zoals eerder is gemeld in paragraaf 3.4 zijn korte vezels geschikt voor het herstellen van microscheuren. Dit zorgt ervoor dat vermoeiing beter opgevangen kan worden. Dit blijkt ook uit de resultaten van Lappa. In Figuur 4.11 is te zien dat het HSFRC mengsel, met de meeste korte vezels, het beste bestand is tegen vermoeiing. Op de x-as is de vermoeiingslevensduur (N) uitgezet. Op de y-as de spanningsverhouding (S) tussen de aangebrachte spanning en de materiaalsterkte.



Figuur 4.11 Vermoeiingssterkte van 3 VVUHSB mengsels

Verder is uit dit onderzoek gebleken dat mengsels met een betere verwerkbaarheid, door de mengselsamenstelling of de toevoeging van plastificeerders, een kleinere spreiding hebben wat betreft mechanische eigenschappen. Dit komt doordat het mengsel en dus de vezels zich beter kunnen verdelen over de gehele constructie. Deze kleinere spreiding in mechanische eigenschappen zorgt ook voor een kleinere spreiding in de vermoeiingseigenschappen van het materiaal, uiteindelijk zullen deze betonmengsels het beste weerstand bieden tegen vermoeiing. Voor betonmengsels met een hoge verwerkbaarheid toonde het onderzoek aan dat bij een buigtrekspanning tot 70% van de opneembare maximale buigtrekspanning vermoeiing geen rol zal spelen. Bij betonmengsels met een lage verwerkbaarheid was dit nog maar 60%. Geadviseerd wordt om 60% aan te houden als het te gebruiken betonmengsel niet onderzocht is naar deze eigenschappen.

Verder blijkt uit haar onderzoek dat vezelrichting en clustering vele male minder van belang is voor vermoeiing dan voor statische bezwijkmethodes. Dit heeft als gevolg dat materiaaleigenschappen met betrekking tot vermoeiing niet verbeterd kan worden door deze factoren te optimaliseren. Daarnaast is de duurzaamheid van VVUHSB nogmaals benadrukt in het onderzoek. Er zijn 200 vries-dooi cycli doorlopen en er is vrijwel geen schade aan het materiaal vastgesteld.

4.6. DUCTILITEIT

Volgens de 'Interim Recommendations' kan de minimum wapeningseis komen te vervallen wanneer er wordt voldaan aan de ductiliteitseis. De minimum wapeningseis in de NEN-EN 1992-1-1 bestaat om brosse breuk van de betonconstructie te voorkomen. Als er voldaan wordt aan de ductiliteitseis, dan zullen de toegevoegde vezels in de constructie ervoor zorgen dat deze brosse breuk niet optreedt. De ductiliteitseis kan worden bepaald als in onderstaande formule.

$$\frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \frac{\sigma(w)}{k_{global}} dw \geq \max(0,4f_{ctm,el}; 3 \text{ MPa}) \quad (4.19)$$

5. REKENMETHODES

Ondanks de potentie van het materiaal zijn er nog relatief weinig toepassingen van VVUHSB in de praktijk te vinden. Een belangrijke reden hiervoor is het ontbreken van een rekenmethode aan de hand van internationaal erkende normen, zoals bijvoorbeeld de NEN-EN1992-1-1 voor betonsterkteklassen tot C90/105. Deze internationale rekenregels zijn lastig op te stellen voor VVUHSB, aangezien de samenstelling van het betonmengsel veel specifiek is dan bij conventioneel beton. Een kleine wijziging in de samenstelling zorgt voor een nieuw materiaal met zijn eigen gedrag. Hierdoor is het lastig om één algemeen geldende norm op te stellen voor een groot scala aan betonmengsels.

Afgelopen decennia is er veel onderzoek verricht naar de mogelijkheden van VVUHSB en zijn er inmiddels werkgroepen opgesteld die werken aan normen voor VVUHSB. Een voorbeeld hiervan is de fib task-group 8.6, een werkgroep die zich richt op het publiceren van een norm speciaal toegesneden op VVUHSB.

Om te rekenen met VVUHSB wordt meestal gebruik gemaakt van de NEN-EN1992-1-1 met als aanvulling de *'Interim Recommendations'*. Dit zijn aanbevelingen waarin de bepaling van diverse materiaaleigenschappen voor VVUHSB worden toegelicht en de afwijkingen met de NEN-EN1992-1-1 worden hierin toegelicht.

In dit hoofdstuk wordt de spanning-rekrelatie van een VVUHSB opgesteld aan de hand van de *'Interim Recommendations'*, waarbij er wordt uitgegaan van softening gedrag van het materiaal. Door uit te gaan van softening wordt een veilige benadering gemaakt van het rekenen met VVUHSB. Vervolgens wordt een VVUHSB doorsnede getoetst middels de *'Interim Recommendations'* en wordt deze vergeleken met conventionele betonsoorten.

5.1. MOMENTWEERSTAND

Voor het bepalen van de momentweerstand in de UGT van een vezelversterkte of gewapende betondoorsnede wordt uitgegaan van het volgende:

- Vlakke doorsneden blijven vlak;
- De rek in het betonstaal of de voorspanelementen met aanhechting is, zowel onder trek als onder druk, gelijk aan die in het omliggende beton;
- De spanning in het beton onder druk of trek is afgeleid uit het spanning-rekdiagram, zoals gegeven in paragraaf 4.1;
- De spanningen in het beton- of voorspanstaal zijn afgeleid uit de diagrammen in de NEN-EN1992-1-1, figuur 3.8 en figuur 3.10;
- De initiële rek in de voorspanelementen is in rekening gebracht bij het bepalen van de spanningen in de voorspanelementen.

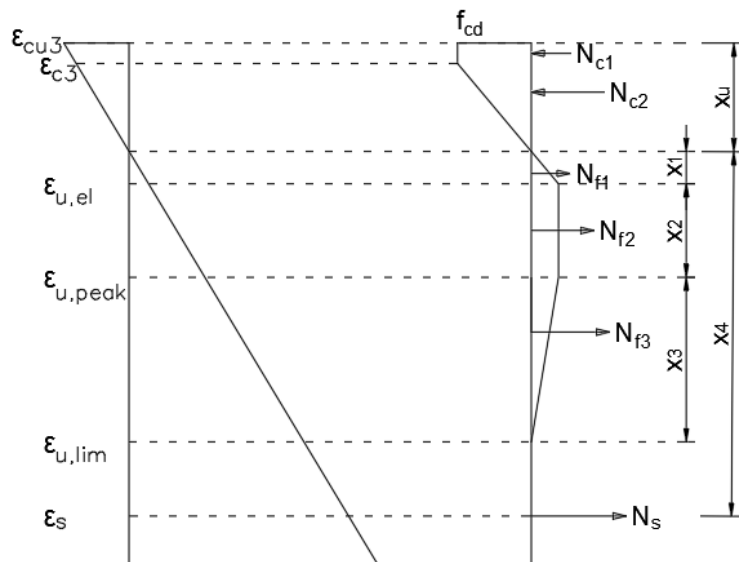
De momentweerstand van een betonnen doorsnede wordt bepaald door een drietal componenten, namelijk:

- Het aandeel van het beton in de betondrukzone N_c ;
- Het aandeel van de vezels in de trekzone N_f ;
- Het aandeel van het wapeningsstaal in de trekzone N_s .

Deze momentweerstand kan bepaald worden uit het evenwicht dat ontstaat in de doorsnede, waarvoor geldt:

$$N_c = N_f + N_s \quad (5.1)$$

Dit krachtenevenwicht is weergegeven in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 krachtenevenwicht van een doorsnede in de UGT voor het bepalen van weerstandsmoment

Het interne krachterspel wordt middels onderstaande formules beschreven:

$$N_{c,1} = k_1 \cdot x_u \cdot f_{cd} \cdot b \quad (5.2)$$

$$N_{c,2} = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot x_u \cdot f_{cd} \cdot b \quad (5.3)$$

$$N_{f,1} = \frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot f_{ctd} \cdot b \quad (5.4)$$

$$N_{f,2} = x_2 \cdot f_{ctd} \cdot b \quad (5.5)$$

$$N_{f,3} = \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot f_{ctd} \cdot b \quad (5.6)$$

$$N_s = A_s \cdot f_{yd} \quad (5.7)$$

$$k_2 = \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}} \quad (5.8)$$

$$k_1 = 1 - k_2 \quad (5.9)$$

$$x_1 = \frac{\varepsilon_{u,el}}{\varepsilon_{cu3}} \cdot x_u \quad (5.10)$$

$$^3 \quad x_2 = \frac{\varepsilon_{u,peak} - \varepsilon_{u,el}}{\varepsilon_{cu3}} \cdot x_u \quad (5.11)$$

$$x_3 = \frac{\varepsilon_{u,lim} - \varepsilon_{u,peak}}{\varepsilon_{cu3}} \cdot x_u \quad (5.12)$$

5.2. DWARSKRACHTCAPACITEIT

Door de toevoeging van vezels aan het beton wordt de dwarskrachtcapaciteit V_{Rd} vergroot en deze kan als volgt berekend worden.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (5.13)$$

Waarin:

- $V_{Rd,c}$ is de dwarskrachtweerstand van het beton zonder dwarskrachtwapening;
- $V_{Rd,s}$ is de dwarskrachtweerstand van de dwarskrachtwapening bij bereiken vloeigrens;
- $V_{Rd,f}$ is de dwarskrachtweerstand van de vezels.

Wanneer het beton begint te scheuren, door de optredende dwarskracht, mag volgens de NEN-EN1992-1-1 niet meer worden gerekend met de dwarskrachtweerstand van het beton en dient de totale dwarskracht opgenomen te worden door de dwarskrachtwapening. De '*Interim Recommendations*' gaat niet uit van deze benadering en rekent met een ongereduceerde dwarskrachtcapaciteit. Echter wijst literatuur erop de conservatieve benadering uit de NEN-EN1992-1-1 te gebruiken [18]. Zodoende is de dwarskrachtcapaciteit voor een gescheurde constructie als volgt te benaderen.

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (5.14)$$

³ Als de situatie wordt geschematiseerd als in Figuur 5.1 dan wordt $\varepsilon_{u0,3} = \varepsilon_{peak}$.

Betondeel

Voor het betonaandeel van de dwarskrachtcapaciteit rekent de 'Interim Recommendations' met een hogere waarde dan de NEN-EN1992-1-1. Voor het betonaandeel van een gewapende doorsnede volgens de 'Interim recommendations' geldt [11]:

$$V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \quad (5.15)$$

Met:

$$k = 1 + \begin{cases} 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} & \sigma_{cp} \geq 0 \\ 0,7 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctk;0,05}} & \sigma_{cp} < 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

d = nuttige hoogte

In het geval van een voorgespannen betondoorsnede geldt voor de rekenwaarde van de dwarskrachtcapaciteit van beton het volgende [11]:

$$V_{Rd,c} = \frac{0,24}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot z \quad (5.17)$$

z = inwendige hefboomarm⁴

Voor een ongewapende en niet voorgespannen doorsnede geldt:

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot h \quad (5.18)$$

Voor bovenstaande formules geldt:

b_w is de smalste breedte van de dwarsdoorsnede op trek;
 γ_E is een veiligheidsfactor zodat $\gamma_{cf} \cdot \gamma_E$ is 1,5;
 σ_{cp} is de aanvangsspanning in een voorgespannen doorsnede.

