

Vezelversterkt beton in de markt

Hoofdonderzoek



Documentinformatie

Titel : Vezelversterkt beton in de markt
Soort document : Verslaglegging hoofdonderzoek
Verwijzing : V3.0
Status : Definitief
Datum : 09 maart 2018

Opdrachtgever : ABT consulting Engineers in Velp

Consulting Engineers



Onderwijsinstelling : Hogeschool van Arnhem en Nijmegen



Colofon*Auteur*

Naam	Dhr. Rick Schönthaler
Adres	Stationsstraat 28-02 7031 BR Wehl
Tel (mobiel)	+31 623 037 066
E-mail	rickschonthaler@gmail.com

Bedrijfsbegeleider

Naam	Ing. Michaël Menting
Functie	Projectleider civiele techniek Velp
Tel (werk)	+31 263 683 514
Tel (mobiel)	+31 651 230 881
E-mail	m.menting@abt.eu

Afstudeerbegeleiders

	1 ^e begeleider	2 ^e begeleider
Naam	Ir. Thomas Beuker	Ir. Remmelt Visscher
Functie	Hoofddocent mechanica en constructies	Opleidingscoördinator civiele techniek
Tel (mobiel)	+31 655 208 739	+31 655 208 746
E-mail	thomas.beuker@han.nl	r.visscher@han.nl

Revisielijst

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
V1.0	14 november 2017	RRS	Initiële opzet verslaglegging
V1.0	28 februari 2018	RRS	Voorlopig definitief
V2.0	01 maart 2018	RRS	Opzet MCA
V3.0	09 maart 2018	RRS	Definitief

Voorwoord

Beste geïnteresseerde,

Ter afsluiting van de Bachelor, Civiele Techniek, is er een onderzoek uitgevoerd. In dit onderzoek is er een objectief marktonderzoek opgezet waarin gekeken is naar de potenties van vezelversterkt hoge sterktebeton in de (hoog)bouw.

Er wordt gekeken of de implementatie van hoge sterktebeton de huidige bouwmarkt kan vergroten. Dit onderzoek bevat de bevindingen en aanbevelingen die voortkomen uit het onderzoek.

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met ABT en de onderwijsinstelling Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Dit document is opgesteld door ondergetekende en gecontroleerd door Michaël Menting, projectleider civiele techniek en vezelversterkt ultra hoge sterktebeton specialist van ABT.

Rick Schönthaler



Samenvatting afstudeeronderzoek

Vezelversterkt beton in de markt

Aanleiding onderzoek

Na de 2^e wereldoorlog kwam de wereldeconomie weer op gang en werd de vraag naar hoogbouw steeds groter. Diverse grote steden staan inmiddels bekend om de grote wolkenkrabbers, denk maar aan de skyline van New York of Tokio. Hoewel Nederland niet bekend staat als een hoogbouwcultuur, worden er steeds meer hoge gebouwen gebouwd.

In een samenleving waar innovatie centraal staat is er een constante aanvoer van potentiële nieuwe bouwmaterialen. Zo werd tijdens een internationaal symposium in Marseille (2004), vezelversterkt ultra hoge sterktebeton voor het eerst geïntroduceerd aan de wereld. Vanaf dat moment stond het materiaal in de spotlights en zijn er diverse onderzoeken naar het materiaal geweest.

Vanuit ABT is er gevraagd onderzoek te doen naar de implementatiemogelijkheden van vezelversterkt hoge sterktebeton (VVHSB) in de hoogbouw. Om de potentie van het materiaal inzichtelijk te krijgen, is er een marktonderzoek opgezet. In dit onderzoek zijn huidige bouwmaterialen als conventioneel beton en staal, vergeleken met VVHSB.

Vezelversterkt beton in de markt

Er bestaat een relatie tussen de mate van transparantie in een gebouw en de toegepaste materialen. Het maken van een slank, open gebouw vereist het gebruik van hoogwaardige en veelal dure materialen. Omdat niet elke hoogbouw in Nederland geschikt is voor de toepassing van VVHSB, is de hoogbouw daarom opgedeeld in drie verschillende klassen:

- Budget klasse
- Middenklasse
- High-end klasse

Tijdens het onderzoek ligt de focus op de elementenstructuur van de high-end klasse. Volgend op een structurele analyse, zijn er een aantal alternatieven ontworpen voor zowel de vloeren, als de draagstructuur. Omdat een open, transparante structuur centraal staat in deze klasse, is dit tevens de belangrijkste randvoorwaarde geweest voor de alternatieve ontwerpen.

Om de huidige draagstructuur, bestaande uit stalen walsprofielen, uit te kunnen voeren in VVHSB, zonder dat dit ten koste gaat van de slanke structuur, zijn er nieuwe methodes ontwikkeld op het gebied van wapening. De toepassing van 8.8 draadeinden aan VVHSB maakt een slanke draagstructuur mogelijk die de huidige draagstructuur kan vervangen.

Het originele ontwerp en de bijbehorende alternatieven zijn vervolgens vergeleken in een multicriteria-analyse. In de analyse zijn de ontwerpen vergeleken op het gebied van:

- Bouwfysica
- Benodigde uitvoeringstijd
- Duurzaamheid
- Kosten

Uit de mc-analyse valt te concluderen dat, gekeken naar de implementatiemogelijkheden, VVHSB een meerwaarde oplevert in de draagstructuur. Met de toepassing van VVHSB kan er bijna 50% worden bespaard op uitvoeringskosten ten opzichte van conventionele bouwmethodes.

VVHSB zorgt voor een comfortabele en veilige leefomgeving. Het is een bijzonder duurzaam product met een verhoogde levensverwachting ten opzichte van conventioneel beton en staal. Daarnaast is het materiaal nagenoeg onderhoudsvrij.

Praktisch is het nog niet mogelijk om de volledige structuur in VVHSB toe te passen. Verdere onderzoeken zijn noodzakelijk voor de toepassingsmogelijkheden van de gekozen alternatieven, al zijn de vooruitzichten bijzonder positief.

Leeswijzer

In deze leeswijzer wordt de opbouw van het onderzoek beschreven. Er is een afzonderlijke leeswijzer opgesteld, waarin wordt beschreven waar de hoofd- en deelvragen zijn behandeld in het onderzoek. Deze leeswijzer is te vinden in **'bijlage I - Leeswijzer hoofd- en deelvragen'**.

Het afstudeeronderzoek bestaat uit drie delen. Deel één is het plan van aanpak. In het plan van aanpak wordt de 'rode draad' beschreven die doorlopen wordt tijdens het onderzoek. Deel twee is het literatuuronderzoek. Dit onderzoek vormt de theoretische ondersteuning voor het hoofdonderzoek. Deel drie is het hoofdonderzoek. In dit deel wordt de theorie, opgedaan in het literatuuronderzoek, gebruikt in een praktijkgericht onderzoek. De indeling van dit deel van het onderzoek wordt onderstaand verder beschreven.

De opdrachtbeschrijving is te vinden in hoofdstuk één. In dit hoofdstuk wordt de probleem- en doelstelling beschreven. Voortgekomen uit de probleem- en doelstelling zijn de hoofd- en deelvragen. Deze vragen vormen de basis van het onderzoek.

De inleiding is bestaat uit de hoofdstukken twee en drie. In hoofdstuk twee wordt de Nederlandse hoogbouw beschreven, en wordt deze onderscheiden in drie verschillende klassen. Voortkomend uit dit hoofdstuk is er een referentieontwerp gekozen. Het referentieontwerp wordt beschreven in hoofdstuk drie.

Het volgende deel van het onderzoek bestaat uit het analyseren van het gekozen referentieontwerp en worden de juiste alternatieven opgesteld en uitgewerkt. Er wordt onderscheid gemaakt in de vloeren en de draagstructuur van de constructie. In hoofdstuk vier zijn de vloeren behandeld en in hoofdstuk vijf de draagstructuur.

In hoofdstuk zes wordt de huidige constructie vergeleken met de ontworpen alternatieven in een multicriteria-analyse. Deze analyse bevat onderwerpen gerelateerd aan bouwfysica, bouwtijd, duurzaamheid en kosten.

Op basis van de technische analyse in hoofdstuk vier en vijf en de multicriteria-analyse in hoofdstuk zes, is er een conclusie getrokken, en beschreven in hoofdstuk zeven. Volgend op de conclusie zijn er een aantal aanbevelingen gedaan voor een vervolgonderzoek.

Inhoudsopgave

INLEIDING	6
1 OPDRACHTBESCHRIJVING.....	7
1.1 PROBLEEMSTELLING	7
1.2 DOELSTELLING.....	8
1.3 HOOFD- EN DEELVRAGEN	9
1.4 PROJECTRESULTAAT	10
1.5 PROJECTSCOPE	10
2 HOOGBOUW IN NEDERLAND.....	11
2.1 VERSCHILLENDE SOORTEN HOOGBOUW	11
2.2 GESCHIKTE KLASSE VOOR VVHSB.....	13
3 REFERENTIEONTWERP	14
3.1 DE MONTEVIDEO	14
3.2 FLEXIBEL EN RUIMTELIJK.....	15
4 VLOEREN	16
4.1 ANALYSE HUIDIGE STRUCTUUR.....	16
4.2 BOUWFYSISCH GELIMITEERD	17
4.3 BEREKENINGEN	18
4.4 ALTERNATIEF VLOERONTWERP	19
4.5 SUBCONCLUSIE	21
5 DRAAGSTRUCTUUR	22
5.1 UITGANGSPUNTEN	22
5.2 ANALYSE HUIDIGE STRUCTUUR.....	23
5.3 OPSCHALEN VAN HET WAPENINGSSTAAL	25
5.4 DRUKREK VEZELVERSTERKT BETON	25
5.5 TOEPASSEN 8.8 DRAADEINDEN	26
5.6 BEREKENINGEN	27
5.7 ALTERNATIEVE DRAAGSTRUCTUUR	28
5.8 IMPACT OP FUNDERING	31
5.9 SUBCONCLUSIE	32
6 MULTICRITERIA-ANALYSE	33
6.1 BOUWFYSICA	34
6.2 BOUWTIJD	35
6.3 DUURZAAMHEID	37
6.4 KOSTEN	38
6.5 SUBCONCLUSIE	40
7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	41
BEGRIPPENLIJST	42
ACRONIEMEN	44
SYMBOLEN	45
BIBLIOGRAFIE.....	46

Bijlagen

Technische analyse en onderbouwing

Bijlage I	- Leeswijzer hoofd- en deelvragen.
Bijlage II	- Technische analyse hoogbouwklasse.
Bijlage III	- Technische rapportage vloeren.
Bijlage IV	- Technische rapportage draagstructuur.
Bijlage V	- Kostenvergelijking.
Bijlage VI	- Excel-tool ten controle van vloeren en kolommen.*
Bijlage VII	- Handleiding Excel-tool.
Bijlage VIII	- Spanning-rekdiagram VVHSB-mengsel.
Bijlage IX	- Handberekeningen.
Bijlage X	- Gewichtsberekening.

Procesmap

Bijlage A	- Resumé.
Bijlage B	- Cijferlijst.
Bijlage C	- Competentielijst.
Bijlage D	- Eindreflectie.
Bijlage E	- Projectplanning.
Bijlage F	- Bedrijfsbeoordeling.
Bijlage G	- Toestemmingsformulier HBO-kennisbank.
Bijlage H	- Tussentijdse beoordeling.
Bijlage I	- Overlegmomenten.
Bijlage J	- Urenregistratie.

* Alleen digitaal.

Inleiding

Met de opkomst van vezelversterkt hoge sterktebeton (VVHSB) is er een nieuwe manier van ontwerpen en construeren ontstaan. Dankzij de eigenschappen van dit materiaal kunnen nieuwe, uitdagende constructies gerealiseerd worden die voorheen ontoereikend waren.

ABT ziet potenties in het gebruik van dit materiaal in de hoogbouw. Momenteel wordt de draagstructuur binnen de hoogbouw in Nederland voornamelijk uitgevoerd in staal. Dit is mede vanwege gewichtsbeporing, transparantie van het gebouw en het gemak in uitvoerbaarheid. Om de potentie(s) van het nieuwe materiaal te onderzoeken is het afstudeeronderzoek 'Vezelversterkt beton in de markt' in het leven geroepen.

Om het hoofdonderzoek in goede banen te leiden is het essentieel om kennis op te doen op het gebied van de te vergelijken materialen. Daarom is voorafgaand aan het hoofdonderzoek een literatuuronderzoek uitgevoerd ter verbreding van de kennis op het gebied van conventioneel beton, VVHSB en staal.

Tijdens dit literatuuronderzoek is er een brede scope aan informatie verzameld en gecatalogiseerd. Er is gekeken naar de opkomst van beton, met parallel hieraan, de invloeden die dit heeft gehad op de architectuele ontwikkelingen.

Er is inhoudelijk gekeken naar de drie bouwmaterialen op het gebied van:

- Productieprocessen
- Mechanische eigenschappen
- Fysische eigenschappen
- Chemische eigenschappen
- Duurzaamheid

Er zijn grote verschillen tussen het bouwen met staal en beton. Beide materialen hebben sterke en zwakke kanten. Om de vergelijking zo objectief mogelijk te maken worden de elementen vergeleken door middel van een multicriteria-analyse.

1 Opdrachtbeschrijving

Dit hoofdstuk geeft de aanleiding van het onderzoek weer. Er wordt ingegaan op de probleemstelling en de doelstelling. Tevens worden de hoofd- en deelvragen besproken die tijdens het onderzoek behandeld zullen worden.

1.1 Probleemstelling

Met de opkomst van VVHSB is er een nieuwe manier van ontwerpen en construeren ontstaan. Dankzij de eigenschappen van dit materiaal kunnen nieuwe, uitdagende constructies gerealiseerd worden die voorheen ontoereikend waren. Deze eigenschappen geven een nieuwe dimensie aan het ontwerpen met beton.

Hoewel er steeds meer bekend is over VVHSB en er verscheidene projecten uitgevoerd worden met beton van dit kaliber, is de potentie van de toepassingen in de hoogbouw nog onbekend terrein. Zodra er gebouwd wordt boven een hoogte van 70 meter wordt er snel gekeken naar staal als draagstructuur. Staal heeft op deze hoogte een aantal voordelen ten opzichte van beton. Naast het lichtgewicht en een eenvoudiger ontwerp is staal makkelijker in de uitvoering vergeleken met conventioneel beton. Het grote voordeel bij het bouwen met staal is dat er een relatief kleine bouwruimte noodzakelijk is. Dit is veelal doorslaggevend voor hoogbouw projecten in Nederland aangezien deze worden toegepast in dicht bebouwde gebieden.



Figuur 1 - De constructie van de Burj Khalifa in Dubai is volledig uitgevoerd in beton.¹

Er zijn inmiddels “wolkenkrabbers” uitgevoerd in beton. Een bekend voorbeeld is de Burj Khalifa in Dubai. Het toepassen van VVHSB is echter nog niet gebruikelijk en in het bijzonder voor de Nederlandse constructiewijze. Het ontwerpen met VVHSB wordt op dit moment nog niet door veel partijen gedaan. Dat komt omdat de kennis en ervaring met het materiaal beperkt is. Binnen ABT is de kennis aanwezig van allerlei wijze van construeren, ook hoe met VVHSB moet worden omgegaan. Deze kennis, in combinatie met de kennis uit literatuur, wordt toegepast in dit onderzoek. Met deze kennis wordt een bestaand hoogbouwproject uitgevoerd in staal herontworpen en wordt er gekeken naar de toepassingsmogelijkheden van VVHSB. Hierna kan worden beoordeeld welke voor- en nadelen aan deze constructiewijze zitten middels een multicriteria analyse.

¹ Bron: <https://www.groupon.ae/deals/at-the-top-burj-khalifa-14>

1.2 Doelstelling

Met het oog op de bouwmaterialen en -methodes van het toekomstig verleden leven we in een samenleving waar innovatie centraal staat. Met de huidige technologieën is er een constante aanvoer van potentiële nieuwe bouwmaterialen. Zo werd tijdens een internationaal symposium in Marseille (2004) vezelversterkt ultra hoge sterktebeton voor het eerst geïntroduceerd aan de wereld². Vanaf dat moment stond het materiaal in de spotlights en zijn er diverse onderzoeken naar het materiaal geweest. Vier jaar na zijn introductie zijn de eerste projecten begonnen met als centraal onderwerp VVHSB.

Tijdens dit onderzoek is er gekeken naar elementen binnen de (hoog)bouw. Er is gekeken of VVHSB een rol kan spelen in het ontwerp. Er zal per element objectief gekeken worden welk materiaal het beste toegepast kan worden.

Er wordt gekeken naar elementen binnen de hoofd-draagstructuur. Het onderzoek omvat: (verdiepings)vloeren, kolommen, wanden en balken. De Montevideo is een goede referentie voor het vaststellen van de eisen en structuur van de elementen. Dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 2 & 3.

Per element wordt er vervolgens beoordeeld welk materiaal het beste past bij de gestelde eisen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende drie materialen: Staal, conventioneel beton en VVHSB. Tijdens dit onderzoek zijn de volgende onderwerpen behandeld:

Interne omstandigheden:

- Veiligheidseisen.
- Uitvoeringsmogelijkheden.
- kracht-opneembaarheid.

Externe omstandigheden:

- Weersbestendigheid.
- Ontwerpduur.
- financiële aantrekkelijkheid.

² https://www.rilem.net/gene/main.php?base=500218&id_publication=422

1.3 Hoofd- en deelvragen

Er zijn diverse onderzoeken gedaan naar de eigenschappen en potenties van VVHSB. Tijdens dit onderzoek wordt ingegaan op de potentie in de (hoog)bouw. Er wordt objectief gekeken naar de mogelijkheden van VVHSB als vervanging van stalen of normale betonnen structurele elementen. Er wordt een brede beschouwing gedaan waarbij verder wordt gekeken dan de zuiver constructieve mogelijkheden. Gedurende dit project wordt er rekening gehouden met de uitvoeringseisen en financiële aantrekkelijkheid van construeren met VVHSB en wordt deze vergeleken met gebruikelijke bouwmethodes.

1.3.1 Hoofdvraag

Tijdens het onderzoek is er een vraag ontstaan uit de probleem- en doelstelling. Deze hoofdvraag staat centraal tijdens het onderzoek. Door de omvang van het onderzoek is er een leeswijzer opgesteld. Deze leeswijzer geeft overzichtelijk weer waar de betreffende vragen behandeld zijn in het onderzoek. De leeswijzer is te vinden in '**bijlage I - Leeswijzer hoof- en deelvragen**'.

Hoofdvraag (HV):

Kan vezelversterkt hoge sterktebeton leiden tot een verbetering in de (hoog)bouw ten opzichte van bouwen met staal en conventioneel beton?

1.3.2 Deelvragen

De hoofdvraag op zich geeft een breed bereik aan antwoorden en is niet te beantwoorden met een simpel ja of nee. Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag is er daarom een aantal deelvragen opgesteld die richting geven aan het onderzoek. Onderstaand zijn alle deelvragen te vinden die behandeld zullen worden tijdens het onderzoek.*

Deelvraag (DL1) Wat is het verschil in uitvoering tussen VVHSB, conventioneel beton en staal?

DL 1.1 Hoe is VVHSB ontstaan?

DL 1.2 Wat is het verschil in uitvoeringstijd?

DL 1.3 Wat is het verschil in kosten?

DL 1.4 Wat is het verschil in uitvoeringsgemak?

DL 1.5 Hoeveel reductie in toegepast materiaal is er mogelijk tussen VVHSB en conventioneel beton?

Deelvraag (DL2) Wat zijn de verschillen in materiaaleigenschappen tussen VVHSB, conventioneel beton en staal?

DL 2.1 Hoe wordt er omgegaan met brandveiligheid?

DL 2.2 Wat zijn de minimale afmetingen voor geluidsbeperving toelaatbaar in de woningbouw?

DL 2.3 Wat zijn de bezwijkmechanismen van de materialen?

DL 2.4 Welk materiaal is het best geschikt voor duurzaam bouwen?

* Korte Toelichting van de codering van de deelvragen:

DL -> Deelvraag literatuuronderzoek; DH -> Deelvraag hoofdonderzoek; DI -> Deelvraag interview.

Deelvraag (DI1) interviewvragen

- DI 1.1 Waarom is er bij de bouw van Montevideo voor een groot deel een staalconstructie gebruikt?
- DI 1.2 Wat zijn de financiële uitgangspunten?
- DI 1.3 Is de bouwlocatie van invloed geweest op de keuze van het materiaal?
- DI 1.4 Is de voorkennis van de constructeur of ontwerper van invloed geweest op de keuze van het materiaal?
- DI 1.5 Heeft de aannemer invloed gehad op de keuze van het materiaal?
- DI 1.6 Heeft de architect invloed gehad op de keuze van het materiaal?
- DI 1.7 Is er gekeken naar andere uitvoeringsmogelijkheden?

Deelvraag (DH1) Welk materiaal heeft de beste toepassingsmogelijkheden bij de volgende elementen?

- Verdiepingsvloeren ten behoeve van de woningbouw.
- Kolommen.
- Wanden.
- Fundering.

1.4 Projectresultaat

Het directe doel van het onderzoek is het opstellen van een handleiding voor constructeurs en ontwerpers. In deze handleiding wordt beschreven welke bouwmaterialen het beste passen bij de omschreven elementen. Als aanvulling op deze handleiding zal er een vergelijkingsmatrix worden gemaakt waarmee, onder standaard omstandigheden, snel het juiste materiaal gekozen kan worden voor het ontwerp.

1.5 Projectscope

Om het project zo goed mogelijk te laten verlopen is het noodzakelijk om de projectgrenzen inzichtelijk te maken. Omdat het onderzoek bestaat uit een objectief marktonderzoek waarin drie materialen* naast elkaar worden gelegd, zullen de verschillen hiertussen worden onderzocht en gecatalogiseerd in een multicriteria analyse. Onderstaand is weergegeven wat wel tot de projectscope behoort en wat hier buiten valt.

1.5.1 Wat tot de scope toebehoort

Vergelijkingsonderzoek van de materialen in:

- Uitvoeringstijd & -kosten.
- Aankoop materialen.
- Onderhoudskosten.
- Ontwerplevensduur.
- Brandveiligheid.
- Onderhoud.
- Duurzaamheid.

1.5.2 Wat niet tot de scope toebehoort

- Het verschil in productietijd.
- Het verschil in CO2 uitstoot.
- Onderzoek naar de materiaaleigenschappen van VVHSB.
- Onderzoek naar prefab toepassingen.

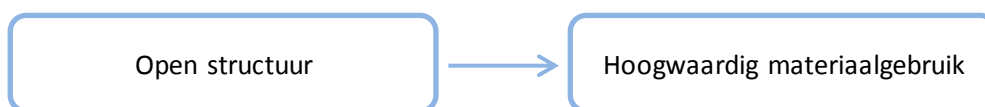
* Staal, conventioneel beton & VVHSB.

2 Hoogbouw in Nederland

Er is inmiddels heel wat hoogbouw in Nederland aanwezig. Wanneer er gekeken wordt naar de toepassing van VVHSB is niet elke hoogbouw geschikt als referentieontwerp. De ene hoogbouw is de andere niet. Denk bijvoorbeeld aan de flatgebouwen in de Bijlmer bij Amsterdam, gekenmerkt door de typische zeskantige honingraatstructuur.

2.1 Verschillende soorten hoogbouw

Er is een relatie tussen de mate van transparantie in een gebouw en de toegepaste materialen. Het maken van een slank, open gebouw vereist het gebruik van hoogwaardige en veelal dure materialen zoals staal en aluminium. Wanneer er geen slanke en open structuur verlangt is, wordt er snel bespaard op materiaalgebruik.



Voor dit onderzoek is de Nederlandse hoogbouw opgedeeld in drie verschillende klassen:

- Budget klasse
- Midden klasse
- High-end klasse

In 'bijlage II - technische analyse hoogbouwklasse' is een verdere onderbouwing gegeven aan de verschillende klassen.

2.1.1 Budget klasse

Wanneer de belangen van de opdrachtgever zijn gericht op het creëren van veel woningen voor weinig geld vallen deze in de budget klasse. In deze klasse hebben de financiën de eerste prioriteit en wordt er weinig tot geen architectonische waarde gehangen aan het ontwerp. Indien dit het geval is wordt de uitvoering van de volledige constructie in beton erg aantrekkelijk, zoals in de Bijlmer bij Amsterdam.



Figuur 2 - Betonnen flatgebouwen in de Bijlmer, Amsterdam.³

Getypeerd door de eindeloos repeterende balkonnetjes en de zeskantige honingraatstructuur lijkt enige transparantie en architectuur afwezig te zijn. Het volledige gebouw is uitgevoerd in beton. Door de hoge aankoopkosten van VVHSB in vergelijking met beton is het uitvoeren van deze klasse hoogbouw in VVHSB niet gewenst.

³ Bron: <https://www.failedarchitecture.com/the-story-behind-the-failure-revisioning-amsterdam-bijlmermeer/>

2.1.2 Middenklasse

De middenklasse is een klasse waar het grootste gedeelte van de Nederlandse hoogbouw onder valt. Deze klasse heeft een goede balans tussen het beschikbare budget en architectonische waarde. In onderstaande afbeelding is een aantal gebouwen weergegeven die kenmerkend zijn voor de middenklasse.



Figuur 3 - Typische middenklasse hoogbouw.⁴

2.1.3 High-end klasse

In de high-end klasse wordt veel waarde gehecht aan het esthetische karakter van het gebouw. Een slanke, open structuur is hierbij veelal gewenst. Om dit karakter te verwezenlijken is hoogwaardig materiaalgebruik noodzakelijk. Er is een groot budget beschikbaar en dit mag ook te zien zijn. Gebouwen typerend voor deze klasse zijn bijvoorbeeld de Hoftoren in Den Haag of de Montevideo in Rotterdam.

Zo bestaat de top van de woontoren van de Montevideo uit een stalen gevelbuisconstructie. Dit zorgt voor een woning waarin transparantie en flexibiliteit centraal staan. De top van de Hoftoren heeft zelfs alleen een esthetische waarde.



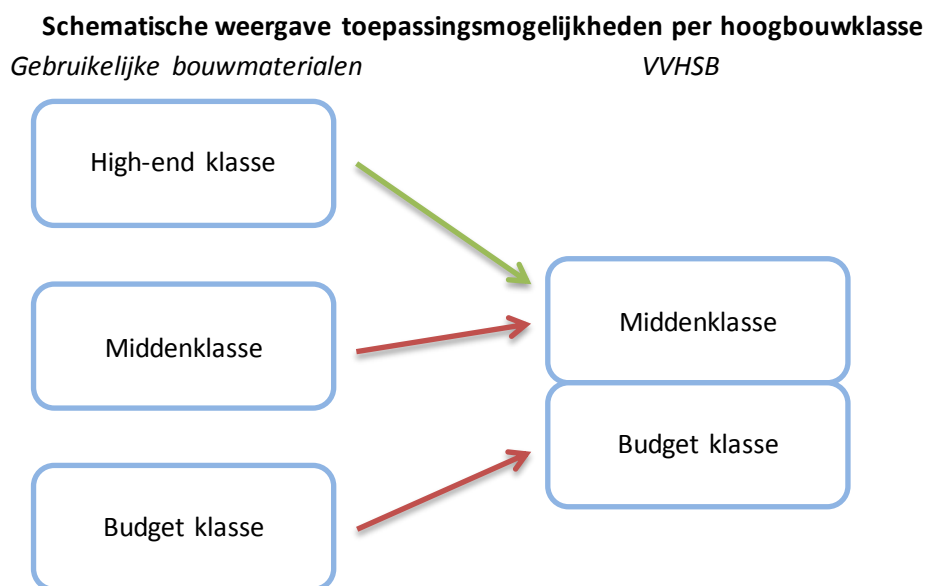
Figuur 4 - Hoftoren in Den Haag.⁵

⁴ Bron: <https://inventaris.onroerenderfgoed.be/themas/129>

2.2 Geschikte klasse voor VVHSB

Wanneer er wordt gekeken naar de implementatiemogelijkheden van VVHSB behoort het materiaal thuis in de high-end klasse. Het gebruik van VVHSB is niet bedoeld voor het maken van een 'betonnen doos' zoals bij de Bijlmer. Het materiaal is bedoeld voor het maken van een architectonisch hoogstandje waarin het optimaal tot zijn recht komt.

Door het goedkope materiaalgebruik in de budget- en de middenklasse is het niet gewenst om de constructie uit te voeren in VVHSB. Indien de constructie wordt uitgevoerd in VVHSB kost dit aanzienlijk meer. Het is daarentegen wel aantrekkelijk om de bouwkosten te reduceren in de uitvoering van de high-end klasse. Deze klasse kan dan voor het budget van de middenklasse worden gerealiseerd. Ter verduidelijking is in onderstaande figuur de uitvoeringsmogelijkheid van VVHSB geschematiseerd.



⁵ Bron: <http://brouwermaintenancesolutions.nl/10-jaar-onderhoud-ventilatie-en-gasdetectie-parkeergarage-hoftoren-teden-haag/>

3 Referentieontwerp

In dit onderzoek wordt er gekeken naar elementen binnen de hoofdstructuur in de hoogbouw. Voor elk element wordt er beoordeeld welk materiaal het beste past bij de gestelde eisen. Om de vergelijking zo betrouwbaar mogelijk te maken is er gekozen om gebruik te maken van een referentieontwerp uit de high-end klasse. Dit ontwerp zal het onderzoek voorzien van maatgevende parameters waarop de elementen ontworpen en getoetst worden. Als referentieontwerp is er gekozen voor De Montevideo in Rotterdam.

3.1 De Montevideo

In 1999 werd Francine Houben van het Delftse architectenbureau Mecanoo door ING Real Estate en de Dienst Stedenbouw Rotterdam gevraagd om een plan te ontwerpen voor een strook woning bouw aan de Rijnhaven. Het belangrijkste uitgangspunt van Houben was dat het programmatische verschil tussen de noord- en de zuidzijde van de Wilhelminapier niet in het architectonische beeld tot uitdrukking mocht komen. Vooral de zich eindeloos repeterende balkonnetjes – prototypisch voor de woningbouw – moesten worden vermeden.⁶



Figuur 5 - De Montevideo in Rotterdam (middelste toren).

“De Montevideo is een gebouw, waarbij de constructieve samenwerking tussen de materialen staal en beton naar een hoger plan is getild. Gelet op de steeds fraaiere architectonische ontwerpen en de vraag naar meer flexibiliteit blijft het in de toekomst zeker niet bij dit ene project. Uit de samenwerking met de aannemer blijkt dat ook de aannemerij steeds meer open staat om een dergelijk complex hybride project op een inventieve manier aan te pakken.” (Bos, 2006)

Door de vraag naar transparantie en flexibiliteit is er een unieke combinatie ontstaan in de staal-betonbouw. Het gebruik van een hybrideconstructie is perfect voor de vergelijking in het onderzoek. Met ABT als constructief ontwerper is er bovendien veel expertise over hybride constructies aanwezig.

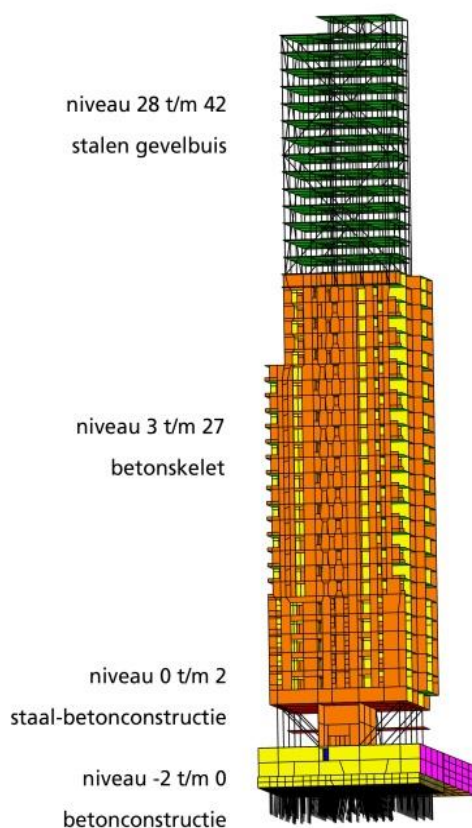
⁶ (Bos, 2006)

3.2 Flexibel en ruimtelijk

De woontoren van de Montevideo bestaat constructief uit 3 verschillende delen zoals te zien is in Figuur 6. De 28^e t/m de 42^e verdieping bestaat uit een stalen gevelbuisconstructie. Vanuit de opdrachtgever moeten de woningen in dit deel van de toren flexibel en ruimtelijk zijn. Om aan deze eis te voldoen is er gekozen voor een stalen constructie.

In de vier zijvlakken van het gebouw zijn grote stalen stabiliteitsverbanden aangebracht. De gehele staalconstructie rust op een ondergelegen betonconstructie. Deze bestaat van de 2^e t/m de 27^e verdieping uit betonnen wanden en vloeren. Het samenwerkende geheel zorgt op deze verdiepingen voor de stabiliteit.

De onderste verdiepingen zijn weer afwijkend uitgevoerd. Hier wordt de toren ondersteund door betonnen kolommen samen met een geschoorde staalconstructie.



Figuur 6 - Model woontoren Montevideo.

In hoofdstuk 4 en 5 wordt de huidige elementenstructuur geanalyseerd en wordt er gekeken naar een geschikt alternatief in VVHSB. De verschillen tussen huidige constructie en de alternatieven worden vervolgens vergeleken door middel van een multicriteria analyse in hoofdstuk 6.

4 Vloeren

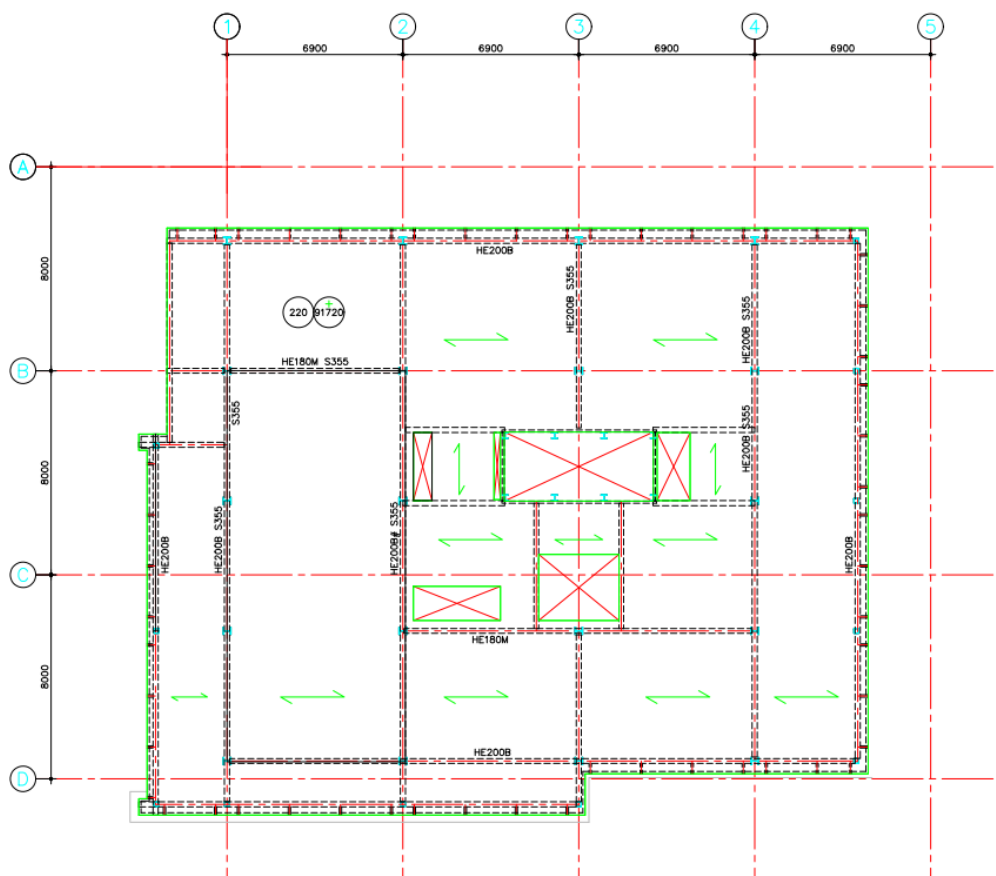
In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de vloeren aanwezig in De Montevideo. Er wordt gekeken of de huidige vloeren vervangen kunnen worden door een vloer gemaakt met VVHSB. Dit hoofdstuk is gebaseerd op de analyses uitgevoerd in 'bijlage III – Technische rapportage vloeren'.

4.1 Analyse huidige structuur

In het huidige ontwerp zijn er twee verschillende vloeren te onderscheiden. De vloeren vanaf de begane grond tot verdieping 27 bestaan uit een monoliete betonvloer. Deze vloeren zorgen samen met de draagstructuur voor de stabiliteit. De draagstructuur bestaat uit betonwanden.

De vloeren vanaf verdieping 27 bestaan uit een betonnen vloer opgelegd in een stalen raster. Om de stabiliteit boven in de woontoren te waarborgen zijn er vanaf verdieping 28 stabiliteitsschoren aanwezig. De stabiliteit voor dit constructieve gedeelte is afhankelijk van de stabiliteitsschoren die langs de gevel zijn bevestigd.

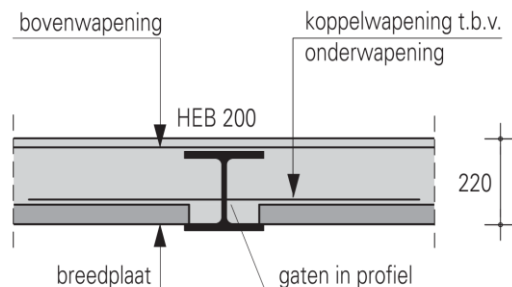
Vanuit de opdrachtgever staat transparantie in de top van de woontoren centraal. Omwille van de transparantie bestaat de draagstructuur in de top van de woontoren uit een stalen gevelbuisconstructie. De stabiliteit wordt verzorgd door stabiliteitsschoren gelegen in de gevel. De vloeren ter plaatse van de gevelbuisconstructie hebben geen schijfwerking en dragen niet bij aan de stabiliteit van deze verdiepingen.



Figuur 7 - NB vloer layout.

4.1.1 Hybrideontwerp

De vloer in de top van de woontoren is een hybrideontwerp dat bestaat uit een raster van stalen liggers die ter ondersteuning dienen voor de betonnen breedplaatvloer. Deze liggers zijn ingestort in het beton vanwege ruimtebesparing en brandveiligheid. Onderstaand is het principe van de vloer weergegeven.



Figuur 8 - Principe vloer van de appartementen vanaf verdieping 28.

Indien de breedplaatvloeren direct opgelegd worden op de bovenflenzen van de ligger, bestaat de kans dat door ongelijke belasting een torsiemoment optreedt in de ligger. Dit resulteert in het bezwijken van het staalprofiel. Dit kan worden voorkomen door de vloer door te leggen over de ligger. Om te voorkomen dat een torsiemoment in de ligger ontstaat zijn er gaten aanwezig in het lijf van het profiel, waar de wapening doorheen kan worden getrokken.