Dwarskrachtwapeningdeel

De deelname aan de dwarskrachtcapaciteit van de verticale dwarskrachtwapening is middels onderstaande formule te berekenen.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (5.19)$$

Waarin:

A_{sw} is de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de dwarskrachtwapening;
 f_{ywd} is de rekenwaarde van de vloeigrens van de dwarskrachtwapening;
 s is de hart-op-hartafstand van de beugels;
 θ is hoek tussen de drukdiagonaal en langsas van het element

Vezeldeel

⁴ Wanneer $z = 0,9 \cdot d$ dan zijn formule 5.15 en 5.17 gelijk.

Om de dwarskrachtcapaciteit van de vezels te berekenen geldt volgens 'Interim Recommendations' onderstaande formule.

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fv} \cdot \sigma_{Rd,f}}{\gamma_{cf} \cdot \tan \theta} \quad (5.20)$$

Waarin:

A_{fv} is het effectieve vezelgebied
 $\sigma_{Rd,f}$ is de restwaarde treksterkte;

Voor het bepalen van A_{fv} wordt onderscheid gemaakt tussen vierkante en ronde doorsneden. In het geval van een vierkante doorsnede geldt:

$$A_{fv} = b \cdot z \quad (5.21)$$

Voor ronde doorsnede met diameter $\emptyset$ geldt:

$$A_{fv} = 0,58 \cdot \emptyset^2 \quad (5.22)$$

De restwaarde voor de treksterkte is te bepalen middels onderstaande formule.

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{w_{lim}} \cdot \int_0^{w_{lim}} \sigma_f(w) \cdot dw \quad (5.23)$$

Waarbij geldt:

$$w_{lim} = \max(w_u, w_{max}) \quad (5.24)$$

Met de 'Interim Recommendations' wordt de sterkte na het scheuren bepaald middels een integraal. Het bepalen van deze integraal is omslachtig en afhankelijk van het mengsel VVUHSB. De waarde van $\sigma_{Rd,f}$ kan op een veilige manier benaderd worden door deze gelijk te stellen aan $\sigma(w_{0,3})$, oftewel aan de spanning die optreedt bij een scheurwijdte van 0,3 mm. [23]

Maximale dwarskrachtcapaciteit

Aanvullend dient getoetst te worden of de dwarskracht niet groter is dan de maximaal opneembare dwarskrachtcapaciteit van de constructie, welke begrensd is door het bezwijken van de drukdiagonalen. De maximaal opneembare dwarskracht is middels onderstaande formule te berekenen:

$$V_{Rd,max} = \frac{2 \cdot 1,14 \cdot \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot b_w \cdot z}{\cot \theta \cdot \tan \theta} \quad (5.25)$$

5.3. SCHEURWIJDTE

Om de scheurwijdte te bepalen wordt gebruik gemaakt van onderstaande formule.

$$w_k = S_{r,max,f} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5.26)$$

Hierin dient allereerst bepaald te worden wat de afstand is tussen de scheuren.

$$S_{r,max} = 2,55(l_0 + l_t) \quad (5.27)$$

$$l_0 = 1,33 \cdot \frac{c}{d} \quad (5.28)$$

$$l_t = \left(\frac{0,3 \cdot k_2 \left(1 - \frac{f_{ctfm}}{f_{ctm,el}} \right)}{\delta \cdot \eta} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_{eff}} \right) \geq \frac{l_f}{2} \quad (5.29)$$

$$\delta = 1 + 0,5 \left(\frac{f_{ctfm}}{f_{ctm,el}} \right) \quad (5.30)$$

$$\frac{f_{ctfm}}{f_{ctm,el}} = 1 \quad (5.31)$$

Met bovenstaande waarde kan de gemiddelde rek ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) bepaald worden bij een scheurwijdte van $w_{max} = 0,2 \text{ mm}$.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{w_{max}}{S_{r,max,f}} \quad (5.32)$$

Uit de gemiddelde rekwaarde kan vervolgens een toelaatbare staalspanning worden berekend aan de hand van onderstaande formule.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (5.33)$$

$$\sigma_s = ((\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot E_s) + k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff}) \quad (5.34)$$

Met de staalspanning, de betonspanning en de vezelspanning zal uiteindelijk het optredend moment worden bepaald. Deze waarden kunnen bepaald worden volgens de formules 5.2 t/m 5.12 in paragraaf 5.1. Daarna wordt het optredend moment bij een scheurwijdte van 0,2 mm bepaald met onderstaande formule. Hierbij is x de hoogte van de betondrukzone in de BGT.

$$M_{Rd0,2} = N_c \cdot \frac{2}{3} x + N_{f,1} \cdot \frac{2}{3} x_1 + N_{f,2} \cdot \left(x_1 + \frac{x_2}{2} \right) + N_s \cdot (d - x) \quad (5.35)$$

Bij het optredende moment bij een scheurwijdte van $w_{max} = 0,2 \text{ mm}$ en het daadwerkelijk optredende moment kan de scheurwijdte in de BGT worden bepaald.

$$w_k = \frac{M_{Ed} \cdot w_{max}}{M_{Rd0,2}} \quad (5.36)$$

6. BALKBEREKENING CONVENTIONEEL BETON VS. (VV)UHSB

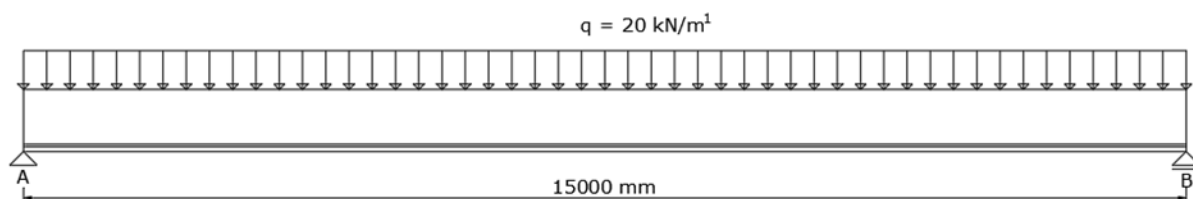
Om beter inzicht te krijgen in de mogelijkheden van (VV)UHSB en de betreffende rekenregels is er een balkberekening uitgevoerd met verschillende betonmengsels. In de oefenberekening wordt een betonnen balk doorgerekend voor een vijftal betonmengsels in de UGT en BGT. Drie daarvan zijn betonmengsels binnen het bereik van NEN-EN1992-1-1 zijn, namelijk C30/37, C50/65 en C90/105. De andere twee zijn een UHSB mengsel zonder toevoeging van vezels en een vezelversterkt mengsel (Ductal FM). In Bijlage C is de uitwerking van deze oefenberekening te vinden. Hieronder zijn de resultaten beschreven.

6.1. UITGANGSPUNTEN

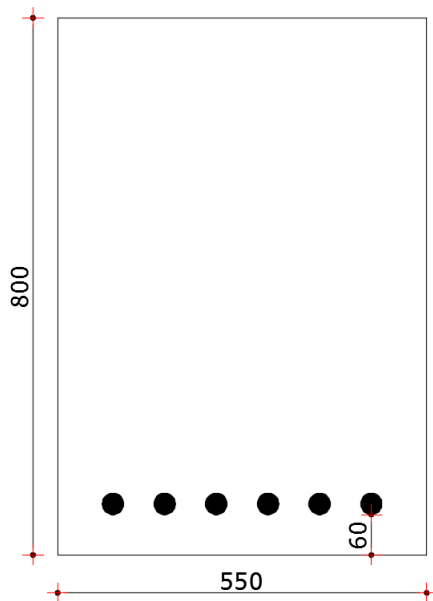
In Tabel 6-1 zijn de uitgangspunten voor deze berekening uitgewerkt. Deze is geschematiseerd in Figuur 6.1 en Figuur 6.2.

Tabel 6-1 Uitgangspunten balkberekening

Omschrijving	Symbool	Waarde
Breedte balk	b	550 mm
Hoogte balk	h	800 mm
Overspanning	l	15.000 mm (ligger op 2 steunpunten)
Karakteristieke belasting	q_k	20 kN/m (eigen gewicht wordt verwaarloosd)
Belastingsfactor	γ	1,65
Toegepaste dekking	c	60 mm
Minimale dekking	c_{min}	60 mm
Maximaal scheurwijdte	w_{max}	0.3 mm
Wapening		6 staven $\varnothing 32$ B500B (indien nodig beugels $\varnothing 12$)
Wapeningsoppervlak	A_s	4825 mm ²
Maximale doorbuiging	u_{max}	$\frac{l}{300}$ mm



Figuur 6.1 mechanisch model constructie



Figuur 6.2 dwarsdoorsnede betonbalk

Resultierend uit bovenstaande situatie zijn de onderstaande waardes voor de oefenberekening leidend.

UGT:

$$V_{Ed} = 247,5 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 928,1 \text{ kNm}$$

BGT:

$$V_{Ed} = 150 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 562,5 \text{ kNm}$$

6.2. RESULTATEN

Per doorsnede is de momentweerstand (M_{Rd}), de dwarskrachtweerstand (V_{Rd}), de optredende scheurwijdte (w_k) en de optredende doorbuiging (u_k) doorerekend.

Tabel 6-2 Resultaten oefenberekening

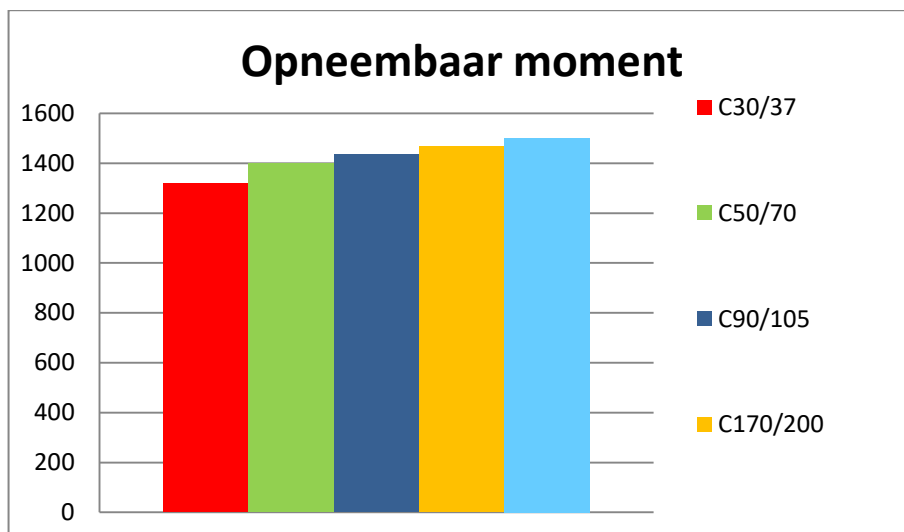
Betonsterkteklasse	M_{Rd} [kNm]	V_{Rd} [kN]	w_k [mm]	u_k [mm]
C30/37	1318,9	241,5	0,24	17,1
C50/60	1398,9	286,3	0,22	15,1
C90/105	1435,6	348,3	0,20	12,9
UHSB C170/200	1467,4	727	-	11,2
VVUHSB C170/200	1501,0	2711,8	0,04	11,2

6.3. CONCLUSIE

6.3.1. Momentweerstand

De toename van opneembaar moment is gering bij een toename van de betonsterkteklasse. De waardes lopen op van 1319 kNm voor C30/37 naar 1501 kNm voor C170/200 vezelversterkt (druksterkte neemt toe met 567% en het opneembaar moment met 13,8%). In het geval van een gewapende betonnen doorsnede bepalen de wapening en de hoogte van de inwendige hefboomsarm het opneembaar van de betonnen doorsnede. Doordat iedere betonddoorsnede dezelfde hoeveelheid wapening bevat, blijven de krachten in de doorsnede gelijk. Wel zorgt een hogere betonsterkteklasse voor een reductie van de betondrukzonehoogte en daarmee voor een grotere inwendige hefboomarm, waardoor het opneembaar moment van de doorsnede toeneemt. Dit heeft uiteindelijk relatief weinig effect.

Door de toevoeging van vezels aan het beton wordt de treksterkte van het beton niet verwaarloosd en kan de doorsnede meer trekkrachten verwerken. Echter blijkt uit de berekening dat door de toevoeging van vezels de momentweerstand van de doorsnede slechts in geringe mate toeneemt. Dit is te verklaren uit het feit dat de vezels relatief weinig trekkrachten kunnen opnemen in verhouding tot het wapeningsstaal. Wanneer opneembaar moment leidend is voor het ontwerp is er weinig optimalisatie te halen uit het toepassen van VVUHSB.



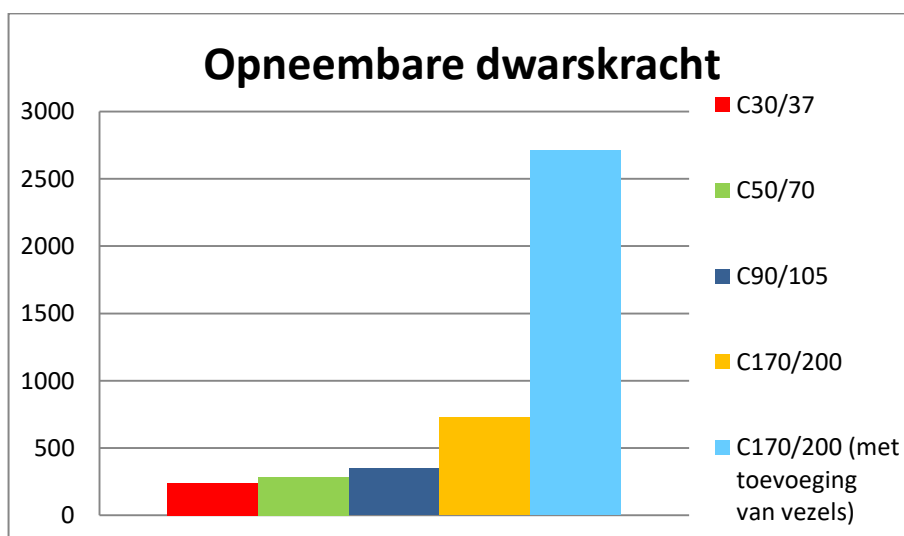
Figuur 6.3 Verschillen in opneembaar moment

6.3.2. Dwarskrachtweerstand

Door een toename van de betonsterkteklasse neemt de dwarskrachtweerstand van het beton toe, zodat dwarskrachtwapening in betonnen balk alleen nodig is in het geval van een C30/37 mengsel. Te zien is dat, zonder de toevoeging van vezels, de dwarskrachtweerstand geleidelijk toeneemt. Tussen C30/37 en C170/200 neemt de opneembare dwarskrachtweerstand toe met 180%. Er is dus met hogere betonsterkteklassen meer voordeel te halen uit de dwarskrachtweerstand, dan uit de momentweerstand.

Uit de resultaten blijkt dat de dwarskrachtweerstand van VVUHSB omhoog schiet ten opzichte van het C170/200 mengsel zonder vezels. Dit verschil is grotendeels te danken aan de toevoeging van vezels. Het vezelaandeel voor de dwarskrachtweerstand is namelijk een factor 2,5 maal zo groot als het betonaandeel in gekozen betonmengsel. Hierdoor loopt de dwarskrachtweerstand op tot 2711,8 kN.

Het hoger uitvallen van de dwarskrachtweerstand komt ook door het rekenen aan de hand van de 'Interim Recommendations', doordat deze aanbeveling met een hoger betonaandeel rekent dan de NEN-EN1992-1-1. De berekening met C170/200 (zonder toevoeging van vezels) is berekend volgens de 'Interim Recommendations' en komt uit op een dwarskrachtweerstand van 727 kN. Dit is een stuk hoger dan het betonaandeel volgens de NEN-EN 1992-1-1 welke uit komt op 431 kN.

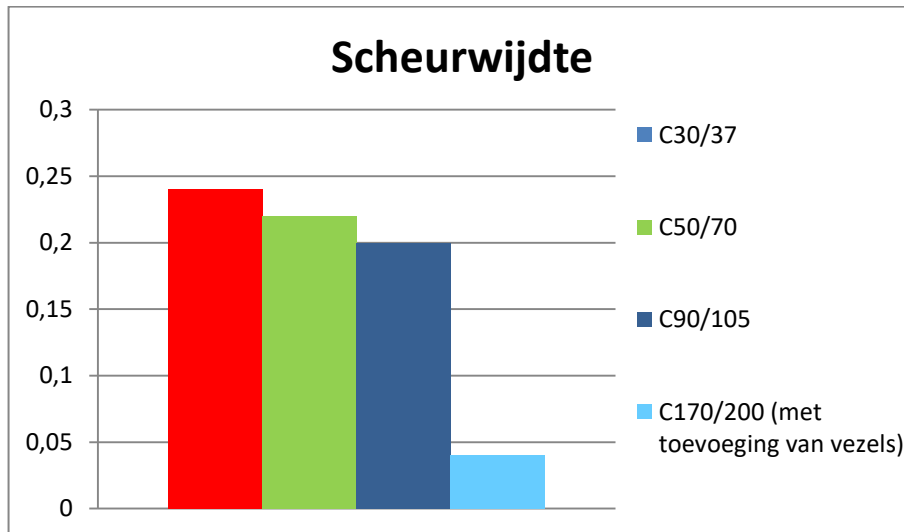


Figuur 6.4 Verschillen in opneembare dwarskracht

6.3.3. Scheurwijdte

Uit de berekening blijkt dat de optredende scheurwijdte bij een bepaald optredend moment bij VVUHSB aanzienlijk lager is dan van conventionele betonsoorten. Dit heeft voornamelijk te maken met een lagere waarde van $s_{r,max}$. Deze waarde bepaalt de maximale afstand tussen de scheuren. Het feit dat deze waarde lager is, betekent dat er een kleinere afstand is tussen de scheuren bij VVUHSB dan bij conventioneel beton. Dit gedrag wordt veroorzaakt door de vezels zoals eerder besproken is in Paragraaf 3.4. Er ontstaan dus meerdere kleine scheurtjes in plaats van één grote scheur, waardoor de scheurwijdte bij het optredende moment lager uitvalt.

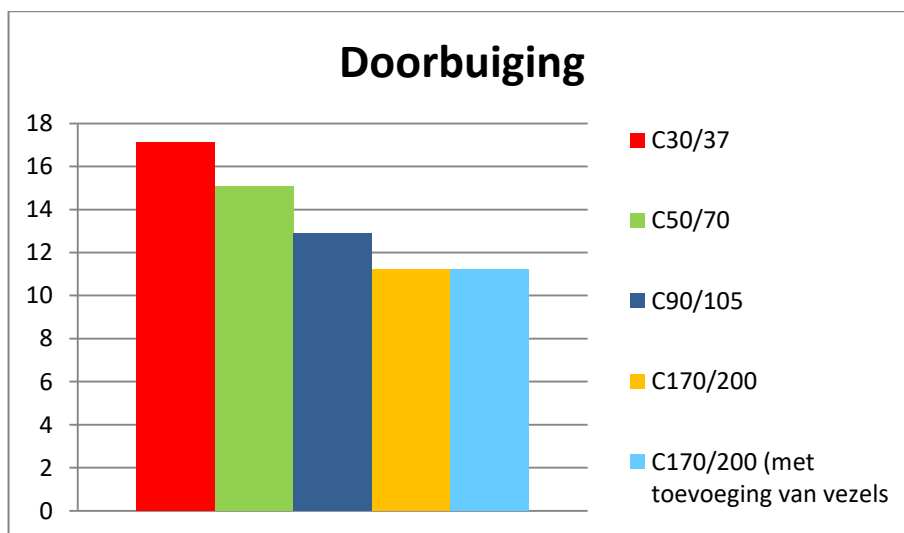
Voor UHSB zonder vezels is geen scheurwijdte bepaald. Dit is gedaan omdat deze niet berekend mag worden volgens de NEN-EN 1992-1-1 en ook niet volgens 'Interim Recommendations'.



Figuur 6.5 Verschillen in optredende scheurwijdte

6.3.4. Doorbuiging

In de berekening blijft het oppervlaktetraagheidsmoment ongewijzigd door het aanhouden van dezelfde afmetingen van de constructie, net zoals de belasting en de overspanningslengte. De enige variabele bij berekeningen met doorbuiging is de elasticiteitsmodulus, welke toeneemt van 33 GPa (voor C30/37) naar 50 GPa⁵ (voor VVUHSB). Deze toename van de elasticiteitsmodulus zorgt voor een reductie van de doorbuiging van 17 millimeter naar 11 millimeter.



Figuur 6.6 Verschil in doorbuiging

⁵ Voor UHSB zonder vezels is eveneens gerekend met een elasticiteitsmodulus van 50 GPa. Hier is voor gekozen omdat er geen waarde bekend is van een UHSB mengsel zonder vezels. In de praktijk zal door de toevoeging van vezels de elasticiteitsmodulus hoger uitvallen.