Door de transparante inrichting van de woningen bestaat de draagstructuur uit stalen profielen. De draagstructuur is direct aangesloten op het stalen raster in de vloeren. Dit zorgt voor een makkelijke spanningstransfer van de draagstructuur ten opzichte van de vloer.

4.2 Bouwfysisch gelimiteerd

Met een dikte van 220 millimeter zijn de vloeren niet erg slank uitgevoerd. De dikte van de vloeren is gelimiteerd door bouwfysische eigenschappen, in het bijzonder de geluidseis. Geluidsoverlast van externe geluidsbronnen kan bijzonder hinderlijk zijn. Om deze reden is er in het Bouwbesluit een aantal normen opgenomen om de geluidshinder te minimaliseren.

Om in praktische zin te voldoen aan de geluidseis is de dikte van een betonnen vloer gelimiteerd tot 210 millimeter dik. Omdat een reductie in de massa van de vloer niet zinvol is kan het slanker maken wel zinvol zijn. Door een hogere toelaatbare spanning in het materiaal kunnen grotere overspanningen worden gerealiseerd bij gelijkblijvende dikte. De winst zit dan in de transparantie van het gebouw en vermindering van het aantal toe te passen kolommen.

4.3 *Berekeningen*

De Montevideo kent twee verschillende vloeren. Deze vloeren zijn ontworpen op basis van het samenwerkend geheel van de draagstructuur met de vloer.

- Het eerste type vloer is een monoliete betonvloer met een draagstructuur van betonnen wanden. Omdat de dikte van de vloeren gelimiteerd wordt door de geluidseis, wordt de sterkte van de vloer niet volledig benut. Een vloerontwerp met verhoging van de betonklasse heeft hierdoor geen toegevoegde waarde.
- Het tweede type vloer bestaat uit een hybrideontwerp. Een stalen raster van walsprofielen waarin breedplaten gesitueerd liggen. Door de kolommen-draagstructuur is de overspanning in deze vloer groter dan bij het eerste type. Om de overspanning te beperken is er een stalen raster aanwezig. Omdat staal in aankoop duurder is dan beton is het interessant om te onderzoeken of er een alternatief op deze vloer ontworpen kan worden. Door de toevoeging van staalvezels aan het beton is het in staat om grotere trekspanningen op te nemen. Dit zorgt er voor dat het stalen raster overbodig wordt.

4.3.1 *Excel-tool*

Om de berekeningen van de vloer te verbeteren zijn deze verwerkt in een Excel-tool. Deze tool biedt de mogelijkheid om tijdens het verloop van het onderzoek en daarna gebruikt te worden voor het controleren van vloeren die gemaakt worden met vezelversterkt beton. Door de minimalistische regelgeving op het gebied van VVHSB in Nederland is deze tool gebaseerd op de FIB-modelcode. Voor de opzet van de tool zijn voorafgaand handmatige berekeningen gemaakt ter controle.

De tool is geschikt voor betonklassen C20 t/m C90 en omvat de volgende controles:

- Sterktecontrole
- Scheurwijdtecontrole
- Ponscontrole

4.3.2 *Scheurwijdte*

Door het toevoegen van staalvezels is het beton in staat meer trekspanning op te nemen dan wanneer deze vezels achterwege worden gelaten. Door middel van vezelactivering is het beton uitstekend geschikt voor toepassing in vloeren waar de scheurwijdte een bepalende factor is. Hierdoor is het mogelijk om de overspanning van de vloer te vergroten, waarbij de toevoeging van conventionele wapening beperkt blijft. Waar bij het huidige ontwerp een stalen raster aanwezig is om de overspanning te vergroten, kan deze nu achterwege gelaten worden.

4.3.3 *Ponscontrole*

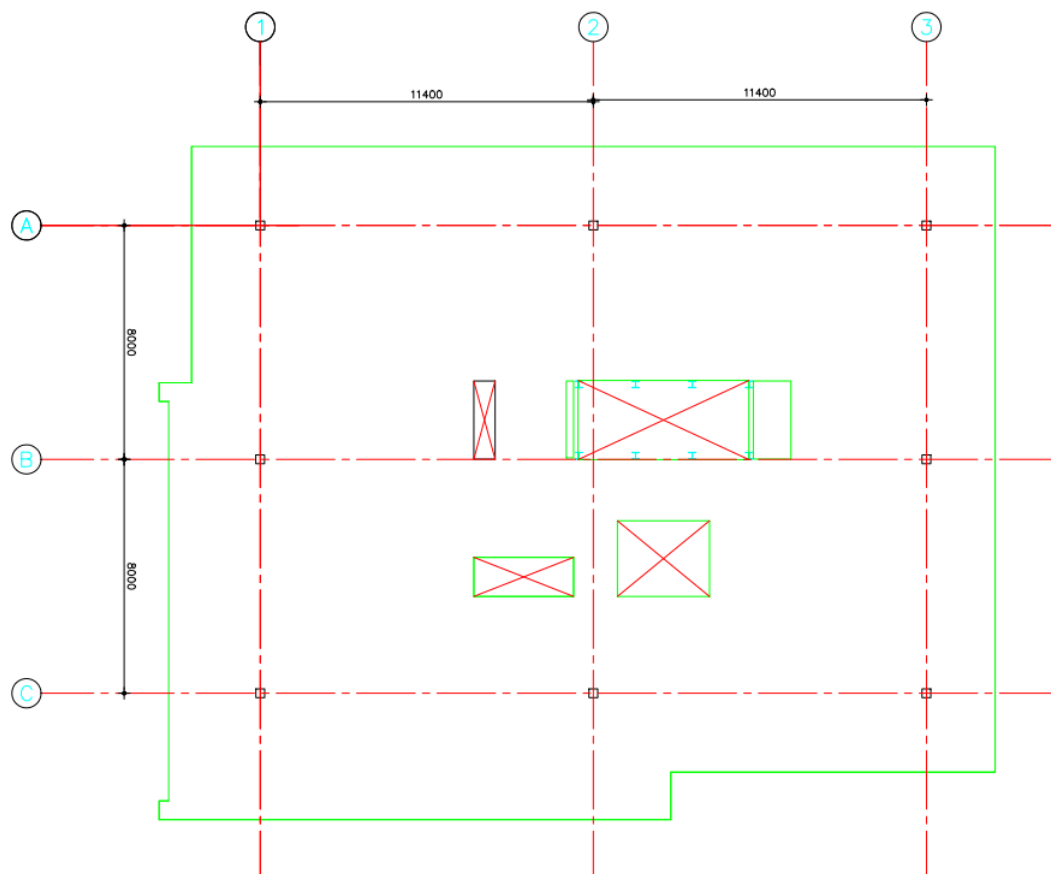
Met het achterwege laten van het stalen raster en de vergrootte overspanning is pons een bezwijkcriterium dat een grote rol gaat spelen. Naast het vergroten van de overspanning is het ook mogelijk om het aantal dragende kolommen drastisch te verminderen. Inherent aan het verminderen van het aantal dragende kolommen is een vergrote kans op pons. Het is van belang te onderzoeken of er ponswapening nodig is wanneer het aantal kolommen verminderd wordt.

4.4 Alternatief vloerontwerp

Zoals in hoofdstuk 4.1 wordt beschreven bestaat de huidige vloer uit een hybrideontwerp van een stalen raster van HE200B profielen waartussen breedplaatvloeren gesitueerd liggen.

Volgend op de analyse van het huidige ontwerp is er een aantal alternatieven ontworpen. Deze alternatieven zijn bedoeld om de verbeterde eigenschappen van het hoge sterktebeton maximaal te benutten. Om de vergelijking zo objectief mogelijk te houden heeft de vloer net als in het huidige ontwerp geen stabiliteitsfunctie. Met het achterwege laten van het stalen raster is de overspanning vergroot en dankzij de toevoeging van de staalvezels blijft de scheurwijdte beperkt.

Er is een aantal ontwerpen gemaakt om de ponskracht te beproeven. Het originele ontwerp bevat 19 dragende kolommen. Op basis van de sterkte van de vloer blijkt dat dit aantal zonder complicaties gereduceerd kan worden naar 8 dragende kolommen. Zie onderstaand figuur voor het definitieve ontwerp.



Figuur 9 - Definitief ontwerp VVHSB-vloer.

De kolommen ter plaatse van de gevelbuisconstructie zijn groter uitgevoerd dan nodig is. (**Zie bijlage IV – Technische rapportage draagstructuur, paragraaf 1.2.2**)

Ter plaatse van verdieping 28 zijn de kolommen in staat om 8520 kN op te nemen. Om de normaalkracht op te kunnen nemen zijn er minimaal 13 kolommen nodig. De sterkte van de draagstructuur is hier dus maatgevend boven de sterkte van de vloer. In totaal is er een reductie van 6 kolommen mogelijk indien de vloer wordt uitgevoerd in VVHSB.

Onderstaand staan de belangrijkste verschillen van de vloeren weergegeven.

	NB-vloer	VVHSB-vloer
Dikte (mm)	220	220
Grootste overspanning (m)	8,0	11,4
Aantal dragers (st)	19	13
Brandveiligheid (-)	++	+++

4.5 Subconclusie

Met een dikte van 220 millimeter is een verdiepingsvloer al bijzonder slank. Indien deze uitgevoerd wordt in VVHSB kan de vloerdikte met de helft gereduceerd worden. De dikte van de vloer is echter gelimiteerd door bouwfysische eisen. Om aan de geluidseis te voldoen heeft de vloer een minimale massa nodig. Het toevoegen van massa is goedkoper als het slanker maken van de vloer met de toevoeging van geluidsreducerende middelen.

Door de verhoogde sterkte van de vloer kan de overspanning vergroot worden. Daardoor kan het aantal kolommen worden gereduceerd. Dit effect vervalt echter wanneer de draagstructuur bestaat uit een wandenstructuur.

Het aantal kolommen wordt sterk beïnvloed door de op te nemen normaalkracht en niet door de sterkte van de vloer. Het aantal te verminderen kolommen door de vloer hoger dan in de praktijk mogelijk is. Met andere woorden: De vloer is sterker dan benodigd.

De uitvoering van een verdiepingsvloer in VVHSB levert geen financiële meerwaarde op. Het uitvoeren van een verdiepingsvloer in staalvezel versterkt beton met klasse C90/105 wordt daarom niet aanbevolen. Met het verlagen van de betonklasse wordt er wel een financiële meerwaarde gecreëerd.

5 **Draagstructuur**

In dit hoofdstuk wordt de huidige draagstructuur van de Montevideo bekeken. Er wordt gekeken of deze op een kosteneffectieve manier vervangen kan worden voor een draagstructuur van VVHSB. Vanuit de opdrachtgever staat de transparantie van het gebouw centraal. Om het gebouw zo transparant mogelijk te maken is er veel gebruik gemaakt van staal. Het gebruik van staal heeft als voordeel dat er een relatief slanke draagstructuur mogelijk is in vergelijking met een betonnen draagstructuur. Het nadeel is dat de aankoopkosten van staal verhoudingsgewijs hoger zijn dan van beton.

De huidige draagconstructie van de Montevideo kan opgedeeld worden in drie hoofdstructuren:

- Staalprofielen tpv. verdieping 29 t/m 42.
- Betonwanden tpv. verdieping 2 t/m 28.
- Staal-betonkolommen tpv. verdieping -2 t/m 2.

Alle onderdelen kunnen in VVHSB worden uitgevoerd. Dit hoofdstuk omschrijft de berekeningen en vergelijkingen en beschouwt of deze uitvoering een voordeel oplevert. Dit hoofdstuk is gebaseerd op de analyses uitgevoerd in **'bijlage IV - Technische rapportage draagstructuur'**.

5.1 *Uitgangspunten*

- Tenzij anders vermeld is de betonkwaliteit van de huidige structuur C53/65.
- Tenzij anders vermeld is de staalkwaliteit S355.
- Systeemhoogte kolommen en wanden is 3.200 mm.
- Gelijkwaardige stijfheid draagconstructie en vloer.
- De stabiliteit wordt veroorzaakt door de stabiliteitsschoren aan de buitenkant van het gebouw. Er is dan wel sprake van een schijfwerking door de vloeren.
- De afmetingen van het nieuwe ontwerp mogen de afmetingen van het huidige ontwerp niet overschrijden.

5.2 *Analyse huidige structuur*

De huidige draagstructuur bestaat uit drie verschillende systemen. Boven in de woontoren bestaat de constructie voornamelijk uit staal. In het midden van de toren gaat de draagstructuur over op betonwanden en onderin bestaat de draagstructuur uit staal-betonkolommen. De huidige structuur zal geanalyseerd worden voor dat er een geschikt alternatief ontworpen kan worden.

5.2.1 *Bovenste verdiepingen*

Boven in de woontoren ter hoogte van verdieping 29 t/m 42 bevinden zich de 'sky' appartementen. Voor deze appartementen staat transparantie en flexibiliteit centraal. De appartementen moeten flexibel zijn en een zo open mogelijk karakter hebben. Omwille van deze eis is de volledige draagstructuur ter plaatse van deze verdiepingen uitgevoerd in staal. Ondanks dat staal duurder is in aankoop en onderhoud biedt het de mogelijkheid om dit open karakter te verwezenlijken dankzij het hoge 'strength to weight' ratio.



Figuur 10 - Transparant karakter in de sky appartementen.⁷

De horizontale stabiliteit in dit gedeelte van de toren wordt opgenomen door stalen windverbanden, aanwezig in de gevel. De windverbanden zorgen er voor dat de staalconstructie over deze hoogte fungeert als een gevelbuisconstructie. Deze constructie is hierdoor te kwalificeren als een geschoorde constructie. Eventuele momenten die aanwezig zijn in de kolommen zijn te wijten aan zijdelingse uitwijkingen en zijn te verwaarlozen.

De verticale stabiliteit wordt verzorgd door stalen kolommen. In het huidige ontwerp zijn er 19 constructieve kolommen aanwezig. Afhankelijk van de verdiepingvloer variëren de toegepaste staalprofielen tussen een HE280M op verdieping 29 tot een HE300A ter plaatse van verdieping 36 en daarboven. Om aan de brandwerendheidseis van 90 minuten te voldoen is er een brandwerende coating aangebracht op de kolommen.

⁷ Bron: <http://www.dearchitect.nl/projecten/woon-en-kantoorgebouw-montevideo-in-rotterdam-door-mecanoo-architecten>

5.2.2 Middelste verdiepingen

De bovenste verdiepingen moeten transparant en flexibel zijn, dit in tegenstelling tot de gesloten structuur in de lager gelegen verdiepingen. De stalen constructie van de bovenste verdiepingen rust op een ondergelegen betonconstructie. Deze bestaat van de 2^e verdieping t/m de 27^e verdieping uit betonnen wanden en vloeren.

De horizontale stabiliteit wordt verzorgd door de wanden in tweezijdige richting. Dit systeem verzorgt tevens de verticale stabiliteit.

De wanden zijn in het werk gestort; en hiervoor is gebruik gemaakt van een klimkist. Afhankelijk van de verdiepingsvloer varieert de betonkwaliteit van C55 tpv. de onderste verdiepingen tot C30 tpv. de bovenste verdiepingen.

5.2.3 Onderste verdiepingen

Vanaf verdieping 2 t/m -2 zijn er staal-betonkolommen toegepast. Hoewel dit niet erg gebruikelijk is zitten er een aantal voordelen aan deze constructie.

- Verminderde de kans op knik en kip.
- Er zijn geen extra maatregelen nodig ter verhoging van de brandweerstand van het staalprofiel.
- Het staalprofiel is goed beschermt tegen corrosie.
- De betonkolom blijft ductiel.



Figuur 11 - Staal-betonkolommen ter plaatse van de onderste verdiepingen.

De horizontale stabiliteit ter plaatse van de onderste verdiepingen wordt verzorgd door een betonnen stabiliteitskern in combinatie met een geschoorde staalconstructie.

De verticale krachten worden opgevangen door betonnen kolommen met daarin geïntegreerd een HD 400-592 staalprofiel. De brede flensen van dit profiel maakt het perfect voor het opnemen van normaalkrachten. Afhankelijk van de verdieping hebben de kolommen een afmeting van rond 750 mm tpv. verdieping -2 en een vierkant 600 tpv. verdieping 2.

5.3 Opschalen van het wapeningsstaal

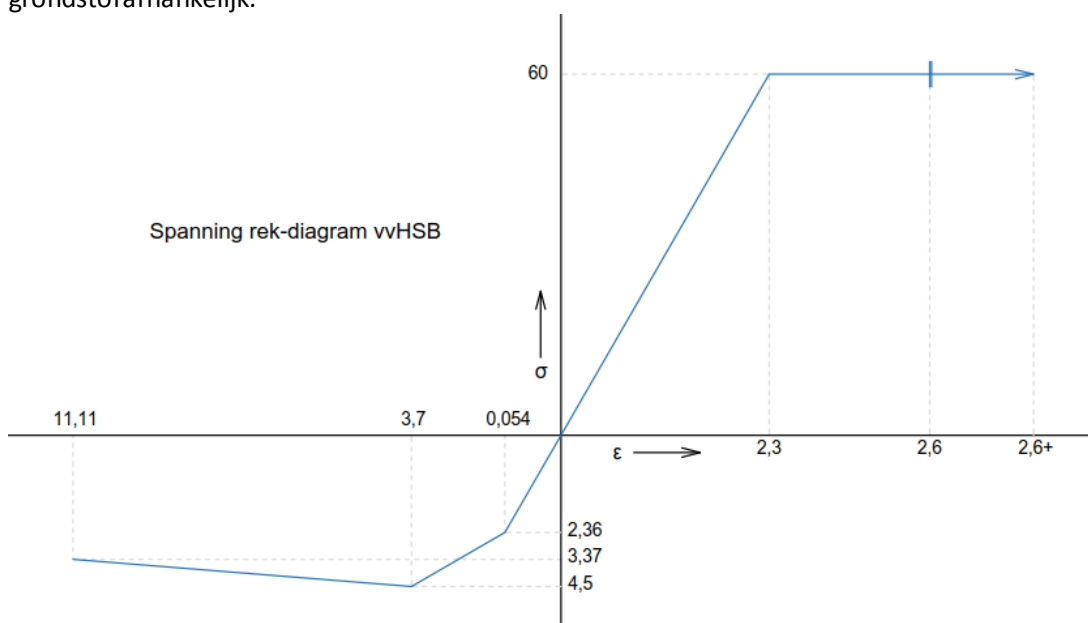
Normaliter is het niet zinvol om wapening toe te passen met een vloeispanning hoger dan 500 MPa. Immers is de scheurwijde-beheersing maatgevend en zou het verhogen van de staalkwaliteit tot een hoger toelaatbaar UGT-moment lijden maar niet tot een hoger momentcapaciteit gebaseerd op de toelaatbare scheurwijde. Door vezels te combineren met wapening wordt de situatie anders. De hoge dosering vezels zorgt voor een aanzienlijke scheurwijde-beheersing. De SLS-situatie wordt afgedekt door de staalvezels. De ULS-situatie kan dan worden opgevangen met staal van een hogere kwaliteit.

Voor kolommen geldt dit in zeer grote mate. De toelaatbare spanning is hier echter beperkt door de toelaatbare drukrek van beton. Deze bedraagt ongeveer 2,5 promille voor hogere betonkwaliteiten. De staalspanning die dan kan optreden is $2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 200.000 = 500$ MPa. Het toepassen van wapeningsstaal groter dan 500 MPa is dan niet zinvol, aangezien de noodzakelijke rek niet kan worden bereikt alvorens het beton op druk begint te bezwijken.

Uit onderzoeken weten we dat VVHSB een groter toelaatbare rekgrens heeft. Deze hogere rek kan worden benut voor het toepassen van een hogere kwaliteit staal.

5.4 Drukrek vezelversterkt beton

Het VVHSB heeft een grote drukrek-grens. Dit komt doordat de microscheurvorming wordt gestabiliseerd bij het bereiken van de maximale drukspanning. Hierdoor kan zowel de spanning als de rek toenemen. Dit effect is nog onvoldoende onderzocht en is enigszins grondstofafhankelijk.



Figuur 12 - Spanning-rekdiagram met theoretische vergroting van de drukrek.

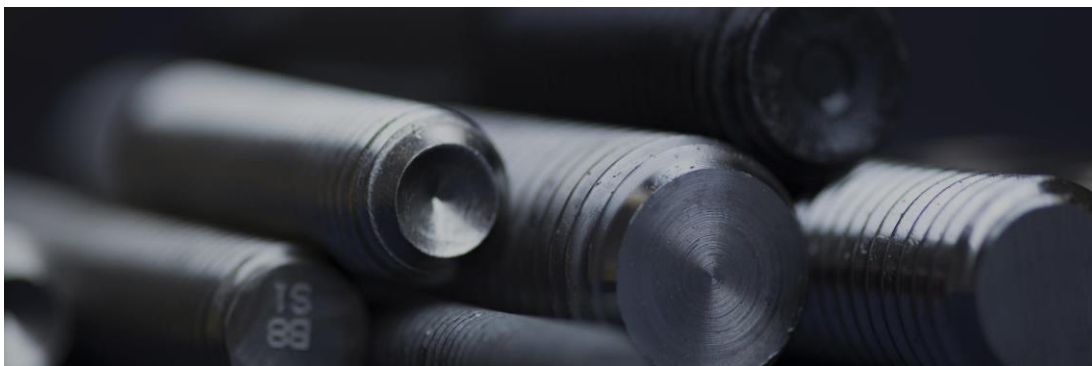
Doordat er een grotere drukrek toelaatbaar is kan er een hogere staalkwaliteit wapening worden toegepast. Bij een drukrek van 3 promille kan een staalkwaliteit worden toegepast van 640 MPa. Dit zou bijvoorbeeld kunnen worden uitgevoerd door 8.8 draadeinden toe te passen. Deze hebben bovendien het voordeel dat ze eenvoudiger kunnen worden doorgekoppeld. Nadeel van draadeinden is de slechtere aanhechting waardoor bij belasting op trek mogelijk bredere scheuren optreden.

5.5 Toepassen 8.8 draadeinden

Uit de FIB-Modelcode blijkt dat het mengsel waarmee ontworpen wordt geen minimale wapening nodig heeft. De Eurocode stelt dat het maximaal toelaatbare wapeningspercentage in kolommen 4% is buiten overlappingslassen en 8% binnen de overlappingslassen. De Eurocode zegt ook dat het wapeningspercentage verhoogd mag worden indien aangetoond wordt dat de samenhang van het beton niet wordt aangetast.

De reden voor dit maximum percentage is dat onder normale omstandigheden het praktisch niet mogelijk is om zo veel wapening in een kolom te stoppen, zonder dat dit ten koste gaat van de integriteit van het beton. Het voordeel is echter dat met een hoger wapeningspercentage een slankere kolom mogelijk is.

De strakke randvoorwaarden van de huidige draagstructuur zorgen er voor dat tijdens het ontwerpen een groot deel van de normaalkracht opgenomen moet worden door wapening om de vereiste slankheid te krijgen. In meerdere gevallen overschrijdt de hoeveelheid wapening het praktisch toepasbare percentage. Een hoger wapeningspercentage zou bijvoorbeeld kunnen worden uitgevoerd door 8.8 draadeinden toe te passen. Deze hebben het voordeel dat er geen overganglassen nodig zijn.



Figuur 13 - Toepassen 8.8 draadeinden boven 4% wapeningspercentage.⁸

Er zijn echter nog wel een aantal beperkingen voor het toepassen van de combinatie VVHSB en 8.8 draadeinden staal.

- De combinatie van draadeindstaal en beton is nog niet uitgebreid onderzocht.
- De hogere drukrek moet voor het VVHSB specifiek worden aangetoond. Deze is afhankelijk van de toegepaste vezels in het materiaal.

⁸ Bron: <http://www.steelfast.nl/fasteners/draadstukken/>

5.6 Berekeningen

De Montevideo heeft drie verschillende draagstructuren. Deze draagstructuren zijn gekozen naar aanleiding van de gestelde eisen vanuit de opdrachtgever. Om te kijken of de huidige draagstructuur vervangen kan worden voor een VVHSB-constructie is het van belang om deze eisen mee te nemen in het ontwerp.

Voor het onderzoek moet een groot aantal kolommen worden berekend. Zowel de reeds toegepaste kolommen als de ontworpen alternatieven moeten worden berekend. Vanwege het groot aantal kolommen dat moet worden getoetst is gebruik gemaakt van een berekeningsopzet in Excel.

Deze tool is opgezet conform de Eurocode in combinatie met de FIB-modelcode. Om de kwaliteit van de tool te controleren zijn er diverse handmatige berekeningen gemaakt en zijn de resultaten vergeleken.

Een overzicht van alle handberekeningen is terug te vinden in '**bijlage IX – Handberekeningen**'.

5.7 Alternatieve draagstructuur

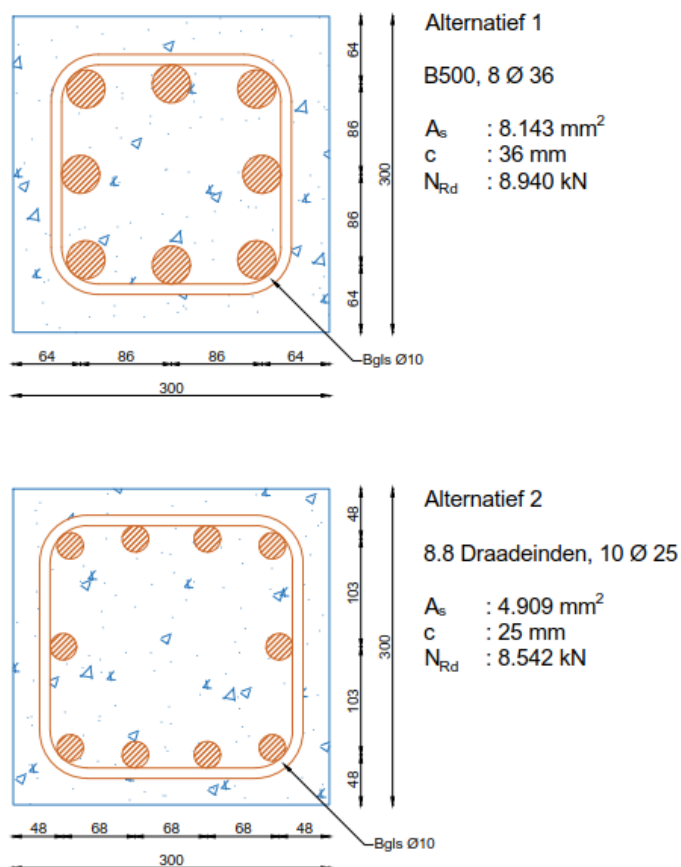
In theorie kan elk element, ongeacht het materiaal, vervangen worden door VVHSB. Dit betekent echter niet dat het zinvol is. Tijdens het ontwerpen van de alternatieven is het een vereiste om de randvoorwaarden van het originele ontwerp in acht te houden. Voor de draagstructuur betekent dit dat de maximale afmetingen van het nieuwe ontwerp beperkt zijn tot de afmetingen van de huidige draagstructuur.

Voor elk systeem van de draagstructuur wordt de meest extreme situatie gekozen; deze zullen de randvoorwaarden zijn voor het nieuwe ontwerp.

5.7.1 Bovenste kolommen

Zoals in paragraaf 5.2.1 is beschreven bestaat het bovenste gedeelte van de woontoren uit een staalconstructie. De staalkolommen die zijn toegepast variëren tussen een HE300A bovenin en een HE280M profiel onderin. Het verschil in gebruiksoppervlak tussen de profielen is erg klein. De normaalkrachten worden groter met elke verdieping die er bij komt. Er wordt daarom een alternatief ontworpen op basis van het HE280M profiel.

De afmetingen en krachtopname van dit staalprofiel vormen de randvoorwaarden van de alternatieven. Op basis van deze voorwaarden zijn er twee soorten kolommen ontworpen van VVHSB. De basis is hetzelfde, het verschil zit in de wapeningskwaliteit en daarmee het toe te passen wapeningspercentage. In het volgende figuur zijn de kolommen uitgewerkt.



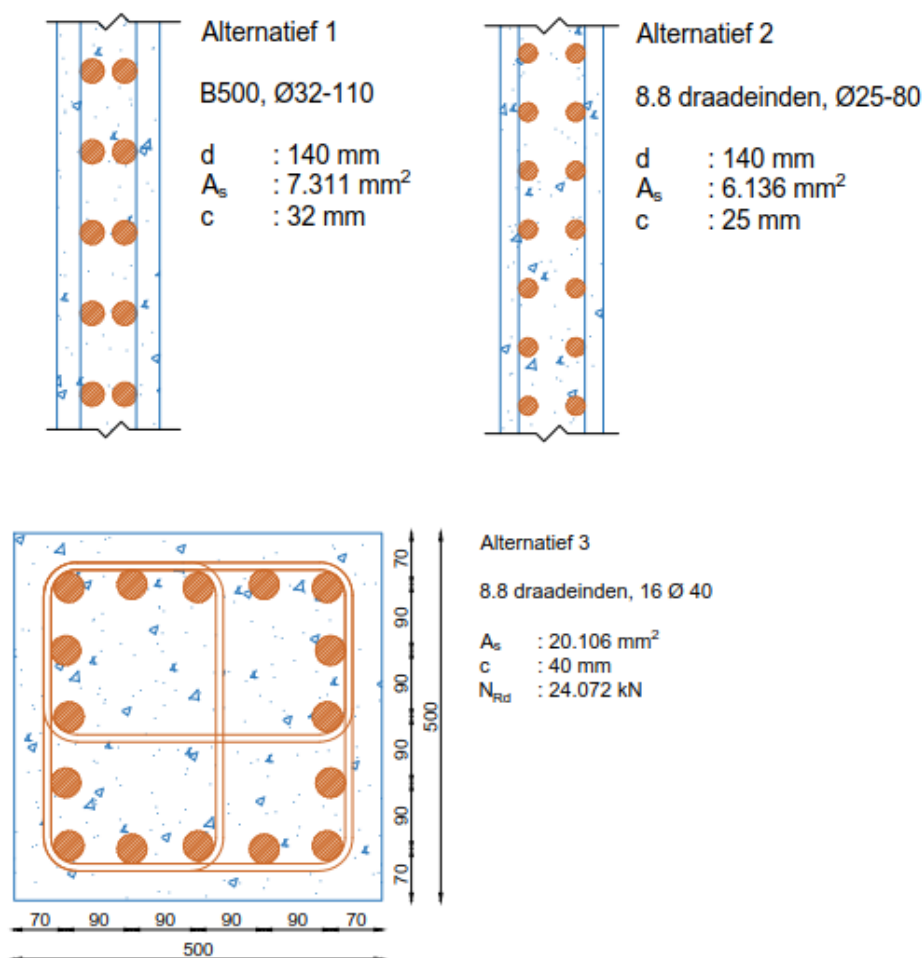
Figuur 14 - Alternatieven bovenste kolommen.

5.7.2 Middelste draagstructuur

De middelste draagstructuur is in het huidige ontwerp van wanden voorzien. Met behulp van VVHSB kan mogelijk een kolommen-draagstructuur worden toegepast. Door het toepassen van een kolommen-draagstructuur wordt het gebouw meer transparant en zou een meerwaarde kunnen worden gecreëerd.

In het eerste ontwerp zal de huidige wandenstructuur vervangen worden door betonwanden van VVHSB. De aankoopkosten van het hoge sterktebeton is hoger dan conventioneel beton en daarom is een reductie in materiaal noodzakelijk om de sterkte economisch te benutten. De huidige dikte van de wanden is 300 millimeter. De dikte van de wanden is gelimiteerd op 140 millimeter door bouwfysische eisen. Deze dikte kan alleen behaald worden met de toepassing van 8.8 draadeinden zoals te zien is in de eerste twee alternatieven.

De potentie van het materiaal zit echter in de mogelijkheid om een zo slank en transparant mogelijke structuur te creëren. In het tweede ontwerp worden daarom de betonwanden vervangen door kolommen. Om het aantal kolommen uniform te houden met het aantal dat boven in de toren is toegepast, is het maximum aantal kolommen 20 stuks.



Figuur 15 - Alternatieven middelste draagstructuur.

5.7.3 Onderste kolommen

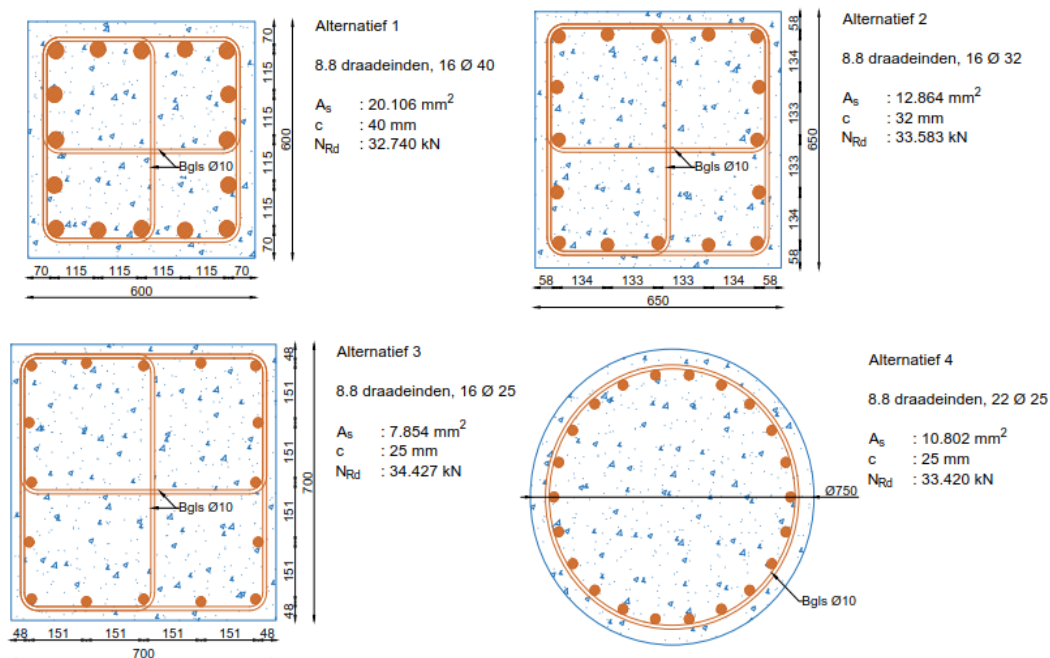
De derde en laatste draagstructuur die is toegepast in het huidige ontwerp zijn staal-betonkolommen. De betonkolommen hebben een diameter van rond 750 millimeter en zijn voorzien van een HD 400-592 staalprofiel.

Onderstaand zijn de randvoorwaarden weergegeven voor het nieuwe ontwerp.

Maximale afmetingen : 750 x 750 mm

$N_{Rd} = N_{Ed}$: 33.150 kN

Op basis van deze voorwaarden zijn er meerdere varianten ontworpen. De varianten verschillen in omvang en soort. Er is gekeken naar de toepassing van ronde kolommen en vierkante kolommen. Daarnaast is er gekeken naar de economisch optimale verhouding tussen het wapeningspercentage en de hoeveelheid beton.



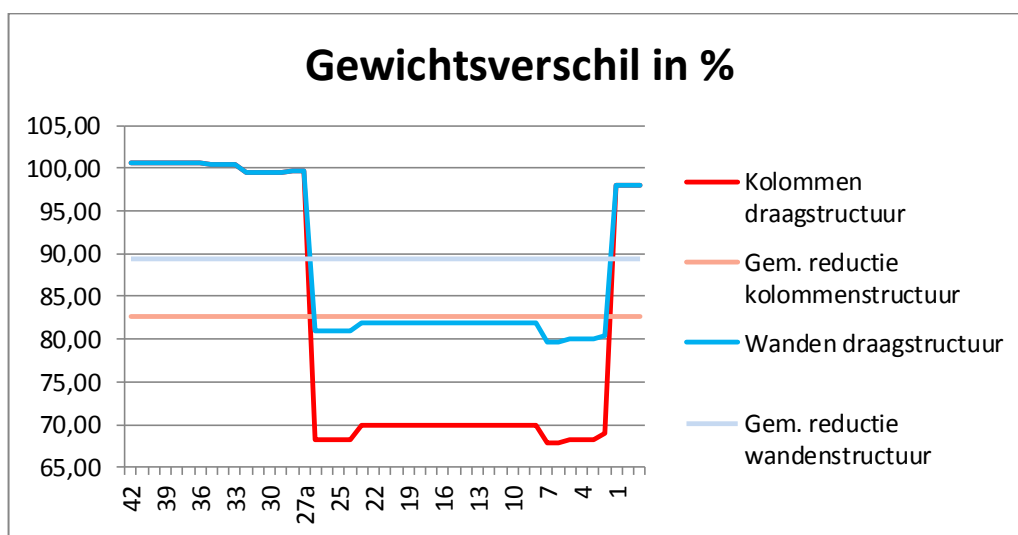
Figuur 16 - Alternatieven kolommen onderste verdiepingen.

5.8 Impact op fundering

Afhankelijk van de gekozen alternatieven is er winst te behalen op het gebied van gewichtsbesparing.

- Indien de middelste draagstructuur wordt vervangen door kolommen is er naast het economische voordeel een grote impact zichtbaar op het gewicht en dus op de fundering. Dankzij de reductie in de toegepaste materialen levert dit een aanzienlijke reductie in gewicht op van 17,5%.
- Indien deze betonwanden vervangen worden voor een VVHSB wandenstructuur is er een reductie in gewicht mogelijk van 11%.

In de onderstaande figuur is een representatie te vinden van het gewichtsverschil tussen de huidige en de nieuwe constructie. De volledige gewichtsberekening is terug te vinden in 'bijlage X – Gewichtsberekening'.



Figuur 17 - Gewichtsverschil huidige constructie t.o.v. de alternatieven%.

Bovenin is eerst een kleine toename in het gewicht te zien waarna deze geleidelijk aan afneemt. De hoeveelheid staal in de bovenste verdiepingen neemt af terwijl de omvang gelijk blijft. De betonkolommen veranderen niet van omvang waardoor deze bovenin zwaarder uitvallen als onderin de top. Dit effect is echter verwaarloosbaar.

Onderin is een kleine afname in gewicht waarneembaar. Dit komt doordat de gekozen alternatieven voor de vergelijking kleiner zijn in omvang als het origineel.

Indien de middelste draagstructuur op voorhand als een kolommenstructuur was uitgevoerd valt te concluderen dat het gewichtsverschil en daarmee de impact op de fundering minimaal is.

5.9 Subconclusie

De huidige draagstructuur is volledig te vervangen voor een structuur van VVHSB zonder dat dit ten koste gaat van de transparantie. Integendeel zelfs, ter plaatse van de midden structuur zorgt een vervanging van de draagstructuur voor een verhoogde transparantie.

Het vervangen van de draagstructuur is echter wel afhankelijk van de toepasbaarheid van 8.8 draadeinden. Als blijkt dat 8.8 draadeinden zonder complicaties toegepast kunnen worden in VVHSB structuren, zijn de vooruitzichten voor het vervangen van de draagstructuur zeer positief.

De staalstructuur in de top van de woontoren kan kosten-efficiënt vervangen worden. De afmetingen van de betonkolommen zijn gelijk aan de afmetingen van de staalkolommen en de krachtopname is gelijkwaardig. Door de hoge aankoopkosten en brandveiligheidsmaatregelen zijn stalen kolommen erg duur. Indien de kolommen uitgevoerd worden in VVHSB kan 50% bespaard worden op de bouwkosten, zie paragraaf 6.4.2.