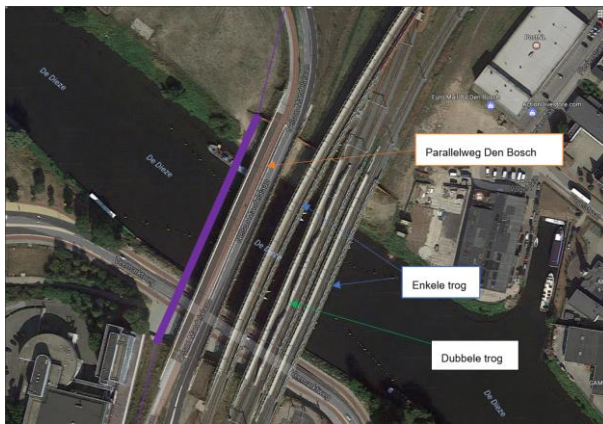
Deel 2: Casusstudie

7. SAMENVATTING CASUS

Om de toepassing van VVUHSB uit te werken in een praktische situatie is een casus uitgewerkt waaraan een voorontwerp gemaakt kan worden. In deze casus zijn twee varianten doorgerekend. Enerzijds een variant van conventioneel beton van de betonsterkteklasse C50/60 en anderzijds een variant van VVUHSB van de betonsterkteklasse C170/200. Deze casus is volledig uitgewerkt in Bijlage D. In komend hoofdstuk is een samenvatting uitgewerkt van de casus waarmee gerekend is.

7.1. LOCATIE

Als casus is een fictieve fietsbrug gekozen die naast de huidige The Royal Welshbrug zal komen te liggen. De locatie is weergegeven in Figuur 7.1.



Figuur 7.1 Locatie fietsbrug casus

Deze fietsbrug zal als aanvulling zijn op de momenteel aanwezige spoorbruggen en de Royal Welshbrug. In deze situatie zal de Royal Welshbrug, welke nu voor de helft voor voetgangers en fietsers wordt gebruikt en voor de helft voor autoverkeer, volledig gebruikt worden voor het autoverkeer. De voetgangers en fietsers zullen over de nieuwe brug worden geleid.

De brug bestaat uit drie overspanningen. De grootste overspanning hierin bestaat uit 55,5 meter tussen de twee steunpunten. In deze casus zal deze grootste overspanning statisch bepaald uitgewerkt worden. Verder zal er naar de randvoorwaarden gekeken worden van de Royal Welshbrug.



Figuur 7.2 Bestaande bruggen over de Dieze

7.2. TE VERGELIJKEN BETONSOORTEN

Voor deze casus zal een mengsel van conventioneel beton en van VVUHSB vergeleken worden. Hiervoor zullen de betonsoorten gebruikt worden zoals weergegeven in Tabel 7-1.

Tabel 7-1 Gebruikte betonsoorten casus

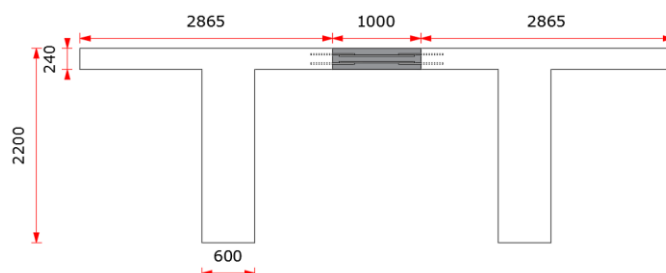
	Symbol	Conventioneel beton C50/60	VVUHSB C170/200
Karakteristieke cilinderdruksterkte	f_{ck}	50 MPa	170 MPa
Karakteristieke kubusdruksterkte	$f_{ck,cube}$	60 MPa	200 MPa
Rekenwaarde druksterkte	f_{cd}	33,3 MPa	113 MPa
Gemiddelde treksterkte	f_{ctm}	4,1 MPa	12,9 MPa
Karakteristieke treksterkte	$f_{ctfk,el}$	2,9 MPa	9,00 MPa
Rekenwaarde treksterkte	f_{ctd}	1,9 MPa	5,54 MPa
Elasticiteitsmodulus	E_{cm}	37 GPa	50 GPa
Rek bij plastische vervorming	ϵ_{c3}	1,75 ‰	2,35 ‰
Rek bij grenswaarde betonstuik	ϵ_{cu3}	3,50 ‰	2,60 ‰
Rek bij ontstaan eerste scheur	$\epsilon_{u,el}$	-	0,133 ‰
Rek bij scheurwijdte van 0,3 mm	$\epsilon_{u,peak}$	-	0,695 ‰
Maximale rek trekzone	$\epsilon_{u,lim}$	-	6,094 ‰
Vezeloriëntatiefactor	K	-	1,25
Kruipfactor	φ	-	0,2

Voor het wapeningsstaal wordt er gebruik gemaakt van het staalsoort B500B.

7.3. UITVOERING

Voor de uitvoering van de constructie is er gekozen om de betonnen liggers per schip te vervoeren vanwege het hoge eigen gewicht van de constructie. Hierdoor is het niet mogelijk om de liggers met speciaal transport te vervoeren.

Bij de plaatsing van de liggers is er gekozen om de dubbele T-ligger in twee stukken te plaatsen en op locatie aan elkaar te storten. Dit is noodzakelijk omdat er geen ruimte beschikbaar is om genoeg hijskranen te plaatsen zodat het gehele dek in één keer kan geplaatst worden. Dit principe is weergegeven in Figuur 7.3. Deze koppeling kan gestort worden met VVUHSB of met conventioneel beton en dient verder ontworpen te worden.



Figuur 7.3 Koppeling van de dubbele T-ligger

De stukken zullen geplaatst worden door een tweetal hijskranen van elk 650 ton. Deze hijskranen zullen worden ondersteund door een kraanschip. Voor een uitgebreidere beschrijving van de uitvoering verwijzen wij u naar Bijlage D hoofdstuk 6.

7.4. CONSTRUCTIE

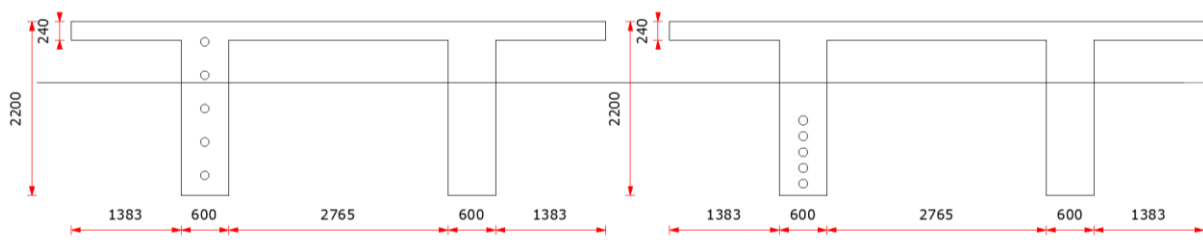
Om de casus uit te werken zijn de randvoorwaarden en eisen van het project van The Royal Welshbrug gebruikt. Hieruit volgen dus ook de overspanningslengte en de eisen met betrekking tot de hoogte van de brug die zijn aangehouden.

De benodigde voorspanning is eerst handmatig uitgerekend. Daarna zijn deze in het rekenprogramma ALP gezet. Uit ALP zijn uiteindelijk de krommingsdrukken en het globaal ontwerp gegenereerd. De uitwerking van de voorspanning is te vinden in Bijlage G. De uitwerking in ALP zijn te vinden in Bijlage H en Bijlage I.

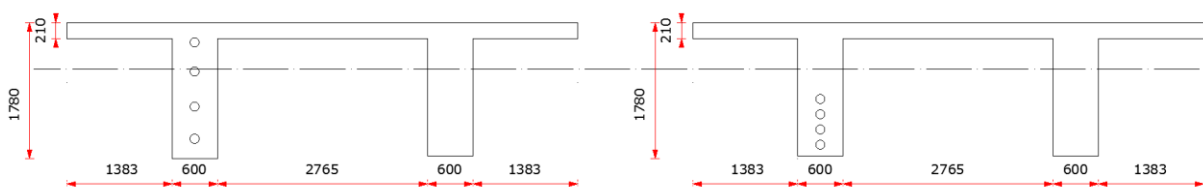
Tabel 7-2 Voorspanning voor conventioneel beton en VVUHSB

	Conventioneel beton:	VVUHSB:
Kabels ⁶	10x 22 strengen (Øext 107)	8x 25 strengen (Øext 117)
σ_{p0}	1370 MPa	1370 MPa
Tijdsafhankelijk verlies	12 %	6 %
Δw	4 mm	4 mm
Wrijvingscoëfficiënt μ	0.18	0.18
Richtingsveranderingscoëfficiënt k	0.006 rad/m	0.006 rad.m

Om bovenstaande voorspanning in de doorsnede te verwerken resulteert dit in de dwarsdoorsnedes als in Figuur 7.4 en Figuur 7.5.



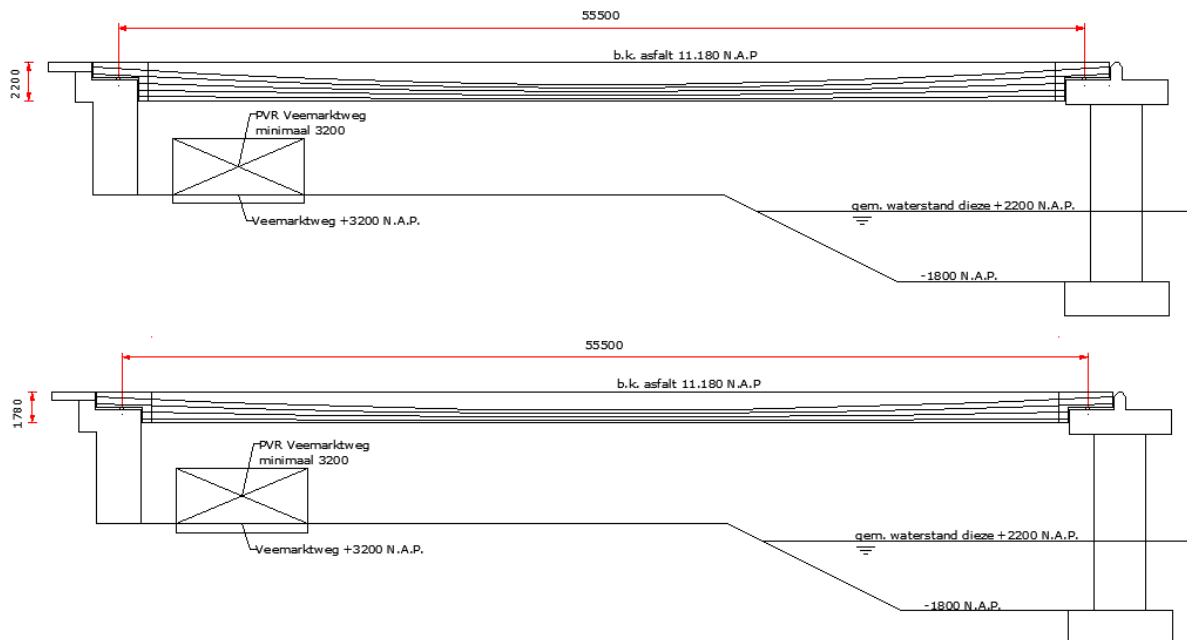
Figuur 7.4 Doorsnedes van conventioneel beton met links de situatie bij de oplegpunten en rechts in het veldmidden



Figuur 7.5 Doorsnedes van UHSB met links de situatie bij de oplegpunten en rechts in het veldmidden

⁶ Voor conventioneel beton zijn in eerste instantie 23 strengen per kabel ontworpen. Echter zijn er 22 strengen per kabel ingevoerd in de ALP-berekening. Dit verschil is in deze fase van het ontwerp verwaarloosbaar geacht. In een latere ontwerpfase kan dit nader ontworpen worden.