De wandenstructuur in het midden van de toren is te vervangen voor VVHSB wanden maar dit levert geen meerwaarde op. De wanden kunnen 53% dunner worden uitgevoerd, maar door de hoge materiaalkosten vallen deze 22% duurder uit.

De wandenstructuur is te vervangen door kolommen. Indien de wandenstructuur vervangen wordt door VVHSB kolommen komt dit neer op 20 kolommen van 500 x 500 millimeter groot. Deze reductie in materialen zorgt er voor dat er maar liefst 77% op de uitvoeringskosten bespaard kan worden. Tevens zorgt een kolommenstructuur voor meer transparantie, wat een meerwaarde oplevert in het na-traject.

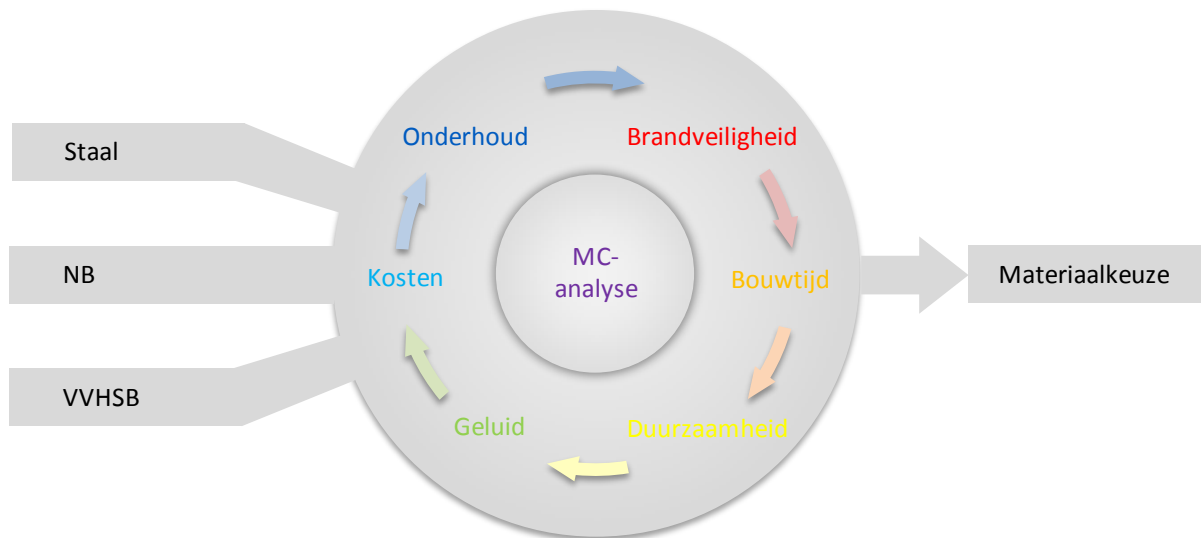
De kolommen ter plaatse van de begane grond kunnen eveneens effectief vervangen worden voor VVHSB. Deze kolommen kunnen slanker worden uitgevoerd en leveren een besparing op van meer dan 50% in uitvoeringskosten.

De hele draagstructuur is gecontroleerd op knik en voldoet aan de gestelde eisen.

6

Multicriteria-analyse

In hoofdstukken 4 & 5 is de huidige elementenstructuur van De Montevideo geanalyseerd. Op basis van deze analyse is er een aantal alternatieven ontworpen met VVHSB. Om de verschillen tussen de huidige constructie en de alternatieven duidelijk in kaart te brengen worden deze alternatieven vergeleken door middel van een multicriteria-analyse. Onderstaand figuur geeft het principe weer van de mc-analyse.



Figuur 18 - Principe multicriteria-analyse.

In de mc-analyse worden de volgende onderwerpen behandeld:

- Bouwfysica
- Bouwtijd
- Duurzaamheid
- Kosten

6.1 *Bouwfysica*

6.1.1 *Brandveiligheid*

Beton en staal zijn beide bouwmaterialen met de hoogste brandclassificatie. De materialen verbranden niet en er komt ook geen warmte of rook vrij. Toch zijn er grote verschillen waarneembaar tussen de materialen.

Staal

Door de hoge sterkte-gewichtsverhouding is er veel staal gebruikt ter plaatse van de top van de woontoren. De sterkte van staal wordt sterk beïnvloed door temperatuursverschillen. Bij een temperatuur van 800°C heeft onbeschermd staal nog maar 10% van de sterkte over. Om het staal te beschermen is het noodzakelijk extra voorzieningen aan te brengen. Vanwege het zichtwerk is er bij de Montevideo gekozen voor het aanbrengen van een brandwerende coating.

Conventioneel beton

Op het gebied van brandveiligheid heeft het werken met beton daarom ook de voorkeur. Als een betonnen constructie goed ontworpen en uitgevoerd is, houdt deze stand tijdens de meest extreme branden. Een betonnen afscheiding vormt een effectief hitteschild. Daarnaast vertraagt een betonnen scheiding de verspreiding van brand.

VVHSB

Over de toepassing van staalvezelbeton is op het gebied van brand tot nog toe weinig bekend. In 2012 is door György Balázs en Éva Lublóy een onderzoek gestart naar het spatgedrag van staalvezelbeton tijdens brand. Ondanks dat de vooruitzichten van dit onderzoek positief zijn, is dit onderzoek afdoende en zijn er vervolgonderzoeken noodzakelijk om deze vooruitzichten te bevestigen. Er zijn positieve effecten aanwezig op het gebied van brandveiligheid met de toevoeging van staalvezels aan het beton maar de effecten zijn nog niet voldoende aangetoond.

6.1.2 *Geluid*

Externe geluidsbronnen kunnen bijzonder hinderlijk zijn. Om deze reden is er een minimale hoeveelheid massa nodig om in praktische zin te voldoen aan de geluidseis. De soortelijke massa van VVHSB verschilt niet van conventioneel beton. Om aan de geluidseis te voldoen is er geen verschil mogelijk in omvang van de structuur.

Indien er gebruik wordt gemaakt van een stalen structuur zijn er extra geluidsreducerende middelen noodzakelijk. Deze geluidsreducerende middelen zijn erg duur om toe te passen. Op het gebied van geluidsbeheersing heeft de toepassing van beton hierin de voorkeur.

6.2 *Bouwtijd*

De uitvoeringstijd is gebaseerd op ervaring aanwezig onder de constructeurs binnen ABT. De ontwerpen zijn niet geverifieerd door een uitvoerende partij.

6.2.1 *Vloeren*

In het referentieontwerp bestaan de topvloeren uit een raster van stalen liggers die ter ondersteuning dienen voor de betonnen breedplaatvloer (paragraaf 4.1.1). Dit is een snelle en efficiënte uitvoeringsmethode. De stalen kolommen worden gelast aan het stalen raster en de breedplaten worden hier tussen gelegd. De breedplaten dienen tevens als bekisting voor het gietwerk. Nadat de breedplaten volledig zijn ingelegd, wordt het beton gestort. De profielen in het stalen raster zijn vooraf voorzien van gaten ten behoeve van de kabels en leidingen. Er is achteraf weinig ruimte voor eventuele correcties bij het aanbrengen van de kabels en leidingen.

Het alternatief is een monoliete betonvloer van VVHSB (paragraaf 4.4). Met de toevoeging van stalvezels is het mogelijk om de stalen profielen te verwijderen. Nadat de bekisting is aangebracht kan direct het beton worden gestort. Met de toevoeging van staalvezels gaat de verwerkingstijd achteruit. Met het achterwege laten van het stalen raster is er weinig laswerk vereist en is er veel ruimte voor het leggen van de kabels en leidingen.

6.2.2 *Draagstructuur*

Gekeken naar wapening leveren VVHSB-kolommen een grote besparing op ten opzichte van conventioneel beton. De wapening in conventioneel beton moet op het werk aan elkaar gevlochten en gelast worden. De toepassing van 8.8 draadeinden in een VVHSB-kolom zorgt ervoor dat de wapening eenvoudig door te koppelen is, zonder dat hier laswerk aan te pas komt.

Het plaatsen van stalen kolommen is erg snel. De staalkolommen worden in de fabriek klaar gemaakt voor gebruik. De benodigde bewerkingstijd op de bouwplaats is hiermee minimaal. De stalen profielen moeten echter wel gelast worden aan het stalen raster, aanwezig in de vloer. Ook moeten de stalen kolommen geconserveerd worden om de brandwerendheid te verhogen.

6.2.3 *Verschillen in bouwtijd*

Naar verwachting is er minimaal tijdsverschil in de uitvoering van de constructie.

- Met het achterwege laten van het stalen raster in de vloer valt de meeste winst te halen voor VVHSB. Er is minimaal laswerk nodig en dankzij de staalvezels is er minder wapening nodig. Het plaatsen van de breedplaten, bekisting, het ontkisten en de betonstort zullen in de praktijk weinig tijdsverschil opleveren.
- Er is weinig tot geen tijdswinst te behalen indien staalkolommen worden uitgevoerd in VVHSB. Met de toepassing van 8.8 draadeinden is er veel winst te halen indien conventionele betonkolommen worden uitgevoerd in VVHSB.

In onderstaande tabel staan de verschillen overzichtelijk weergegeven.

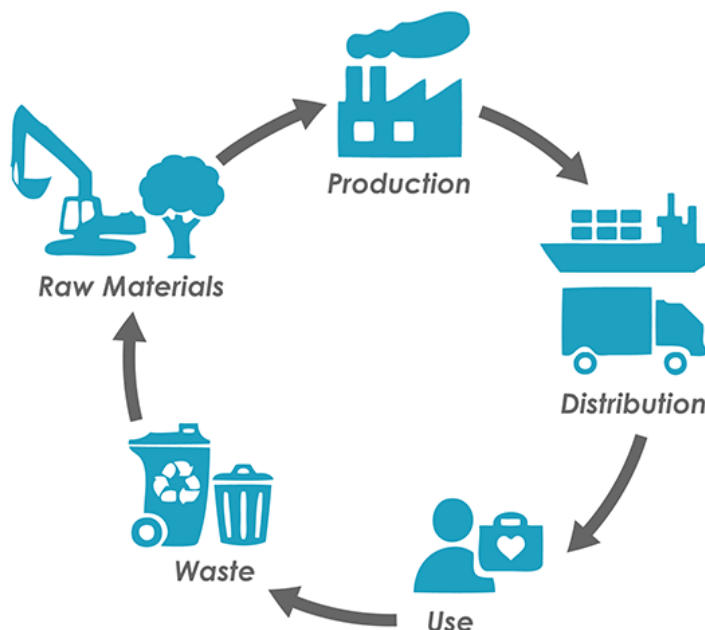
Verschillen in uitvoeringstijd		
Soort	Hybride-vloer	VVHSB-vloer
Verwerkbaarheid	De verwerkbaarheid van het beton is goed.	De verwerkbaarheid van het beton gaat achteruit door de toevoeging van staalvezels.
Wapening	Veel wapening aanwezig, dus vlechtwerk. De wapening moet door de walsprofielen getrokken worden.	Minimale hoeveelheid wapening, weinig vlechtwerk.
Bekisting	De bekisting bestaat uit breedplaten, er wordt geen extra bekisting toegepast.	Indien de draagstructuur en de vloer beide uit beton bestaan kan deze worden gerealiseerd door tunnels.
Lassen	Veel laswerk vereist.	Weinig tot geen laswerk vereist.
Brandwerendheid	Er zijn maatregelen nodig om de onderflens te beschermen tegen brand.	Er zijn geen maatregelen nodig om de brandwerendheid te verhogen.
K&L	Er is minimale ruimte voor eventuele correcties op de bouwplaats.	Grote vrijheid in het plaatsen van de K&L.

Soort	Staalkolommen	VVHSB-kolommen
Verwerkbaarheid	Staalprofielen zijn vooraf klaargemaakt voor de uitvoering.	De verwerkbaarheid van het beton gaat achteruit door de toevoeging van staalvezels.
Wapening	-	Met de toepassing van 8.8 draadeinden kan de wapening gemakkelijk doorgespleet worden.
Bekisting	-	Bekisting bestaat uit een tunnelkast, ter bevordering van de bouwtijd.
Lassen	Er is veel laswerk vereist.	Er is geen laswerk nodig.
Brandwerendheid	Betimmering van de kolommen noodzakelijk om de brandweerstand te verhogen.	Er zijn geen maatregelen nodig om de brandweerstand te verhogen.

Tabel 1 - Verschillen in uitvoeringstijd voor de huidige bouwmethoden en VVHSB.

6.3 Duurzaamheid

Duurzaamheid is een begrip waar veel verschillende definities en interpretaties aan hangen. Om dit begrip helder te krijgen is er in Nederland een bepalingsmethode opgesteld. Deze bepalingsmethode is gebaseerd op de levens cyclus analyse (LCA). Met de LCA-methode wordt de impact van een product op de omgeving gemeten in elk stadium van diens levensduur. Dit is goed te zien in de onderstaande figuur.



Figuur 19 - Schematische weergave levenscyclus analyse.⁹

Uit het literatuuronderzoek is naar voren gekomen dat beton een bijzonder duurzaam materiaal is (LO-p29-30,43,62-63). De meeste betonnen kunstwerken worden ontworpen voor een levensduur van 50 jaar. Een ruime meerderheid van de civiele constructies in de Nederlandse infrastructuur is inmiddels over de helft van de beoogde levensduur. Een deel heeft de beoogde leeftijd zelfs al bereikt.¹⁰

Het vervangen van civiele constructies is niet goedkoop. Om deze reden is het van belang om de kunstwerken zo lang mogelijk te behouden. Theoretisch kan VVHSB dankzij de compacte betonmatrix een levensduur van 200 jaar zonder problemen bereiken. Een bijkomend voordeel is dat het gebruik van hoge sterktebeton bijzonder laag is in onderhoud vergeleken met conventioneel beton.

Gekeken naar levensduur en onderhoud heeft het gebruik van VVHSB een onbetwiste voorkeur ten opzichte van bouwen met staal en conventioneel beton.

Als er gekeken wordt naar de 'cradle to cradle' cyclus heeft het bouwen met staal echter de voorkeur, aangezien dit nu al voor 100% recyclebaar is. De technieken om vezelversterkt beton volledig te recyclen zijn inmiddels aanwezig maar zijn echter nog vrij nieuw en worden nog niet op grote schaal toegepast.

⁹ Bron: <https://thelcacentre.com/en/what-is-lca/>

¹⁰ (Levensduurverlenging kunstwerken)

6.4 Kosten

De aankoopkosten van staal is aanzienlijk duurder als dat van beton. Het resultaat is dat met de toepassing van staal de draagstructuur slanker kan worden uitgevoerd als een structuur van conventioneel beton. Wanneer er echter gewerkt wordt met VVHSB is het mogelijk om dezelfde slanke structuur te maken met het gebruik van aanzienlijk minder staal. Het volgende hoofdstuk is gebaseerd op de analyses uitgevoerd in '**bijlage V - Kostenvergelijking**'.

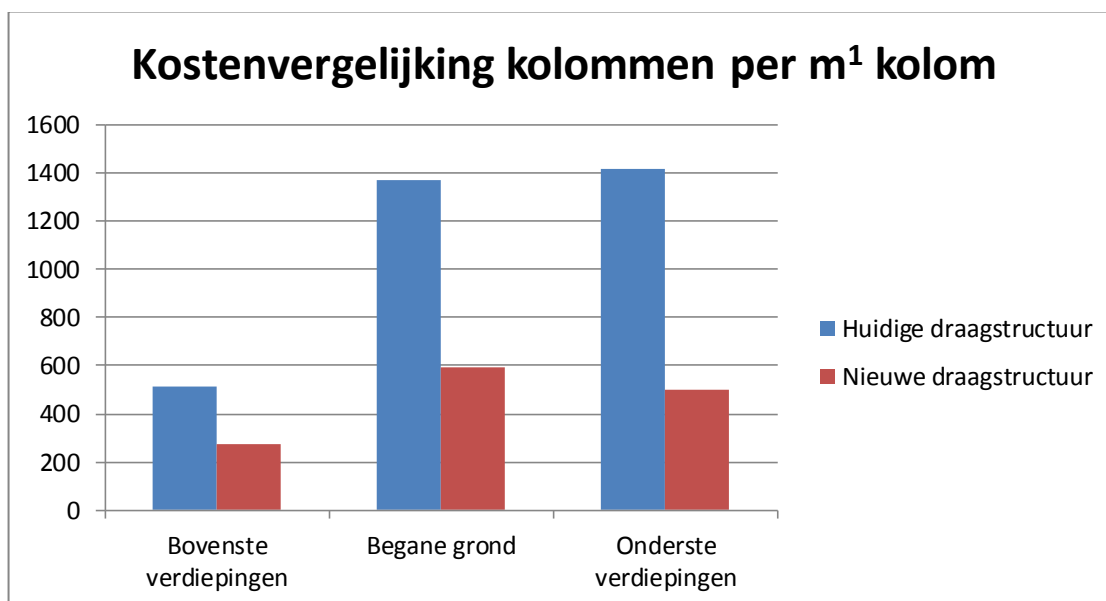
6.4.1 Vloeren

De huidige vloer is uitgevoerd in conventioneel beton met geïntegreerde HE200B staalprofielen. Wanneer de vloer wordt ontworpen in VVHSB wordt het gebruik van staal aanzienlijk verminderd, wat gunstig is voor de aankoopprijs. De aankoopkosten van het beton zijn dermate hoog dat een besparing in het gebruik van het materiaal noodzakelijk is. Gekeken naar de vloer is dit echter niet mogelijk. Om te voldoen aan de geluidseis is er geen reductie in de vloerhoogte mogelijk.

De aankoopkosten voor de staal-betonvloer zijn gelijk aan de kosten van de VVHSB vloer en op basis van deze gegevens blijft een aanbeveling uit. De verschillen in uitvoering zijn doorslaggevend.

6.4.2 Kolommen

Gekeken naar de huidige kolommenstructuur in vergelijking met de kolommenstructuur van VVHSB is er een aanzienlijke reductie in de aankoopkosten mogelijk van 50%. Dit betekent dat de huidige draagstructuur vervangen kan worden voor de helft van de kosten zonder dat dit ten koste gaat van de kwaliteit of ruimte. In de onderstaande figuur is het verschil in aankoopkosten tussen de huidige kolommenstructuur en de alternatieven weergegeven.



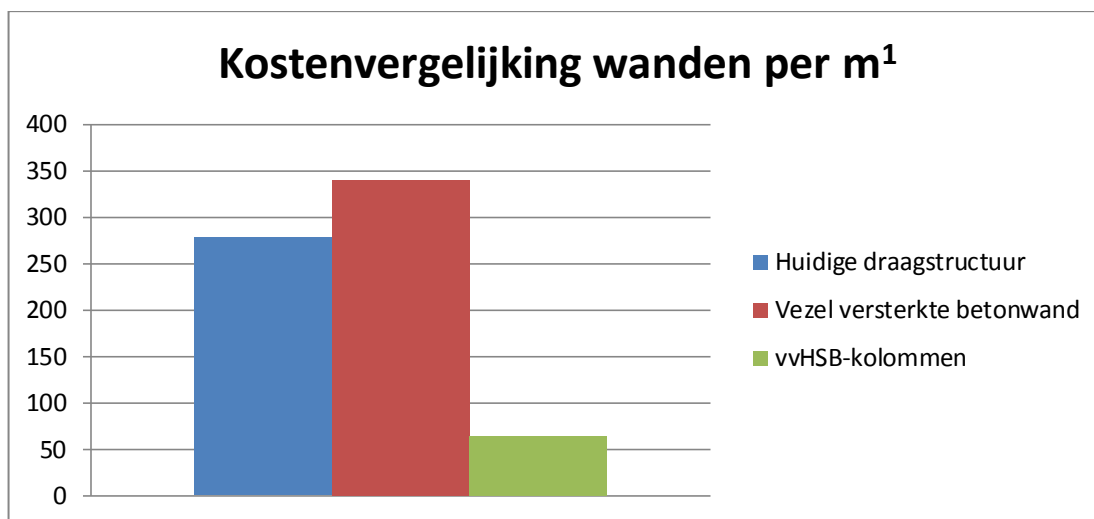
Figuur 20 - Kostenvergelijking kolommen huidige draagstructuur versus de nieuwe draagstructuur.

De draagstructuur in het midden van de toren bestaat uit betonnen wanden. Het mag direct duidelijk zijn dat er geen kostenreductie mogelijk is indien dezelfde wand wordt uitgevoerd in VVHSB, aangezien dit beton meer kost. Wanneer de hoeveelheid materiaal verminderd word naar de minimaal toegestane dikte volgens de geluidseis valt het ontwerp zo'n 22% duurder uit.

Hieruit valt te concluderen dat, indien er gekeken wordt naar een wand van conventioneel beton versus een wand van VVHSB, dat de hoeveelheid vermindering van het materiaal van groot belang is. In theorie kan een wand van VVHSB kosteneffectief zijn indien de hoeveelheid materiaal voldoende gereduceerd word. Om te voldoen aan bouwfysische eisen wordt er in de praktijk al snel aangelopen tegen de minimale hoeveelheid massa die toegepast moet worden. In een één op één vergelijking is het dus voordeliger om wanden uit te voeren in conventioneel beton.

Het toepassen van wanden gaat echter ten koste van de vrije indeelbaarheid van het gebouw. De indeling is op voorhand bepaald en kan in de toekomst niet worden aangepast. Hierdoor zijn deze verdiepingen minder aantrekkelijk en gaat dit ten koste van de vraagprijs in het na-traject. Wanneer de wanden vervangen worden door kolommen, uitgevoerd in VVHSB wordt de transparantie aanzienlijk verhoogd. Daarnaast wordt er genoeg materiaal bespaard om het lucratief te maken.

De vraagprijs per vierkante meter gaat omhoog door de verhoogde transparantie en vrije indeelbaarheid van het gebouw en tegelijkertijd wordt er ca. 77% bespaard in de uitvoeringskosten zoals te zien is in het onderstaande figuur.



Figuur 21 - Kostenvergelijking wanden in de middenstructuur.

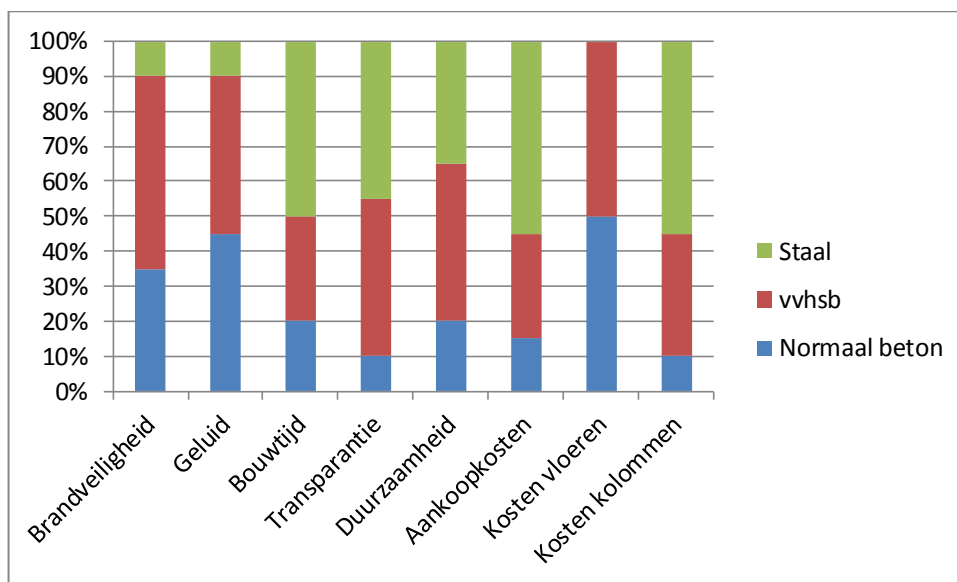
6.5 Subconclusie

Omdat de toepassing van de materialen afhankelijk is van meerdere criteria is deze mc-analyse opgesteld. Door middel van een mc-analyse zijn de voor- en nadelen van de materialen inzichtelijk gemaakt. In voorgaande paragrafen zijn de belangrijkste onderwerpen besproken die van toepassing zijn voor deze analyse. De resultaten zijn verwerkt in onderstaande effectentabel.

	NB	VVHSB	Staal
Brandveiligheid	+	++	-
Geluid	+	+	-
Bouwtijd	0	+	++
Transparantie	-	++	++
Duurzaamheid	0	++	+
Aankoopkosten	++	0	--

Tabel 2 - Effectentabel op basis van de mc-analyse.

Als er een waarde aan de resultaten van de effectentabel wordt gehangen, wordt de verhouding van de materiaalvoorkeur inzichtelijk voor het desbetreffende onderwerp. Zie onderstaand figuur.



Figuur 22 - Verhouding materiaalbijdrage per onderwerp.

7 Conclusies en aanbevelingen

In de huidige architectuur wordt transparantie steeds belangrijker. Om deze transparantie te bereiken wordt er snel gekeken naar een staalconstructie. Door de hoge sterkte-gewicht ratio is staal ideaal voor het maken van een slanke en open structuur. Met vezelversterkt hoge sterktebeton is het mogelijk om deze slanke en open structuur te bewerkstelligen in beton.

De huidige constructie van de Montevideo heeft als referentie gediend voor de vergelijking. Na een grondige analyse blijkt dat elk element, zowel de vloeren als de draagstructuur, vervangen kan worden door vezelversterkt hoge sterktebeton. Het vervangen van de draagstructuur heeft een grotere meerwaarde dan het vervangen van de vloer.

De kracht van vezelversterkt hoge sterktebeton is dat het op een kostenefficiënte manier een staalconstructie kan vervangen zonder dat dit ten koste gaat van de transparante omgeving. Ondanks de hoge aankoopkosten is het beton goedkoper dan een vergelijkbare staalconstructie. Daarnaast is er een grote meerwaarde te halen in het na-traject door de verhoogde transparantie in de middenstructuur.

Vezelversterkt hoge sterktebeton zorgt voor een comfortabele en veilige leefomgeving. Het is een bijzonder duurzaam product met een verhoogde levensverwachting ten opzichte van conventioneel beton en staal. Daarnaast is het materiaal nagenoeg onderhoudsvrij.

Indien de uitvoering goed wordt verzorgd en strak wordt ingepland is het tijdsverlies van bouwen met VVHSB in vergelijking met de staalbouw minimaal.

Aanbevelingen ten behoeve van een vervolgonderzoek

Voor dat vezelversterkt hoge sterktebeton volledig toegepast kan worden in de huidige constructiewereld zijn er nog een aantal vervolgonderzoeken nodig:

- Er is een aantal onderzoeken geweest op het gebied van een verhoogde brandveiligheid met de toevoeging van staalvezels. Met de toevoeging van polypropyleenvezels is een verhoogde brandweerstand reeds bewezen. Ondanks een positieve prognose is de toevoeging van staalvezels op het gebied van brandveiligheid nog onvoldoende onderzocht. Voor meer informatie zie LO p39-41.
- Met de toevoeging van staalvezels heeft beton een grotere toelaatbare drukrek. Door de verhoging van de drukrek is het bevorderlijk om de wapeningshoeveelheid te verhogen. De wapeningshoeveelheid is wegens praktische toepasbaarheid gelimiteerd op 4% van het betonoppervlak. De drukcapaciteit van de kolom zou verhoogd kunnen worden met de toevoeging van 8.8 draadeinden, waardoor de wapening efficiënt gekoppeld kan worden. De verhoging van de drukrek door de toevoeging van staalvezels is nog niet onderbouwd met onderzoek. De effecten van 8.8 draadeinden op het beton moeten worden onderzocht. Voor meer informatie zie hoofdstuk 5.4 & 5.5.

Begrippenlijst

Alluris	: Het studentinformatiesysteem binnen de HAN.
Bekisting	: Tijdelijk aangebrachte mal waarin beton wordt gestort.
Beton	: Kunstmatig steenachtig materiaal.
Betonrot	: Schade aan het beton door roestende wapening.
Beugels	: Dwarskrachtwapening.
Bindmiddelen	: Stoffen die de toeslagstoffen van het beton samenbinden.
Brandklasse	: Een groep van gelijksoortige branden, geordend naar de aard van brandende stoffen.
Breukspanning	: Spanning die bezwijken van het materiaal tot gevolg heeft.
Carbonatie	: Chemische reactie waarbij CO ₂ indringt op de alkalische bestanddelen in het beton.
Carbon footprint	: De hoeveelheid CO ₂ -uitstoot in de atmosfeer bij het verkrijgen van een materiaal.
Cement	: Basis bestanddeel van beton, verkregen uit de betonklinker.
Competentie	: Een geïntegreerd geheel van kennis en inzicht, vaardigheden en attitudes.
Consistentieklassen	: Verwerkbaarheidsklasse van beton.
Constructiestaal	: Laaggelegeerd staal dat gebruikt wordt in de constructie.
Conventioneel beton	: Beton met sterkteklasse C30/37.
Corrosie	: Chemische aantasting van materialen door diens omgeving.
Dekking	: Afstand tussen de buitenkant van het beton tot het dichtstbijzijnde wapeningsstaal.
Dichtheid	: Soortelijke massa van een materiaal.
Draagstructuur	: Hoofdstructuur die de krachten overbrengt op de fundering
Druksterkte	: De mate waarin een materiaal weerstand kan bieden tegen drukkrachten.
Ductal	: Merk UHSB.
Ductiliteit	: De mate waarin een materiaal plastische vervorming toelaat.
Duplexsysteem	: Manier van bescherming van het staal tegen corrosie.
Duurzaamheid	: Ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen.
Elasticiteitsmodulus	: Maat voor de stijfheid van een materiaal t.o.v. de rek onder een belasting.
Elasticiteitstheorie	: Theorie over elastische vervorming.
Ephorus	: Een programma voor plagiaatcontrole.
Faculteit	: Organisatorische eenheid van de HAN waarin instituten met verwante opleidingen zijn samengebracht.
Gewapend beton	: Beton met wapeningsstaal.
Hoogbouw	: <i>“Een te bouwen bouwwerk waarin een vloer van een gebruiksgebied hoger dan 70 m boven of lager dan 8 m onder het meetniveau ligt”</i> volgens bouwbesluit 2012 Artikel 2.14.
Hoogoven cement	: Cement gewonnen uit staalklinkers.
Hulpstoffen	: Stoffen die aan de betonsamenstelling worden toegevoegd ter verbetering van de mechanische eigenschappen.
Ing.	: Ingenieur, bachelor graad.
International style	: architectuele stijl in de jaren '70.
Ir.	: Ingenieur, master graad.
Kip	: Uitbuigen van een staaf in de zogenoemde 'zwakke' richting.

Klinker	: Smeltproduct voor het vergaren van cement.
Knik	: Een ongecontroleerde plaatselijke scherpe verbuiging in een rechte of licht gekromde staaf of balk.
Koud walsen	: Walsen van staal met kamertemperatuur.
Langswapening	: Hoofdwapening ter voorkoming van scheurvorming in beton.
Legering	: Een vast, kunstmatig bereid homogeen mengsel van een metaal met één of meer andere elementen.
Major	: De hoofdrichting van de bachelor opleiding waarin de student zijn beroepscompetenties ontwikkelt.
Milieuklasse	: De mate waarin een constructie wordt blootgesteld aan diens omgeving.
Minor	: Deel van de postpropedeutische fase van de bachelor opleiding dat gericht is op verbreding of verdieping van de studie.
Mortel	: Vloeibare staat van beton.
Ontkisten	: Verwijderen van de bekisting.
Portland cement	: Cementmerk.
Prefab	: Gerefabriceert beton.
Profielstaal	: Algemene benaming van diverse staalprofielen die gebruikt worden in de constructie.
Rek	: De mate waarin een materiaal uitrekt onder een gegeven belasting.
Ruwijzer	: Het materiaal dat ontstaat na de eerste fase van het proces waarbij ijzererts wordt omgezet in ijzer.
Scia Engineer	: Een 3D programma voor structureel ontwerp en analyses.
Spuitmortel	: Speciale verf die bij brand opschuimt.
Staal	: Legering bestaande uit ijzer en koolstof.
Staalvezels	: Vezels van staal
Sterkteklassen	: Maat van de sterkte van een materiaal.
Superplastificeerder	: Een sterke waterreducerder ter verbetering van de verwerkbaarheid van beton.
Thermisch verzinken	: Het aanbrengen van een dun laagje zink op het metaal ter voorkoming van roest.
Toeslagmaterialen	: Materialen die aan het cement worden toegevoegd, zoals zand, grind etc.
Treksterkte	: De mate waarin een materiaal weerstand kan bieden tegen trekkrachten.
Verwerkbaarheid	: De mate waarin het beton te verwerken is.
Vloeispanning	: De overgang van elastische naar plastische toestand.
Vulstoffen	: Een stof die aan de betonspecie kan worden toegevoegd ter aanvulling van de hoeveelheid fijn materiaal.
Warm walsen	: Walsen van staal onder verhoogde temperatuur.
Wapeningsstaal	: Staal dat in het beton kan worden aangebracht in de trekzone van beton voor het opvangen van trekspanningen.
w/b	: Water-bindmiddel factor.
w/c	: Water-cement factor.
Werkdag	: Dag niet zijnde zaterdag, zondag, officiële feest- of vakantiedag.

Acroniemen

BF	: Blast Furnace
BGT	: Bruikbaarheids grens toestand
CMOD	: Crack Mouth Opening Displacement
EAf	: Electric Arc Furnace
FIB	: International Federation for structural concrete
HAN	: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
HSS	: High speed steel
LCA	: Levens cyclus analyse
LO	: Literatuur onderzoek
MPa	: Mega Pascal
NB	: Normaal beton
NEN	: Nederlands Europese Norm
PVA	: Plan van aanpak
RWA	: Rook en warmte afvoer
SLS	: Bruikbaarheids grens toestand
UGT	: Uiterste grens toestand
ULS	: Uiterste grens toestand
VVHSB	: Vezelversterkt hoge sterktebeton
VOBN	: Vereniging van ondernemingen van betonmortelfabrikanten in Nederland.

Symbolen

A_{sl}	: De oppervlakedoorsnede van de toegepaste wapening.
b	: Breedte.
b_w	: De kleinste breedte van de doorsnede in de trek-zone.
c	: Betondekking.
d	: De effectieve hoogte van de dwarsdoorsnede.
E_{cm}	: Elasticiteitsmodulus van beton.
E_s	: Elasticiteitsmodulus van het wapeningsstaal.
F_j	: Kracht overeenkomstig met $CMOD_j$.
h_{sp}	: Afstand tussen de zaagsnede en de top van het proefstuk.
l	: Lengte.
$V_{Rd,F}$	: Dwarskracht weerstand van vezelversterkt beton.
$V_{Rd,Fmin}$	: Minimale dwarskracht weerstand van vezelversterkt beton.
W_u	: Maximale scheurwijdte.
α_e	: Elasticiteitsmodulus ratio tussen beton en staal.
β	: Coëfficiënt afhankelijk van het belastingpatroon.
ϵ	: Specifieke vervorming (rek).
ϵ_{sh}	: Krimpspanning.
f_{cd}	: Rekenwaarde van de druksterkte van beton.
f_{ck}	: Karakteristieke cilinderdruksterkte van beton op 28 dagen.
$f_{ck,cube}$	: Karakteristieke kubusdruksterkte van beton op 28 dagen.
f_{cm}	: Gemiddelde cilinderdruksterkte van beton.
f_{ctd}	: Rekenwaarde van de treksterkte van beton.
f_{ctk}	: De karakteristieke trekspanning van het beton zonder vezels.
f_{ctm}	: Gemiddelde axiale treksterkte van beton.
f_{Fts}	: Serviceability residual strength treksterkte in de BGT.
f_{Ftsm}	: De karakteristieke waarde van f_{Fts} .
f_{Ftu}	: Ultimate residual strength treksterkte in de UGT.
f_{Ftuk}	: Karakteristieke uiterlijke trekspanning van vezelversterkt beton met $w_u=1,5mm$.
f_{Rj}	: Resterende buigtrekspanning overeenkomstig met $CMOD_j$.
δ_{peak}	: Verplaatsing bij de maximale kracht.
δ_{SLS}	: Maximale verplaatsing in de BGT.
δ_u	: Maximale verplaatsing in de UGT.
ρ_l	: De langswapeningsratio.
σ	: Spanning.
σ_{cp}	: Gemiddelde stress op de doorsnede A_c voor een centrische kracht N_{Ed} .
σ_s	: Staalspanning t.p.v. een scheur.
σ_{sr}	: Maximale staalspanning in een scheur tijdens de scheurvorming.
γ_c	: Veiligheidsfactor voor beton zonder vezels.
γ_F	: Veiligheidsfactor 1,5 voor ontwerpen met vezels.
τ_{bm}	: Gemiddelde bindingskracht tussen het staal en beton.
$\varnothing_s$	: Diameter langswapening.

Bibliografie

- Bos, F. (2006). Gestapelde hoogbouw, hybride constructie van staal en beton. *Bouwen met staal*, 20.
- Oss, van, S. (2005). *Afstudeeronderzoek "hoe hoger, hoe duurder?"*. Delft: TU Delft.
- z.n. (2013, 11 20). *Vuistregels voor het ontwerpen van een draagconstructie*. Opgeroepen op 11 27, 2017, van Tu delft: http://wiki.bk.tudelft.nl/mw_bk-wiki/images/1/12/Vuistregels.pdf
- z.n. (z.j.). *Levensduurverlenging kunstwerken*. Opgehaald van TNO Innovation for life: <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/bouw-infra-maritiem/roadmaps/buildings-infrastructure/infrastructuur-wegen-spoor-sluizen-bruggen-en-tunnels/levensduurverlenging-kunstwerken/>

-

Vezel versterkt beton in de markt

Literatuuronderzoek



Documentinformatie

Titel : Vezel versterkt beton in de markt
Soort document : Literatuuronderzoek
Verwijzing : V2.0
Status : Definitief
Datum : 18 januari 2018

Opdrachtgever : ABT consulting Engineers in Velp

Consulting Engineers



Onderwijsinstelling : Hogeschool van Arnhem en Nijmegen



Colofon*Auteur*

Naam	Dhr. Rick Schönthaler
Adres	Stationsstraat 28-02 7031 BR Wehl
Tel (mobiel)	+31 623 037 066
E-mail	rickschonthaler@gmail.com

Bedrijfsbegeleider

Naam	Ing. Michaël Menting
Functie	Projectleider civiele techniek Velp
Tel (werk)	+31 263 683 514
Tel (mobiel)	+31 651 230 881
E-mail	m.menting@abt.eu

Afstudeerbegeleiders

	1 ^e begeleider	2 ^e begeleider
Naam	Ir. Thomas Beuker	Ir. Remmelt Visscher
Functie	Hoofddocent mechanica en constructies	Opleidingscoördinator civiele techniek
Tel (mobiel)	+31 655 208 739	+31 655 208 746
E-mail	thomas.beuker@han.nl	r.visscher@han.nl

Revisielijst

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
V1.0	20 september 2017	RRS	Initiële opzet Literatuuronderzoek
V1.0	13 november 2017	RRS	Voorlopig definitief
V2.0	18 januari 2018	RRS	Definitieve versie

Inhoudsopgave

INLEIDING	6
1 INTRODUCTIE	7
1.1 GESCHIEDENIS VAN BETON	7
1.2 GEWAPEND BETON	8
1.3 HOOGBOUW	9
2 BETON.....	11
2.1 PRODUCTIEPROCES	12
2.1.1 Productie cement.....	12
2.1.2 Productie beton.....	12
2.2 GRONDSTOFFEN BETON	13
2.2.1 Toeslagmaterialen.....	13
2.2.2 Bindmiddelen	14
2.2.3 Vulstoffen.....	14
2.2.4 Hulpstoffen.....	14
2.2.5 Dichtheid beton.....	14
2.3 SOORTEN BETON	15
2.4 FASES VAN BETON.....	16
2.5 VERWERKBAARHEID BETON	17
2.6 MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN	18
2.6.1 Druksterkte.....	19
2.6.2 Treksterkte	20
2.6.3 Elasticiteit (stijfheid).....	20
2.6.4 Gewapend beton	21
2.7 FYSISCH EIGENSCHAPPEN	22
2.7.1 Geluid.....	22
2.8 CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN	23
2.8.1 Brandveiligheid	23
2.8.2 Corrosie.....	25
2.9 DUURZAAMHEID BETON	27
2.9.1 Levenscyclus analyse.....	27
2.9.2 Carbon footprint	27
2.10 CONCLUSIE	29
3 VEZEL VERSTERKT ULTRA HOGE STERKTEBETON.....	30
3.1 GRONDSTOFFEN	30
3.1.1 Homogeen materiaal.....	30
3.1.2 Water/bindmiddel factor.....	31
3.1.3 Microsilica	32
3.1.4 Superplastificeerder.....	32
3.1.5 Staalvezels.....	33
3.2 VERWERKBAARHEID	34
3.3 MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN	34
3.3.1 Druksterkte.....	34
3.3.2 Treksterkte	35
3.3.3 Elasticiteitsmodulus.....	36
3.3.4 VVUHSB en impactbelasting.....	36
3.4 FYSISCH EIGENSCHAPPEN	36
3.4.1 Geluid.....	36
3.5 CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN	37
3.5.1 Brand	37
3.5.2 Corrosie.....	40

3.6	DUURZAAMHEID	41
3.6.1	Carbon footprint	41
3.7	REKENMETHODE VOLGENS DE FIB.....	42
3.7.1	F-CMOD-curve.....	42
3.7.2	Lineair elastisch model.....	43
3.7.3	Maximale verplaatsing.....	44
3.7.4	Rekenen met in de uiterste grens toestand	44
3.7.5	Dwarskracht in balken.....	45
3.7.6	Balken zonder dwarskrachtwapening met langswapening.....	45
3.7.7	Balken met dwarskrachtwapening en langswapening	46
3.7.8	scheurwijde controle in elementen	46
3.8	VVUHSB-MENGSEL VOOR HET HOOFDONDERZOEK	47
3.9	CONCLUSIE	48
4	STAAL.....	49
4.1	PRODUCTIEPROCES	49
4.1.1	Primaire staalproductie.....	49
4.1.2	Secundaire staalproductie.....	50
4.2	SOORTEN STAAL	50
4.2.1	Ongelegeerd staal.....	50
4.2.2	Laaggelegeerd staal.....	51
4.2.3	Hooggelegeerd staal	51
4.3	VERWERKBAARHEID STAAL	52
4.3.1	Koud gevormd staal.....	52
4.3.2	Warm gewalst.....	52
4.4	MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN STAAL	52
4.4.1	Vloeigrens.....	53
4.4.2	Treksterkte	54
4.4.3	Druksterkte.....	54
4.5	STAALPROFIELEN	54
4.6	BRANDVEILIGHEID STAAL	55
4.6.1	Actieve maatregelen.	55
4.6.2	Passieve maatregelen.....	56
4.7	CORROSIE.....	58
4.7.1	Thermisch verzinken	58
4.7.2	Duplexsysteem.....	58
4.8	MECHANISCHE BEZWIJKMECHANISMEN	59
4.8.1	Kipinstabiliteit.....	59
4.8.2	Knik.....	59
4.9	DUURZAAMHEID STAAL	60
4.9.1	Recycling.....	60
4.9.2	CO ₂ emissie van constructiestaal.....	61
4.10	CONCLUSIE	62
5	SCIA ENGINEER	63
6	BEGRIPPENLIJST.....	64
7	ACRONIEMEN.....	66
8	SYMBOLEN.....	67
	BIBLIOGRAFIE.....	68
	TABELLEN	69
	FIGUREN	70

Inleiding

Om het hoofdonderzoek in goede banen te leiden is het essentieel om kennis op te doen op het gebied van de te vergelijken materialen. Voorafgaand aan het hoofdonderzoek is een literatuuronderzoek opgesteld ter verbreding van de kennis op het gebied van conventioneel beton, vwhsb en staal.

Tijdens dit literatuuronderzoek is er een brede scope aan informatie verzameld en gecatalogiseerd. Er wordt gekeken naar de opkomst van beton met parallel hieraan de invloeden die dit heeft gehad op de ontwikkelingen binnen de architectuur.

Voor de vergelijking wordt er onderzoek gedaan naar de eigenschappen van drie materialen; conventioneel beton, vezel versterkt hoge sterktebeton en staal. Er wordt onderscheidt gemaakt in de volgende onderwerpen:

- Productieprocessen
- Mechanische eigenschappen
- Fysische eigenschappen
- Chemische eigenschappen
- Duurzaamheid

Het verschil tussen het bouwen met beton of staal kan worden gezien als het vergelijken van appels met peren. In het onderzoek word de vergelijking tussen de materialen zo gelijk mogelijk gehouden. De economische voordelen en de daadwerkelijke kosten worden tijdens het hoofdonderzoek behandeld.

1 Introductie

1.1 Geschiedenis van beton

1.1.1 Prehistorie

De eerste resten van beton zijn terug te vinden in de prehistorie. Ca. 6500 v.C. werden er al betonachtige materialen gebruikt door de Nabataea handelaars die een aantal nederzettingen hebben gebouwd in zuid-Syrië en ten noorden van de Jordaan. Deze handelaars ontdekten de mogelijkheden van gebroken kalksteen dat hard word wanneer het in aanraking komt met water. Rond 700 v.C. waren ze ovens aan het maken om de mortel te krijgen voor het maken van huizen.¹

1.1.2 Egyptenaren

Rond 3000 v.C. waren het de Egyptenaren die een mix gebruikten van stro en klei om bakstenen te maken voor de huizen. Hoewel deze bakstenen werden gebruikt voor de woningbouw, werd een andere combinatie gebruikt bij het maken van piramides. Voor het maken van piramides gebruikten de Egyptenaren kalksteen. Zo is de grote piramide bij Giza gemaakt van kalksteen.¹



Figuur 1 - Piramides van Gizeh.²

1.1.3 Romeinse revolutie

Het is welbekend dat de Romeinen een brede kennis hadden op het gebied van infrastructuur en architectuur. Door een combinatie van vulkanisch as toe te voegen aan kalksteen en water kregen de Romeinen een materiaal dat veel op het huidige beton lijkt. Omdat het toevoegen van staal nog onbekend was kon dit 'beton' weinig trekkrachten opnemen. Dit werd echter gecompenseerd met de manier van ontwerpen. Door het toepassen van bogen in het ontwerp was het mogelijk om grote kunstwerken te maken waarvan sommige vandaag de dag nog steeds aanwezig zijn zoals de Romeinse tempel het Pantheon.



Figuur 2 - Pantheon 3D-model.³

¹ (Shepard)

² <https://pixabay.com/nl/giza-piramide-piramides-van-gizeh-1756946/>

³ <https://pixabay.com/nl/pantheon-rome-architectuur-gebouw-1026997/>

1.1.4 *John Smeaton*

Met de val van het Romeinse rijk zijn veel technologieën verloren gegaan. De betontechnologie kwam pas weer in opkomst medio 18^e eeuw. In 1756 begon John Smeaton met de bouw van de Eddystone vuurtoren.⁴

Voor het ontwerp van deze vuurtoren heeft Smeaton met de hulp van William Cookworthy een cement ontwikkeld. Dit cement bestond uit een combinatie van kalksteen en vulkanisch as en was in staat om uit te harden onder water. Dit cement is de voorloper van de moderne betonmortel zoals we die nu kennen.

1.1.5 *Portland cement*

Halverwege de 19^e eeuw werd er opnieuw een grote sprong gemaakt in de ontwikkeling van cement. Joseph Aspdin ondervond dat een mix van kalksteen, klei en staalklinkers een mortel ontstond dat hard werd onder water. In 1824 heeft Joseph het patent gekregen op Portland cement.⁵ Hij heeft het de naam Portland cement gegeven omdat het gemaakte beton leek op de steensoort die gedolven werd op het eiland Portland in Dorset, Engeland. In 1845 creëerde Isaac Johnson het eerste 'moderne' Portland cement door het verbranden van een mix van kalk en klei op veel hogere temperaturen.⁵ Op temperaturen van 1400 à 1500 graden Celsius worden er klinkers gevormd die een betere vorm van cement tot gevolg had. Deze vorm van cement is de basis geweest van het Portland cement dat we vandaag de dag kennen.

1.2 *Gewapend beton*

1.2.1 *Eerste toepassingen*

Hoewel cement al eeuwen werd toegepast in de bouw, werd gewapend beton pas in de 19^e eeuw geïntroduceerd. De ontwikkeling begon in 1867 toen de Franse tuinman Joseph Monier een patent aanvraagde voor grote betonnen bloempotten met daarin een net van ijzeren draden verwerkt. François Hennebique zag het ontwerp van Joseph en vond een manier om dit materiaal ook toe te passen in de constructie. Hij begon met het toepassen van wapening in betonnen vloeren in 1879 en in 1892 patenteerde hij het gebruik van beton gewapend met hoofdwapening en beugels.⁶

1.2.2 *Elasticiteitstheorie*

Tussen 1900 en 1910 werd de elasticiteitstheorie voor het eerst onderzocht. Emil Morsch heeft deze theorie voor het eerst geformuleerd⁶. Deze formule was later geverifieerd door gedetailleerde experimentele testen aan de Technische Universiteit van Stuttgart. Deze testen lieten de behoefte zien van geribbelde staven voor een goede binding met het beton. Er werd aangetoond dat de hoeveelheid staal in het beton beperkt is tot ca. 8% van het oppervlak om het vloeien van het staal te garanderen.

Vanaf dat moment werd het beton ook toegepast in grootschalige constructies. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld de Centennial Hall (1913) in Breslau. Deze constructie is ontworpen door de architect Max Berg en de ingenieurs van Dyckerhoff & Widmann. Deze koepel is maar liefst 65 meter lang en is daarmee groter dan de overspanning van het Pantheon.

⁴ (Knowles)

⁵ (cement)

⁶ (Britannica, Building construction)

1.2.3 Voorgespannen staal

In 1920 heeft Freyssinet een grote bijdrage geleverd aan de betonindustrie met de introductie van voorgespannen wapeningsstaal. In dit proces waren de staven voorgespannen en werd het beton rondom gegoten. Wanneer het beton hard werd werden de staven losgelaten en het element kreeg een opwaartse buiging en was volledig in samendrukking. Wanneer er een belasting werd aangebracht boog het element weer naar een rechte positie terwijl deze volledig samengedrukt bleef en geen tekenen van trekscheuren ontwikkelde.⁶

1.3 Hoogbouw

Door de toenemende vraag naar kantoor en woonruimte werd de vraag naar hoogbouw steeds groter. Ondanks dat de technologieën toereikend genoeg waren in de 19^e eeuw was het maken van hoge gebouwen verre van aantrekkelijk en dienden er nog een aantal problemen overwonnen te worden.

1.3.1 Hoger als vijf

Begin 19^e eeuw was er geen lift aanwezig in de gebouwen en moesten de mensen lopend naar de bovenste verdieping. Dit heeft er voor gezorgd dat het maken van een gebouw hoger als vijf verdiepingen bijzonder onaantrekkelijk was. Dit was tot Elisha Otis in 1853 een passagiersveilige lift introduceerde.⁷ Dankzij deze uitvinding werd het aantrekkelijk om gebouwen te maken die hoger gingen als vijf verdiepingen.

1.3.2 Draagmuur

Het probleem echter ontstond, dat met de nieuwe hoogte de krachten die opgenomen moesten worden een stuk groter waren. De eerste hoge gebouwen werden gemaakt door middel van een draagmuur die de krachten opneemt. Om het gewicht op te kunnen nemen werden de muren vaak extreem dik en dit ging ten koste van de ruimte. Een goed voorbeeld is het Monadnock gebouw in Chicago (1889).⁸ Deze 16 verdiepingen hoge toren werd gemaakt met een draagmuur die het gewicht op zich moest nemen. Het resultaat was een muur van ruim 1,8 meter dik aan de onderkant en 45 cm dik aan de bovenkant.

1.3.3 Massaproductie van staal

Met het Bessemer proces in ca. 1860 werd er een grote sprong gemaakt in de hoogbouw. Dankzij dit proces werd het mogelijk om staal op grote schaal te produceren. Dankzij het de hoge kracht-gewicht ratio van staal was het mogelijk om grote gebouwen te maken zonder dat dit ten koste ging van de ruimte.

Het "Home Insurance Company Building" dat in 1885 door de architect William Le Baron Jenney was ontworpen, was het eerste gebouw dat gebruik maakte van een stalen draagconstructie. William was tevens de eerste architect die gebruik maakte van een *curtain wall*.⁹ Dit principe bestaat uit een draagstructuur van staal met een buitenste bekleding van metselwerk of ander materiaal dat slechts zijn eigen gewicht draagt en bevestigd en ondersteund wordt door het stalen skelet.

⁷ (Britannica, Elevator)

⁸ (Wikipedia, Monadnock building)

⁹ (Britannica, Skyscraper)

1.3.4 *International style*

Na de 2^e wereldoorlog begon de wereldeconomie weer op gang te komen en werd de vraag naar hoogbouw steeds groter. Het was rond deze tijd dat de *international style* bekendheid kreeg. Deze architectuele manier van ontwerpen bestond uit vaak rechthoekige gebouwen met veel lichtinval zoals te zien is in de onderstaande afbeelding. Deze gebouwen waren gestript van decoratie en waren een uiting van visuele gewichtloze kwaliteit. De constructie bestond voornamelijk uit een combinatie van glas, staal en wat minder zichtbaar gewapend beton. In de jaren 70 begonnen sommige architecten en critici tegen de 'nadelen' aan te lopen van deze stijl. De 'glazen dozen' die karakteristiek waren voor deze stijl werden bespottelijk gemaakt en als reactie hierop ontstond er een nieuwe beweging.¹⁰



Figuur 3 - International style in Chicago.¹¹

1.3.5 *Moderne architectuur*

In de jaren 80 en 90 begon de complexiteit van de gebouwen toe te nemen. Het vakgebied werd steeds meer multidisciplinair benaderd met specialisaties voor elk projecttype, technologische expertise of projectleveringsmethoden. De voorbereidende processen voor het ontwerp van een groot gebouw is steeds ingewikkelder geworden en vereist een voorloop van diverse studies van zaken zoals duurzaamheid, kwaliteit, financiën en naleving van de lokale wetten. Een constructie van dergelijke grote kan niet meer het ontwerp zijn van één persoon maar wordt ontworpen door diverse disciplines. Hiermee is het ontwerp geen persoonlijke filosofische of esthetische navolging meer van individualisten. In plaats daarvan staan de dagelijkse behoeften van de omgeving en het gebruik van nieuwe technologieën centraal om leefbare omgevingen te creëren.¹⁰

¹⁰ (Wikipedia, Architecture)

¹¹ <https://pixabay.com/nl/chicago-architectuur-stad-449021/>

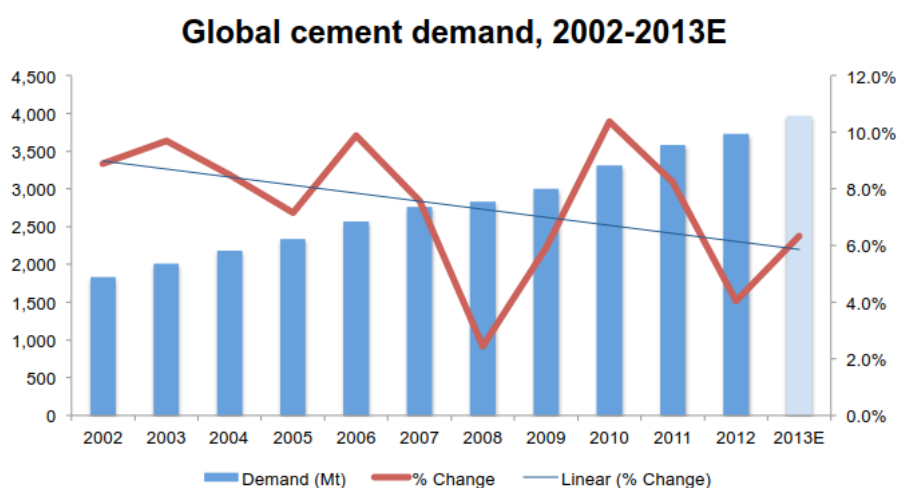
2

Beton

Zoals in hoofdstuk 1 wordt beschreven wordt beton al generaties gebruikt voor het maken van betonnen constructies. Ontwikkelingen zoals Portland cement en de toepassing van wapening-staal in beton hebben er voor gezorgd dat beton op dit moment het meest gebruikte kunstmatige materiaal ter wereld is.

Volgens het *Global Cement Report 10th Edition* is de vraag naar cement gestegen van 1,8 miljard ton in 2002 naar 3,7 miljard ton in 2012. De wereldwijde cementmarkt bedraagt volgens Statista een omzet van respectievelijk 237 miljard U.S. dollars in 2011 en 394 miljard U.S. dollars in 2016.¹² Dit maakt de betonindustrie een van de grootste industrieën wereldwijd waar miljoenen banen afhankelijk van zijn.

In onderstaande afbeelding is de vraag naar cement op wereldniveau te zien tussen 2002 en 2013.



Figuur 4 - Global cement demand 2002-2013.¹³

*“Dit maakt beton het meest gebruikte kunstmatige materiaal ter wereld, met bijna drie ton per jaar voor elke man, vrouw en kind. Twee keer zo veel beton wordt over de hele wereld gebruikt dan het totaal van alle andere bouwmaterialen, waaronder hout, staal, kunststof en aluminium. Geen van deze andere materialen kan voor de meeste doeleinden concreet worden vervangen in termen van effectiviteit, prijs en presentatie”.*¹⁴

¹² (Statista)

¹³ Global cement report 10th edition

¹⁴ (WBCSD)

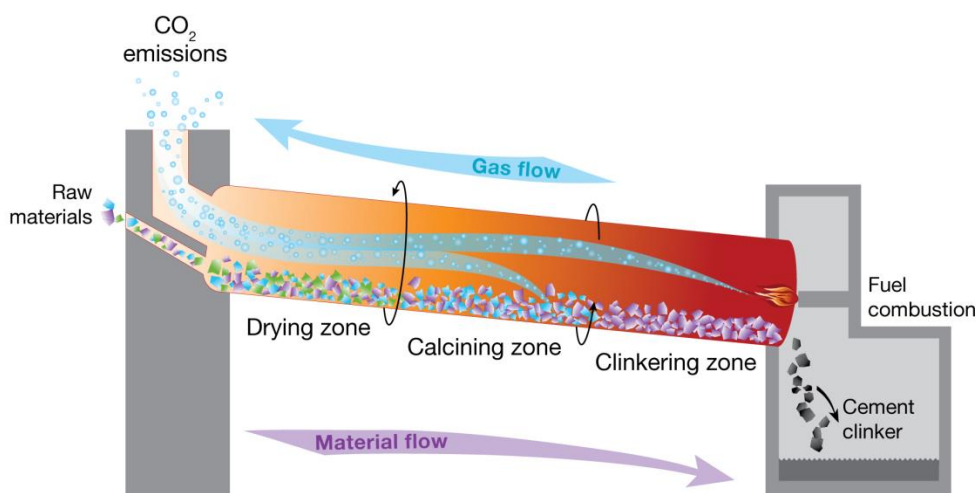
2.1 Productieproces

2.1.1 Productie cement

Het productieproces van beton begint bij het vergaren van kalksteen, het basisbestanddeel van cement. Kalksteen is een sedimentair gesteente dat ontstaat door de opeenhoping van stoffelijke overblijfselen van in zee levende organismen. Kalksteen bestaat voornamelijk uit calciumcarbonaat (CaCO_3) en afhankelijk van de geografische ligging van de mijnen kan kalksteen diverse andere mineralen bevatten zoals ijzer, silica, aluminiumoxide en klei.

Vanuit de mijn worden de gewonnen grondstoffen getransporteerd naar de cementfabriek. In de fabriek wordt de kalksteen fijngemalen tot de grootte van een golfbal. Afhankelijk van de vereiste kwaliteit en de mineralen die van nature al aanwezig zijn in het gesteente kunnen er extra mineralen worden toegevoegd.

Deze ingrediënten worden fijngemalen en in de oven verwarmt tot een temperatuur van ongeveer $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ om er voor te zorgen dat de mineralen samensmelten. Het product wat ontstaat tijdens het samensmelten is een klinker. Deze klinkers worden fijngemalen in de cementmolen tot cement.¹⁵



Figuur 5 Cement productie.¹⁶

2.1.2 Productie beton

In de betonmolen worden de grondstoffen in de gewenste consistentie gemengd. Een betoncentrale beschikt over een omvangrijk pakket aan verantwoorde grondstoffen: diverse cementsoorten, overige duurzame bindmiddelen in verschillende sterkteklassen, vulstoffen, diverse hulpstoffen en tot slot meerdere toeslagmaterialen.¹⁷

Na menging van deze grondstoffen is de betonmortel klaar voor transport naar de bouwplaats. Hier wordt het beton in de bekisting gestort en neemt het na uitharding een definitieve vorm aan.

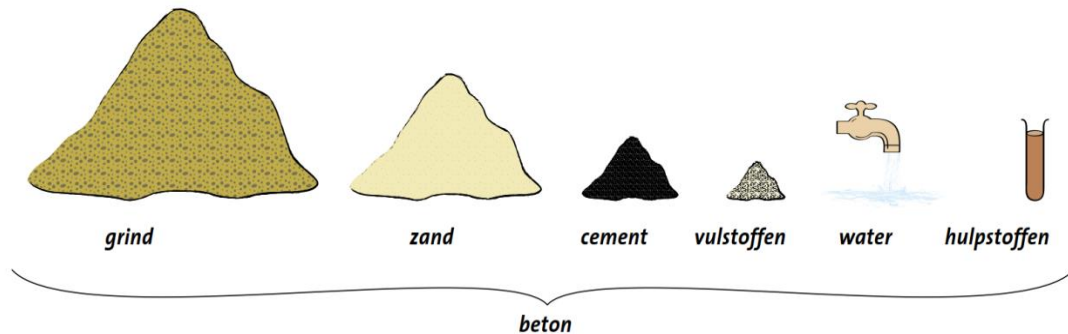
¹⁵ (how it's made, 2007)

¹⁶ <http://nordflux.info/cement-manufacturing-process-flow-diagram.draw>

¹⁷ (VOBN, Grondstoffen van beton, 2013)

2.2 Grondstoffen beton

De grondstoffen voor conventioneel beton bestaan doorgaans uit grind, zand, cement, vulstoffen, water en hulpstoffen. Afhankelijk van de eigenschappen en kwaliteit die gevraagd wordt zijn er verschillende samenstellingen mogelijk.



Figuur 6 - Grondstoffen beton.¹⁸

2.2.1 Toeslagmaterialen

Afhankelijk van de gewenste kwaliteit van het beton zijn er verschillende toeslagmaterialen die gebruikt worden. Er wordt onderscheid gemaakt in grof en fijn toeslagmateriaal. Onderstaand zijn een aantal voorbeelden van grove en fijne toeslagmaterialen weergegeven.

Grof toeslagmateriaal, korrelgroep 4/32.

- Riviergrind
- Betongranulaat
- Zeegrind
- Harde kalksteen
- Graniet
- Geëxpandeerde kleikorrels (voor lichtbeton).

Fijn toeslagmateriaal, korrelgroep 0/4.

- Rivierzand
- Betonbrekerzand
- Zeezand
- Geëxpandeerde kleikorrels

¹⁸ Betonbouwgids 2012

2.2.2 Bindmiddelen

Binnen Nederland zijn er een aantal bindmiddelen toepasbaar. De meest bekende zijn Portland- en hoogovencement. Hoogovencement reageert bij lage temperaturen trager dan portlandcement en bij hoge temperaturen juist sneller. Bij lage temperaturen (winter) heeft het sneller bindende portlandcement de voorkeur; bij hogere temperaturen (zomer) verkiest men vaak hoogovencement. De reactiesnelheid is verder afhankelijk van de fijnheid van het bindmiddel. Een fijner cement reageert sneller dan een grof cement.

Soorten bindmiddelen:

- Portlandcement CEM I
- Hoogovencement CEM III
- Samengesteld Portland cement CEM II (combinatie van portlandcement met poederkoolvlieggas en gemalen hoogovenslak).
- Overige cementen

2.2.3 Vulstoffen

Ter verbetering van het beton kunnen zeer fijnkorrelige materialen worden toegevoegd aan de betonmix. Onderstaand zijn puzzolanen stoffen die in een alkalisch milieu gaan reageren in vergelijkbare vorm als de portlandklinker.

Soorten vulstoffen < 0,063mm:

- Poederkoolvlieggas
- Microsilica
- (kalk)steenmeel

2.2.4 Hulpstoffen

Om een optimale betonkwaliteit te krijgen zijn er diverse hulpstoffen die toegevoegd kunnen worden aan het beton.

- Water reducerende hulpstof, (super) plastificeerders.
- Luchtbelvormers
- Vertragende hulpstof
- Versnellende hulpstof

2.2.5 Dichtheid beton

Afhankelijk van de samenstelling zijn de dichtheden van het beton in te delen in een aantal categorieën:

Licht beton	: 800 – 2000 kg/m ³ .
Normaal beton	: 2000 – 2600 kg/m ³ .
Zwaar beton	: > 2600 kg/m ³ .

2.3 Soorten beton

Op dit moment zijn er diverse soorten beton beschikbaar op de markt. In de onderstaande tabel zijn een aantal voorbeelden van betonsoorten weergegeven.

Soorten beton	Eigenschap	Toepassing
Aardvochtig beton	Vormvast, blijft op eigen kracht staan.	In de wegenbouw bij gebruik slipvormpaver en in de constructie bij de productie van kanaalplaten.
Colloïdaal beton, Onderwater beton	Ontmengt niet onder water of in water. Verkrijgbaar in open en dichte structuur.	Tunnelopritten, funderingen van parkeergarages, oeverbescherming en berm beton.
Hoge sterkte beton	Hoge eindsterkte, snelle sterkteontwikkeling, slank, slijtvast en duurzaam.	Viaducten, grote overspanningen en bij agressief milieu.
Kleurbeton	Kleurpigment toegevoegd, door en door gekleurd.	Gevels, kunstwerken, bouwonderdelen en schoonbeton constructies.
Lichtbeton	Volumieke massa $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$.	Betonconstructies op een ondergrond met een laag draag vermogen, renovaties op een bestaande fundering.
Vezel beton	Staal- of kunststofvezels toegevoegd.	(Bedrijfs)vloeren, wanden, rotondes.
Normaal beton	Gangbare sterkteklasse, milieuklasse, enz.	Boorpalen, funderingen, vloeren, wanden, bruggen en stallen.
Schoon beton	Proces waarbij de esthetische kwaliteit van het betonoppervlak wordt bepaald door vele factoren.	Gevels, geluidsschermen, wegenbouw en binnenwanden.
Vloeistofdicht beton	Hoge weerstand tegen indringing van vloeistoffen.	Bedrijfsvloeren, kuilvloeren, mestopslag en zwembaden.
Zelf verdichtend beton, verdichtingsarm beton	Zeer vloeibaar en homogeen en hoeft niet of nauwelijks verdicht te worden.	Constructies met complexe vormen en/of hoge wapeningsdichtheid en schoonbeton constructies. Veel toegepast in de prefab beton industrie.
Zwaar beton	Volumieke massa $> 2600 \text{ kg/m}^3$.	Straling werende constructies zoals ruimten met röntgenapparatuur in ziekenhuizen.
Hybride gewapend beton	Toevoeging van staalvezels in combinatie met traditioneel wapeningsstaal.	Bedrijfsvloeren waar een beperkte scheurwijdte is gewenst.

Tabel 1 - Soorten beton volgens VOB¹⁹.

¹⁹ <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/beton/soorten-beton>

2.4 Fases van beton

Tijdens het proces van het produceren van betonmortel tot aan de gebruiksfase wordt er onderscheid gemaakt in drie verschillende fasen van het beton:

- Plastische fase
- Verhardende fase
- Verharde fase

Per fase heeft de mortel verschillende eigenschappen waaraan eisen gesteld kunnen worden. Deze eisen zijn afhankelijk van de kwaliteit die gevraagd wordt. Deze kwaliteit is onder andere afhankelijk van invloeden als: de functie van het beton, de omgevingsinvloeden en kosten.

Plastische fase	
Verwerkbaarheid	Consistentieklasse of andere omschrijving
Pompbaarheid	Afstand en/of hoogte
Homogeniteit, stabiliteit	Bleeding, ontmenging
Verwerkingstijd	Versnellen, vertragen

Verhardende fase	
Opstijfgedrag	Aanvang binding
Sterkteontwikkeling	Buig-treksterkte, kubusdruksterkte i.v.m. ontkisten, rijpheid
Warmteontwikkeling	Temperatuurspanningen
Krimpgedrag	Beheersing van scheurvorming

Verharde fase	
Gerealiseerde druksterkte	Kubusdruksterkte op 28, 56 of 91 dagen
Vloeistofdichtheid	Vloeistofindringing
Duurzaamheid	Chloridemigratie, 100 jaar duurzaamheid
Kleur	Kleurstoffen, cementkeuze (grijschaal)

Tabel 2 - Eisen betonmortel per fase.²⁰

²⁰ Betonbouwgid 2012

2.5 Verwerkbaarheid beton

Onder de verwerkbaarheid van beton verstaan we een combinatie van:

- De mengbaarheid van het beton
- De vervoerbaarheid van het beton
- De mate waarin de mortel zich laat verdichten

In de NEN 8005 is de verwerkbaarheid van beton vastgelegd in een aantal consistentieklassen.²¹ De consistentie kan volgens de indeling in deze norm worden onderscheiden tussen 'droog' en 'zeer vloeibaar'.

Aanduiding	Verdichtingmaat C	Zetmaat S (mm)	Schudmaat F (mm)
Droog	C0		
Aardvochtig	C1	S1 (10-40)	F1 (<340)
Half plastisch	C2	S2 (50-90)	F2 (350-410)
Plastisch	C3	S3 (100-150)	F3 (420-480)
Zeer plastisch		S4 (160-210)	F4 (490-550)
Vloeibaar		S5 (>220)	F5 (560-620)
Zeer vloeibaar			F6 (>-630)

Tabel 3 - Aanbevolen consistentieklassen volgens NEN 8005.²¹

De NEN 8005 benoemt nog enkele klassen voor de "aanvullende eigenschappen" wanneer zelfverdichtend beton wordt toegepast.

Viscositeit	VF1	Trechtertijd <9,0 sec.
	VF2	Trechtertijd 9,0 – 25,0 sec.
Blokkeringsmaat	PJ1	J-ring stap in mm: ≤ 10 met 12 staven
	PJ2	J-ring stap in mm: ≤ 10 met 16 staven
Stabiliteit	SR1	Ontmengde portie in % ≤ 20
	SR2	Ontmengde portie in % ≤ 15

Tabel 4 - Aanvullende eigenschappen zelfverdichtend beton volgens NEN 8005.

²¹ (VOBN, Consistentieklasse van beton, 2017)

2.6 Mechanische eigenschappen

De druksterkte is de belangrijkste kwaliteitsparameter van beton. Veel kwaliteitsaspecten zijn gerelateerd aan de druksterkte. Beton heeft een hoge druksterkte en een relatief lage treksterkte. De buigtreksterkte is respectievelijk 10% van de druksterkte.

In onderstaande tabel zijn enkele mechanische eigenschappen te vinden op grond van de sterkteklassen van beton.

Sterkteklasse	f_{ck}	$f_{ck,cube}$	f_{cd}	f_{ctm}	$f_{ctk,0,05}$	f_{ctd}	E_{cm}
C8/10	8	10	5,3	1,20	0,84	0,56	25300
C12/15	12	15	8,0	1,57	1,10	0,73	27100
C16/20	16	20	10,7	1,90	1,33	0,89	28600
C20/25	20	25	13,3	2,21	1,55	1,03	30000
C25/30	25	30	16,7	2,56	1,80	1,20	31500
C30/37	30	37	20,0	2,90	2,03	1,35	32800
C35/45	35	45	23,3	3,21	2,25	1,50	34100
C40/50	40	50	26,7	3,51	2,46	1,64	35200
C45/55	45	55	30,0	3,80	2,66	1,77	36300
C50/60	50	60	33,3	4,07	2,85	1,90	37300
C55/67	55	67	36,7	4,21	2,95	1,97	38200
C60/75	60	75	40,0	4,35	3,05	2,03	39100
C70/85	70	85	46,7	4,61	3,23	2,15	40700
C80/95	80	95	53,3	4,84	3,39	2,26	42200
C90/105	90	105	60,0	5,05	3,54	2,36	43600
C100/115	100	115	66,7	5,23	3,66	2,44	44900

Tabel 5 - Materiaaleigenschappen beton volgens NEN-EN 1992-1-1 (in N/mm²).²²

Verklaring

f_{ck} : Karakteristieke cilinderdruksterkte van beton op 28 dagen.

$f_{ck,cube}$: Karakteristieke kubusdruksterkte van beton op 28 dagen.

f_{cd} : Rekenwaarde van de druksterkte van beton $\frac{f_{ck}}{1,5}$.

f_{ctm} : Gemiddelde axiale treksterkte van beton.

$$\leq C50/60: f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(2/3)}$$

$$> C50/60: f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10))$$

f_{cm} : Gemiddelde cilinderdruksterkte van beton = $f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$

$f_{ctk,0,05}$: Karakteristieke waarde van de axiale treksterkte van beton;
5% ondergrenswaarde = $0,7 \cdot f_{ctm}$.

f_{ctd} : Rekenwaarde van de treksterkte van beton.

E_{cm} : Elasticiteitsmodulus van beton = $22[f_{cm}/10]^{0,3}$.

²²<http://www.cementenbeton.nl/materiaal/materiaaleigenschappen/mechanische-eigenschappen/materiaaleigenschappen-normaal-en-zwaarbeton>

2.6.1 Druksterkte

De druksterkte is zonder twijfel de meest gebruikte kwaliteitsaanduiding van beton. In werkelijkheid heeft beton meer dan één bepaalde druksterkte. Op grond van de druksterkte van de verwerkte betonspecie zijn de sterkteklassen van beton vastgelegd.



Figuur 7 - druksterktemeting aan een kubus.²³

Op dit moment zijn sterkteklassen tot en met C100/115 opgenomen in de voorschriften beton (NEN-EN 206-1 / NEN 8005). Hogere sterkteklassen zijn inmiddels produceerbaar. Er wordt dan vaak gesproken van Zeer Hoge Sterkte Beton (ZHSB) of Ultra Hoge Sterkte Beton (VUHBSB).²⁴

Sterkteklasse	Karakteristieke kubusdruksterkte
Normaal beton	Tot 65 N/mm ² (Mpa)
Hoge sterkte beton	65 N/mm ² tot 105 N/mm ² (Mpa)
Zeer hoge sterkte beton	105 N/mm ² tot 150 N/mm ² (Mpa)
Ultra hoge sterkte beton	150 N/mm ² tot 200 N/mm ² (Mpa)

Tabel 6 - Sterkteklassen beton.²⁵

Afhankelijk van de sterkteklassen en diens samenstellingen verschilt de dichtheid van beton:

C30/37 : 2400 kg/m³ met 1% wapening en een w/c van 0,65
 C80/95 : 2500 kg/m³ met 1% wapening en een w/c van 0,35
 C120/140 : 2550 kg/m³ met 1% wapening en een w/c van 0,25

²³ <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/materiaaleigenschappen/mechanische-eigenschappen>

²⁴ (VOBN, 2017)

²⁵ <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/beton/soorten-beton/hogesterktebeton>

2.6.2 Treksterkte

De treksterkte van beton is de spanning waarbij het materiaal bezwijkt onder trekbelasting, uitgedrukt in N/mm^2 .

Afhankelijk van de samenstelling kan beton een hoge druksterkte bereiken. De treksterkte is vele malen kleiner. Om de lage treksterkte te compenseren, wordt beton gewapend op plaatsen waar trekspanningen optreden. Als het beton dreigt te scheuren neemt de wapening de inwendige trekkrachten over.

2.6.3 Elasticiteit (stijfheid)

De elasticiteitsmodulus (E-modulus) van een materiaal is het getal dat de verhouding weergeeft tussen de grootte van de spanning, veroorzaakt door de belasting, en de door deze spanning veroorzaakte (elastische) vervorming. Deze relatie staat bekend als de Wet van Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

waarbij:

E = elasticiteitsmodulus [N/mm^2]

σ = spanning [N/mm^2]

ε = specifieke vervorming [-]

De specifieke vervorming (rek) is de verlenging of verkorting van een materiaal per eenheid van lengte en is daardoor dimensieloos. Beton is een heterogeen materiaal, bestaande uit toeslagmateriaal ingebed in een matrix van cementsteen.

De elasticiteitsmodulus van beton wordt in sterke mate bepaald door het soort en gehalte aan toeslagmaterialen in de betonsamenstelling (er vanuit gaande dat het gebruikte toeslagmateriaal een andere elasticiteitsmodulus heeft dan de cementsteen).

De relatie tussen elasticiteitsmodulus E en kubusdruksterkte f'_{ck} kan voor het gemak in een eenvoudige formule worden gevat:

Karakteristieke kubusdruksterkte	Elasticiteitsmodulus	Volgens
$15 \leq f'_{ck} \leq 65$	$E'_b = 22250 + 250 f'_{ck}$	NEN-EN 1992-1-1
$65 < f'_{ck} \leq 105$	$E'_b = 35900 + 40 f'_{ck}$	CUR-aanbeveling 97

Tabel 7 - Relatie tussen elasticiteitsmodulus E en kubusdruksterkte f'_{ck} .²⁶

Onderstaand zijn enkele elasticiteitsmoduli weergegeven:

C30/37 : 29,7 GPa
C80/95 : 44,4 GPa
C120/140 : 50,3 GPa.