Bovenstaande dwarsdoorsneden, samen met de maximale overspanningslengte zoals bepaald van de Royal Welshbrug, resulteert in de langsdoorsnede als in Figuur 7.6.



Figuur 7.6 Langsdoorsnede van conventioneel beton (boven) en VVUHSB (onder)

7.5. BELASTINGEN

Een uitgebreide toelichting van de belastingsgevallen en de bijbehorende combinaties is weergegeven in Bijlage D hoofdstukken 7 t/m 8.

8. DIMENSIONERING DEKCONSTRUCTIE

8.1. CONVENTIONEEL BETON

8.1.1. Langsrichting

	Optredend	Opneembaar	U.C.
Moment	$M_{Ed} = 6.545,9 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 13.966,3 \text{ kNm}$	0,47
Dwarskracht	$V_{Ed} = 2.431,4 \text{ kN}$	$V_{Rd,s} = 3.149,7 \text{ kN}$	0,77
Scheurwijdte	$\sigma_b = 2,9 \text{ MPa}$	$f_{ctm} = 4,1 \text{ MPa}$	0,71
Doorbuiging	$u = 148,2 \text{ mm}$	$u_{max} = 185 \text{ mm}$	0,80

Hiervoor is de wapening aangehouden zoals in paragraaf 8.1.3.

8.1.2. Dwarsrichting

	Optredend	Opneembaar	U.C.
Moment bovenzijde	$M_{Ed} = 60,3 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 95,1 \text{ kNm}$	0,63
Moment onderzijde	$M_{Ed} = 36,4 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 66,1 \text{ kNm}$	0,55
Dwarskracht	$V_{Ed} = 81,2 \text{ kN}$	$V_{Rd,c} = 148,7 \text{ kN}$	0,55
Scheurwijdte bovenzijde	$w_k = 0,19 \text{ mm}$	$w_{max} = 0,20 \text{ mm}$	0,95
Scheurwijdte onderzijde	$w_k = 0,16 \text{ mm}$	$w_{max} = 0,20 \text{ mm}$	0,80
Doorbuiging	$u = 0,56 \text{ mm}$	$u_{max} = 11,2 \text{ mm}$	0,07

Hiervoor is de wapening aangehouden zoals in paragraaf 8.1.3.

8.1.3. Benodigde wapening

Om bovengenoemde krachten op te kunnen nemen is onderstaande wapening benodigd.

Soort wapening	Aantal staven	Diameter
Langswapening lijf	6	Ø25
Beugels lijf	h.o.h. 150	Ø12
Dwarswapening flens boven	h.o.h. 150	Ø16
Dwarswapening flens onder	h.o.h. 125	Ø12
Langswapening flens	h.o.h. 200	Ø12
Beugels Ophangwapening	h.o.h. 85	Ø32

Splijtwapening

Verticaal bovenzijde:	Wapening:
Kopsplijt	9 staven Ø16
Primair	9 staven Ø25
Secundair	9 staven Ø12
Hoeksplijt	9 staven Ø12

Verticaal onderzijde	Wapening:
Kopsplijt	9 staven Ø16
Primair	9 staven Ø25
Secundair	9 staven Ø12
Hoeksplijt	9 staven Ø12

Horizontaal bovenzijde	Wapening:
Kopsplijt	6 staven Ø12
Primair	27 staven Ø32
Secundair	26 staven Ø32

Horizontaal onderzijde	Wapening:
Kopsplijt	9 staven Ø12
Primair	41 staven Ø32
Secundair	41 staven Ø32

8.2. VVUHSB

8.2.1. Ductiliteitsgrens

Wanneer er wordt voldaan aan de ductiliteitsgrens hoeft er niet voldaan te worden aan de minimum wapeningseis. De vezels zorgt dan voor voldoende ductiliteit in de doorsnede.

$$\frac{1}{0,3} \int_0^{0,3} \frac{9}{1,25} dw \geq \max(0,4 * 12,9; 3 \text{ MPa})$$

$$7,2 \geq \max(5,16; 3)$$

Hieruit volgt dat de doorsnede voldoet aan de ductiliteitseis.

8.2.2. Langsrichting

	Optredend	Opneembaar	U.C.
Moment	$M_{Ed} = 14.386,77 \text{ kNm}$	$M_{rd} = 41.033,0 \text{ kNm}$	0,36
Dwarskracht	$V_{Ed} = 2.175,0 \text{ kN}$	$V_{Rd} = 4.020,9 \text{ kN}$	0,54
Scheurwijdte	$\sigma_{w;Ed} = 10,3 \text{ MPa}$	$f_{ctm} = 12,9 \text{ MPa}$	0,80
Doorbuiging	$u = 93,7 \text{ mm}$	$u_{max} = 185 \text{ mm}$	0,51

Hiervoor is de wapening aangehouden zoals in paragraaf 8.2.4.

8.2.3. Dwarsrichting

	Optredend	Opneembaar	U.C.
Moment bovenzijde	$M_{Ed} = 49,9 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 68,5 \text{ kNm}$	0,73
Moment onderzijde	$M_{Ed} = 36,4 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 42,2 \text{ kNm}$	0,86
Dwarskracht	$V_{Ed} = 70,2 \text{ kN}$	$V_{Rd} = 1.430,1 \text{ kN}$	0,05
Scheurwijdte bovenzijde	$\sigma_{w;Ed} = 4,46 \text{ MPa}$	$f_{ctm} = 12,9 \text{ MPa}$	0,35
Scheurwijdte onderzijde	$\sigma_{w;Ed} = 2,94 \text{ MPa}$	$f_{ctm} = 12,9 \text{ MPa}$	0,23
Doorbuiging	$u = 1,65 \text{ mm}$	$u_{max} = 3,36 \text{ mm}$	0,49

Hiervoor is de wapening aangehouden zoals in paragraaf 8.2.4.

8.2.4. Benodigde wapening

Om bovengenoemde krachten op te kunnen nemen is onderstaande wapening benodigd.

Soort wapening	Aantal staven	Diameter
Langswapening lijf	Niet benodigd	
Beugels lijf	Niet benodigd	
Dwarswapening flens boven	h.o.h. 150	Ø16
Dwarswapening flens onder	Niet benodigd	
Langswapening flens	Niet benodigd	
Ophangwapening	Niet benodigd	

Splijtwapening

Verticaal bovenzijde	Wapening:
Kopsplijt	Niet benodigd
Primair	Niet benodigd
Secundair	Niet benodigd
Hoeksplijt	Niet benodigd

Verticaal onderzijde	Wapening:
Kopsplijt	Niet benodigd
Primair	Niet benodigd
Secundair	Niet benodigd
Hoeksplijt	Niet benodigd

Horizontaal bovenzijde	Wapening:
Kopsplijt	Niet benodigd
Primair	Niet benodigd
Secundair	Niet benodigd

Horizontaal onderzijde	Wapening:
Kopsplijt	Niet benodigd
Primair	31 staven Ø32
Secundair	31 staven Ø32

8.3. CONCLUSIE

Uit de resultaten van bovenstaande berekeningen blijkt dat bij conventioneel beton het meest kritieke ontwerpcriterium de scheurwijdte is. In de dwarsrichting blijkt hiervoor ook de meeste wapening nodig te zijn voor zowel de bovenzijde als de onderzijde.

Verder is er spleetwapening nodig om de voorspankrachten in te leiden. Deze zullen geplaatst worden in de eerste 3,15 meter van de constructie, welke massief uitgevoerd zal worden. Deze spleetwapening kan nog kleiner gedimensioneerd worden, aangezien deze nu conservatief is benaderd. Dit komt door de volgende punten:

- De volledige voorspankracht wordt door de lijven terug ingeleid. Echter zal er in de realiteit ook een deel naar de flens worden overgedragen.
- Voor de secundaire spleetwapening is de hoek van de interne spanningsafdracht op 45 graden aangehouden. Dit is een conservatieve benadering van de spanningsafdracht.

Wat opvalt, is dat bij VVUHSB niet de BGT, maar de UGT het meest kritieke ontwerpcriterium is. Voor de scheurwijdte is hierbij geen wapening nodig, maar voor de momentweerstand in de dwarsrichting wel. Dit is in lijn met wat in de oefenberekening is gebleken, namelijk dat de scheurwijdte drastisch afneemt bij het toepassen van VVUHSB ten opzichte van conventioneel beton.

Daarnaast blijkt er ook bijna geen spleetwapening nodig bij VVUHSB. Alleen in het horizontale deel onderin de constructie kunnen de spleetkrachten niet opgenomen worden en zijn daar 62 staven $\varnothing 32$ toegepast. Deze zouden in een vervolgend ontwerpstadium gereduceerd kunnen worden, aangezien er nog geen vezelaandeel is meegerekend. Daarnaast geldt voor VVUHSB dezelfde twee punten als bij de spleetwapening voor conventioneel beton en is ook deze variant conservatief benaderd.

9. KOSTEN

9.1. PRODUCTIE

Een van de redenen dat VVUHSB niet vaker wordt toegepast zijn de initiële productiekosten. Oostra [24] heeft dit uitgebreid beschreven in zijn onderzoek naar de toepassing van VVUHSB in bruggen die gebouwd worden met de *'incremental launching method'*. Hij heeft de productiekosten van conventioneel beton en VVUHSB naast elkaar afgezet. Waardes die hij heeft gebruikt voor zijn kostenberekening zijn gebruikt om een inschatting te maken voor deze casus. Deze zijn verder uitgewerkt in Tabel 9-1.

Tabel 9-1 kostenvergelijk VVUHSB en conventioneel beton [24]

Materiaal	Prijs/eenheid			VVUHSB			Conventioneel beton			
<i>Cement</i>	0,120	€/kg	705	kg	84,60	€	350	kg	42,00	€
<i>Zand/grind</i>	0,018	€/kg	1010	kg	18,18	€	1800	kg	32,40	€
<i>Vulstof</i>	0,15	€/kg	-	kg	-	€	25	kg	3,75	€
<i>Gemalen kwarts</i>	0,030	€/kg	210	kg	6,30	€	-	kg	-	€
<i>Silica fume</i>	0,300	€/kg	230	kg	69,00	€	-	kg	-	€
<i>(super)Plastificeerder</i>	0,50	€/kg	17	kg	8,50	€	1	kg	0,50	€
<i>Staalvezels</i>	1,50	€/kg	190	kg	285,00	€	-	kg	-	€
<i>Productiekosten</i>	15	€/st	2	kg	30,00	€	1	kg	15	€
<i>Totaal (€/m³)</i>					501,58	€		kg	93,65	€

Hierin is duidelijk te zien dat VVUHSB meer dan 5x zo duur is in productiekosten dan conventioneel beton. Wat opvalt in de productiekosten van VVUHSB is dat meer dan de helft van de kosten bestaat uit de staalvezels. Verder zijn de productiekosten tweemaal zo hoog bij VVUHSB, ook dit komt door de toevoeging van vezels. Bovenstaande kosten zijn gebaseerd op een prefabricage van de onderdelen. De productiekosten voor in-situ zullen hoger zijn.