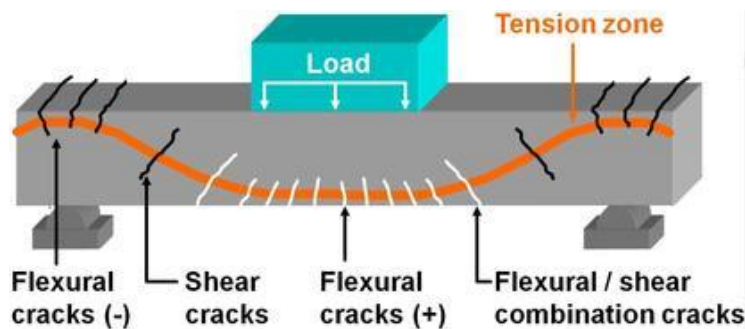
Diverse rek-waarden:

C30/37 : $E_{c,1} = 2,3\text{‰}$ $E_{o,lim} = 3,5\text{‰}$
C80/95 : $E_{c,1} = 2,8\text{‰}$ $E_{o,lim} = 3,1\text{‰}$
C120/140 : $E_{c,1} = 3,0\text{‰}$ $E_{o,lim} = 3,0\text{‰}$

²⁶http://www.cementenbeton.nl/materiaal/materiaaleigenschappen/vervormingseigenschappen?se=elasticiteitsmodulus#toc_0

2.6.4 Gewapend beton

Beton kan bijzonder goed drukkrachten opnemen maar in veel mindere maten trekkrachten. Wanneer beton niet gewapend is zal het door de trekkrachten aan de trekzijde gaan scheuren. Om de scheurvorming te beperken wordt er wapeningsstaal toegevoegd aan de trekzijde van het beton.



Figuur 8 - Spanningen in oplegging.²⁷

De wapeningsstaven in Nederland zijn geprofileerd. Door het profiel krijgt het staal een groter oppervlak wat zorgt voor een betere aanhechting aan het beton.



Figuur 9 - Profielen wapeningsstaal.²⁸

De wapeningsstaven zijn in verschillende diktes verkrijgbaar, variërend tussen een dikte van 8mm en 50mm. Deze diktes zijn verkrijgbaar in diverse staalkwaliteiten. De meest toegepaste staalkwaliteit in Nederland is FeB 500 met een vloeispanning van 435 N/mm^2 .

Omdat wapeningsstaal bijzonder gevoelig is voor corrosie moet het staal afgedekt worden met een bepaalde hoeveelheid beton. Als deze afstand te klein is kan het staal gaan roesten en wordt het beton weggedrukt. De dekking van het beton is afhankelijk van de milieuklasse waarop ontworpen wordt.

²⁷ <https://failures.wikispaces.com/+Overview+of+Types+and+Causes>

²⁸ <https://pixabay.com/nl/ijzeren-staven-wapeningsstaven-474810/>

2.7 Fysische eigenschappen

2.7.1 Geluid

Geluidsoverlast van buiten of buren kan bijzonder ergerlijk zijn. Zeker in steden zijn er steeds meer geluidsbronnen aanwezig. Door gebruik te maken van beton zijn er prima woning scheidende constructies mogelijk die voldoen aan de normen van het Bouwbesluit.

Volgens het bouwbesluit worden er een aantal akoestische eisen gesteld voor nieuwe woongebouwen. Er worden eisen gesteld ten aanzien van:

- De geluidwering van de gevel en het dak.
- Het toelaatbare installatiegeluidniveau.
- De geluidwering tussen ruimten en gebouwen.
- De beperking van galm in gemeenschappelijke ruimten.

2.7.1.1 Geluid van buiten

De toegestane binnengrenswaarde afkomstig van geluid van buiten bedraagt in beginsel 35 dB. Indien geluidsbronnen in de directe omgeving niet onder de Wet geluidhinder vallen, dan moet de geluidwering van de gevel toch tenminste 20 dB bedragen.

2.7.1.2 Geluid van installaties

Bewoners kunnen geen invloed uitoefenen op het geluid van installaties als een lift of de kraan vanuit een aangrenzende woning. Dit heeft als gevolg dat dergelijke geluiden snel als hinderlijk worden ervaren. Deze geluiden mogen daarom in de andere woning dan die waar de installatie zich bevindt het niveau van 30 dB niet overschrijden.

In de onderstaande tabel zijn een aantal ontwerprichtlijnen beschreven waarmee in praktische zin voldaan wordt aan de geluidseis.

Type	Massa (kg/m ²)	Uitvoering
Wanden		
Woning scheidend – Massief	575	- 250 mm beton - 300 mm kalkzandsteen
Woning scheidend – ankerloze spouwwand	350	- 2x 160 mm beton - 2x 214 mm kalkzandsteen
Dragende binnenwanden	350	- 160 mm beton - 214 mm kalkzandsteen

Vloeren		
Woning scheidend – Massief	800	- 300 mm beton + 50 mm zandcement
Verend opgelegde dekvloer	500	- 210 mm beton + verend opgelegde vloer
Dakvloer bij massieve wand	550	- 210 mm beton
Dakvloer bij ankerloze spouwwand	250	110 mm beton
Begane grondvloer bij massieve wand	250	- Vloer flexibel aansluiten op massieve wand en verend opleggen of, - Massa draagvloer 350 kg/m ²
Begane grondvloer bij ankerloze spouwwand	300	- Verend opleggen - Verdiepte of gescheiden fundering

Tabel 8 - Randvoorwaarden woning scheidende elementen.²⁹

²⁹ Interne tabellen ABT

2.8 Chemische eigenschappen

2.8.1 Brandveiligheid

2.8.1.1 Brandklassen

In het bouwbesluit worden brandklassen aangegeven voor verschillende constructiematerialen. Deze klassen zijn onderdeel van de Europese brandvoortplantingsklasse. De klassen lopen van A1 tot F, waarbij A1 de hoogste klassering aangeeft en F de laagste.

Als basis voor het nieuwe brandklassensysteem geldt dat het beste product geen enkele bijdrage mag leveren aan een brand. Een onbrandbaar product hoort dus thuis in de hoogste klasse. Een product dat zeer snel vlam vat en snel verbrandt met veel hitte-ontwikkeling, dus het meest brandbare product, komt in de laagste klasse (F). Ook een product waarvan geen gegevens bekend zijn, komt in die laagste klasse terecht. In de onderstaande tabel zijn alle brandklassen weergegeven volgens de Eurocode.

Klasse	Omschrijving	Voorbeeld
A1	Materialen in deze klasse dragen niet bij in elk stadium van de brand, ook niet bij een volledig ontwikkelde brand	Steenachtige materialen zoals gips, baksteen en beton.
A2	Materialen in deze klasse dragen bij een volledig ontwikkelde brand niet bij aan de vuurlast en branduitbereiding. Praktisch onbrandbaar.	Gipskartonbeplating
B	Moeilijk brandbare materialen, die een beperkte bijdrage leveren aan brandgebaar.	PVC vloerbedekking, sommige textiele vloerbedekking, geverfde gipsplaat, brandvertragend MDF
C	Materialen in deze klasse vertonen een beperkte zijdelingse vlamuitbereiding wanneer ze blootstaan aan de hitte van vlammen. Brandbare materialen die een bijdrage leveren aan brandgebaar.	Zwaardere houtsoorten, gipsplaat met behang.
D	Materialen in deze klasse bieden langer weerstand tegen een klein vlamcontact zonder dat daarbij substantiële vlamuitbereiding plaatsvindt. Daarbij zijn ze ook in staat blootstelling aan de hitte van vlammen te doorstaan met voldoende vertraagde en beperkte warmte afgifte. Goed brandbare materialen die een grote bijdrage leveren aan brandgebaar.	De meeste houtsoorten
E	Materialen in deze klasse leveren een zeer hoge bijdrage aan de brand. De materialen zijn voor een korte periode bestand tegen brand zonder wezenlijke vlamuitbereiding. Zeer goed brandbare materialen die een zeer grote bijdrage leveren aan brandgebaar.	Kunststof, brandvertragend EPS.
F	Materialen waarvoor geen reactie op brandvoorplantingseisen worden bepaald. Uiterst brandbare materialen.	Niet geteste materialen, EPS.

Tabel 9 - Brandklassen volgens Eurocodes.³⁰

2.8.1.2 Brandveilig ontwerp

Bij een constructie hebben de keuze van bouwmaterialen grote invloed op de ontwikkeling van brand. Betonnen constructies zijn hierin in het voordeel. Als een betonnen constructie goed ontworpen en uitgevoerd is, houdt deze stand tijdens de meest extreme branden. Een betonnen afscheiding vormt een effectief schild tegen de hitte. Daarnaast vertraagt een betonnen scheiding de verspreiding van de brand.

Belangrijke brandveiligheidsaspecten die invloed hebben op bouwkundig ontwerp, constructie en bouwmethodiek zijn:

- Brandwerendheid met betrekking tot bezwijken.
- Brandwerendheid van de gevel.
- Beperking van de uitbreiding van brand.
- Inrichting van rookvrije vluchtroutes.

In het bouwbesluit zijn de brandwerendheidseisen opgenomen met betrekking tot bezwijken. Afhankelijk van de grootte, hoogte en bestemming wordt het aantal minuten vernoemd dat een constructie-element bestand moet zijn tegen brand. In onderstaand figuur zijn deze brandwerendheidseisen weergegeven.

Bouwconstructie		Brandwerendheid m.b.t. bezwijken	BB2003 artikel
Bouwconstructie waarvan het bezwijken leidt tot het onbruikbaar worden van rookvrije vluchtroute		30 minuten	2.9.1
Hoofddraagconstructie van woonfunctie	geen vloer VG > 7m boven meetniveau	60 minuten ¹⁾	2.9.2
	hoogste vloer VG tussen 7m en 13m boven meetniveau	90 minuten	2.9.2
	hoogste vloer VG > 13m boven meetniveau	120 minuten	2.9.2

¹⁾ Geldt alleen voor woningen met meer dan drie bouwlagen.

²⁾ Brandwerendheid m.b.t. bezwijken mag met 30 minuten worden gereduceerd indien permanente vuurlast van het bouwwerk < 500 MJ/m².

³⁾ VG = Verblijfsgebied

Figuur 10 - Brandwerendheidseisen met betrekking tot bezwijken.³⁰

2.8.1.3 Brandbaarheid beton

In februari 2005 breekt er een grote brand uit in de Windsor-toren in Madrid. Dankzij de betonnen kolommen en stabiliteitskernen bezwijkt het 29 verdiepingen tellende gebouw niet. Sterker nog: De betonnen overdrachtsbalken boven de zestiende verdieping hielden het vuur boven dat niveau maar liefst zeven uur in bedwang.³¹



Figuur 11 - Windsor-toren in Madrid.³²

De volgende eigenschappen maakt het materiaal bijzonder geschikt voor het maken van een brandveilig gebouw:

- Beton brandt niet.
- Beton heeft een hoge brandweerstand.
- Beton is (hitte)isolerend.
- Beton laat geen gesmolten materiaal druppelen waardoor vuur kan verspreiden.

De Europese Commissie heeft een bindende lijst van goedgekeurde materialen gepubliceerd. Hierop staan ook de verschillende typen beton en de minerale bestanddelen ervan, zoals zand en grind. Beton valt in de hoogst mogelijke classificatie A1 voor brandveiligheid.³¹

³⁰ Brochure brandveiligheid, natuurlijk met beton 2009

³¹ (Wapperom, Welling, & Kerkhoven, 2009)

³² http://www.hcia.gr/en/cement-concrete/uses-concrete/mellon_skurodema_purkagia/

2.8.2 Corrosie

Betonconstructies worden ontworpen op basis van diverse veiligheidseisen. Deze veiligheidseisen omvatten factoren zoals de kwaliteit van het beton en de toepassing van wapeningsstaven. Wanneer de constructie belast wordt in de mate waarin de veiligheidsfactoren overschreden worden kan het beton beschadigen of falen. Inherent aan het falen van het beton zijn het ontstaan scheuren in het oppervlak. Wanneer deze scheuren te groot zijn kan dit leiden tot een aantal mogelijke problemen. Onderstaand zijn een aantal van deze problemen weergegeven.

2.8.2.1 Carbonatie

Beton heeft een zeer alkalisch milieu (basisch, pH hoger dan 12). Door het ontstaan van een passiveringslaag wordt de wapening beschermd. Deze laag is stabiel in een hoog alkalisch milieu maar kan verloren gaan als de alkaliteit van het beton daalt. Dit gebeurt door het indringen van koolstofdioxide uit de lucht in het beton. De hieraan gekoppelde chemische reacties in het beton verlagen de alkaliteit tot een zodanig niveau dat de wapening niet langer wordt beschermd en gaat corroderen.



Figuur 12 – Betonrot.³³

2.8.2.2 Vorstschade

Als met water verzadigd beton bevroert wordt het water in het beton van de omgeving afgesloten, het water bevriest immers van buiten naar binnen. Bij bevriezen zet water ongeveer 9% uit. Door bevriezing van een deel van het water komt het nog niet bevroren water onder druk te staan. Deze drukken zijn zo hoog dat het beton inwendig kapot gedrukt kan worden en de constructie niet meer bruikbaar is.

Beton van enige ouderdom is beter bestand tegen vorstschade als jong beton. Jong beton bevat veel ongebonden water en is nog niet zo sterk. Als het vriest is het dan ook niet verstandig om jong beton met water na te behandelen. In plaats van lucht wordt dan water naar binnen gezogen. Het jonge beton raakt verzadigd met water en is zeer gevoelig voor bevriezing, waardoor ernstige schade aan de constructie kan ontstaan.

Door de voortgaande hydratatie van beton wordt er steeds meer water gebonden en worden er holle ruimtes gevormd. Deze holle ruimtes worden bij vorst voor expansie benut.

³³ <https://eduardodseng.wordpress.com/2013/12/03/corrosion-of-steel-in-concrete/>

Vorst en dooizout

Kenmerkend voor de Nederlandse winters is het zogenoemde kwakkelweer, met een veelvuldige afwisseling van vriezen en dooien, wat vaak gepaard gaat met neerslag. Dat veroorzaakt gladheid, die wordt bestreden met het strooien van dooizout (NaCl). Het gebruik van dooizout vormt een ernstige complicatie voor beton. De werking van dooizout berust op verlagen van het vriespunt van water in een zoutoplossing. Bij strooien van zout op een ijslaag smelt het ijs. Om ijs te laten smelten is warmte nodig. Deze wordt onttrokken aan het onderliggende beton, waardoor de temperatuur plotseling sterk kan dalen. Strooien van dooizout op besneeuwd of met ijs bedekt beton heeft dus dezelfde werking als een felle vorstaanval op dit betonoppervlak. Bij vorst-dooizoutschade heeft een (meestal oppervlakkige) afschilfering van de oppervlaktelaag plaats. De buitenhuid van het beton vriest kapot en schilfert af. Dit verschijnsel staat bekend onder de Engelse term 'scaling'³⁴.

2.8.2.3 *Scheuren in de plastische fase*

Scheuren die ontstaan terwijl de betonspecie nog plastisch is zijn onder te verdelen in een aantal categorieën.

- Sedimentatie- of zettingsscheuren.
- Plastische krimpscheuren.
- Trekscheuren.

Sedimentatie- of zettingsscheuren

Vlak na het storten en afwerken zal onder invloed van de zwaartekracht het toeslagmateriaal zakken. Dit verschijnsel noemen we sedimentatie. De mate van sedimentatie is afhankelijk van de stabiliteit van het mengsel. Zolang de zetting gelijkmatig is en niet wordt verhinderd, kan sedimentatie geen kwaad en zal er geen scheurvorming optreden. Scheuren ontstaan pas als de sedimentatie plaatselijk tot stilstand komt terwijl die vlak ernaast doorgaat. Schuifspanningen in de betonspecie veroorzaken dan de scheurvorming. Grote verticale doorsneden zoals wanden en kolommen zijn gevoeliger voor ongelijkmatige zetting dan horizontale vlakken met een geringe dikte zoals vloeren.

Plastische krimpscheuren

Een ander gevolg van sedimentatie is dat aan het betonoppervlak een dun laagje water verschijnt, ook wel wateruitstoting of 'bleeding' genoemd. Onder invloed van de temperatuur, de luchtvochtigheid maar vooral de windsnelheid, zal dit water verdampen. zo lang de wateruitstoot groter is dan de verdamping, ziet men weinig aan het betonoppervlak. Maar, als de verdamping sneller gaat dan de aanvoer van bleedingwater, gaat de verdamping door tot in de poriën. Hierdoor vernauwen de poriën zich, wat trekspanningen oplevert die niet door de nog plastische betonspecie kunnen worden opgenomen.

Trekscheuren

Met deze scheurvorming worden de scheuren bedoeld die ontstaan wanneer een betonconstructie wordt vervaardigd door middel van een glijbekisting. Het ontstaan van trekscheuren ontstaat wanneer de wrijving tussen de betonspecie en de glijkist groter is dan de inwendige treksterkte van de betonspecie. De betonspecie wordt dan letterlijk uit elkaar getrokken³⁵.

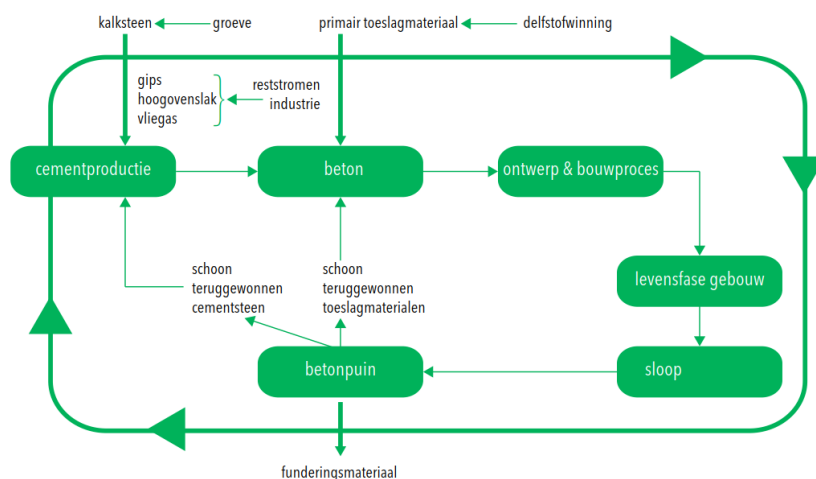
³⁴ (Vorst en dooizouten)

³⁵ (Scheurvorming in jong beton)

2.9 Duurzaamheid beton

2.9.1 Levenscyclus analyse

Mede dankzij de vormvrijheid is beton het meest gebruikte materiaal in de bouwindustrie. Beton past perfect in onze samenleving waarin duurzaamheid een veel besproken onderwerp is. Duurzaam bouwen is een begrip waar veel verschillende definities en interpretaties aan hangen. Om het begrip duurzaam helder te krijgen is er in Nederland een bepalingsmethode op gesteld. Deze bepalingsmethode is gebaseerd op de levens cyclus analyse (LCA).



Figuur 13 - Levenscyclus beton.³⁶

De gemiddelde technische levensduren van bouwdeelen en bouwproducten (praktijkwaarden) zijn vastgelegd in de SBR-publicatie 'Levensduur van Bouwproducten'. Hieruit blijkt dat de levensduur van veel betonnen constructiedelen is gesteld op meer dan 100 jaar.

2.9.2 Carbon footprint

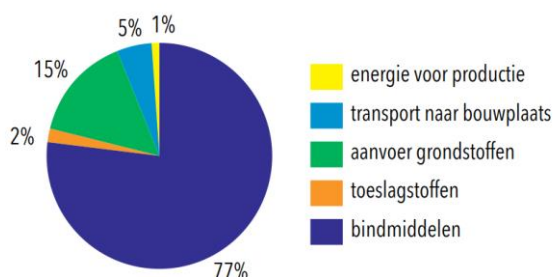
De bouw in Nederland verwerkt jaarlijks ca. 14 miljoen m³ beton. Tijdens het vervaardigen van beton komt er veel CO₂ vrij. Het Nederlandse betongebruik leidt tot een CO₂-uitstoot van circa 3,5 Mt per jaar. 80% van deze emissie is gerelateerd aan de productie van cement. Wereldwijd wordt de cementindustrie verantwoordelijk geacht voor ruim 5% van de door mensen veroorzaakte CO₂-emissie. In Nederland is dat minder dan 1%.³⁷

2.9.2.1 Bindmiddel

De meest bepalende component voor de prestaties van beton is cement. Het klinkergehalte in cement heeft relatief een hoge CO₂-footprint. Daarom streeft de betonsector al jaren naar gebruik van beton met een zo laag mogelijk klinkergehalte, zonder dat de betrouwbaarheid van het materiaal in het geding komt.

³⁶ #duurzaambeton – trending topics 2014

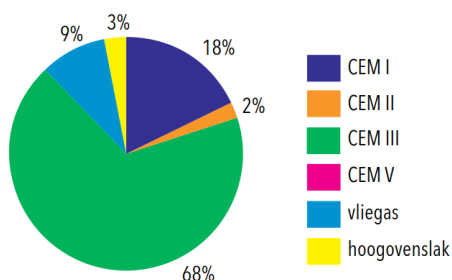
³⁷ (Smets & Coen, 2014)



Figuur 14 - CO₂-footprint van een m³ t.p.g. gewapend beton.³⁵

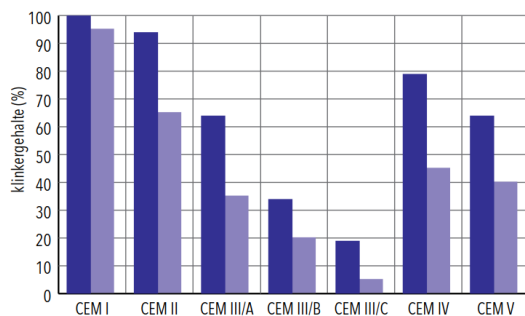
2.9.2.2 Cementsoorten

De Europese cementnorm EN 197-1 telt 27 samengestelde cementen, onderverdeeld in vijf hoofdtypen. De indeling van deze cementen hangt samen met het type en gehalte klinker vervangende componenten. De Klinker geldt bij al deze samengestelde cementen als basiscomponent. Het klinkergehalte, en daarmee de CO₂-footprint, varieert echter enorm: van 5 tot 100%.



Figuur 15 - Percentage bindmiddel per gemiddelde m³ beton.³⁶

Betonmortelfabrikanten met het keurmerk "Beton Bewust" hebben de verplichting om de emissie van de hoeveelheid CO₂ per m³ betonmortel structureel te verlagen. Om deze reductiemaatregelen mogelijk te maken, wordt per betoncentrale de gemiddelde CO₂-uitstoot bepaald aan de hand van een Benchmarkinstrument. Het gebruik van klinkerarme cementen, alternatieve bindmiddelen en de inzet van secundaire grondstoffen wordt gestimuleerd. In 2013 is de hoeveelheid CO₂ per m³ betonmortel in lijn gebleven met de voorgaande jaren (160 kg CO₂ per m³).³⁸ Deze relatief lage uitstoot van CO₂ van betonmortel kan worden toegeschreven aan het feit dat in verschillende marktsegmenten veel klinkerarme cement wordt toegepast.



Figuur 16 - Klinkergehalte in Europees cement (in%).³⁶

³⁸ (VOBN, Betonmortel en CO₂-emissie, 20114)

2.10 Conclusie

Met de continu groeiende wereldpopulatie is de vraag naar woningen groter dan ooit tevoren. Voor het maken van woningen wordt beton al eeuwen gebruikt en dit is niet voor niets. Het is een materiaal dat gemaakt wordt van natuur eigen grondstoffen en is overal terug te vinden in de grond. De vloeibare eigenschappen en de verwerkbaarheid van de mortel zorgt voor grote architectonische vormvrijheid.

Voordelen bouwen met beton:

- Gebouwen gemaakt van beton zijn erg duurzaam.
- Het kan hoge temperaturen verdragen zonder verlies van de structurele integriteit.
- Hoog comfort voor de gebruiker.
- De grondstoffen zijn lokaal verkrijgbaar en kost weinig energie om te vervoeren.
- Betonnen structuren, indien goed uitgevoerd, vereisen weinig onderhoud.
- Bijzonder sterk wanneer op druk belast.

Nadelen bouwen met beton:

- Grote en zware constructies.
- Beton wordt nog niet volledig gerecycled.
- Het bouwproces is relatief langzaam.

3 Vezel versterkt ultra hoge sterktebeton

Het materiaal beton bestaat al eeuwen en is continu in ontwikkeling. Zoals in hoofdstuk 2.4 is aangetoond zijn er inmiddels verscheidene soorten beton verkrijgbaar. Een relatief nieuwe ontwikkeling binnen de betonindustrie is met vezels versterkt ultra hoge sterktebeton. Ondanks dat VVUHSB in de jaren 2000 al verkrijgbaar was werd VVUHSB voor het eerst geïntroduceerd aan de wereld tijdens een internationaal symposium in Marseille (2004).³⁹ Vanaf dit moment stond het materiaal in de spotlights en zijn er sindsdien diverse onderzoeken naar het materiaal geweest. Vier jaar na zijn introductie zijn de eerste projecten begonnen met als centraal onderwerp VVUHSB.

Ultra hoge sterktebeton is een sterkteklasse van beton waarbij de kubusdruksterkte tussen de 150 en 200 MPa ligt. VVUHSB heeft een aantal karakteristieke eigenschappen:

- De druksterkte van het beton ligt tussen de 150 en 200 MPa.
- w/c ratio is lager dan 0,25.
- Door de lage w/c ratio is er een grote toevoeging van bindmiddel nodig.
- Versteving door middel van staalvezels.
- Zeer geringe carbonatiediepte.

3.1 Grondstoffen

VVUHSB bestaat uit een groot deel uit dezelfde grondstoffen als conventioneel beton. Het verschil echter ligt in de hoeveelheid bindmiddel, de grootte van de toeslagmaterialen en de aanwezigheid van vezels. In de onderstaande tabel staat een typische compositie van een VVUHSB mix.

Grondstoffen	Hoeveelheid (in %)
Cement	27-40
Microsilica	6-12
Kwarts	7-14
Zand	35-45
Super plastificeerder	0,5-3
Water	4-10
Staalvezels	0-8

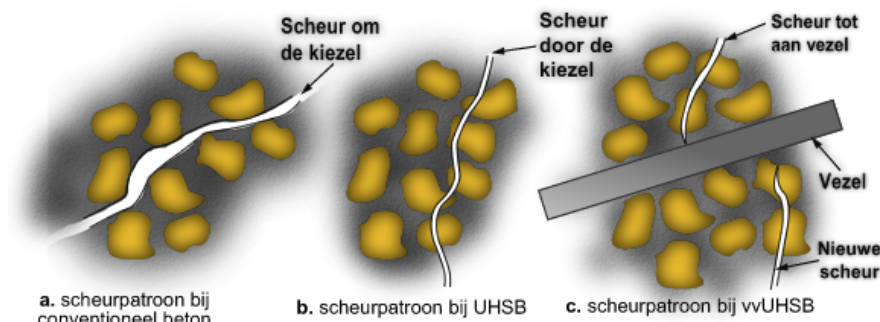
Tabel 10 - Typische samenstelling VVUHSB.⁴²

3.1.1 Homogeen materiaal

Beton is een materiaal wat bestaat uit de combinatie van toeslagmaterialen en cementpasta. Een groot verschil in de elasticiteitsmodulus van beide materialen zorgt er voor dat het materiaal zich heterogeen gedraagt.

Bij conventioneel beton is het cement de zwakste schakel en zal de scheur om de toeslagstoffen heen ontstaan. Door de sterkte van de cementlijm bij VVUHSB gaat de scheur door de toeslagstoffen heen.

³⁹ (International symposium on ultra-high performance concrete, 2004)



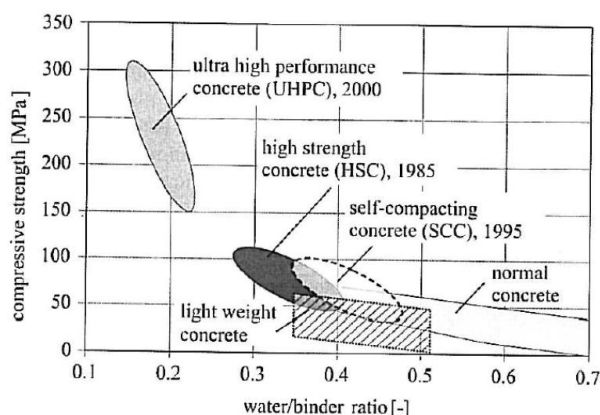
Figuur 17 - Vergelijking scheurpatronen conventioneel beton en VVUHSB.⁴⁰

De belangrijkste factor voor het verkrijgen van VVUHSB is het verbeteren van de macro- en microstructuren van de grondstoffenmix. Door het optimaliseren van deze mix worden de mechanische eigenschappen, verpakingsdichtheid en de homogeniteit van het materiaal verbeterd. Vergeleken met conventioneel beton is de dichtheid van VVUHSB veel groter. Het soortelijk gewicht van VVUHSB is ca. 2500 kg/m³. Dit komt door het elimineren van de grote granulaten en de toevoeging van vulstoffen waarvan de deeltjesgrootte kleiner is als dat van het cement.

Het gebruik van vulstoffen is niet alleen noodzakelijk voor het behalen van een maximale dichtheid maar het dient ook als smeermiddel. Door dit smeermiddel kunnen de grondstoffen gemakkelijker langs elkaar schuiven met een minimale wrijvingsweerstand.⁴¹ Op deze manier kan VVUHSB meestal uitgevoerd worden als zelf verdichtend beton, waarbij er geen of minder trillingen nodig zijn voor de verdichting.

3.1.2 Water/bindmiddel factor

Door een lage w/b factor hydrateert slechts een deel van het cement. Het deel dat niet hydrateert kan vervangen worden door bijvoorbeeld gebroken kwarts, vliegashuis of hoogovenslakken. Tot 40% van het volume cement kan vervangen worden zonder de druksterkte in gevaar te brengen.⁴² Over het algemeen wordt een w/b ratio tussen de 0,13 en 0,25 aangenomen om een optimale pakingsdichtheid te krijgen.



Figuur 18 - Water / cement ratio verschillende soorten beton.⁴³

⁴⁰ <http://www.vvuhsb.nl/wp-content/uploads/2011/03/scheurvorming.png>

⁴¹ (Jonan Claes, 2014)

⁴² (Abbas, Nehdi, & Saleem, 2016)

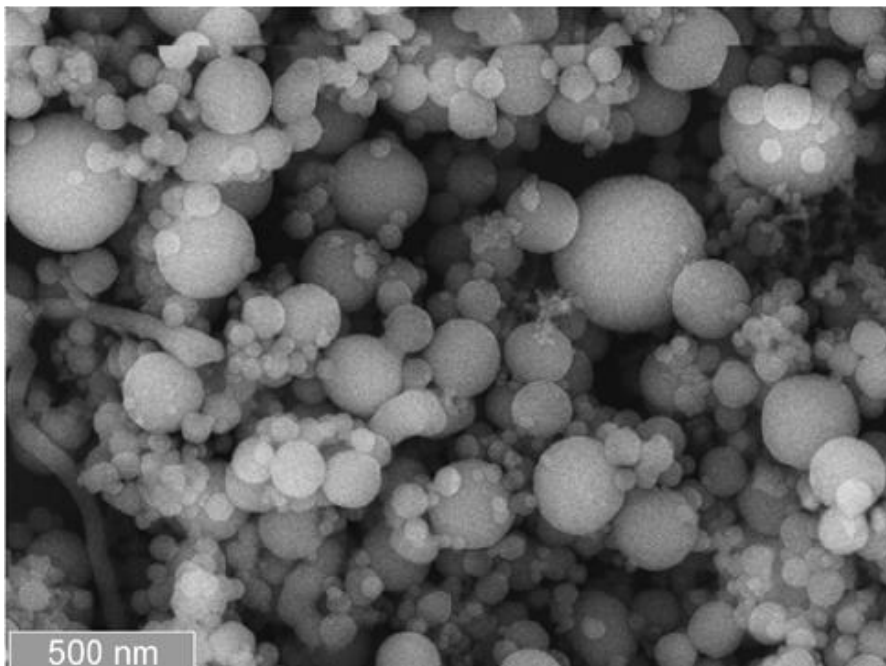
⁴³ (Eide & Hisdal, 2012)

3.1.3 *Microsilica*

Microsilica is een bijproduct bij de productie van silicium. Het is een stof dat bestaat uit bijzonder fijne deeltjes (0,1 tot 0,2 μm). Om de optimale pakking te creëren kan de toevoeging van microsilica leiden tot verbetering van de matrix om de volgende redenen:

- De grootte van de deeltjes verminderd de porositeit en dit leidt tot een hogere dichtheid van de matrix.
- De ronde vormen van de deeltjes verbetert de vloeibaarheid van het mengsel.
- Microsilica reageert met calcium hydroxide, een product van gehydrateerd cement, wat leidt tot een verbetering in kracht van het beton.
- Door de vergrootte dichtheid is het beton beter bestand tegen weersinvloeden en de penetratie van chloriden.

Diverse studies⁴² raden een dosering tussen de 20 en 30 % van het totale bindmateriaal aan.



Figuur 19 - Textuur microsilica.⁴⁴

3.1.4 *Superplastificeerder*

De lage w/b ratio gaat ten koste van de verwerkbaarheid van de mortel. Dit kan verholpen worden door het toevoegen van superplastificeerders. Superplastificeerders verspreiden de cement- en silicadeeltjes voor een betere verwerkbaarheid. Over het algemeen wordt een dosering van 1,4-2,4 % van het cementgewicht aanbevolen.⁴²

⁴⁴ https://www.researchgate.net/publication/259357577_Supplementary_Cementitious_Materials/figures

3.1.5 Staalvezels

Door de hoge sterkte en homogeniteit van VVUHSB is het erg bros. De toevoeging van staalvezels is daarom noodzakelijk voor de stabiliteit/breuktaaiheid bij drukspanningen. De toevoeging van vezels is ook bevorderlijk voor de treksterkte van het beton. Door het toevoegen van vezels kan traditionele wapening gedeeltelijk of volledig vervangen worden. Er zijn diverse vezels verkrijgbaar op de markt met elk zijn eigen voor en nadelen. Uit de masterscriptie van Jonas Claes en Tom Hoydongs⁴⁵ worden de volgende conclusies getrokken:

“Door de kenmerkende voor- en nadelen van de verschillende vezeltypes tegen elkaar af te wegen kan er het volgende besluit gemaakt worden. Vooral polypropyleen- en polyvinylalcoholvezels zijn geschikt ter vervanging van staalvezels op een economisch verantwoorde manier.

Er is onderscheid gemaakt tussen structureel, brandwerend en architecturaal VVUHSB. Structureel VVUHSB bevat staalvezels, terwijl er voor de brandwerende VVUHSB-toepassing gebruik gemaakt wordt van een combinatie van staalvezels en polypropyleenvezels. Voor het architectonisch beton valt de keuze op PVA-vezels.”

Vezeltype	Treksterkte (MPa)	E (GPa)	Rek (%)	Dichtheid (kg/m ³)	Smelt- of degradatietemperatuur (°C)	Kostprijs (€/kg)
Staal	1800 - 3250	200	1-12	7850	1050	1,2-2,0
Polypropyleen	140 - 700	3,5 - 4,8	15	905	165	2,0-2,8
Polyvinylalcohol	800 - 1620	22 - 60	6-7	1290-1300	240	2,8-3,8

Tabel 11 - Belangrijkste eigenschappen diverse vezelsoorten.⁴¹

De meest gebruikte vezelsoort zijn staalvezels. Dit komt door de goede kwaliteit-prijsverhouding en de uitgebreide kennis over dit materiaal in combinatie met beton. De meest toegepaste grootte is 13/0,20 mm (l/d). Voor een economisch en goed verwerkbaar VVUHSB-mix word een hoeveelheid van ca. 2% aanbevolen met een l/d ratio tussen de 40 & 60. De maximum lengte van de vezels is afhankelijk van de grootte van de toeslagmaterialen. Om de porositeit zo laag mogelijk te houden wordt een maximale lengte van 10 maal de diameter van de grootste toeslagmaterialen aangehouden.



Figuur 20 - Staalvezels met eindverakering.⁴⁶

⁴⁵ (Jonan Claes, 2014)

3.2 Verwerkbaarheid

Door de lage w/b factor gaat de verwerkbaarheid van de mortel erg achteruit. De verwerkbaarheid wordt beïnvloed door de toevoeging van staalvezels.

De benodigde tijd om het mengsel te mixen is groter als dat van normaal beton en kan dus kostenintensief zijn.

Het voordeel van VVUHSB is dat er geen wapening nodig is en dit de benodigde bouwtijd reduceert tijdens de voorbereidingen.

3.3 Mechanische eigenschappen

3.3.1 Druksterkte

VVUHSB is op dit moment beperkt verkrijgbaar onder enkele gepatenteerde merken. Ductal Lafarge is een Frans-Amerikaans bedrijf dat in de jaren 90 VVUHSB voor commerciële doeleinden op de markt heeft gebracht onder de naam Ductal. Ductal bevat de volgende mechanische eigenschappen.

Eigenschappen	Indicatiewaarde
Ductal- FM Gris	
Mechanische eigenschappen	
Druksterkte	150 - 180 MPa
Buigtreksterkte	15 - 45 MPa
E-modulus	50 a 60 GPa
Samenstelling	
Water/cementfactor	0.19 - 0.21
Superplastificeerders	4 - 4.5 % van cement
Versnellers	0 - 4 % van cement
Vezels	2.15 % volume
Duurzaamheid	
Dichtheid	2.4 - 2.5
Capillaire porositeit > 10 micron	met hittebehandeling: 0.5 - 0.7 % zonder hittebehandeling: 1.2 - 1.6 %
Totale porositeit	met hittebehandeling: 1.9 - 2.8 % zonder hittebehandeling: 4 - 6 %

Figuur 21 - Mechanische eigenschappen Ductal.⁴⁶

3.3.1.1 Effect van hittebehandeling

De kwaliteit van de mix kan worden bevorderd door een hittebehandeling. De hittebehandeling zorgt voor een puzzolane reactie waarbij de micro silica reageert met het cement en water. Een bijproduct van dit proces is de aanmaak van calcium silicaat hydraten ofwel CSH. Deze deeltjes vullen de kleine poriën en zorgen voor een kleinere microstructuur en daarmee verbeterde mechanische eigenschappen.⁴² Zo is er een gemiddelde toename in druksterkte van 40% bij een proefmonster met een hittebehandeling van 90°C ten opzichte van onbehandelde proefmonsters.

De starttijd van de hittebehandeling had een gering effect. Zo is er 'slechts' een verschil waargenomen van 4% in druksterkte van proefmonsters die 2 dagen na ontkisten behandeld zijn in vergelijking met proefmonsters die 10 dagen na ontkisten behandeld zijn.⁴²

Dit betekent dat meerdere gefabriceerde elementen tegelijk behandeld kunnen worden wat ecologisch voordeliger is.

⁴⁶ (ABT, 2011)

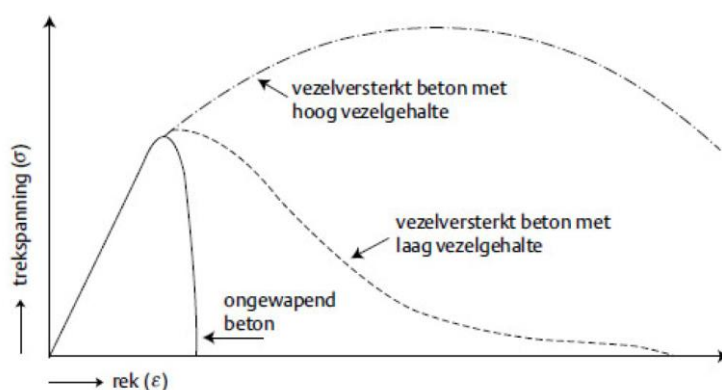
3.3.1.2 Effect van staalvezels op de druksterkte

VVUHSB reageert erg verschillend tijdens bezwijkstadia wanneer er vezels aanwezig zijn of niet. Wanneer er geen vezels zijn toegevoegd vertoont het beton explosief gedrag tijdens bezwijken. Wanneer er vezels aanwezig zijn in het beton vertoont het beton meer ductiel gedrag.

Het toevoegen van vezels heeft geen invloed op de druksterkte van het beton.

3.3.2 Treksterkte

Bij gedrag op trek worden verschillende gedragingen waargenomen in het trekgebied van VVUHSB. De eerste fase is een elastische fase, dat gekenmerkt wordt door de treksterkte van de cementmatrix. Wanneer de cementmatrix gescheurd is wordt het verdere gedrag gekenmerkt door de vezels die geactiveerd worden. Loopt dan de treksterkte op, spreken we van *hardening* gedrag. Wanneer de treksterkte afneemt, spreken we van *softening* gedrag. Het type vezels, hoeveelheid vezels en type belasting zijn bepalend voor het optreden van dit gedrag. De invloed van strain-softening en strain-hardening is goed te zien in onderstaand figuur.⁴⁶



Figuur 22 - invloed van strain-softening en strain-hardening.⁴⁶

Waar normaal beton de treksterkte vaak wordt aangenomen als zijnde 0, heeft VVUHSB wel een toevoeging als het aankomt op de trekspanning. In onderstaande figuur staan de rekenwaarden aangegeven zoals ze worden gebruikt bij ABT.

Betontype	Druksterkte rekenwaarde	Buigtreksterkte gemiddeld	Buigtrek rekenwaarde CUR A. 111	Buigtrek rekenwaarde MC 2010	Centrisch trek CUR A. 111	Centrisch trek MC 2010	Staalvezel dosering	Indicatie budgetprijs
C12/15	8	2,6	2,08	1,60	0,94	0,64	30	100
C35/45	23	4	3,2	2,46	1,44	0,98	35	110
C45/55	30	5	4	3,08	1,80	1,23	40	120
C80/95	47	10	8	6,15	3,60	2,46	60	175
C110/135	73	16	12,8	9,85	5,76	3,94	80	300
C110/135	73	25	20	15,38	9,00	6,15	160	550
C120/150	80	27	21,6	16,62	9,72	6,65	160	1000

Tabel 12 - Indicatie opneembare trekspanningen betonsoorten met vezelversterking.

3.3.3 Elasticiteitsmodulus

Hoewel de elasticiteitsmodulus van VVUHSB over het algemeen genomen tussen de 50 en 60 GPa ligt, is dit sterk afhankelijk van de gekozen behandeling. Zo blijkt uit een onderzoek van Richard en Cheyrezy in 1994. Tijdens het onderzoek zijn diverse proefstukken voor twee dagen behandeld met een hoge temperatuur van 250 °C en dit resulteerde in een vergroting van de elasticiteitsmodulus van 57 naar 70 GPa.

Er zijn diverse modellen ontwikkeld voor het berekenen van de elasticiteitsmodulus zoals in onderstaande figuur te zien is.

Table 6 Relationship between elastic modulus and compressive strength of UHPC.

References	Models
ACI 363R-92 (HPC) (1997)	$E = 3300 \cdot \sqrt{f'_c} + 6,9$
Ma and Schneider (2002)	$E = 16,364 \cdot \ln(f'_c) - 34,828$
Sriharan et al. (2003)	$E = 4150 \cdot \sqrt{f'_c}$
Ma et al. (2004)	$E = 19,000 \cdot \sqrt[3]{f'_c/10}$
Graybeal (2007)	$E = 3840 \cdot \sqrt{f'_c}$

Figuur 23 - Diverse manieren voor het berekenen van de elasticiteitsmodulus.⁴⁷

Ductal heeft onderzoek gedaan naar de eigenschappen van het betonmengsel. Tijdens dit onderzoek zijn er 196 proefstukken gemaakt van Ductal. Deze proefstukken zijn onderworpen aan druk- en trekproeven met het volgende resultaat.

De gemiddelde druksterkte werd gemeten op 228 MPa met een standaarddeviatie van 18 MPa.

De karakteristieke druksterkte volgens de AFGC-SETRA is 180 MPa met een elasticiteitsmodulus van 51 GPa.

3.3.4 VVUHSB en impactbelasting

Rebentrost en Wight (2008) documenteerden dat de toepassing van VVUHSB resulteerde in kleinere resulterende krachten tijdens een aardbeving. Dit komt door het gereduceerde gewicht t.o.v. conventioneel beton.

VVUHSB is bijzonder goed bestand tegen impactbelasting. Door de hoge sterkte en ductiliteitseigenschappen kan VVUHSB meer energie tijdens impactbelastingen weerstaan dan normaal beton.

Astarlioglu en Krauthammer (2014) bestudeerden het gedrag van VVUHSB-kolommen onder impactbelasting en kwamen tot de conclusie dat VVUHSB-kolommen 30% minder verplaatsing vertoonden als kolommen van normaal beton. Bovendien kan VVUHSB 4 keer zo veel kracht weerstaan in vergelijking met normaal beton.⁴²

3.4 Fysische eigenschappen

3.4.1 Geluid

In paragraaf 2.7.1 is het onderwerp geluid beschreven.

Bij het ontwerpen op geluid met VVUHSB dient er rekening gehouden te worden met een hogere dichtheid van respectievelijk 2500 kg/m³ i.p.v. 2300 kg/m³. Dit maakt slanker construeren mogelijk. Door de verhoogde massa is er een reductie van ca. 8% mogelijk zonder toevoeging van extra geluidswerende maatregelen.

⁴⁷ http://www.cementenbeton.nl/materiaal/materiaaleigenschappen/vervormingseigenschappen#toc_0

3.5 Chemische eigenschappen

3.5.1 Brand

De eigenschappen van beton kunnen behoorlijk worden beïnvloed door hoge temperaturen. Tot welke mate het beton wordt beïnvloed hangt in sterke mate af van de maximale temperatuur en de samenstelling van het beton.

De achteruitgang van beton is op twee manieren te onderscheiden:

- De achteruitgang van het materiaal zelf.
- De achteruitgang van de structurele integriteit.

3.5.1.1 Achteruitgang van het materiaal

Wanneer beton hoge temperaturen bereikt worden er een aantal chemische processen in gang gezet.

- 100 °C Het vrije water verdampt door microporiën.
- 50-110 °C Vrijkomen van chemisch gebonden water met gewichtsverlies als gevolg.
- 250-300 °C Al het vrije en chemisch gebonden water is verdwenen en er is geen gewichtsverlies meer mogelijk.
- 450-550 °C De chemische verbinding Ca(OH)_2 wordt ontbonden in $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.
- 575 °C In beton met kwarts vindt een herschikking plaats van het kristal van de α naar de β Structuur. Deze transformatie is gevolgd met een volumieke toename van 5.7%.
- 700 °C De ontbinding van TriCalciumSiliciumpenta-oxide.

Wanneer er temperaturen bereikt van ca. 100 °C verdampt het vrije water en begint het chemisch gebonden water te verdampen. Tijdens het verdampen neemt het volume van het water toe. Een deel van het verdampte water zal door microporiën in het beton ontsnappen. Wanneer deze damp niet kan ontsnappen wordt de druk dermate groot dat het risico bestaat op spatten. Bij dit verschijnsel spat de buitenste laag explosief van het beton af. Door het spatten is er een waarneembaar verlies van de structurele integriteit.

3.5.1.2 Achteruitgang van de structurele integriteit

Het spatten van beton zorgt voor het verkleinen van de effectieve hoogte van de betondoorsnede. Het explosief spatten komt door de druk die ontstaat bij het verdampen van het water in het beton. Dit zou betekenen dat een laag watergehalte en een groot poriëngehalte een positief effect zou hebben. Het probleem echter is dat je het poriëngehalte zo laag mogelijk wilt houden in het kader van duurzaamheid. Hoe groter de sterkte van het beton hoe lager het poriëngehalte.

3.5.1.3 Polypropyleen vezels

Onderzoeken bewijzen dat de toevoeging van micro polypropyleenvezels aan conventioneel beton de kans op spatten aanzienlijk verminderd. Er bestaan diverse theorieën over de werking van dit mechanisme. De meest simpele en aannemelijkste theorie is dat de PP-vezels smelten en daarmee luchtkanalen vormen voor de waterdruk om te ontsnappen. In een onderzoek van Troitzsch, 1990 is echter naar voren gekomen dat het smeltpunt van de vezels tussen de 145 en 175 °C ligt⁴⁸ en dit dus niet de oorzaak kan zijn.

⁴⁸ (Kusterle, Lubl6y, Bal6zs, & Di Prisco, 2017)

3.5.1.4 Staalvezels

Over het spatgedrag van VVUHSB met staalvezels is tot nog toe veel minder bekend als PP-vezels.

In 2012 is door György Balázs en Éva Lublóy een onderzoek gestart naar de invloed van vezels in hoge sterktebeton nadat deze blootgesteld waren aan hoge temperaturen. Er zijn vijf verschillende betonmixen getest met een druksterkte tussen de 60 en 74.7 MPa. (zie Figuur 24) De proefstukken werden blootgesteld aan temperaturen tussen de 20 en 800 °C. De proefstukken zijn spanningsloos in een verwarmde ruimte geplaatst en na afkoelen tot kamertemperatuur getest op de resterende sterkte.

Er zijn vijf verschillende soorten vezels getest:

- Propyleenvezels, macro $\varnothing 1.1\text{mm}$, $l = 40\text{mm}$.
- Propyleenvezels, micro $\varnothing 32\text{ }\mu\text{m}$, $l = 18\text{mm}$.
- Staalvezels, gegolfd $\varnothing 0.9\text{mm}$, $l = 35\text{mm}$.
- Staalvezels, haak aan het eind $\varnothing 0.75\text{mm}$, $l = 35\text{mm}$.
- Staalvezels, recht $\varnothing 0.3\text{mm}$, $l = 12.5\text{mm}$.

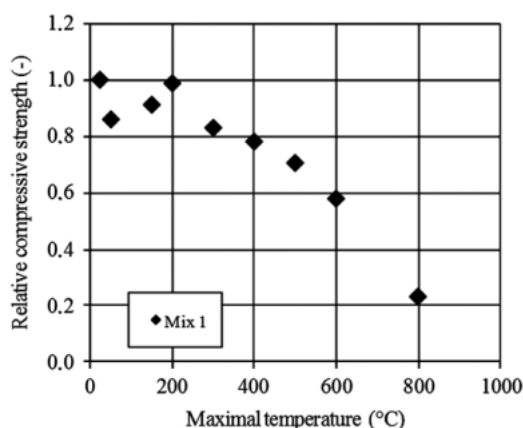
	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
CEM I 42.5 N, kg/m ³	350	350	350	350	445	445
Water, kg/m ³	151	151	151	151	144	144
Aggregate 0-4 mm, kg/m ³	912	912	912	912	818	818
Aggregate 4-8 mm, kg/m ³	485	485	485	485	363	363
Aggregate 8-16 mm, kg/m ³	544	544	544	544	636	636
Superplasticizer, kg/m ³	1.4	1.4	1.4	1.4	8.9	8.9
Fibres, kg/m ³	-	1 PP macro	1 PP micro	80, Steel corrugated	80, Steel deformed end	80, Steel straight, 12.5 mm

Figuur 24 - Betonsamenstellingen onderzoek invloeden vezels bij brand.

Het onderzoek gaf de volgende resultaten:

Mix zonder vezels

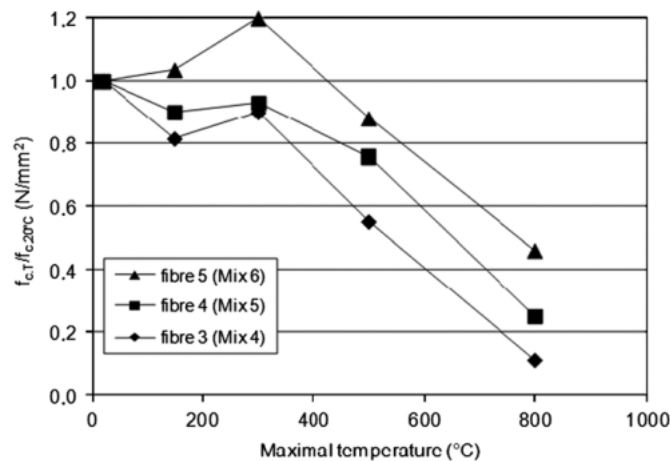
- De druksterkte van Mix 1 was 64 MPa op kamertemperatuur.
- Er zijn een groot aantal scheuren waargenomen op het oppervlak van het proefstuk tijdens de visuele inspectie.
- De overgebleven druksterkte van het proefstuk na een belasting van 800 °C was ca. 23% van de beginsterkte, zie Figuur 25.



Figuur 25 - Krachtsverloop proefstuk zonder vezels bij verhoogde temperatuur.

Mix met staalvezels

- De druksterkte van mix 4,5 & 6 waren 74.7, 67.2 & 70.5 MPa op kamertemperatuur.
- Voor mix 4 is er een bijzonder soort falen ontstaan, de hoeken van het proefstuk waren afgebroken.
- Tijdens de visuele inspectie zijn er geen scheuren waargenomen bij mixen 5 en 6.
- De overgebleven druksterkte van de proefstukken na een belasting van 800 °C waren tussen de 45% voor mix 6 en 17% voor mix 4, zie Figuur 26.



Figuur 26 - Krachtsverloop proefstukken met staalvezels bij verhoogde temperatuur.

Aan de hand van deze resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Opmerkelijk is dat de toelaatbare kracht van de proefstukken piekt bij een temperatuur van ca. 200 à 300 graden. Onderzoekers concludeerde dat de piek veroorzaakt wordt door de leeftijd van de proefstukken. Alle proefstukken hebben een leeftijd van maximaal 90 dagen.
De testresultaten zijn waarschijnlijk niet representatief voor betonelementen die minder gehydrateerd zijn.
- De proefstukken zijn belast nadat deze zijn afgekoeld tot kamertemperatuur. Hoewel dit een redelijk beeld kan geven van de overgebleven drukkracht worden de elementen belast tijdens de brand, misschien dat dit andere resultaten brengt.
- Tijdens de visuele inspectie zijn er geen scheuren waarneembaar in de proefstukken van mix 5 en 6 na een belasting van 800 graden. Voorzichtig kan geconcludeerd worden dat VVUHSB minder gevoelig is voor spatten. Er zal wel nader onderzoek moeten worden uitgevoerd naar het spatgedrag wanneer de proefstukken onder belasting worden blootgesteld in combinatie met hoge temperaturen.

3.5.2 Corrosie

Dankzij de compacte samenstelling van de betonmatrix scoort dit beton uitstekend op het gebied van penetratiediepte, carbonatie en de omgang met temperatuurverschillen. Het gemiddelde poriëngehalte in VVUHSB varieert tussen ca. 1-2% van het totale volume. Dit poriëngehalte is verkregen met behulp van een hittebehandeling. Zonder hittebehandeling heeft VVUHSB een gemiddeld poriëngehalte van ca. 8-10%. Dankzij de hoge dichtheid en het lage poriëngehalte is dit mengsel uitstekend bestand tegen weersinvloeden en chloriden.

In een studie van Schmidt en Fehling (2005) werd een carbonatiediepte van 1,5 mm gevonden na 3 jaar. Dit is respectievelijk 2,5 en 4,5 keer minder als HSB en conventioneel beton. De toevoeging van microsilica heeft een positieve invloed op de corrosie van het wapeningsstaal. Waar bij conventioneel beton een dekking van ca. 50 millimeter gebruikelijk is bij grote constructies kan deze bij VVUHSB gereduceerd worden naar de grootste staafdiameter van het wapeningsstaal.

Temperatuurverschillen

De lage penetratiewaarden en porositeit van VVUHSB zorgen voor een verhoogde weerstand tegen temperatuurverschillen. Er is bijvoorbeeld geen ontdooi-vries degradatie gevonden in proefstukken die blootgesteld zijn aan 800 ontdooi-vries cycli.⁴²

Krimpscheuren

VVUHSB vertoont krimpgedrag dat afwijkt van normaal beton. Het grootste deel van de krimpscheuren ontstaan in de plastische fase van de mortel. Zonder behandeling zal VVUHSB blijven krimpen met een steeds kleinere snelheid. Een stoombehandeling zorgt er voor dat de volledige krimp optreedt tijdens de 2-daagse behandeling. Na deze periode is het element dan ook gestabiliseerd tegen verdere krimp. De totale krimp lijkt echter wel groter te zijn met een stoombehandeling dan onbehandeld VVUHSB.⁴⁹

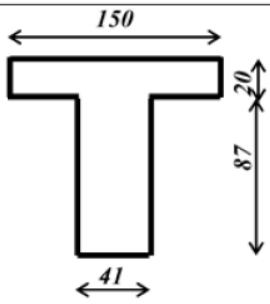
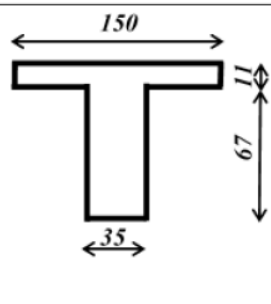
⁴⁹ (Graybeal, 2006)

3.6 Duurzaamheid

3.6.1 Carbon footprint

VVUHSB bevat zo'n twee tot drie keer zo veel cement als normaal beton. Omdat de productie van cement verantwoordelijk is voor ca. 80% van de CO₂ emissie van beton is het noodzakelijk om de hoeveelheid beton te minimaliseren.

Dankzij de verbeterde mechanische eigenschappen en de lage kruipfactor is er een kleinere doorsnede mogelijk van VVUHSB voor dezelfde krachtopname. Dit resulteert in een reductie van 36,7% van het gebruikte materiaal voor de onderstaande doorsnede.

NSC cross-section	UHPC cross-section
	
$A_c = 1.25 \text{ m}^2$ $A_s = 15,39 \text{ mm}^2$	$A_c = 0.80 \text{ m}^2$ $A_s = 15,39 \text{ mm}^2$

Figuur 27 - oppervlakte vergelijking tussen conventioneel beton en VVUHSB.⁵⁰

Habert et al (2013) heeft een studie gedaan naar de CO₂-emissie van VVUHSB in vergelijking met normaal beton. In deze studie kwam naar voren dat de emissie vijf tot zeven keer zo hoog was van VVUHSB in vergelijking met dezelfde hoeveelheid normaal beton. Wanneer echter de hoeveelheid reductie beton en de verbeterde onderhoudseigenschappen worden meegenomen, blijkt dat VVUHSB ca. 60-72% minder impact heeft op het milieu.⁵⁰ Er dient echter wel geattendeerd te worden op het feit dat er is aangenomen dat de VVUHSB-brug een levensduur heeft van 200 jaar vs. een levensduur van 100 jaar met normaal beton.

In een studie van 2016, Thorstensen et al (2016) is er een vergelijkbaar onderzoek gedaan. Het verschil met dit onderzoek is dat er rekening is gehouden met een ontwerplevensduur van 100 jaar voor zowel de VVUHSB als de brug van conventioneel beton. Het resultaat van dit onderzoek is dat het VVUHSB alternatief ca. 10% minder uitstoot levert als een brug met normaal beton.

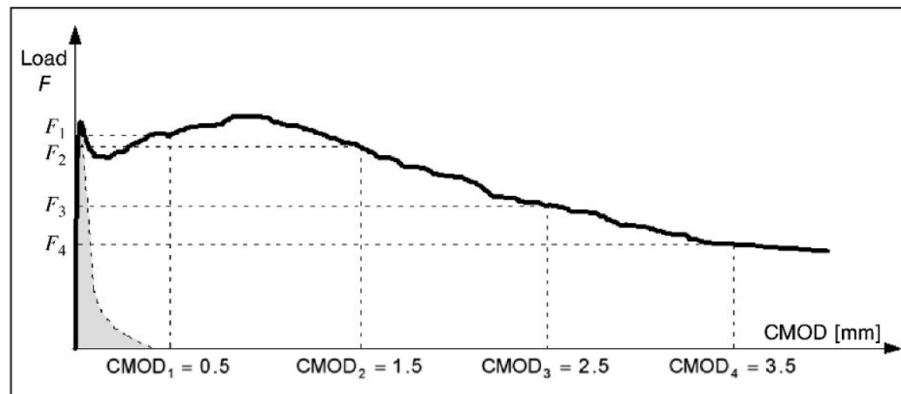
⁵⁰ (Larsen, Aasbakken, O'Born, Vertes, & Thorstensen, 2017)

3.7 Rekenmethode volgens de FIB

Tijdens het construeren zal worden gewerkt met 'FIB Model Code for Concrete Structures 2010'. Deze code is opgesteld door 'The International Federation for structural concrete'. Dit is een internationale organisatie die regelgeving van beton ontwikkeld voorafgaand aan de uiteindelijke norm. Dit document vormt de basis voor nieuwe normen en regelgeving met als doel het materiaalgedrag optimaal te kunnen voorspellen.

3.7.1 F-CMOD-curve

De rekenregels met betrekking tot de druksterkte van normaal beton zijn ook toepasbaar bij VVUHSB. De nominale materiaaleigenschappen van de treksterkte kunnen bepaald worden door middel van een drie-punt proef. Deze proef legt een relatie vast tussen de kracht (F) en de 'Crack Mouth Opening Displacement' (CMOD) in een F-CMOD-curve.



Figuur 28 - F-CMOD-curve voor normaal beton en VVUHSB.⁵¹

Afgeleid aan de grafiek kunnen de volgende parameters vastgesteld worden.

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j l}{2 b h_{sp}^2}$$

Verklaring:

f_{Rj} : de resterende buigtrekspanning overeenkomstig met $CMOD_j$. [MPa]

F_j : de kracht overeenkomstig met $CMOD_j$. [N]

l : de lengte. [mm]

b : de breedte. [mm]

h_{sp} : de afstand tussen de zaagsnede en de top van het proefstuk. [mm]

⁵¹ (Concrete, 2010)

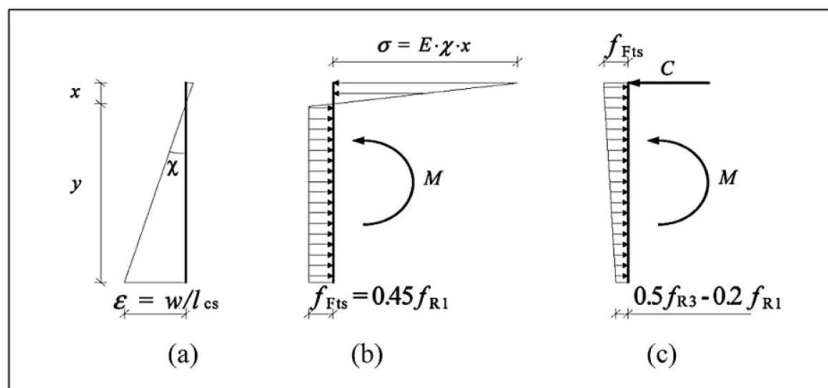
3.7.2 Lineair elastisch model

In dit model wordt de F-CMOD-curve omgerekend naar een lineair spanning rekdiagram.

Het model heeft twee referentiepunten, zijnde f_{Fts} en f_{Ftu} . De f_{Fts} (serviceability residual strength) representeert de treksterkte in de BGT en de f_{Ftu} (ultimate residual strength) representeert de treksterkte in de UGT.

$$M(CMOD_1) = \frac{f_{R1} b h_{sp}^2}{6}$$

$$M_{max} = \frac{f_{R3} b h_{sp}^2}{6} = \frac{f_{Ftu} b h_{sp}^2}{2}$$



Figuur 29 – Spanningsevenwicht in VVUHSB.⁵¹

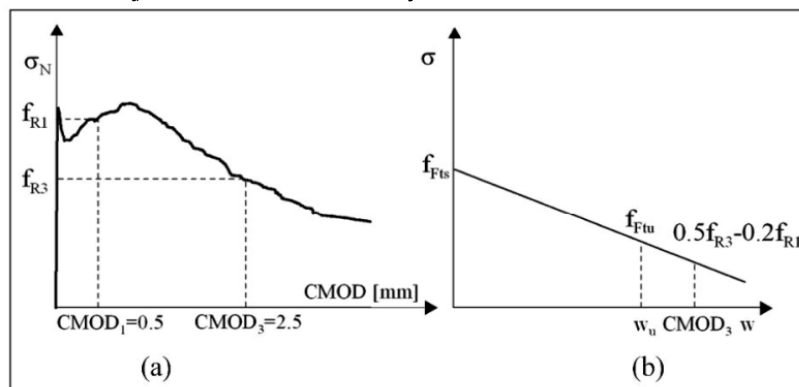
In bovenstaand figuur is het spanningsevenwicht schematisch weergegeven. Er wordt hier vanuit gegaan dat de drukspanning zich helemaal bovenin het beton bevindt en de trekspanning lineair verloopt in de rest van de doorsnede.

Deze spanningen kunnen als volgt worden berekend:

$$f_{Fts} = 0,45 f_{R1}$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - f_{Fts} - \frac{W_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5 f_{R3} + 0,2 f_{R1}) \geq 0$$

Hierin is W_u de maximale scheurwijdte van 2,5mm.



Figuur 30 - Schematisering van het lineair elastisch model.⁵¹

3.7.3 Maximale verplaatsing

Constructief ontwerp moet voldoen aan eisen voor weerstand en bruikbaarheid voor de verwachte levensduur van de VVUHSB-elementen. Aan de ductiliteitseis in buiging kan worden voldaan door toevoeging van conventionele wapening. Indien een element geen conventionele wapening bevat gelden op het gebied van doorbuiging ten minste één van de volgende regels.

$$\delta_u \geq 20 \delta_{SLS}$$

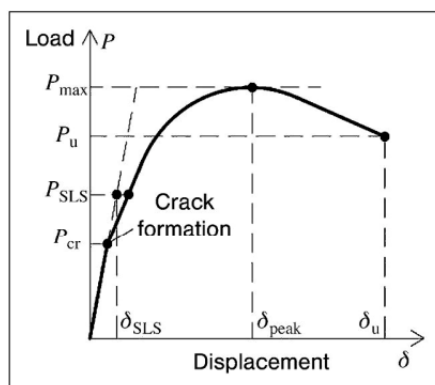
$$\delta_{peak} \geq 5 \delta_{SLS}$$

Verklaring:

δ_u : Maximale verplaatsing in de UGT.

δ_{peak} : Verplaatsing bij de maximale kracht.

δ_{SLS} : Maximale verplaatsing in de BGT.

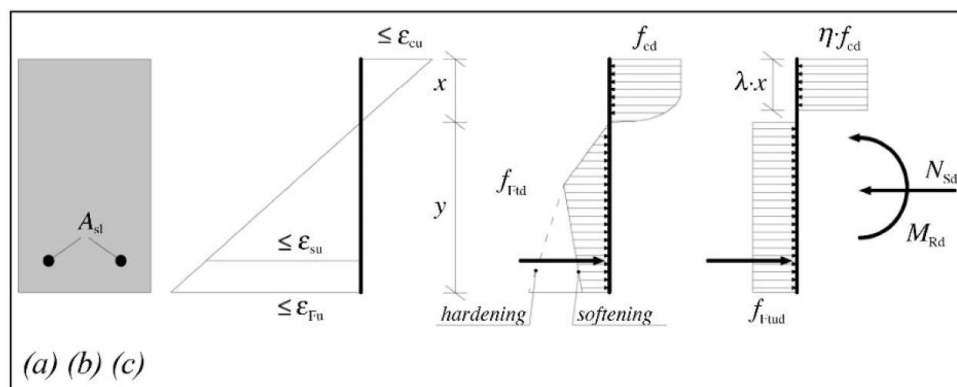


Figuur 31 - Typisch verplaatsingsdiagram VVUHSB onder de kracht P.⁵¹

3.7.4 Rekenen met in de uiterste grens toestand

Een constructie faalt wanneer een van de volgende normen wordt overschreden.

- De ultieme drukspanning wordt overschreden in het vezelbeton, ϵ_{cu} .
- De ultieme trekspanning in het staal wordt overschreden, ϵ_{su} .
- De ultieme trekspanning in de staalvezels wordt overschreden, ϵ_{Fu} .



Figuur 32 - UGT voor buigingsmoment en centrische kracht.⁵¹

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50) / 400$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50) / 200$$

3.7.5 Dwarskracht in balken

Wanneer vezel versterkt beton met treksterkte-hardening wordt gebruikt en de elementen geen langs of dwarskrachten wapening krijgen mag de uiterlijke trekspanning σ_1 de ontwerp trekspanning f_{Ftuk} niet overschrijden.

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F}$$

Verklaring:

f_{Ftuk} : de karakteristieke uiterlijke trekspanning van vezel versterkt beton met $w_u=1,5\text{mm}$.

γ_F : Veiligheidsfactor 1,5

3.7.6 Balken zonder dwarskrachtwapening met langswapening

De ontwerpformule voor dwarskracht weerstand in elementen **met** langswapening en **zonder** dwarskrachtwapening is al volgt:

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_l \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{1/3} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d$$

Verklaring:

γ_c : De veiligheidsfactor voor beton zonder vezels.

k : $1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$

d : De effectieve hoogte van de dwarsdoorsnede. [mm]

ρ_l : De langswapeningsratio = $\frac{A_{sl}}{b_w d}$

A_{sl} : De oppervlakedoorsnede van de toegepaste wapening. [mm²]

f_{Ftuk} : De karakteristieke uiterlijke trekspanning van vezel versterkt beton met $w_u=1,5\text{mm}$.

f_{ctk} : De karakteristieke trekspanning van het beton zonder vezels. [MPa]

f_{ck} : De karakteristieke cilinder drukspanning van het beton. [MPa]

σ_{cp} : $N_{Ed} / A_c < 0,2 f_{cd}$ is de gemiddelde stress op de doorsnede A_c [mm²] voor een centrische kracht N_{Ed} .

b_w : De kleinste breedte van de doorsnede in de trek-zone. [mm]

De dwarskracht weerstand $V_{Rd,F}$ mag niet kleiner zijn dan de minimale dwarskracht weerstand $V_{Rd,Fmin}$.

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Met

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

3.7.7 Balken met dwarskrachtwapening en langswapening

Voor het ontwerp van balken met dwarskrachtwapening en langswapening geldt de volgende ontwerpformule:

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s}$$

Er hoeft geen dwarskrachtwapening worden geplaatst indien er voldaan wordt aan de volgende vergelijking:

$$f_{Ftuk} \geq 0,08 \sqrt{f_{ck}}$$

3.7.8 scheurwijdte controle in elementen

De volgende scheurwijdte controle heeft betrekking op elementen met vezelversterking in combinatie met conventionele wapening.

$$w_d = 2 \left\{ k \cdot c + \frac{1}{4} \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \cdot \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}} \right\} \cdot \frac{1}{E_s} \cdot (\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr} + \eta_r \cdot \varepsilon_{sh} \cdot E_s)$$

Verklaring:

$$k : 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

c : betondekking [mm]

ϕ_s : diameter langswapening [mm]

$\rho_{s,ef}$: $\frac{A_s}{A_{c,ef}}$ met $A_{c,ef}$ als de oppervlakte van het beton in druk.

f_{ctm} : gemiddelde waarde van de axiale trekkracht van beton.

F_{Ftsm} : $f_{Ftsk}/0,7$ (f_{Ftsk} is de karakteristieke waarde van f_{Fts}).

τ_{bm} : gemiddelde bond kracht tussen het staal en beton, zie onderstaande tabel.

E_s : Elasticiteitsmodulus van het wapeningsstaal.

σ_s : staalspanning t.p.v. een scheur.

β : coëfficiënt afhankelijk van het belastingpatroon, zie onderstaande tabel.

σ_{sr} : $\frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}} (1 + \alpha_e \rho_{s,ef})$ maximale staalspanning in een scheur tijdens de scheurvorming.

η_r : zie onderstaande tabel

ε_{sh} : krimpspanning

α_e : $\frac{E_s}{E_c}$

	Crack formation stage	Stabilized cracking stage
Short term, instantaneous loading	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$
Long term, repeated loading	$\tau_{bms} = 1.35 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.4$ $\eta_r = 1$

3.8 VVUHSB-mengsel voor het hoofdonderzoek

Tijdens het hoofdonderzoek worden diverse elementen ontworpen en getoetst. Het doel is een objectieve vergelijking tussen conventioneel beton, VVUHSB en een staalconstructie.

Om praktische redenen wordt er gekozen voor een hybridevariant van VVUHSB waarin conventionele wapening gecombineerd zal worden met staalvezels. Aan het eind van het onderzoek zal blijken of dit de meest economisch voordelige oplossing blijkt. Het VVUHSB mengsel waar mee ontworpen zal worden is als volgt.

Betonkwaliteit	C90/105
f_{ck}	90
$f_{ck,cube}$	105
f_{cd}	60,0
f_{cm}	98
$f_{ctk,0,05}$	3,54
f_{ctd}	2,36
E_{cm}	43600
f_{R1}	13 MPa
f_{R3}	12 MPa
Klasse	10c
Dichtheid	2500 kg/m ³

Tabel 13 - Mechanische gegevens VVUHSB-mengsel.

Samenstelling	Hoeveelheid	Indicatiewaarde
CEM I 52,5 R ENCI	330 kg/m ³	0,09 €/kg
CEM III/B 42,5 N LH HS + Cemij	330 kg/m ³	0,07 €/kg
Vliegas	100 kg/m ³	0,04 €/kg
Water	160 L/m ³	
Superplastificeerder	10 kg/m ³	2,00 €/kg
Staalvezels 35/0,5	100 kg	1,30 €/kg
w/b-factor	0,236	
Toeslagmateriaal 0-4 mm	610 kg/m ³	20 €/m ³
Toeslagmateriaal 4-8 mm	610 kg/m ³	
Mengprijs		30 €/m ³

Tabel 14 - Samenstelling VVUHSB.

3.9 Conclusie

Betonnen gebouwen zijn bijzonder duurzaam en ultra hoge sterktebeton doet daar een schepje bovenop. De mechanische eigenschappen van VVUHSB wijken sterk af in vergelijking met conventioneel beton. Hogesterktebeton is een investering. Dankzij de verbeterde eigenschappen is het bijzonder duurzaam en onderhoudsvrij maar erg duur in de aankoop. Deze aankoop is echter terug te verdienen indien de levensduur van de betonconstructie in acht wordt genomen.

Voordelen van vezel versterkt VVUHSB

- Verhoogde mechanische eigenschappen ten opzichte van conventioneel beton.
- Reductie in betondoorsnede mogelijk onder dezelfde situaties.
- Erg duurzaam
- Onderhoudsvrij
- De reductie in conventioneel wapeningsstaal is positief voor een snellere werkbaarheid op de bouwplaats.
- Mogelijk betere eigenschappen bij brand ten opzichte van beton zonder staalvezels.

Nadelen

- Door de toegevoegde staalvezels gaat de verwerkbaarheid van de mortel achteruit.
- Grondstofprijzen zijn hoger in aanschaf ten opzichte van regulier beton.
- Hoog cementaandeel wat minder goed is voor het milieu.

4 Staal

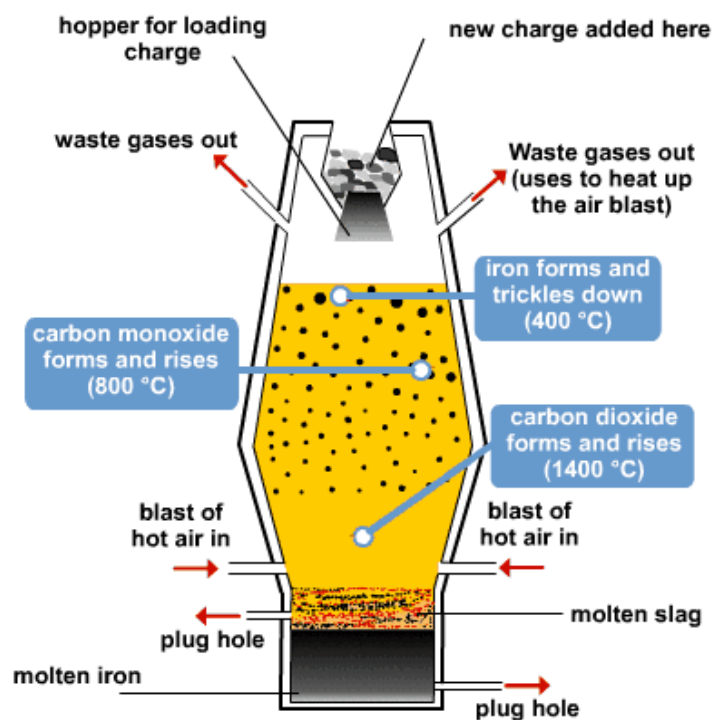
4.1 Productieproces

Voor het maken van staal zijn grofweg twee manieren mogelijk. Hierin wordt onderscheidt gemaakt in de primaire en secundaire staalproductie.

4.1.1 Primaire staalproductie

Tijdens de primaire staalproductie zijn er twee stages te onderscheiden.

Het eerste stadium begint met het mijnen van grondstoffen met een hoog ijzer gehalte. Deze grondstoffen worden fijngemalen tot poeder en door middel van magneten wordt het ijzererts gescheiden. Het ijzererts (Fe_2O_3) wordt in een hoogoven gemixt met koolmonoxide (CO) waardoor de zuurstof onttrokken wordt aan het erts met als eindproduct ijzer en koolstofdioxide.



Figuur 33 - principe hoogoven.⁵²

Als eindproduct ontstaat er ruw ijzer onderin de hoogoven met daar bovenop een laag met gesmolten staalslakken. De hoogovenslakken worden gebruikt in de cementindustrie voor cement type III. Gestold ruwijzer is een hard, bros, moeilijk buigbaar materiaal met een hoog koolstofgehalte, gewoonlijk rond de 3,5-4,5%.

In het tweede stadium wordt het ruwijzer verwerkt tot ijzer, gietijzer of staal.

Om er staal van te maken moet het koolstofgehalte van het vloeibare ijzer worden verlaagd tot onder de 2,14%. Dit wordt gedaan door het ruwijzer te verhitten en door zuurstof toe te voegen. De zuurstof reageert met de aanwezige koolstof. Afhankelijk van de vereiste specificaties kan de fabrikant diverse metalen toevoegen aan het mengsel om de juiste eigenschappen te krijgen.

⁵² <http://www.s-cool.co.uk/gcse/chemistry/extraction-of-metals/revise-it/the-blast-furnace>

4.1.2 *Secundaire staalproductie*

Staal is 100% recyclebaar en dit staat centraal bij de secundaire staalproductie. Staal wordt gewonnen door middel van het Electric Arc Furnace Proces (EAF). Tijdens dit proces wordt 100% schroot gebruikt dat wordt omgesmolten zonder inzet van primaire grondstoffen. Alleen zuurstof en kalk worden toegevoegd om eventuele verontreinigingen te binden. Ook gebruikt verzinkt staal is te verwerken in de elektro-oven. Hierbij wordt het zink teruggewonnen en gebruikt bij de productie van nieuw zink.