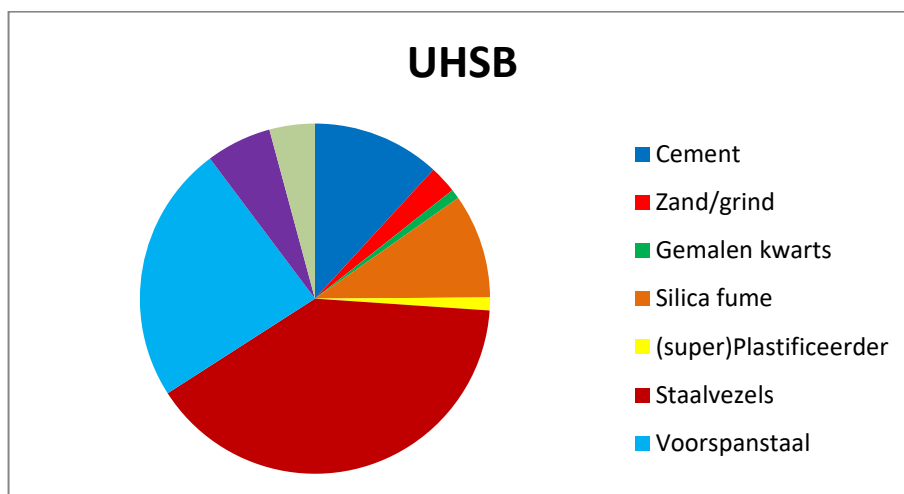
9.2. PROJECTKOSTEN

De benodigde hoeveelheid beton en wapeningsstaal voor VVUHSB kleiner dan bij conventioneel beton. Zo zijn er minder voorspanstrengen toegepast en is er helemaal geen wapening nodig. Dit zorgt ervoor dat het verschil in kosten aanzienlijk minder wordt.

Tabel 9-2 Brugdek VVUHSB variant

Onderdeel	Hoeveel		Prijs		Totaal
Beton	190	m3	501,58	€/m3	€ 95.300,20
Voorspanstaal	12966,3495	kg	2,5	€/kg	€ 32.415,87
Wapeningsstaal	8218,47233	kg	1	€/kg	€ 8.218,47
Totaal					€ 135.934,55

Zoals te zien is in Tabel 9-2 bestaan de kosten van het brugdek in VVUHSB voor 75% uit de kosten van het beton zelf. De overige 25% bestaat uit voorspanstaal en wapeningsstaal.



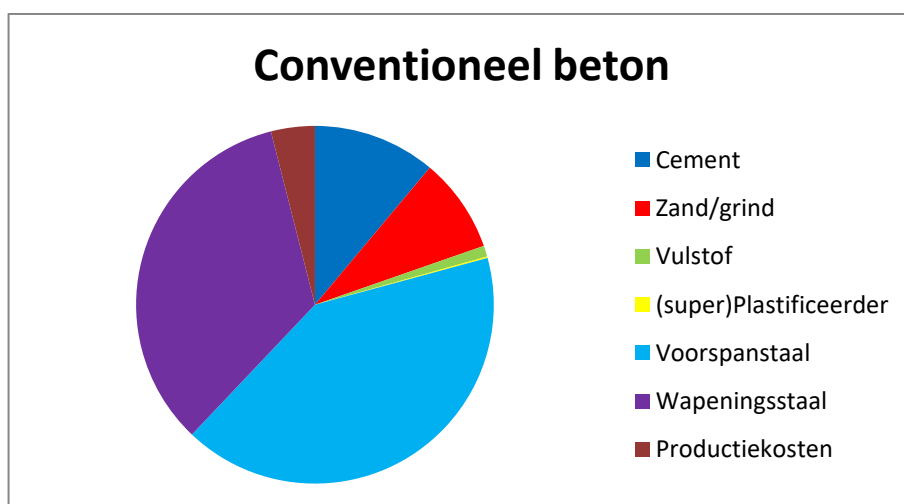
Figuur 9.1 Kostenverdeling per kuub VVUHSB

In Figuur 9.1 is duidelijk te zien dat het grootste gedeelte van de kosten nog steeds bepaald wordt door de toevoeging van staalvezels. Dit is nog steeds bijna de helft van de kosten. Daarna is de hoeveelheid voorspanstaal de grootste kostenpost.

In Tabel 9-3 zijn de kosten voor het brugdek in conventioneel beton te zien. Bij deze variant is het grootste deel van de kosten het voorspanstaal. Dit is bijna de helft van de kosten van het brugdek. De andere helft van de kosten bestaat uit de kosten van het beton en van het wapeningsstaal.

Tabel 9-3 Brugdek conventioneel beton variant

Onderdeel	Hoeveel		Prijs		Totaal
Beton	226,1	m3	93,65	€/m3	€ 21.174,27
Voorspanstaal	14130,89964	kg	2,5	€/kg	€ 35.327,25
Wapeningsstaal	29053,85662	kg	1	€/kg	€ 29.053,86
Totaal					€ 85.555,37



Figuur 9.2 Kostenverdeling per kuub conventioneel beton

In Figuur 9.2 is de kostenverdeling per kuub conventioneel beton te zien. Hieruit wordt duidelijk dat bijna de helft van de kosten naar het voorspanstaal gaan. Daarnaast is een kwart van de kosten voor het wapeningsstaal.

Hieruit blijkt dat uitvoeren van het brugdek in VVUHSB 64% duurder is dan bij het gebruik van conventioneel beton. Wanneer er echter naar het gehele project gekeken wordt, dan zal dit verschil kleiner worden. In het brugdek zit een gewichtsverschil van 90 ton, van 565 ton naar 495 ton. Dit betekent ook dat de onderbouw minder zwaar geconstrueerd kan worden.

Verder is bekend dat VVUHSB een betere duurzaamheid heeft dan conventioneel beton. Dit zou moeten resulteren in lagere onderhoudskosten. Ondanks dat er nog geen projecten met VVUHSB het einde van hun levensduur hebben bereikt wordt verwacht dat VVUHSB een langere levensduur zal hebben dan conventioneel beton. Dit komt door de dichte structuur, waardoor het beton en de wapening niet aangetast zal worden. Ook dit speelt mee in de kostenafweging.

Hier staat tegenover dat er nog geen richtlijnen voor VVUHSB zijn, zoals de Eurocode 2 voor conventioneel beton. Het ontwerpen van de constructie en het verifiëren dat deze constructie aan de eisen voldoet zal dus meer tijd kosten dan voor conventioneel beton. Er zal gewerkt moeten worden met vooraf bestudeerde mengsels, zoals degen die zijn opgenomen in de 'interim recommendations', of er zal door proeven onderbouwd moeten worden hoe het VVUHSB-mengsel zal reageren. Daarnaast is er geen zekerheid over hoe het UHSB op lange termijn zal reageren. Dit zal een onzekerheid meebrengen voor de opdrachtgever.

10. CONCLUSIE

UHSB is een betonmengsel met een geoptimaliseerde samenstelling. Het principe is het creëren van een korrelstructuur die optimaal op elkaar aansluit en daarmee weinig holle ruimten bevat. Door de zeer dichte korrelstructuur van het betonmengsel kunnen krachten zich makkelijker verspreiden door het mengsel en ontstaan er geen pieken in de inwendig optredende spanningen. Hieruit volgt een hoge cilinderdruksterkte van een UHSB mengsel in relatie tot conventioneel beton. Deze optimale korrelstructuur wordt verkregen door het toevoegen van fijnere toeslagmaterialen. Dit dichte korrelskelet heeft ook als gevolg dat het beton moeilijker doordringbaar wordt voor vloeistoffen en deze dus minder invloed hebben op de levensduur van het beton en de eventuele wapening. Meestal worden UHSB mengsels geoptimaliseerd door de toevoeging van vezels, resulterende in VVUHSB. Deze vezels zorgen ervoor dat de treksterkte van het beton hoger wordt, de elasticiteitsmodulus hoger wordt en dat de optredende scheurwijdte minder wordt.

Huidige infrastructurele toepassingen blijven tot op heden nog beperkt. Voorbeelden als de Catherinabrug in Leiden of The Footbridge of Peace in Seoul zijn een paar voorbeelden die in VVUHSB zijn uitgevoerd. Deze projecten zijn als prestige projecten gebouwd om te laten zien wat het materiaal kan. Verdere toepassingen blijven bij kleine modulaire bruggen, ter vervanging van bijvoorbeeld houten stadsbruggen. Het achterblijven van grotere projecten in VVUHSB kent verschillende redenen. Zo zijn de hoge investeringskosten van het materiaal een struikelblok voor verschillende opdrachtgevers. Daarnaast is de stroperigheid van het materiaal een belemmering tijdens het storten en kan het in situ storten van het materiaal een struikelblok vormen in de uitvoering. Verder is het uitblijven van internationaal erkende rekenregels, waarmee de veiligheid en duurzaamheid van een constructie eenduidig kan worden berekend en geverifieerd, een belangrijke reden voor de geringe toepassing van VVUHSB.

Deze internationale rekenregels zijn lastig op te stellen voor VVUHSB, aangezien de samenstelling van het betonmengsel veel specifieker is dan bij conventioneel beton. Een kleine wijziging in de samenstelling zorgt voor een nieuw materiaal met zijn eigen gedrag.

In de huidige wet- en regelgeving is er de Eurocode 2 welke geldig is voor betonsterkteklassen tot en met een kubusdruksterkte van 105 MPa. VVUHSB valt echter niet binnen deze marge, waardoor de huidige Eurocode niet één op één gebruikt kan worden. Er wordt momenteel door verschillende instanties gewerkt aan algemeen geldende richtlijnen voor het gebruik van VVUHSB. Op moment van schrijven van deze scriptie is de meest complete richtlijn diegene van de AFGC genaamd 'Interim Recommendations' Revised Edition, June 2013. Dit is een richtlijn uitgebracht door de Franse betonvereniging die een rekenmethode beschrijft voor het gebruik van VVUHSB mengsels aan de hand van de Eurocode 2. Een andere optie voor het rekenen met VVUHSB is proef onderbouwd aantonen van de gebruikte materiaaleigenschappen. Dit vraagt om vele proeven en testmodellen om aan te tonen dat het product reageert op de manier zoals is gesteld. Een aantal Nederlandse betonproducenten heeft hiervoor gekozen, bij gebrek aan geldende richtlijnen. Een groot nadeel hieraan zijn de hoge investeringskosten voor het ontwerpen van een specifiek mengsel. Daarnaast dienen, bij het gebruik van een ander mengsel de materiaaleigenschappen opnieuw proefondervindelijk te worden aangetoond, wat ontwikkelingen hierin remt.

Wat betreft de mechanische eigenschappen zijn er aanzienlijke verbeteringen te constateren ten opzichte van conventioneel beton. Zo heeft VVUHSB een hogere cilinderdruksterkte dan conventioneel beton. Een trend die zich voordoet bij de toename van de druksterkte is dat de plastische tak van het spanning-rekdiagram op druk relatief klein is ten opzichte van de elastische tak. Dit betekent dat het materiaal brosser gedrag vertoont bij een toename van de druksterkte, hetgeen ook het geval is bij VVUHSB. Om de ductiliteit van het beton te verhogen worden er vezels toegevoegd aan het mengsel om een bros bezwijkmechanisme te voorkomen. Door de toevoeging van vezels wordt ook de treksterkte van VVUHSB hoger dan van conventioneel beton en mag er in tegenstelling tot conventioneel beton gerekend worden met de treksterkte van een betonmengsel voor het bepalen van de momentweerstand van een doorsnede. Naast een toename in treksterkte wordt er ook een verhoogde elasticiteitsmodulus geconstateerd, wat wordt veroorzaakt door de hogere sterkteklasse en de toevoeging van vezels.

Er zijn veel verschillende soorten vezels die toegevoegd kunnen worden aan beton. De meest gebruikte vezels zijn staalvezels en PVA-vezels. De staalvezels hebben een gemiddeld grotere afmeting en zorgen voor een hogere opneembare trek- en buigsterkte. Een belangrijk aspect bij staalvezels is de vorm van de vezel. Een goede aanhechting met de rest van het beton is leidend voor het nut van de vezels.

De PVA-vezels zijn gemiddeld kleiner en worden vaak in grotere hoeveelheden aan het mengsel toegevoegd. Het materiaal van de PVA-vezels hecht zich vanzelf goed aan het beton, de vorm van de vezels is hiervoor dus minder van belang.

De samenstelling van het vezelversterkte betonmengsel heeft invloed op het gedrag van VVUHSB aan de trekzijde van het spanning-rekdiagram. Zo zal afhankelijk van de hoeveelheid, lengte en type vezels het materiaal softening of hardening gedrag vertonen. Het grote verschil is dat bij hardening de treksterkte van het materiaal zal toenemen na intreding van de eerste scheur en bij softening het materiaal een weker gedrag vertoont na intreding van de eerste scheur bij een verdere toename van de belasting.

Uit de balkberekening is gebleken dat bij éénzelfde doorsnede met dezelfde hoeveelheid wapening, het toepassen van VVUHSB de minste invloed heeft op de momentweerstand en de doorbuiging van de balk. Dit komt door een relatief klein aandeel van de trekzone van beton in verhouding tot de drukzone en het wapeningsaandeel. Daarnaast is de toename van de elasticiteitsmodulus klein in verhouding tot de toename van de druksterkte, waarmee ook de doorbuiging in mindere mate afneemt. Kijkend naar de dwarskrachtweerstand is een enorme sprong waar te nemen in de resultaten. De dwarskrachtcapaciteit van VVUHSB verschilt een factor vijf ten opzichte van conventioneel beton, doordat de vezels als dwarskrachtwapening fungeren. Ook de scheurwijdte wordt aanzienlijk minder, doordat de toevoeging van vezels zorgen voor een groot aantal kleine scheuren in plaats van één geconcentreerde scheur tussen de wapeningsstaven (kleinere scheurafstand).

Voor de casus is een vergelijking gemaakt tussen VVUHSB en conventioneel beton met respectievelijk betonsterkteklasse C170/200 en C50/60. Hierbij is uitgegaan van een lange overspanning van 57 meter, waardoor voorspanning noodzakelijk is in beide situaties. Hieruit is gebleken dat het plaatsen van de voorspanning in de constructie maatgevend is voor het ontwerp. Wel kan er door de toepassing van VVUHSB met een reductie van de hoeveelheid voorspanning worden ontworpen. Dit

zit hem in het feit dat bij VVUHSB de toelaatbare trekspanning in de doorsnede hoger ligt dan bij conventioneel beton, waardoor er minder kabels nodig zijn in de lijven van de constructie. Daarnaast kan door de verbeterde duurzaamheidseigenschappen van VVUHSB de dekking worden verminderd, wat resulteert in een flensdikte van 210 mm ten opzichte van de 240 mm van conventioneel beton. Uiteindelijk is de constructiehoogte van 2200 mm voor conventioneel beton gereduceerd tot 1780 millimeter door het gebruik van VVUHSB.

Een ander bijkomend voordeel is het weg mogen laten van de minimumwapening en de minimum dwarskrachtwapening in de doorsnede. Dit is te danken aan de vezels die fungeren als dwarskrachtwapening en wanneer er wordt voldaan aan de ductiliteitseis ook als minimumwapening.

Vaak wordt er nog niet gekozen voor het toepassen van VVUHSB in verband met de hoge initiële kosten die het met zich meebrengt. Wanneer er puur naar de fabricatiekosten van het mengsel wordt gekeken dan is VVUHSB ruim vijf maal zo duur als conventioneel beton, 500 €/m³ ten opzichte van 95 €/m³. Als dit op de casus wordt toegepast dan is het verschil al stukken kleiner. Door de slankere constructie, minder voorspanwapening en het mogelijk ontbreken van zachtstaal wapening is het verschil in kosten kleiner. De materiaal kosten van het brugdek in VVUHSB worden geschat op 136 ton en van conventioneel beton 86 ton. Hieruit blijkt dat het toepassen van VVUHSB nog steeds duurder is dan conventioneel beton. Dit verschil in kosten zou deels gecompenseerd kunnen worden door een reductie in de onderbouw (VVUHSB brugdek weegt minder) en een langer verwachte levensduur.

Uit de balkberekening en de uitgewerkte casus blijkt het volgende.

Voordelen:

- + Dichte korrelstructuur zorgt voor verhoogde duurzaamheid;
- + Treksterkte mag meegenomen worden in UGT-berekeningen door toevoeging van vezels;
- + Hoge opneembare dwarskracht door toevoeging van vezels;
- + Lagere scheurwijdte door spreiding scheuren tussen de vezels;
- + Reductie van voorspanning door hoger toelaatbare trekspanning in doorsnede;
- + Wegvallen van de minimumwapeningseis.

Nadelen:

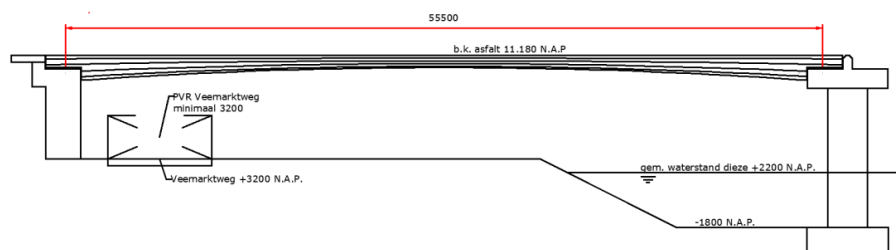
- Gebrek aan duidelijke en uniforme internationaal erkende richtlijnen;
- Diversiteit in betonmengsels met elk eigen gedrag;
- Hoge kosten van betonmengsels;
- Lastige verwerkbaarheid in situ door stroperigheid mengsel.

11. DISCUSSIE

Het product dat is opgeleverd aan het einde van deze scriptie geeft een voorontwerp van een fietsbrug weer. Deze is uitgewerkt in conventioneel beton en VVUHSB.

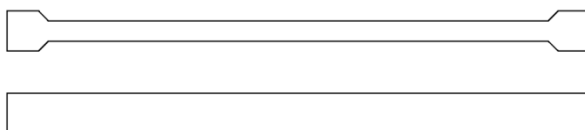
Het ontwerp in conventioneel beton zal dichterbij de realiteit liggen, dan die van VVUHSB. Dit komt voornamelijk doordat constructies in conventioneel beton een van de expertises is van de constructeurs bij Wagemaker. Hierdoor zijn realistischere aannames gemaakt met betrekking tot de dimensionering van het brugdek. In de loop van de casusstudie is gebleken dat er op veel vlakken nog geoptimaliseerd had kunnen worden, voornamelijk bij VVUHSB. Anderzijds is de volledige uitwerking van de constructie gelimiteerd gebleven om zo de opdracht niet complex te maken. Hieronder zijn een aantal punten genoemd waarop de constructie in VVUHSB verder geoptimaliseerd had kunnen worden.

- De dikte van de flens is aangenomen op 210 millimeter. Hierbij is de dikte gereduceerd ten opzichte van conventioneel op basis van de minder benodigde dekking. De dikte van deze flens zou gereduceerd kunnen worden, omdat de doorsnede in dwarsrichting ruim voldoet aan de ontwerpcriteria. Omdat de betondrukzone in de UGT binnen de flens dient te vallen, dient dit aanvullend beoordeeld te worden.
- Het grootste gedeelte van de belasting is het eigen gewicht van de constructie. Bij dit voorontwerp is ervoor gekozen om de hoogte van de lijven constant te houden over de gehele lengte. Deze zou eventueel met een parabolisch verloop gereduceerd kunnen worden over de lengte van de constructie om op deze wijze het eigen gewicht te reduceren. Zoals schematisch weergegeven in Figuur 11.1.



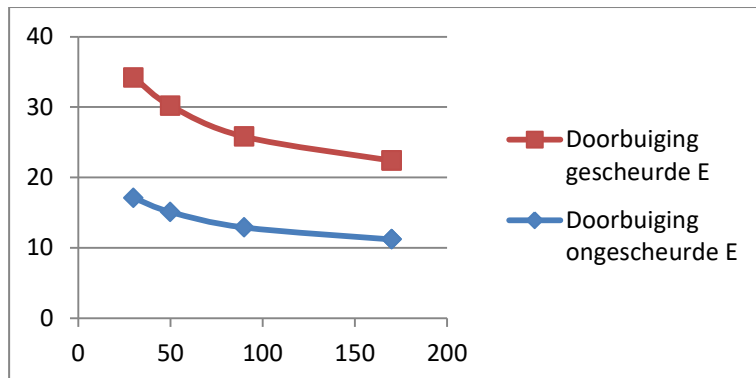
Figuur 11.1 Schematisatie knippen in hoogte lijf

- Ook de breedte van de lijven is tot nu toe constant gehouden, gebaseerd op de inleiding van de voorspankrachten. Ook hierin zou in het veldmidden minder oppervlakte nodig zijn dan nu is toegepast. De breedte van de lijven kan gereduceerd worden na het inleiden van de voorspankrachten. Een schematisatie van dit principe is weergegeven in Figuur 11.2. (De verhouding in deze tekening is niet correct om zo het principe duidelijk te maken)



Figuur 11.2 Boven-aanzicht schematisatie knippen in breedte lijf

Bij de oefenberekening is er gekozen om te rekenen met een elasticiteitsmodulus van een ongescheurde doorsnede. Hiervoor is gekozen omdat de verhouding tussen de resultaten gelijk zal blijven, wanneer er met een ongescheurde of een gescheurde situatie wordt gerekend. De relatie tussen de optredende doorbuiging en het gebruikte betonsoort zal gelijk blijven, zoals is geschematiseerd in Figuur 11.3. Voor de insteek van de oefenberekening bestaat geen meerwaarde om de gescheurde elasticiteitsmodulus te bepalen.