In principe is al het staal te produceren op deze manier maar op dit moment is er echter nog niet genoeg schroot voorhanden om de vraag volledig te beantwoorden. Van al het staal dat in Europa wordt gebruikt wordt, wordt inmiddels 50% via EAF vervaardigd. Dit percentage varieert per specifiek product. Er vindt een verschuiving plaats van de hoogoven naar de elektrische oven doordat staal steeds meer terugkeert naar de staalindustrie.

4.2 *Soorten staal*

Metaal wordt in de industrie bijna nooit in zuivere vorm toegepast. In plaats daarvan bestaan metaalsoorten vrijwel altijd uit een legering. Een legering is een mengsel van verschillende metalen. Legeringen worden in verschillende samenstellingen en hoeveelheden gebruikt om metaalsoorten van verschillende eigenschappen te voorzien. Door het toevoegen van diverse legeringen kunnen onder andere de treksterkte, hardheid, corrosiebestendigheid, rekgrens en slijtvastheid verbeterd worden.

Staal is in te delen in drie hoofdgroepen. De hoofdgroepen worden geclassificeerd aan de hand van de hoeveelheid toegevoegde elementen. Koolstof wordt hierbij niet als legeringselement gezien.

4.2.1 *Ongelegeerd staal*

Ongelegeerd staal, ook wel constructiestaal, bevat maximaal 1,5% aan legeringselementen. Veel gebruikte legeringselementen zijn onder andere mangaan en silicium. Net als koolstof worden mangaan en silicium gebruikt om de sterkte en hardheid te verhogen. Deze groep is verantwoordelijk voor ca. 90% aan de wereldwijde staalproductie.⁵³ Dit komt voornamelijk doordat het relatief goedkoop en goed bewerkbaar is.

Constructiestaal bevat (globaal) de volgende kenmerken:

- Laag koolstofgehalte
- Relatief zacht materiaal
- Goed koud en warm te vormen
- Goede lasbaarheid (zonder hard / bros te worden)
- Grote rek

⁵³ (Wondris & Nutting, 2016)

4.2.2 *Laaggelegeerd staal*

Laaggelegeerd staal, ook wel machinestaal, bevat tussen de 1,5 en 5% aan legeringselementen. Naast mangaan en silicium zijn chroom, vanadium, nikkel en molybdeen veel voorkomende legeringselementen. Zoals de naam al doet vermoeden wordt dit staal veelal toegepast voor machines en dan voornamelijk de inwendige onderdelen zoals tandwielen, koppelingen etc.

Chroom wordt vaak gebruikt om staal oxidatie- en corrosiebestendig te maken. Chroom in combinatie met Molybdeen maakt het staal uitstekend bestand tegen hoge temperaturen en maakt het erg sterk.

Machinestaal bevat (globaal) de volgende kenmerken:

- Sterker en harder als constructiestaal
- Goed te snijden
- Moeilijk te vervormen (koud niet mogelijk, warm slechts beperkt)
- Hardingsverschijnselen bij het lassen

4.2.3 *Hooggelegeerd staal*

Hooggelegeerd staal bevat meer dan 5% aan legeringselementen. De bekendste vormen zijn roestvast staal (rvs) en gereedschapstaal.

De hoofdlegeringselementen in rvs zijn chroom en nikkel. Chroom wordt gebruikt om staal roestvast te maken. Nikkel wordt vaak gebruikt om de ongewenste effecten van chroom tegen te gaan. Gereedschapstaal wordt ook wel snelstaal of High Speed Steel (HSS) genoemd. Het materiaal behoudt bij hogere temperaturen zijn hardheid en is daardoor zeer geschikt voor gereedschap dat heet kan worden, zoals metaal- en betonboren, hamers, snijgereedschap etc.

Hooggelegeerd staal bevat (globaal) de volgende kenmerken:

- Sterk en hard
- Bestendig tegen stoten
- Eenvoudig te bewerken
- Hoog gelegeerd

4.3 Verwerkbaarheid staal

4.3.1 Koud gevormd staal

Stalen profielen die zijn gevormd bij omgevingstemperatuur zijn koud gevormd. Koudgewalste profielen of platen worden in de gewenste vorm gewalst. Omdat het walsen op omgevingstemperatuur gebeurt is deze productiemethode goedkoper dan warm walsen.

Tijdens het walsen wordt het staal dermate uitgerekt dat de optredende spanning groter is dan de vloeigrens. Daardoor zal de sterkte van het staal toenemen, maar gaat dit ten koste van de elasticiteit. Afhankelijk van de intensiteit van het oprekken bestaat de mogelijkheid dat het staal geen waarschuwing meer geeft bij overbelasting. Bij constructieve toepassingen gaat de voorkeur uit veiligheidsoverwegingen dan ook uit naar warm gewalste profielen. Het voordeel aan koud walsen is dat de minimaal verkrijgbare dikte kleiner is als bij warm walsen. Dit maakt het koud walsen bijzonder aantrekkelijk voor bijvoorbeeld de luchtvaart of auto-industrie.

4.3.2 Warm gewalst

Standaard constructiestaal is gemaakt van warm gewalst staal. Dit houdt in dat het onder invloed van hitte is vervormd, waarna het relatief elastisch is geworden met een waarschuwingsplafon. Deze eigenschap houdt in dat het materiaal tot de vloeispanning kan vervormen en in de oorspronkelijke vorm terugkomt, indien het wordt ontlast. Ofwel, indien er een vervorming optreedt dan is dat zichtbaar zonder dat de constructie faalt. Dit is dan ook een goede waarschuwingsmethode voor een overbelaste constructie.

Warmgewalst stal is vrij ruw en wordt daarom veel gebruikt in de constructie waar het staal minder glad hoeft te zijn.

4.4 Mechanische eigenschappen staal

Constructiestaal is in verschillende sterkteklassen te verkrijgen. Binnen Nederland worden de klassen S235, S275 en S355 het meest toegepast. De naam geeft weer welke eigenschappen het staal bevat. Zo duidt de S op "structural", vrij vertaald constructiestaal of staal. De "235" geeft de vloeigrens in MPa aan bij een dikte van 16mm. Daarnaast kent staal nog een aantal toevoegingen die iets over het materiaal en het productieproces zeggen.

De chemische samenstelling van staal is extreem belangrijk. Het is een fundamentele factor die de mechanische eigenschappen van het staal sterk bepaald. Vanwege deze fundamentele rol wordt er streng toegezien op de productie van staal volgens de geldende Europese normen. De chemische samenstelling is afhankelijk van de toepassing. Zo is S235J2 een staalsoort met een verhoogde hardheid (J2). De chemische samenstelling van het staal is dan ook net iets anders dan standaard S235. In de onderstaande tabel staan de maximale waarden voor de elementen die aan S235, S275 en S355 zijn toegevoegd.

Staalsoort	Max. % koolstof (C)	Max. % mangaan (Mn)	Max. % fosfor (P)	Max. % zwavel (S)	Max. % silicium (Si)
S235	0,22	1,60	0,05	0,05	0,05
S275	0,25	1,60	0,04	0,05	0,05
S355	0,23	1,60	0,05	0,05	0,05

Tabel 15 - Maximale waarden samenstelling staalsoorten S235, S275 en S355.⁵⁴

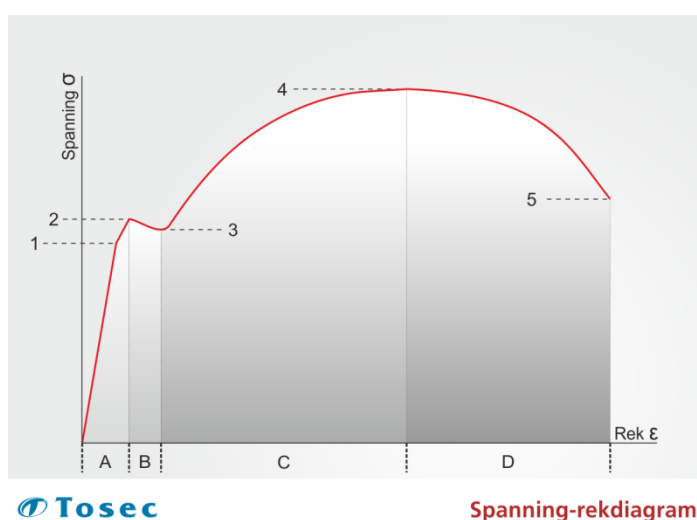
Staal heeft een elasticiteitsmodulus van $2,1 \cdot 10^5$ MPa en een dichtheid van 7850 kg/m^3 .

⁵⁴ <https://www.tosec.nl/wiki/staal/>

4.4.1 Vloiegrens

De vloiegrens is één van de belangrijkste mechanische eigenschappen van staal, ongeacht de toepassing. De vloiegrens wordt berekend door middel van een trekproef en is af te lezen uit het spanning-rekdiagram. De vloiegrens is het punt waarop het materiaal begint te vloeien. Dit is de minimale kracht die nodig is om het materiaal blijvend plastisch te vervormen.

In het onderstaande figuur is het spanning-rekdiagram weergegeven van staal. Voor constructies is de vloeispanning van belang. Constructies moeten hier altijd onder blijven om er voor te zorgen dat ze niet ongewenst vervormen. In onderstaand figuur is te zien dat het materiaal elastisch reageert in zone A en plastisch in zones B t/m D. Ook zijn er een aantal kenmerkende fases te onderscheiden, aangegeven met nummer 1 t/m 5.



Figuur 34 - Spanning-rekdiagram staal.⁵⁵

1. De proportionaliteitsgrens: Dit is de grens tot waar het materiaal evenredig verlengt ten opzichte van de aangebrachte spanning.
2. De elasticiteitsgrens (bovenste vloiegrens): Dit is de grens tot waar de vervorming elastisch van aard is. Het materiaal zal onder dit punt bij het wegnemen van de spanning weer terug keren naar zijn oorspronkelijke lengte en vorm.
3. De onderste vloiegrens: Dit is de grens waarop het materiaal begint te vloeien, de aangebrachte spanning zorgt voor plastische vervorming.
4. Maximale spanning of treksterkte: Vanaf de vloiegrens tot aan de maximale spanning is er sprake van plastische vervorming, ook wel versteviging. De maximale spanning is de grens tot waar het materiaal kan vervormen zonder insnoering/breuk optreedt.
5. Breukspanning: Dit is het punt waarop het materiaal onder de aangebrachte spanning bezwijkt. De insnoering die hieraan vooraf gaat begint bij de maximale spanning totdat het breukpunt wordt bereikt. De breukspanning ligt lager dan de maximale spanning.

⁵⁵ <https://www.tosec.nl/wiki/spanning-rekdiagram/>

4.4.2 Treksterkte

De treksterkte van staal is de maximale spanning die het materiaal bereikt om plastisch te vervormen. Praktisch gezien is de vloeigrens veel meer van belang. Als het materiaal immers bij de maximale treksterkte aankomt is het element al sterk plastisch vervormd. Bij een langdurige spanning zal het materiaal zelfs breken. De treksterkte wordt berekend door middel van een trekproef en is af te lezen uit het spanning-rekdiagram aangegeven als punt nummer 4. Onderstaand zijn de vloeispanningen en maximale treksterktes weergegeven van enkele staalsoorten.

Staalsoort	Vloeigrens in N/mm ²	Max. treksterkte in N/mm ²
S235	235	310-510
S275	275	370-530
S355	355	470-630

Tabel 16 - Maximale treksterkte staalsoorten S235, S275 en S355 bij een dikte van 16mm staal.⁵⁴

4.4.3 Druksterkte

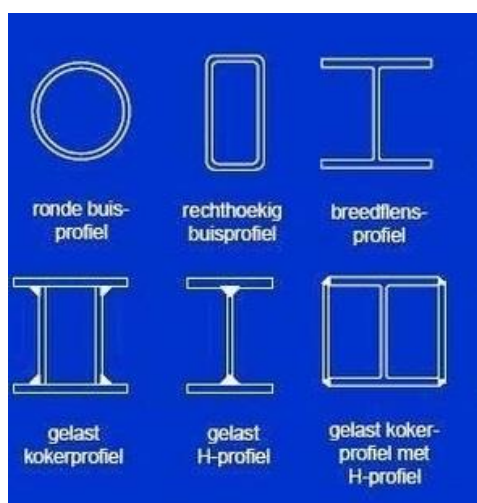
Het spanningsrekfiguur van staal is in de drukzone hetzelfde als de trekzone. Ondanks dat de druksterkte van staal nagenoeg gelijk is aan de treksterkte is dit geen gebruikelijke grootte. In staalconstructies treedt vervorming op lang voordat de druksterkte relevant word.

Stalen kolommen worden steeds meer uitgevoerd in combinatie met beton. Op deze manier is er minder kans op knip en kip, heeft het een hoge brandweerstand, is het beschermd tegen corrosie en blijft de kolom ductiel.

4.5 Staalprofielen

Constructiestaal wordt in Nederland in diverse vormen toegepast. Een staalprofiel is warm gewalst en de afmetingen zijn vrijwel altijd genormeerd. De meest bekende profielen zijn de H-, I-, U-, en L-profielen, genoemd naar de doorsnede vorm. Uitgezonderd het L-profiel bestaan deze profielen uit twee flensen met een tussenstuk dat het lijf wordt genoemd.

Deze profielen kunnen samengesteld worden door deze aan elkaar te lassen of te bouten.



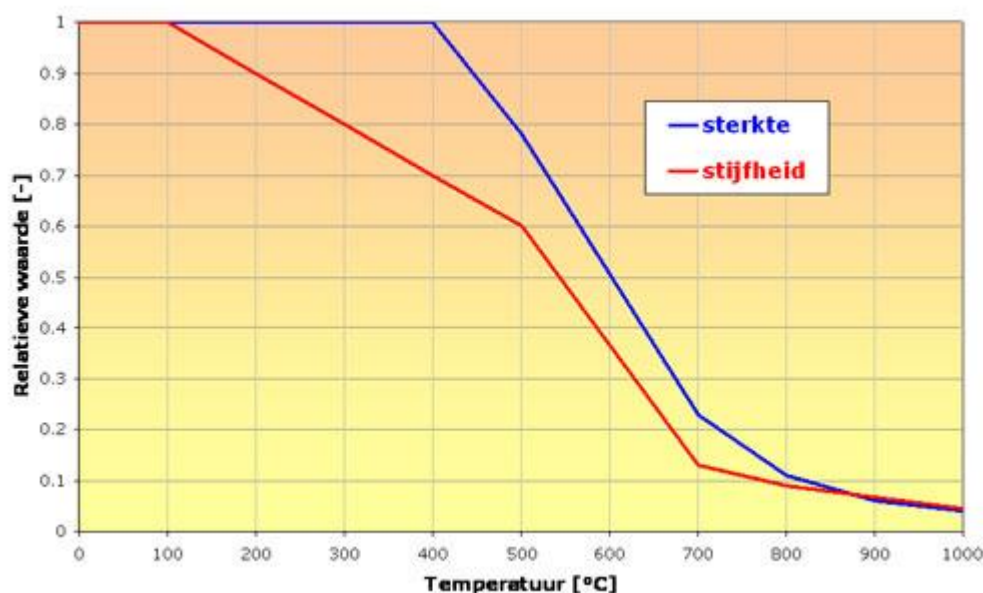
Figuur 35 - Diverse staalprofielen.⁵⁶

Het verschil tussen de I- en H-profielen is dat de H-profielen een bredere flens hebben waardoor de letter H wordt gevormd. In de aanduiding van de profielen is de hoogte af te lezen van de profielen.

⁵⁶ <http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/profielstaal.htm>

4.6 Brandveiligheid staal

Staal is een onbrandbaar materiaal en valt daarmee net als beton in de hoogste brandklasse A1. Staal verbrandt niet en er komt ook geen warmte of rook vrij. Bij de temperaturen die kunnen optreden bij een brand in een gebouw treedt er echter wel verlies op van sterkte en stijfheid. Vanaf een staaltemperatuur van ca. 400 °C neemt de sterkte af en bij 800 °C is er nog maar 10% van de sterkte over.⁵⁷ Zie onderstaand figuur.



Figuur 36 - Sterkte bij staal bij temperatuurverhoging.⁵⁸

De sterkte van staal is erg beïnvloedbaar door een temperatuursverhoging. Dit betekent dat de juiste maatregelen genomen moeten worden om de brandweerstand te verhogen. Er zijn zowel actieve als passieve oplossingen mogelijk deze brandweerstand te verhogen.

4.6.1 Actieve maatregelen.

De actieve maatregelen verlagen de kans dat een brand zich volledig ontwikkelt. De brand blijft zo beperkt tot een lokale brand en zal de verhitting van de staalconstructies zo beperken. Echter, er blijft altijd een kleine kans over dat de actieve maatregelen niet in staat zijn om een volledig ontwikkelde brand te voorkomen. Als het risico erg groot is, wat het geval is bij hoogbouw, wordt er geacht de staalconstructie zo te ontwerpen dat de kans dat deze bezwijkt zo klein mogelijk is.

Diverse actieve maatregelen:

- Detectie
- Alarmering
- Blusmiddelen
- Rook en warmte afvoer (RWA) installaties
- Verlaging van het zuurstofgehalte

⁵⁷ (Infosteel)

⁵⁸ <http://www.infosteel.be/materiaal/techniek-normen/brandveiligheid.html#gedrag-van-staal-bij-brand>

4.6.2 *Passieve maatregelen*

De passieve maatregelen zijn alle maatregelen die de weerstand tegen brand van de staalconstructie verhogen uitgaande van een volledig ontwikkelde brand.

Er zijn een aantal passieve maatregelen die toegepast kunnen worden:

- Overdimensionering
- Plaatsing (inwendig of uitwendige constructie)
- Bouwkundige integratie
- Brandwerende isolatie
- waterkoeling

Overdimensionering

Door de staalconstructies zwaarder uit te voeren dan voor het koude ontwerp nodig is, wordt de spanning in de constructie verlaagd. Door het verlagen van de spanning is een hogere temperatuur toelaatbaar en zal de opwarmsnelheid afnemen.

De opwarmsnelheid van de staalconstructie hangt niet alleen af van het temperatuurverloop van de brand zelf, maar ook van de verhouding tussen het verhitte buitenoppervlak en het staalvolume. Een massief profiel met een klein buitenoppervlak dat wordt verhit warmt langzamer op dan een licht profiel met een groot verhit buitenoppervlak. Deze verhouding wordt aangeduid met de profielfactor A/V . [1/m]

Plaatsing van de constructie buiten het gebouw

Een kolomstructuur die buiten het gebouw is geplaatst wordt bij brand in een brandcompartiment slechts verhit door de straling uit het ramen en de verhitting van de eventuele vlammen uit het raam. Bovendien straalt de kolom bij opwarming veel warmte af naar de buitenlucht.

Door de kolommen niet recht voor de ramen te positioneren, blijft de verhitting beperkt. Op deze manier kan de constructie zonder brandwerende isolatie worden uitgevoerd om een weerstand tegen brand van 120 minuten te realiseren. In deel 1991-1-2 van de Eurocodes wordt een berekeningsmethode gegeven om weerstand tegen brand te toetsen. Deze oplossing kan ook economisch zijn met een constructie van roestvast staal ondanks de hogere materiaalkosten, dankzij de inherente duurzaamheid en de betere mechanische eigenschappen bij verhoogde temperatuur dan gewoon staal.

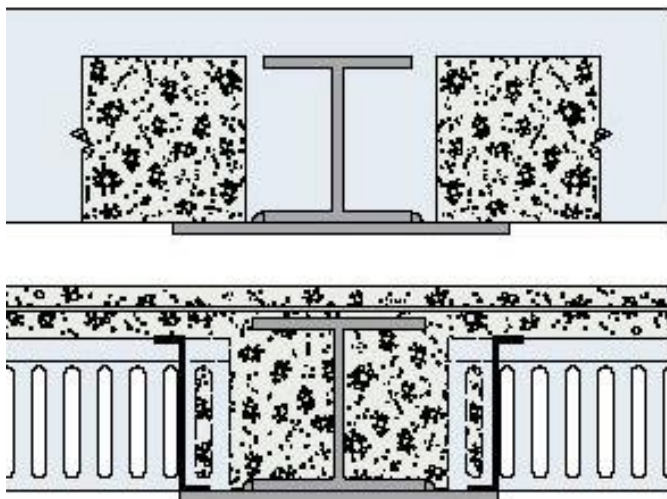


Figuur 37 - Hoogbouw met een uitwendige stalen constructie.⁵⁹

⁵⁹ <http://www.infosteel.be/materiaal/techniek-normen/brandveiligheid.html>

Bouwkundige integratie

Bouwkundige integratie is een veel gebruikte manier om het staal economisch te beschermen tegen brand. De staalconstructie wordt gedeeltelijk of geheel opgenomen in de rest van de constructie waardoor de constructie niet of slechts beperkt door de brand wordt verhit. Door de integratie ontstaan bovendien vlakke vloeren en wanden die ruimte besparen en het plaatsen van leidingen en installaties vereenvoudigen.



Figuur 38 - Bouwkundige integratie van stalen profielen.⁶⁰

Brandwerende isolatie

Een veel gebruikte oplossing om staal de gewenste weerstand tegen brand te geven is het beschermen van de staalconstructie tegen brand met brandwerende isolatie. Er bestaan verschillende types isolatiemateriaal:

- Opschuimende verf:
De verf schuimt op bij verhitting en vormt een isolerende laag die de opwarming van het staal vertraagt.
- Beplating:
Brandwerende platen worden traditioneel veel toegepast en d.m.v. kan elke gewenste weerstand gerealiseerd worden. Veel toegepaste platen zijn op basis van gips, calciumsilicaat of minerale wol.
- Spuitmortel:
Spuitmortels worden op de werf aangebracht. Het kan een zeer economische oplossing zijn maar door het ruwe oppervlak is het minder geschikt voor zichtwerk.

Waterkoeling

Kokerprofielen kunnen effectief tegen brand worden beschermd voor 120 minuten door ze te vullen met water. Circulatie van het water is essentieel zodat de warmte wordt afgevoerd en niet gaat koken.

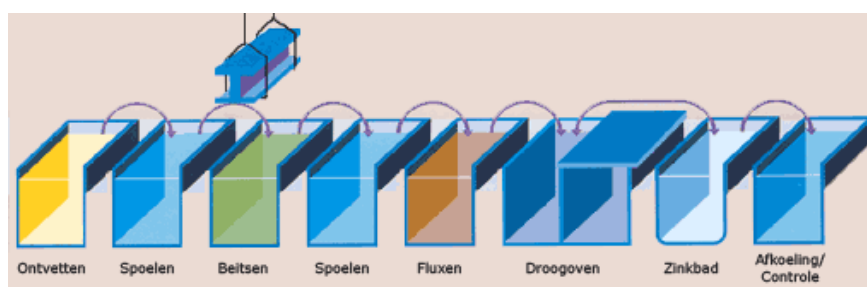
⁶⁰ <http://www.infosteel.be/materiaal/techniek-normen/brandveiligheid.html#passieve-maatregelen>

4.7 Corrosie

Zoals in hoofdstuk 2.8.2 al is besproken, is staal bijzonder beïnvloedbaar voor corrosie. Om er voor te zorgen dat het staal bestendig wordt tegen corrosieve invloeden wordt het staal geconserveerd. Deze behandeling zorgt er voor dat het staal niet gaat roesten en beter bestand is tegen externe chemische invloeden. Er zijn meerdere mogelijke oplossingen om het staal te conserveren.

4.7.1 Thermisch verzinken

Thermisch verzinken op industriële schaal is al bijna twee eeuwen oud. Het proces is in de basis nog steeds hetzelfde: Het dompelen van staal in een bad gesmolten zink. Het staal komt minutenlang in contact met zink op een temperatuur van ongeveer 450 °C. Het gevolg is dat er een reeks zink-ijzer legeringen ontstaan aan het oppervlak van het staal. Bovenop de verzinkingslaag vormt zich een 'patinalaag', een haast ondoordringbaar en stabiel scherm tegen de corrosieve elementen van de omgeving.



Figuur 39 - Procesbeheersing verzinken van stalen profielen.⁶¹

Als gekozen wordt voor thermisch verzinken is het van essentieel belang dat hiermee rekening wordt gehouden vanaf het moment dat de constructie ontworpen wordt. Allereerst moet men er zeker van zijn dat de verschillende staalsoorten die deel uitmaken van de constructie goed verzinkbaar zijn. Ten tweede zijn de afmetingen van de constructie een heel belangrijk punt: Het te verzinken element moet passen binnen de bruikbare afmetingen van het verzinkingsbad. Kokers moeten worden voorzien van gaten om de zink aan de binnenzijde te krijgen en voorkomen dat door verwarmen van het profiel er explosies kunnen plaatsvinden.

4.7.2 Duplexsysteem

Middels een duplexsysteem wordt het object eerst thermisch verzinkt en vervolgens voorzien van een natlak- of poedercoating. De lak en poedercoating zijn in iedere gewenste kleur beschikbaar en zorgt er voor dat het verzonken staal er goed uit komt te zien. Voor het toepassen van zichtbaar staal wordt deze behandeling aanbevolen.

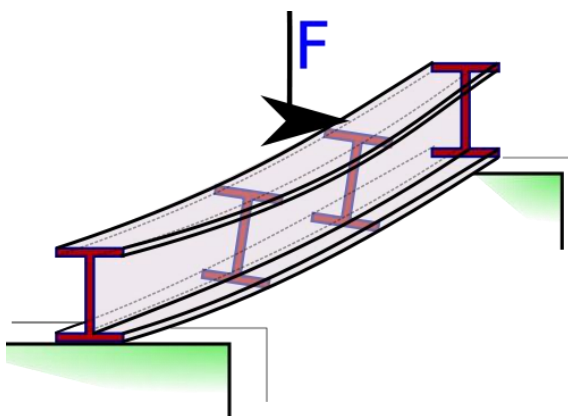
⁶¹ <http://www.stalenmasten.nl/conserveringen/>

4.8 Mechanische bezwijkmechanismen

4.8.1 Kipinstabiliteit

Kipinstabiliteit is het kantelen van een belaste staaf in de zogenoemde 'zwakke' richting, in combinatie met een zijdelingse verplaatsing en rotatie van de doorsnede. De gedrukte flens van het profiel gaat zijdelings uitbuigen in combinatie met het roteren om de lengteas van de ligger.

Kip is vooral een probleem bij liggers met een relatief grote sterkte om de x-as, en een relatief kleine torsiestijfheid om de y-as. Kip kan voorkomen worden door het toepassen van zijdelingse (kip)steunen. Kipinstabiliteit komt vooral voor bij 'slanke' liggers ongeacht het gebruikte constructiemateriaal.

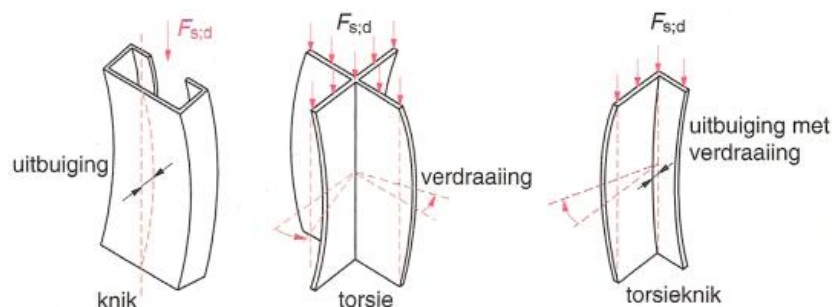


Figuur 40 - Ligger die kipt onder invloed van de belasting F .⁶²

4.8.2 Knik

Samen met kip is knik een van de meest voorkomende bezwijkmechanismen voor slanke staalprofielen. Kip is van toepassing op een stalen ligger en Knik is van toepassing op een stalen kolom. Knik is het buigen van een staaf door een erop uitgeoefende kracht waarbij de staaf een vorm kan aannemen die op een boog of golf lijkt. Doorzetten van de buiging heeft tot gevolg dat de staaf bezwijkt.

Knik komt vooral voor bij een kolom, minder vaak bij een ligger omdat deze niet vaak in de richting van de as wordt belast, maar meestal loodrecht op de as. Knik is afhankelijk van de stijfheid van het materiaal, de lengte van de staaf en de weerstand tegen doorbuiging in een bepaalde richting.



Figuur 41 - Soorten knik bij diverse profielen.⁶³

⁶² [https://nl.wikipedia.org/wiki/Kippen_\(techniek\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Kippen_(techniek))

⁶³ http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgk/knik_11_knikinstabiliteit_staaf_tabellenboek_bouwkunde

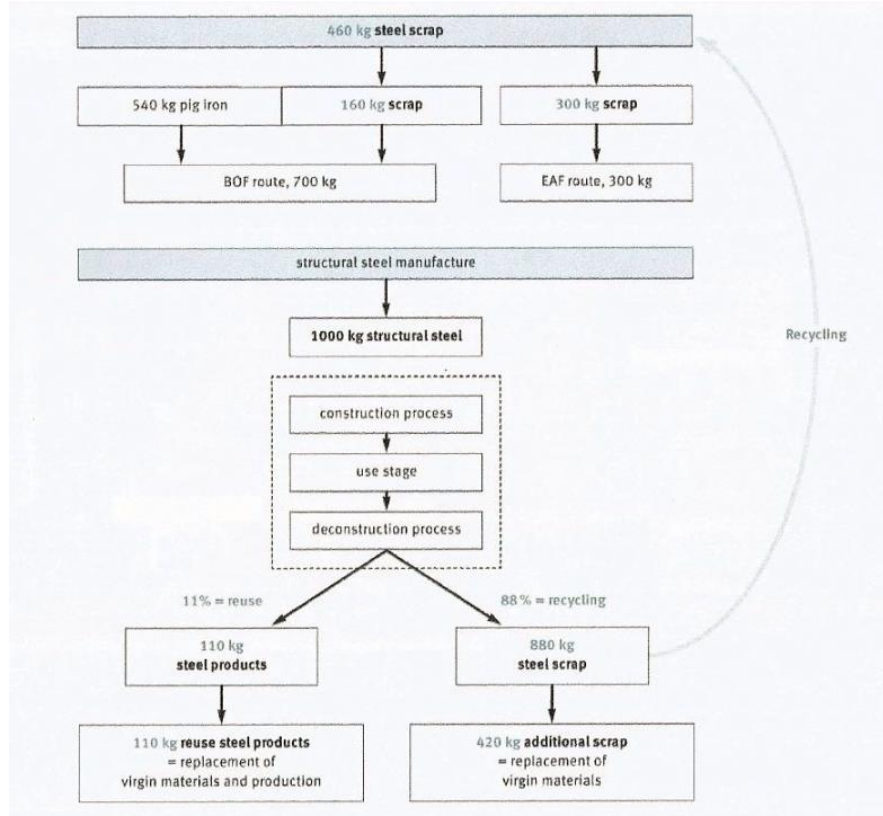
4.9 Duurzaamheid staal

Zoals in hoofdstuk 4.1 wordt besproken zijn er twee productieprocessen voor staal: Het hoogovenproces (BF) en het elektrostaalproces (EAF). Bij het elektroproces wordt tot 100% gerecycled staal ingezet en bij het hoogovenproces ca. 15 tot 20%. De verhouding tussen het hoogovenproces en het elektrostaalproces is momenteel 70:30.⁶⁴ Beide productieroutes zijn in evenwicht met elkaar door de economische balans van de prijs van staalschroot. Daarnaast blijft het winnen van ijzererts en steenkool rendabel. De behoefte aan staal is namelijk groter dan de productie van staalschroot, deze bedraagt slechts 50% van de wereldproductie van staal, waardoor beide productieroutes nodig blijven. De wereldproductie van schroot neemt weliswaar jaarlijks toe maar zo ook de vraag naar staal.

4.9.1 Recycling

Het voordeel van bouwen met staal is dat staal 100% recyclebaar is. Voor constructiestaal (profielen en platen) bestaat al enkele tientallen jaren in Europa een goed functionerend recyclingsysteem. Staal is het eerste constructiemateriaal dat de kringloop vrijwel volledig gesloten heeft. Van 100 ton constructiestaal wordt 99% gerecycled. Gemiddeld wordt in Europa 11% van de staalprofielen hergebruikt in andere projecten en 88% wordt gerecycled.

Een ander voordeel is dat in tegenstelling tot de meeste andere bouwmaterialen de kwaliteit gelijk blijft bij recyclen. Door de nieuwe productietechnieken is het zelfs mogelijk om staal met een hogere kwaliteit te maken dan het schroot waar het van afkomstig is. Onderstaand is een schematische weergave te zien van de recycling potentie van staal.



Figuur 42 - Schematische weergave recycling potentie staal.⁶⁴

⁶⁴ (van Herwijnen, 2013)

4.9.2 CO₂ emissie van constructiestaal

De staalindustrie is erg energie-intensief. Bij de productie van 1 ton staal wordt gemiddeld 1,8 ton CO₂ uitgestoten. Hiermee is de ijzer- en staalindustrie verantwoordelijk voor 4 tot 5% van de totale mondiale CO₂ uitstoot, vergelijkbaar met die van de cementindustrie.

Bladen van het Milieu Relevante Product Informatie (MRPI) onderscheiden de CO₂ emissies van staal in vijf verschillende groepen, gebaseerd op verschillende toepassingen. In de onderstaande tabel zijn de resultaten van deze bladen weergegeven.

Productgroep	Productie	Transport	Montage	Demontage	Recycling	Totaal
Zware toepassingen	908	19,6	17	40,3	-512	473
Middelzware toepassingen	2590	19,6	45	24,1	-1660	1020
Lichte toepassingen	2500	19,6	52	46,4	-1640	977
Binnenwanden	2570	19,6	50,3	48,1	-1530	1160
Dak- en gevelbekleding	2600	19,6	44,7	64,8	-1940	791

Tabel 17 - CO₂ emissie voor verschillende staaltoepassingen in kg CO₂ per ton staal.⁶⁴

Wat opvalt de productie van zware toepassingen aanzienlijk minder CO₂-emissie levert als de andere toepassingen. Dit is te verklaren doordat deze staalsoort vele malen minder bewerkt wordt.

De CO₂ emissie van staal is onafhankelijk van de staalsoort. De waarden voor de productgroepen vormen dan ook een gemiddelde voor de verschillende producten binnen een groep. Daardoor kan een spreiding van meer dan 20% optreden in een of meer milieucategorieën. Deze variatie is nagenoeg van dezelfde omvang als de variatie tussen de verschillende landen en productieplaatsen in Europa. Ook verschillen in de wijze van allocatie van milieueffecten kunnen leiden tot verschillen van meer dan 20% in de milieuscores van staalconstructie producten⁶⁴.

Voor de productgroep constructiestaal voor zware toepassingen wordt gerekend met 51% recycling en 49% hergebruik. Dit leidt tot de negatieve waarde -512 in de kolom recycling. Voor dak- en gevelplaten wordt aangehouden: 70% recycling, 29% hergebruik en 1% afval. Voor de overige productgroepen geldt: 87% recycling, 12% hergebruik en 1% afval.

4.10 Conclusie

Sinds de introductie van hoogwaardig constructiestaal wordt dit veelvuldig toegepast. Staal heeft de hoogste sterkte-gewichtsverhouding van de constructiematerialen hout, beton en staal. Bovendien blijven staalconstructies met nieuwe constructiemethodes een populaire keuze voor de kantoor- en utiliteitsbouw. Door de hoge sterkte-gewichtsverhouding zijn slanke constructies mogelijk. Met staal kunnen extreem lange overspanningen worden gemaakt waardoor grote vrije ruimtes mogelijk zijn.

Voordelen

- Snellere bouwtijd op de bouwplaats (gaat ten koste van de voorbereidingstijd).
- Grote overspanningen met weinig materiaal.
- De hoge ductiliteit van staal maakt dit materiaal erg goed bestand tegen windbelasting.
- Er is een groot diversiteit aan profielen beschikbaar.
- Staal is 100% recyclebaar.

Nadelen

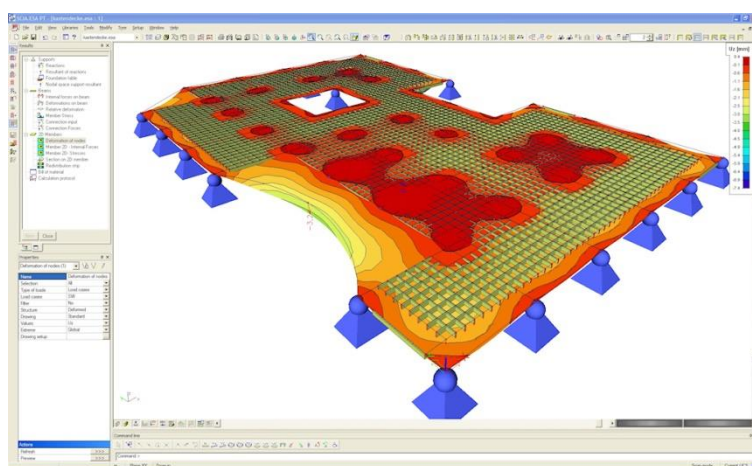
- Staalprofielen zijn algemeen genomen erg slank waardoor er problemen kunnen ontstaan met kip en knik.
- Staal is per volume duurder dan andere veel gebruikte materialen zoals hout, steen of beton.
- Staal functioneert bijzonder slecht bij brand.
- Corrosie kan lijden tot duurzaamheidsproblemen of aanvullend onderhoud. Verder kan door corrosie het beeld worden aangetast.
- Zwaarbelaste knopen zijn complex van aard en kosten veel tijd om te ontwerpen en realiseren.
- Door de grote slankheid zijn staalconstructies gevoeliger voor vermoeiing en vervormingen.

5

Scia Engineer

Tijdens het hoofdonderzoek wordt er gerekend met het programma Scia Engineer. Scia Engineer is een 3D programma voor structureel ontwerp en analyses. Het programma wordt gebruikt om de technische prestaties van alle soorten gebouwen te berekenen. Het programma is geschikt om een verscheidenheid aan constructies te berekenen zoals hoogbouw projecten maar ook klassieke constructies in staal en beton. Het EEM programma is gespecialiseerd voor de berekening van statische constructies. Voor het berekenen van dynamische krachten en spanning is het programma niet of beperkt geschikt. Met het programma kunnen ook specifieke oplossingen voor infrastructuur- en milieu-installaties zoals bruggen, tanks, pijpleidingen, betonnen schepen, stalen torens en steigers worden ontworpen.

Het programma werkt op basis van de eindige elementenmethode en zorgt er voor dat gemaakte of geïmporteerde modellen van diverse constructies doorgerekend worden op theoretische sterkte, stabiliteit en vervorming.



Figuur 43 - Voorbeeld Scia Engineer model.⁶⁵

Voorafgaand aan het gebruik van het programma is het belangrijk om de constructie duidelijk te hebben en dienen de oplegreacties en de materiaalkeuzes op te worden gegeven. Er bestaat de mogelijkheid om de parameters van de materialen aan te passen, wat in het geval met de berekening met VVUHSB essentieel is.

Binnen ABT wordt het programma gebruikt voor het modelleren en construeren van diverse constructies. Omdat het programma binnen ABT veelvuldig wordt gebruikt is er veel expertise in het gebruik van het programma.

Naast de expertise van ABT is er online een bijna ongelimiteerde hoeveelheid aan informatie beschikbaar over het werken met Scia Engineer, denk bijvoorbeeld aan Youtube, online handleidingen, forums, etc.