Figuur 11.3 Verschil in doorbuiging tussen gescheurde en ongescheurde doorsnede

Er moet gerealiseerd worden dat de getrokken conclusies uit de casusstudie alleen geldig zijn voor statisch bepaalde voetgangersbruggen, waarbij de dimensionering van de dekconstructie is uitgewerkt als dubbele T-ligger. Zo kan het zijn dat andere uitgangspunten nieuwe conclusies met zich meebrengen. Om deze reden zijn de conclusies uit de balkberekening slechts een indicatie en mogen deze niet één op één overgenomen worden bij het ontwerp van de voorgespannen voetgangersbrug of andere projecten.

Voor dit project is niet ingegaan op onderstaande aspecten:

- Dynamica;
- Duurzaamheid;
- Temperatuursontwikkelingen;
- Zettingen;
- Onderbouw;
- Bouwkosten conventioneel beton v.s. VVUHSB;
- Productietijd;
- Omgeving.

12. AANBEVELINGEN

Bij het ontwerpen van de brugconstructie in onze casus is gebleken dat de hoogte van de constructie afhankelijk is van de benodigde hoeveelheid voorspanwapening. Hierdoor is de reductie in constructiehoogte minder dan vooraf verwacht.

Als ernaar gestreefd wordt om dit materiaal optimaal te benutten dan dient er gekeken te worden naar kleinere overspanningen of constructiemethodes waarbij de hoogte niet bepaald wordt door de benodigde hoeveelheid voorspanwapening, maar door de materiaaleigenschappen of de geometrie van de doorsnede.

Als er gekeken wordt naar de toekomst van betonconstructies, dan zal VVUHSB daar zeker een rol in spelen. Echter de afwezigheid van uniformiteit in het gedrag van VVUHSB is een belemmering voor de doorbraak van het materiaal. Hierdoor is het lastig om één algemeen geldende norm op te stellen voor een groot scala aan betonmengsels. Door het uitblijven van deze norm is het minder aantrekkelijk het materiaal toe te passen in de ontwerpen van projecten.

Wanneer er uniforme richtlijnen zijn voor het ontwerpen met VVUHSB, dan zal de toepassing hiervan aanzienlijk toenemen. Voor Wagemaker is het verstandig om op de hoogte te blijven van ontwikkelingen omtrent dit materiaal. Door tijdig in te springen op actualiteiten en te investeren in kennis omtrent VVUHSB kan Wagemaker zich onderscheiden in de markt.

Wanneer Wagemaker wil gaan werken met VVUHSB constructies dan is het verstandig om verder onderzoek te doen. Deze scriptie kan als handvat worden gebruikt om het ontwerpproces in te richten, echter is hier voornamelijk gekeken naar de mechanische eigenschappen en de rekenmethodieken en minder naar overige zaken. Om uiteindelijk een volledig beeld te krijgen over het ontwerpen met UHSB dient er nog gekeken te worden naar de funderingsconstructie en onderbouw van de brug. Daarnaast dient er uitgebreider gekeken te worden naar uitvoeringsmethodieken, de kosten en de belasting van het milieu. Verder is er in de casusuitwerking alleen gekeken naar een statisch bepaalde voetgangers- en fietsersbrug, welke is uitgewerkt als een dubbele T-constructie. Het zou verstandig zijn om nog te kijken naar verkeers- of spoorbruggen, statisch onbepaalde constructies en andere constructievormen.

13. BIBLIOGRAFIE

- [1] Hi-Con, „Brochures,” [Online]. Available: <http://www.hi-con.nl/?ID=1687>. [Geopend 15 februari 2017].
- [2] TU Delft, „(vezel versterkt) Ultra Hoge Sterkte Beton,” [Online]. Available: <http://www.uhsb.nl/>. [Geopend 09 febr. 2017].
- [3] Vree, Joost de, „hogesterktebeton,” [Online]. Available: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/hogesterktebeton.shtml>. [Geopend 09 febr. 2017].
- [4] P. S. Martin Hunger, „Praktijkproef bewijst potentie UHSB,” *Betoniek*, pp. 12-16, 2016.
- [5] J. d. Geus, „Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete applied in Railway Bridges,” 2014.
- [6] J. Walraven, „Ultra-hogesterktebeton: een materiaal in ontwikkeling,” *Cement*, pp. 57-31, 2006.
- [7] TU Delft, „samenstelling deel 3; Vulstoffen,” UHSB, [Online]. Available: <http://www.uhsb.nl/?p=260>. [Geopend 14 februari 2017].
- [8] TU Delft, „samenstelling deel 4; Vezels,” UHSB, 2017. [Online]. Available: <http://www.uhsb.nl/?p=278>. [Geopend 17 februari 2017].
- [9] TU Delft, „Serie productie - deel 3; verzeloriëntatie in vvUHSB,” [Online]. Available: <http://www.uhsb.nl/?p=500>. [Geopend 28 Maart 2017].
- [10] E. Lappa, „High strength fibre reinforced concrete: Static and fatigue behaviour in bending,” 2007.
- [11] J. Resplendino, „Recommendations on Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes (Revised Edition, June 2013),” AFGC, 2013.
- [12] TU Delft, „Serie productie – deel 4; nabehandeling (warmte-/stoombehandeling),” [Online]. Available: <http://www.uhsb.nl/?p=579>. [Geopend 28 februari 2017].
- [13] J. P. J. W. N. Cauberg, „Ultrahogesterktebeton: een veelbelovende technologie,” WTCB, 2006.
- [14] Aeneas Media, „Nabehandeling (curing),” *Beton Lexicon*, [Online]. Available: <http://betonlexicon.nl/N/Nabehandeling/>. [Geopend 02 Maart 2017].
- [15] Ductal®, „Why use Ductal®?,” z.d.. [Online]. Available: <http://www.ductal.com/en/engineering/why-use-ductal>. [Geopend 14 april 2017].
- [16] CAE Nederland B.V., „USHB; duurzamer of juist niet,” z.d.. [Online]. Available: <http://www.uhsb.nl/?p=417>.
- [17] R. A.D., „Literatuuronderzoek vvUHSB,” Breijn b.v., Rosmalen, 2011.
- [18] CAE Nederland bv, „Rekenmodel VVUHSB,” *Cement*, nr. 3, pp. 50-57, 2011.
- [19] M. Hunger en P. Spiesz, „Praktijkproef bewijst potentie UHSB,” *Betoniek*, nr. 2, pp. 12-16, 2016.
- [20] J. Pierard en V. Dieryck, „De krimp van jong speciaal beton,” *WCTB*, vol. 1, nr. 2, 2004.
- [21] E. Tazawa en S. Miyazawa, „Influence of cement composition on autogenous shrinkage of concrete,” in *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg (Zweden), 1997.
- [22] E. Fehling, M. Schmidt, J. C. Walraven, T. Leutbecher en S. Fröhlich, „Betonkalender - Ultra High Performance Concrete UHPC - fundamentals - design - examples,” Wiley Vch, Weinheim, 2014.

- [23] H. Ketel, R. Willemse, P. van Rijen en E. Koolen , „Dwarskracht- en kolomberekening VVUHSB,” *Cement*, vol. 63, nr. 6, pp. 86-91, 2011.
- [24] A. Oostra, „Ultra-high performance fiber-reinforced concrete in incremental bridge launching,” TU Delft, Delft, 2015.
- [25] Academie ABI, „Studiehandleiding afstuderen,” 2015.
- [26] Wagemaker, „Over ons,” [Online]. Available: <http://www.wagemaker.nl/over-ons/missie/>. [Geopend 7 februari 2017].
- [27] Cement& Beton, „Ultra-hogesterktebeton,” [Online]. Available: <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/innovaties/ultra-hogesterktebeton>. [Geopend 14 februari 2017].
- [28] G. v. Ekris, Artist, *Catharinabrug, Leiden...slotakkoord..* [Art]. Gerde van Ekris Fotografie, 2016.
- [29] M. d. G. J. v. d. A. Rogier van Nalta, „Extreme engineering met UHSB,” *Cement*, vol. 68, nr. 8, p. 9, 2016.
- [30] CPCI, „Project of the Month; Shawnessy Light Rail Transit Station,” [Online]. Available: http://www.cpci.ca/en/about_us/project_month/december_2003/. [Geopend 17 februari 2017].
- [31] VSL, „The Footbridge of Peace, Seoul - Korea,” *VSL*, p. 2.
- [32] E.-j. Lim, Artist, *Seonyu-kyo pedestrian bridge*. [Art]. osu.edu.
- [33] PCA, „First Use of Ultra-High Performance Concrete,” *Concrete Technology today*, vol. 25, nr. 2, p. 2, 2004.
- [34] C. Braam, Constructieleer voorgespannen beton, 3e red., Boxtel: Aeneas, 2012, p. 146.
- [35] RDW, „Overzicht maten en gewichten in Nederland,” [Online]. Available: [https://www.rdw.nl/SiteCollectionDocuments/Ontheffingen%20\(TET\)/Themasite%20Ontheffingen/Handleidingen/2%20B%201097b%20Overzicht%20maten%20en%20gewichten.pdf](https://www.rdw.nl/SiteCollectionDocuments/Ontheffingen%20(TET)/Themasite%20Ontheffingen/Handleidingen/2%20B%201097b%20Overzicht%20maten%20en%20gewichten.pdf). [Geopend 19 April 2017].
- [36] Kraanbedrijf Nederhoff, „Hijstabellen,” [Online]. Available: <http://www.nederhoff.nl/hijstabellen/>. [Geopend 20 April 2017].
- [37] RDW, „Levertijden incidentele ontheffingen,” RDW Ontheffingen, [Online]. Available: <https://www.rdw.nl/sites/ontheffingen/Paginas/Levertijden.aspx>. [Geopend 27 mei 2017].
- [38] Peineman Holding B.V., „AT-Kranen,” 2017. [Online]. Available: <http://www.peinemann.nl/nl/kranen/mobiele-hijskranen/at-kranen/>. [Geopend 28 5 2017].



BIJLAGE A	VOORSPANNING
BIJLAGE B	TOEPASSINGEN CIVIELE TECHNIEK
BIJLAGE C	OEFENBEREKENING
BIJLAGE D	CASUS UITWERKING
BIJLAGE E	UITWERKING KRACHTENSPEL
BIJLAGE F	BEREKENINGEN CASUS
BIJLAGE G	BEPALING BENODIGDE VOORSPANNING
BIJLAGE H	ALP CB INPUT
BIJLAGE I	ALP UHSB INPUT
BIJLAGE J	SCIA CB INPUT
BIJLAGE K	SCIA UHSB INPUT
BIJLAGE L	WAPENINGSTEKENING CB
BIJLAGE M	WAPENINGSTEKENING UHSB