⁶⁵ https://nl.wikipedia.org/wiki/SCIA_Engineer#/media/File:SCIA-concrete1.jpg

6 Begrippenlijst

Bekisting	Tijdelijk aangebrachte mal waarin beton wordt gestort.
Beton	Kunstmatig steenachtig materiaal.
Betonrot	Schade aan het beton door roestende wapening.
Beugels	Dwarskrachtwapening.
Bindmiddelen	Stoffen die de toeslagstoffen van het beton samenbinden.
Brandklasse	Een groep van gelijksoortige branden, geordend naar de aard van de brandende stoffen.
Breukspanning	Spanning die bezwijken van het materiaal tot gevolg heeft.
Carbonatie	Chemische reactie waarbij CO ₂ indringt op de alkalische bestanddelen in het beton.
Carbon footprint	De hoeveelheid CO ₂ -uitstoot in de atmosfeer bij het verkrijgen van een materiaal.
Cement	Basis bestanddeel van beton, verkregen uit de betonklinker.
Consistentieklassen	Verwerkbaarheidsklasse van beton.
Constructiestaal	Laaggelegeerd staal dat gebruikt wordt in de constructie.
Conventioneel beton	Beton met sterkteklasse C30/37.
Corrosie	Chemische aantasting van materialen door diens omgeving.
Dekking	Afstand tussen de buitenkant van het beton tot het dichtstbijzijnde wapeningsstaal.
Dichtheid	Soortelijke massa van een materiaal.
Draagstructuur	Hoofdstructuur die de krachten overbrengt op de fundering.
Druksterkte	De mate waarin een materiaal weerstand kan bieden tegen drukkrachten.
Ductal	Merk VVUHSB.
Ductiliteit	De mate waarin een materiaal plastische vervorming toelaat.
Duplexsysteem	Manier van bescherming van het staal tegen corrosie.
Duurzaamheid	Ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen.
Elasticiteitsmodulus	Maat voor de stijfheid van een materiaal t.o.v. de rek onder een belasting.
Elasticiteitstheorie	Theorie over elastische vervorming.
Gewapend beton	Beton met wapeningsstaal.
Hoogbouw	<i>"Een te bouwen bouwwerk waarin een vloer van een gebruiksgebied hoger dan 70 m boven of lager dan 8 m onder het meetniveau ligt"</i> volgens bouwbesluit 2012 Artikel 2.14.
Hoogoven cement	Cement gewonnen uit staalklinkers.
Hulpstoffen	Stoffen die aan de betonsamenstelling worden toegevoegd ter verbetering van de mechanische eigenschappen.
Ing.	Ingenieur, bachelor graad.
International style	architectuele stijl in de jaren 70.
Ir.	Ingenieur, master graad.
Kip	Uitbuigen van een staaf in de zogenoemde 'zwakke' richting.
Klinker	Smeltproduct voor het vergaren van cement.
Knik	Een ongecontroleerde plaatselijke scherpe verbuiging in een rechte of licht gekromde staaf of balk.
Koud walsen	Walsen van staal met kamertemperatuur.
Langswapening	Hoofdwapening ter voorkoming van scheurvorming in beton.

Legering	Een vast, kunstmatig bereid homogeen mengsel van een metaal met één of meer andere elementen.
Milieuklasse	De mate waarin een constructie wordt blootgesteld aan diens omgeving.
Mortel	Vloeibare staat van beton.
Ontkisten	Verwijderen van de bekisting.
Portland cement	Cementmerk.
Profielstaal	Algemene benaming van diverse staalprofielen die gebruikt worden in de constructie.
Rek	De mate waarin een materiaal uitrekt onder een gegeven belasting.
Ruwijzer	Het materiaal dat ontstaat na de eerste fase van het proces waarbij ijzererts wordt omgezet in ijzer.
Scia Engineer	Een 3D programma voor structureel ontwerp en analyses.
Spuitmortel	Speciale verf die bij brand opschuimd.
Staal	Legering bestaande uit ijzer en koolstof.
Staalvezels	Vezels van staal.
Sterkteklassen	Maat naar de sterkte van een materiaal.
Superplastificeerder	Een sterke waterreducerder ter verbetering van de verwerkbaarheid van beton.
Thermisch verzinken	Het aanbrengen van een dun laagje zink op het metaal ter voorkoming van roest.
Toeslagmaterialen	Materialen die aan het cement worden toegevoegd, zoals zand, grind etc.
Treksterkte	De mate waarin een materiaal weerstand kan bieden tegen trekkrachten.
Verwerkbaarheid	De mate (gemak) waarin het beton te verwerken is.
Vloeispanning	De overgang van elastische naar plastische toestand.
Vulstoffen	Een stof die aan de betonspecie kan worden toegevoegd ter aanvulling van de hoeveelheid fijn materiaal.
Warm walsen	Walsen van staal onder verhoogde temperatuur.
Wapeningsstaal	Staal dat in het beton kan worden aangebracht in de trekzone van beton voor het opvangen van trekspanningen.
w/b	Water-bindmiddel factor.
w/c	Water-cement factor.

7**Acroniemen**

BF	: Blast Furnace.
BGT	: bruikbaarheids grens toestand.
CMOD	: Crack Mouth Opening Displacement.
EAF	: Electric Arc Furnace.
FIB	: International Federation for structural concrete.
HAN	: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
HSS	: High speed steel.
LCA	: Levens cyclus analyse.
MPa	: Mega Pascal.
NB	: Normaal beton.
NEN	: Nederlands Europese Norm.
RWA	: Rook en warmte afvoer.
UGT	: Uiterste grens toestand.
VVUHSB	: Vezel Versterkt Ultra hoge sterktebeton.
VOBN	: Vereniging van ondernemingen van betonmortelfabrikanten in Nederland.

8

Symbolen

A_{sl}	: De oppervlakedoorsnede van de toegepaste wapening.
b	: Breedte.
b_w	: De kleinste breedte van de doorsnede in de trek-zone.
c	: Betondekking.
d	: De effectieve hoogte van de dwarsdoorsnede.
E_{cm}	: Elasticiteitsmodulus van beton.
E_s	: Elasticiteitsmodulus van het wapeningsstaal.
F_j	: Kracht overeenkomstig met $CMOD_j$.
h_{sp}	: Afstand tussen de zaagsnede en de top van het proefstuk.
l	: Lengte.
$V_{Rd,F}$	: Dwarskracht weerstand van vezel versterkt beton.
$V_{Rd,Fmin}$	: Minimale dwarskracht weerstand van vezel versterkt beton.
W_u	: Maximale scheurwijdte.
α_e	: Elasticiteitsmodulus ratio tussen beton en staal.
β	: Coëfficiënt afhankelijk van het belastingpatroon.
ϵ	: Specifieke vervorming (rek).
ϵ_{sh}	: Krimpspanning.
f_{cd}	: Rekenwaarde van de druksterkte van beton.
f_{ck}	: Karakteristieke cilinderdruksterkte van beton op 28 dagen.
$f_{ck,cube}$	: Karakteristieke kubusdruksterkte van beton op 28 dagen.
f_{cm}	: Gemiddelde cilinderdruksterkte van beton.
f_{ctd}	: Rekenwaarde van de treksterkte van beton.
f_{ctk}	: De karakteristieke trekspanning van het beton zonder vezels.
f_{ctm}	: Gemiddelde axiale treksterkte van beton.
f_{Fts}	: Serviceability residual strength treksterkte in de BGT.
f_{Ftsm}	: De karakteristieke waarde van f_{Fts} .
f_{Ftu}	: Ultimate residual strength treksterkte in de UGT.
f_{Ftuk}	: Karakteristieke uiterlijke trekspanning van vezel versterkt beton met $w_u=1,5mm$.
f_{Rj}	: Resterende buigtrekspanning overeenkomstig met $CMOD_j$.
δ_{peak}	: Verplaatsing bij de maximale kracht.
δ_{SLS}	: Maximale verplaatsing in de BGT.
δ_u	: Maximale verplaatsing in de UGT.
ρ_l	: De langswapeningsratio.
σ	: Spanning.
σ_{cp}	: Gemiddelde stress op de doorsnede A_c voor een centriscche kracht N_{Ed} .
σ_s	: Staalspanning t.p.v. een scheur.
σ_{sr}	: Maximale staalspanning in een scheur tijdens de scheurvorming.
γ_c	: Veiligheidsfactor voor beton zonder vezels.
γ_F	: Veiligheidsfactor 1,5 voor ontwerpen met vezels.
τ_{bm}	: Gemiddelde bond kracht tussen het staal en beton.
$\varnothing_s$	: Diameter langswapening.

Bibliografie

- International symposium on ultra-high performance concrete*. (2004). Opgeroepen op 10 10, 2017, van <http://www.uni-kassel.de/uhpc2004/introduction.html>
- Abbas, S., Nehdi, M., & Saleem, M. (2016). *International Journal of Concrete Structures and Materials* (vol.10, No.3). CrossMark.
- ABT. (2011). *Wat zijn de mechanische eigenschappen van UHSB*.
- Britannica. (z.j.). *Building construction*. Opgeroepen op 09 29, 2017, van Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/building-construction>
- Britannica. (z.j.). *Elevator*. Opgeroepen op 09 26, 2017, van Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/elevator-vertical-transport>
- Britannica. (z.j.). *Skyscraper*. Opgeroepen op 09 26, 2017, van Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/skyscraper>
- cement, U. (z.j.). *Cement history*. Opgeroepen op 09 21, 2017, van Understanding cement: <http://www.understanding-cement.com/history.html#>
- Concrete, I. F. (2010). *Fib model code 2010*. Ernst & Sohn.
- De Vree, J. (sd). *Kip*. Opgeroepen op 11 07, 2017, van Joost de Vree: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/kip.shtml>
- Duurzaamstaal. (sd). *Productieroutes voor staal*. Opgeroepen op 08 11, 2017, van Duurzaamstaal: http://www.duurzaamstaal.nl/p/406/productieroutes_voor_staal.html
- Eide, M. B., & Hisdal, J.-M. (2012). *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of the art*.
- Graybeal, B. A. (2006). *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*. Fairfax.
- how it's made. (2007, 11 15). *Cement, how it is made*. Opgeroepen op 10 03, 2017, van Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=n-Pr1KTVSXo>
- Infosteel. (sd). *Brandveiligheid*. Opgeroepen op 11 07, 2017, van Infosteel: <http://www.infosteel.be/materiaal/techniek-normen/brandveiligheid.html#gedrag-van-staal-bij-brand>
- Jonan Claes, T. H. (2014). *Masterproef, Buigtreksterkte van ultra hoge sterkte beton met synthetische vezels*. Universiteit Hasselt, KU Leuven.
- Knowles, E. (z.j.). *John Smeaton*. Opgeroepen op 09 21, 2017, van Engineering timelines: http://www.engineering-timelines.com/who/Smeaton_J/smeatonJohn8.asp
- Kusterle, W., Lublóy, É., Balázs, G. L., & Di Prisco, M. (2017). *Fibers to prevent fire spalling. FIB T4.1*, 34.
- Larsen, I. L., Aasbakken, I. G., O'Born, R., Vertes, K., & Thorstensen, R. T. (2017). *Determining the environmental benefits of UHPC as a bridge construction material*.
- Shepard, G. &. (z.j.). *The history of concrete*. Opgeroepen op 09 20, 2017, van Internachi: <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm#ixzz31V47ZuuJ>
- Smets, & Coen. (2014, 11). *#duurzaambeton - trending topics*.
- Statista. (z.j.). *Size of the global cement market in 2011 and 2016*. Opgeroepen op 09 29, 2017, van Statist: <https://www.statista.com/statistics/248667/size-of-the-global-cement-market/>
- Thinking, C. (z.j.). *Reduced sound transmission*. Opgeroepen op 10 04, 2017, van Concrete thinking: <http://www.concretethinker.com/solutions/Acoustics.aspx>
- van Herwijnen, F. (2013). *Duurzaam construeren met materialen*. VNconstructeurs.

- VOBN. (20114, 10 22). *Betonmortel en CO2-emissie*. Opgeroepen op 10 05, 2017, van VOBN: <http://www.vobn-beton.nl/beton-bewust%7Ccsc/duurzaam-bouwen-met-beton/beton-en-co2-emissie>
- VOBN. (2013, 05 30). *Grondstoffen van beton*. Opgeroepen op 10 03, 2017, van VOBN: <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/beton/grondstoffen-beton>
- VOBN. (2017, 07 03). *Consistentieklasse van beton*. Opgeroepen op 10 03, 2017, van VOBN: <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/beton/beton-bestellen/consistentieklasse>
- VOBN. (2017, 08 31). *Hoge sterkte beton*. Opgeroepen op 09 29, 2017, van VOBN: <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/beton/soorten-beton/hogesterktebeton>
- Wapperom, Welling, & Kerkhoven. (2009). *brandveiligheid, natuurlijk met beton*. 23. BFBN, Cement&Betoncentrum, VOBN, Cascade en VHB.
- WBCSD. (z.j.). *Sustainability benefits of concrete*. Opgeroepen op 09 29, 2017, van World business council for sustainable development: <http://www.wbcsdcement.org/index.php/about-cement/benefits-of-concrete>
- Wikipedia. (z.j.). *Architecture*. Opgeroepen op 09 28, 2017, van Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Architecture#Modernism>
- Wikipedia. (z.j.). *Concrete*. Opgeroepen op 10 05, 2017, van Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>
- Wikipedia. (z.j.). *Monadnock building*. Opgeroepen op 09 29, 2017, van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building
- Wondris, E. F., & Nutting, J. (2016, juli 15). *Steel metallurgy*. Opgeroepen op 10 30, 2017, van Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/steel/Testing-of-properties#toc81355>
- z.n. (z.j.). *Scheurvorming in jong beton*. *Cement&BetonCentrum*, 7.
- z.n. (z.j.). *Vorst en dooizouten*. *Cement&BetonCentrum*, 3.

Tabellen

TABEL 1 - SOORTEN BETON VOLGENS VOBN.....	15
TABEL 2 - EISEN BETONMORTEL PER FASE.....	16
TABEL 3 - AANBEVOLEN CONSISTENTIEKLASSEN VOLGENS NEN 8005.	17
TABEL 4 - AANVULLENDE EIGENSCHAPPEN ZELFVERDICHEND BETON VOLGENS NEN 8005.....	17
TABEL 5 - MATERIAALEIGENSCHAPPEN BETON VOLGENS NEN-EN 1992-1-1 (IN N/MM ²).....	18
TABEL 6 - STERKTEKLASSEN BETON.	19
TABEL 7 - RELATIE TUSSEN ELASTICITEITSMODULUS E EN KUBUSDRUKSTERKTE F_{ck}	20
TABEL 8 - RANDVOORWAARDEN WONING SCHEIDENDE ELEMENTEN.	22
TABEL 9 - BRANDKLASSEN VOLGENS EUROCODES.	23
TABEL 10 - TYPISCHE SAMENSTELLING VVUHSB.....	30
TABEL 11 - BELANGRIJKSTE EIGENSCHAPPEN DIVERSE VEZELSOORTEN.	33
TABEL 12 - INDICATIE OPNEEMBARE TREKSPANNINGEN BETONSOORTEN MET VEZELVERSTERKING.	35
TABEL 13 - MECHANISCHE GEGEVENS VVUHSB-MENGSEL.....	47
TABEL 14 - SAMENSTELLING VVUHSB.....	47
TABEL 15 - MAXIMALE WAARDEN SAMENSTELLING STAALSOORTEN S235, S275 EN S355.....	52
TABEL 16 - MAXIMALE TREKSTERKTE STAALSOORTEN S235, S275 EN S355 BIJ EEN DIKTE VAN 16MM STAAL.	54
TABEL 17 - CO ₂ EMISSIE VOOR VERSCHILLENDE STAALTOEPASSINGEN IN KG CO ₂ PER TON STAAL.	61

Figuren

- FIGUUR 1 - PIRAMIDES VAN GIZEH.
FIGUUR 2 - PANTHEON 3D-MODEL.
FIGUUR 3 - INTERNATIONAL STYLE IN CHICAGO.
FIGUUR 4 - GLOBAL CEMENT DEMAND 2002-2013.
FIGUUR 5 CEMENT PRODUCTIE.
FIGUUR 6 - GRONDSTOFFEN BETON.
FIGUUR 7 - DRUKSTERKTEMETING AAN EEN KUBUS.
FIGUUR 8 - SPANNINGEN IN OPLEGGING.
FIGUUR 9 - PROFIELEN WAPENINGSSTAAL.
FIGUUR 10 - BRANDWERENDHEIDSEISEN MET BETREKKING TOT BEZWIJKEN.
FIGUUR 11 - WINDSOR-TOREN IN MADRID.
FIGUUR 12 - BETONROT.
FIGUUR 13 - LEVENSCYCLUS BETON.
FIGUUR 14 - CO₂-FOOTPRINT VAN EEN M³ T.P.G. GEWAPEND BETON.
FIGUUR 15 - PERCENTAGE BINDMIDDEL PER GEMIDDELDE M³ BETON.
FIGUUR 16 - KLINGERGEHALTE IN EUROPEES CEMENT (IN%).
FIGUUR 17 - VERGELIJKING SCHEURPATRONEN CONVENTIONEEL BETON EN VVUHSB.
FIGUUR 18 - WATER / CEMENT RATIO VERSCHILLENDE SOORTEN BETON.
FIGUUR 19 - TEXTUUR MICROSILICA.
FIGUUR 20 - STAALVEZELS MET EINDVERAKERING.
FIGUUR 21 - MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN DUCTAL.
FIGUUR 22 - INVLOED VAN STRAIN-SOFTENING EN STRAIN-HARDENING.
FIGUUR 23 - DIVERSE MANIEREN VOOR HET BEREKENEN VAN DE ELASTICITEITSMODULUS.
FIGUUR 24 - BETONSAMENSTELLINGEN ONDERZOEK INVLOEDEN VEZELS BIJ BRAND.
FIGUUR 25 - KRACHTSVERLOOP PROEFSTUK ZONDER VEZELS BIJ VERHOOGDE TEMPERATUUR.
FIGUUR 26 - KRACHTSVERLOOP PROEFSTUKKEN MET STAALVEZELS BIJ VERHOOGDE TEMPERATUUR.
FIGUUR 27 - OPPERVLAKTE VERGELIJKING TUSSEN CONVENTIONEEL BETON EN VVUHSB.
FIGUUR 28 - F-CMOD-CURVE VOOR NORMAAL BETON EN VVUHSB.
FIGUUR 29 - SPANNINGSEVENWICHT IN VVUHSB.
FIGUUR 30 - SCHEMATISERING VAN HET LINEAIR ELASTISCH MODEL.
FIGUUR 31 - TYPISCH VERPLAATSINGSDIAGRAM VVUHSB ONDER DE KRACHT P.
FIGUUR 32 - UGT VOOR BUIGINGSMOMENT EN CENTRISCHE KRACHT.
FIGUUR 33 - PRINCIPE HOOGOVEN.
FIGUUR 34 - SPANNING-REKDIAGRAM STAAL.
FIGUUR 35 - DIVERSE STAALPROFIELEN.
FIGUUR 36 - STERKTE BIJ STAAL BIJ TEMPERATUURVERHOOGING.
FIGUUR 37 - HOOGBOUW MET EEN UITWENDIGE STALEN CONSTRUCTIE.
FIGUUR 38 - BOUWKUNDIGE INTEGRATIE VAN STALEN PROFIELEN.
FIGUUR 39 - PROCESBEHEERSING VERZINKEN VAN STALEN PROFIELEN.
FIGUUR 40 - LIGGER DIE KIPT ONDER INVLOED VAN DE BELASTING F.
FIGUUR 41 - SOORTEN KNIK BIJ DIVERSE PROFIELEN.
FIGUUR 42 - SCHEMATISCHE WEERGAVE RECYCLING POTENTIE STAAL.
FIGUUR 43 - VOORBEELD SCIA ENGINEER MODEL.

Vezel versterkt beton in de markt

Plan van aanpak



Documentinformatie

Titel : Vezel versterkt beton in de markt
Soort document : Plan van aanpak
Verwijzing : V3.0
Status : Definitief
Datum : 05 maart 2018

Opdrachtgever : ABT consulting Engineers in Velp



Onderwijsinstelling : Hogeschool van Arnhem en Nijmegen



Colofon*Auteur*

Naam	Dhr. Rick Schönthaler
Adres	Stationsstraat 28-02 7031 BR Wehl
Tel (mobiel)	+31 623 037 066
E-mail	rickschonthaler@gmail.com

Bedrijfsbegeleider

Naam	Ing. Michaël Menting
Functie	Projectleider civiele techniek Velp
Tel (werk)	+31 263 683 514
Tel (mobiel)	+31 651 230 881
E-mail	m.menting@abt.eu

Afstudeerbegeleiders

	1 ^e begeleider	2 ^e begeleider
Naam	Ir. Thomas Beuker	Ing. Remmelt Visscher
Functie	Hoofddocent mechanica en constructies	Opleidingscoördinator Civiele Techniek
Tel (mobiel)	+31 655 208 739	+31 655 208 746
E-mail	thomas.beuker@han.nl	r.visscher@han.nl

Revisielijst

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
V1.0	5 september 2017	RRS	Initiële opzet plan van aanpak
V2.0	18 september 2017	RRS	Aanpassen onderzoeksrichting en het pva hierop aanpassen.
V2.1	21 september 2017	RRS	Controle door Michaël, definitief maken pva.
V3.0	05 maart 2017	RRS	Definitief.

Inhoudsopgave

INLEIDING	5
1 PROJECTORGANISATIE	6
1.1 PROJECTTEAM	6
1.2 WERKLOCATIES	7
1.3 WERKTIJDEN	7
1.4 COMMUNICATIE	7
2 OPDRACHTBESCHRIJVING	8
2.1 PROBLEEMSTELLING	8
2.2 DOELSTELLING	9
2.3 HOOFD- EN DEELVRAGEN	10
2.4 PROJECTRESULTAAT	11
2.5 PROJECTSCOPE	11
2.6 RISICO'S	12
3 PRODUCTEN	13
3.1 PRODUCTEN DEELVRAGEN	13
3.2 VERANTWOORDING	15
3.3 PLAN VAN AANPAK	15
3.4 HOOFDVERSLAG	16
3.5 EINDPRESENTATIE	17
4 PROJECTFASERING	18
4.1 TYPE ONDERZOEK	18
4.2 LITERATUURONDERZOEK	18
4.3 DESKRESEARCH	18
4.4 PROJECTPLANNING	18
5 KWALITEITSBEHEERSING	20
5.1 DOCUMENTBEHEER	20
5.2 OPSLAG	20
5.3 FORMAT	20
5.4 KWALITEITSBEWAKING ABT	20
5.5 KWALITEITSBEWAKING HAN	20
6 PERSOONLIJK ONTWIKKELINGSPLAN	21
6.1 REEDS BEHAALDE COMPETENTIES	21
6.2 DOEL	21
BEGRIPPENLIJST	22
REFERENTIES	23

Inleiding

Met de opkomst van vezel versterkt hoge sterktebeton is er een nieuwe manier van ontwerpen en construeren ontstaan. Dankzij de eigenschappen van dit materiaal kunnen nieuwe uitdagende constructies gerealiseerd worden die voorheen ontoereikend waren.

ABT ziet potentie in het gebruik van dit materiaal in de hoogbouw. Momenteel wordt de draagstructuur binnen de hoogbouw in Nederland voornamelijk uitgevoerd in staal. Dit is mede omwille gewichtsbepierking en het gemak in uitvoerbaarheid. Om de potenties te onderzoeken is het afstudeeronderzoek 'Vezel versterkt beton in de markt' in het leven geroepen.

In het kader van dit onderzoek is dit plan van aanpak geschreven. Om het onderzoek in goede banen te leiden is het essentieel om voorafgaand het te doorlopen proces te documenteren. Door middel van deze procesbeschrijving wordt de algemene rode draad zichtbaar, niet alleen voor de onderzoeker maar ook voor derden.

In dit plan van aanpak wordt de probleemstelling inzichtelijk gemaakt en worden de kaders van het onderzoek afgebakend zodat er niet afgeweken wordt van de gestelde probleemstelling.

Naast het inzichtelijk maken van de probleemstelling en diens randvoorwaarden komen er nog een aantal onderwerpen aan bod over onder andere de projectorganisatie, kwaliteits-, risico- en procesbeheersing.

1 Projectorganisatie

Wanneer er gewerkt wordt aan een onderzoek van degelijke omvang zijn er diverse partijen betrokken. Om er voor te zorgen dat alles goed verloopt wordt in dit hoofdstuk ingezoomd op alle betrokken partijen en afspraken die zijn gemaakt.

1.1 Projectteam

Onderstaand zijn alle betrokken partijen weergegeven.

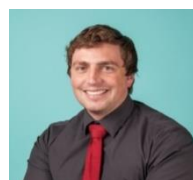
Afstudeerder



Rick Schönthaler
Afstudeerder
rickschonhaler@gmail.com
+31 623 037 066

Ik zal het onderzoek uitvoeren onder begeleiding van de bedrijfs- en de HAN-begeleiders. Het doel is om een goed en bruikbaar eindproduct te leveren voor ABT en de onderwijsinstelling.

Bedrijfsbegeleider/contactpersoon ABT



Michaël Menting
Projectleider civiele techniek
m.menting@abt.eu
+31 651 230 881

Michaël Menting is de bedrijfsbegeleider en tevens contactpersoon voor het onderzoek binnen ABT. Michaël is de juiste persoon voor dit onderzoek gezien zijn expertise met vezel versterkt hoge sterktebeton. Hij zal er mede voor zorgen dat de beoogde doelen van ABT worden behaald en zal intern ondersteuning bieden met het onderzoek.

HAN-begeleiders

De twee afstudeerbegeleiders hebben tot algemene taak het begeleiden van het proces van het afstuderen. De 1^e afstudeerbegeleider is voornamelijk aanwezig om het proces te begeleiden. De 2^e begeleider is meer incidenteel aanwezig.



1^e HAN-begeleider
Thomas Beuker
Hoofddocent mechanica en constructies
thomas.beuker@han.nl
+31 655 208 739



2^e HAN-begeleider
Remmelt Visscher
Opleidingscoördinator civiele techniek.
r.visscher@han.nl
+316 655 208 746

1.2 *Werklocaties*

Er zal hoofdzakelijk gewerkt worden op de locatie Velp van ABT. Hier zijn flex-plekken, uitstekende facilitaire voorzieningen en ervaren collega's aanwezig. De collega's zijn op deze manier beter bereikbaar en dit bevordert de communicatie. Er bestaat de mogelijkheid tot thuiswerken.

Sporadisch zal er een overleg ingepland worden op de techniek locatie van de HAN of op de locatie Velp van ABT met de HAN-begeleiders.

1.3 *Werktijden*

Volgens afspraak met ABT staan er 40 werkuren per week ingepland om te werken aan het onderzoek. Van maandag t/m vrijdag staan deze uren vrij ter invulling. Pauzes zijn in theorie een half uur in de middag maar deze is vrij ter interpretatie of- en wanneer deze genomen word. De eerste paar weken zal er geprobeerd worden zo veel mogelijk aanwezig te zijn zodat eventuele achterstand en onvoorziene tegenslagen in een later stadium preventief opgevangen kunnen worden.

Week 52 en week 1 zijn ingepland als vakantie.

1.4 *Communicatie*

Door het werken op de locatie van ABT wordt er nauw contact onderhouden met de collega's. Binnen ABT worden de programma's Skype en Microsoft Outlook gebruikt voor het onderhouden van contact. De agenda's van de medewerkers zijn voor iedereen inzichtelijk en deze manier maakt het makkelijk voor collega's om elkaar te vinden en- of vergaderingen in te plannen.

Er zijn periodieke overlegmomenten ingepland tussen Michaël en mijzelf. Op deze manier is snel inzichtelijk of alles nog naar wens verloopt en het onderzoek de kant op gaat die verlangd word.

2 Opdrachtbeschrijving

Dit hoofdstuk geeft de aanleiding van het onderzoek weer. Er wordt ingegaan op de probleemstelling en de doelstelling die beoogd wordt te behalen tijdens het onderzoek. In hoofdstuk 3.3 worden de hoofd- en deelvragen besproken die tijdens het onderzoek behandeld zullen worden. De oplevering van de producten die hier uit voortkomen worden besproken in hoofdstuk 4.1

2.1 Probleemstelling

Met de opkomst van VVHSB is er een nieuwe manier van ontwerpen en construeren ontstaan. Dankzij de eigenschappen van dit materiaal kunnen nieuwe, uitdagende constructies gerealiseerd worden die voorheen ontoereikend waren. Deze eigenschappen geven een nieuwe dimensie aan het ontwerpen met beton.

Hoewel er steeds meer bekend is over VVHSB en er verscheidene projecten uitgevoerd worden met beton van dit kaliber, is de potentie van de toepassingen in de hoogbouw nog onbekend terrein. Zodra er gebouwd wordt boven een hoogte van 70 meter wordt er snel gekeken naar staal als draagstructuur. Staal heeft op deze hoogte een aantal voordelen ten opzichte van beton. Naast het lichtgewicht en een eenvoudiger ontwerp is staal makkelijker in de uitvoering vergeleken met conventioneel beton. Het grote voordeel bij het bouwen met staal is dat er een relatief kleine bouwruimte noodzakelijk is. Dit is veelal doorslaggevend voor hoogbouw projecten in Nederland aangezien deze worden toegepast in dicht bebouwde gebieden.

Er zijn inmiddels “wolkenkrabbers” uitgevoerd in beton. Een bekend voorbeeld is de Burj Khalifa in Dubai. Het toepassen van VVHSB is echter nog niet gebruikelijk en in het bijzonder voor de Nederlandse constructiewijze. Het ontwerpen met VVHSB wordt op dit moment nog niet door veel partijen gedaan. Dat komt omdat de kennis en ervaring met het materiaal beperkt is. Binnen ABT is de kennis aanwezig van allerlei wijze van construeren, ook hoe met VVHSB moet worden omgegaan. Deze kennis, in combinatie met de kennis uit literatuur, wordt toegepast in dit onderzoek. Met deze kennis wordt een bestaand hoogbouwproject uitgevoerd in staal herontworpen en wordt er gekeken naar de toepassingsmogelijkheden van VVHSB. Hierna kan worden beoordeeld welke voor- en nadelen aan deze constructiewijze zitten middels een multicriteria analyse.

2.2 Doelstelling

Met het oog op de bouwmaterialen en -methodes van het toekomstig verleden leven we in een samenleving waar innovatie centraal staat. Met de huidige technologieën is er een constante aanvoer van potentiële nieuwe bouwmaterialen. Zo werd tijdens een internationaal symposium in Marseille (2004) vezel versterkt ultra hoge sterktebeton voor het eerst geïntroduceerd aan de wereld¹. Vanaf dat moment stond het materiaal in de spotlights en zijn er diverse onderzoeken naar het materiaal geweest. Vier jaar na zijn introductie zijn de eerste projecten begonnen met als centraal onderwerp VVHSB.

Tijdens dit onderzoek wordt er gekeken naar elementen binnen de (hoog)bouw. Er wordt gekeken of VVHSB een rol kan spelen in het ontwerp. Er zal per element objectief gekeken worden welk materiaal het beste toegepast kan worden.

Er wordt gekeken naar elementen binnen de hoofd-draagstructuur. Het onderzoek omvat: (verdiepings)vloeren, kolommen, wanden en balken.

Per element wordt er vervolgens beoordeeld welk materiaal het beste past bij de gestelde eisen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende drie materialen: Staal, conventioneel beton en VVHSB. Tijdens dit onderzoek wordt er gekeken naar externe omstandigheden zoals; weersbestendigheid, ontwerpduur en financiële aantrekkelijkheid. De interne omstandigheden zoals veiligheidseisen, uitvoeringsmogelijkheden en kracht-opneembaarheid komen ook aan bod.

¹ https://www.rilem.net/gene/main.php?base=500218&id_publication=422

2.3 Hoofd- en deelvragen

Er zijn diverse onderzoeken gedaan naar de eigenschappen en potenties van VVHSB. Tijdens dit onderzoek wordt ingegaan op de potentie in de (hoog)bouw. Er wordt objectief gekeken naar de mogelijkheden van VVHSB als vervanging van stalen of normale betonnen structurele elementen. Er wordt een brede beschouwing gedaan waarbij verder wordt gekeken dan de zuiver constructieve mogelijkheden. Gedurende dit project wordt er rekening gehouden met de uitvoeringseisen en financiële aantrekkelijkheid van construeren met VVHSB en wordt deze vergeleken met gebruikelijke bouwmethodes.

2.3.1 Hoofdvraag

Tijdens het onderzoek is er een vraag ontstaan uit de probleem- en doelstelling. Deze hoofdvraag staat centraal tijdens het onderzoek.

Hoofdvraag (HV):

Kan vezel versterkt hoge sterktebeton leiden tot een verbetering in de (hoog)bouw ten opzichte van bouwen met staal en conventioneel beton?

2.3.2 Deelvragen

De hoofdvraag op zich geeft een breed bereik aan antwoorden en is niet te beantwoorden met een simpel ja of nee. Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag zijn er daarom een aantal deelvragen opgesteld die richting geven aan het onderzoek. Onderstaand zijn alle deelvragen te vinden die behandeld zullen worden tijdens het onderzoek.*

Deelvraag (DL1) Wat is het verschil in uitvoering tussen VVHSB, conventioneel beton en staal?

DL 1.1 Hoe is VVHSB ontstaan?

DL 1.2 Wat is het verschil in uitvoeringstijd?

DL 1.3 Wat is het verschil in kosten?

DL 1.4 Wat is het verschil in uitvoeringsgemak?

DL 1.5 Hoeveel reductie in toegepast materiaal is er mogelijk tussen VVHSB en conventioneel beton?

Deelvraag (DL2) Wat zijn de verschillen in materiaaleigenschappen tussen VVHSB, conventioneel beton en staal?

DL 2.1 Hoe wordt er omgegaan met brandveiligheid?

DL 2.2 Wat zijn de minimale afmetingen voor geluidsbeperving toelaatbaar in de woningbouw?

DL 2.3 Wat zijn de bezwijkmechanismen van de materialen?

DL 2.4 Welk materiaal is het best geschikt voor duurzaam bouwen?

* Korte Toelichting van de codering van de deelvragen:

DL -> Deelvraag literatuuronderzoek; DH -> Deelvraag hoofdonderzoek; DI -> Deelvraag interview.

Deelvraag (DI1) interviewvragen

- DI 1.1 Waarom is er bij de bouw van Montevideo voor een groot deel een staalconstructie gebruikt?
- DI 1.2 Wat zijn de financiële uitgangspunten?
- DI 1.3 Is de bouwlocatie van invloed geweest op de keuze van het materiaal?
- DI 1.4 Is de voorkennis van de constructeur of ontwerper van invloed geweest op de keuze van het materiaal?
- DI 1.5 Heeft de aannemer invloed gehad op de keuze van het materiaal?
- DI 1.6 Heeft de architect invloed gehad op de keuze van het materiaal?
- DI 1.7 Is er gekeken naar andere uitvoeringsmogelijkheden?

Deelvraag (DH1) Welk materiaal heeft de beste toepassingsmogelijkheden bij de volgende elementen?

- Verdiepingsvloeren ten behoeve van de woningbouw.
- Kolommen.
- Wanden.
- Fundering.

2.4 *Projectresultaat*

Het directe doel van het onderzoek is het opstellen van een handleiding voor constructeurs en ontwerpers. In deze handleiding wordt beschreven welke bouwmaterialen het beste passen bij de omschreven elementen. Als aanvulling op deze handleiding zal er een vergelijkingsmatrix worden gemaakt waarmee, onder standaard omstandigheden, snel het juiste materiaal gekozen kan worden voor het ontwerp.

2.5 *Projectscope*

Om het project zo goed mogelijk te laten verlopen is het noodzakelijk om de projectgrenzen inzichtelijk te maken. Omdat het onderzoek bestaat uit een objectief marktonderzoek waarin drie materialen* naast elkaar worden gelegd, zullen de verschillen hiertussen worden onderzocht en gecatalogiseerd in een multicriteria analyse.

2.5.1 *Wat tot de scope toebehoort*

Vergelijkingsonderzoek van de materialen in:

- Uitvoeringstijd & -kosten.
- Aankoop materialen.
- Onderhoudskosten.
- Ontwerplevensduur.
- Brandveiligheid.
- Onderhoud.
- Duurzaamheid.

2.5.2 *Wat niet tot de scope toebehoort*

- Het verschil in productietijd.
- Het verschil in CO2 uitstoot.
- Onderzoek naar de materiaaleigenschappen van VVHSB.
- Onderzoek naar prefab toepassingen.

* Staal, conventioneel beton & VVHSB.

2.6 *Risico's*

Tijdens het afstuderen zijn er een aantal risico's die voor kunnen komen. Door middel van een risicoanalyse worden deze risico's inzichtelijk gemaakt en wordt hier preventief een oplossing voor bedacht.

2.6.1 *Solo afstuderen*

Persoonlijk ben ik perfectionistisch in mijn werkwijze. Als voordeel geeft dit dat de gemaakte producten er over het algemeen goed uit zien. Het nadeel van deze manier van werken is dat het meer tijd kost. Door het missen van een afstudeerpartner kunnen deze kwaliteiten en zwaktes niet uitgebalanceerd worden. Ik zal extra aandacht moeten besteden aan de gestelde planning.

2.6.2 *Kennis*

Ondanks de kennis die inmiddels opgedaan is uit voorgaande stages en de opleiding vereist de scope van het onderzoek specifieke kennis over VVHSB en hoogbouw. Mijn huidige kennis over dit onderwerp is ver van toereikend en deze zal verworven worden tijdens het literatuuronderzoek. Naast het literatuuronderzoek heeft mijn begeleider Michaël een breed scala aan informatie en ervaring met VVHSB, vrij om in te zien.

2.6.3 *Ziekte*

Het risico bestaat dat door toenemende werkdruk of ziekte het aantal benodigde uren niet op tijd behaald wordt en daarom uitstel van de einddatum wordt verlangd. Om dit risico zo veel mogelijk te beperken zal ik voornamelijk aan het begin van het half jaar meer uren wegschrijven dan voorgeschreven.

2.6.4 *Tentamens*

Er zijn een aantal tentamens die nog moeten worden afgesloten voordat het mogelijk is om af te studeren. Deze tentamens dienen behaald te zijn voor de tussentijdse beoordeling. Er is inmiddels contact geweest met de desbetreffende leraren met het verzoek voor een vervroegd tentamenmoment. Het niet behalen van de tentamens behoort tot de grootste risicogroep.

3 Producten

In het volgende hoofdstuk wordt het volledige proces inzichtelijk gemaakt en wordt er gekeken naar de producten die opgeleverd worden voor het plan van aanpak en het hoofdonderzoek.

3.1 Producten deelvragen

In dit hoofdstuk zijn alle vragen met bijbehorende producten uitgeschreven. Op deze manier wordt inzichtelijk welke eindproducten er worden opgeleverd per deelvraag.

Deelvraag (DL1) Wat is het verschil in uitvoering tussen VVHSB, conventioneel beton en staal?

DL 1.1 Hoe is VVHSB ontstaan?

DL 1.2 Wat is het verschil in uitvoeringstijd?

DL 1.3 Wat is het verschil in kosten?

DL 1.4 Wat is het verschil in uitvoeringsgemak?

DL 1.5 Hoeveel reductie in toegepast materiaal is er mogelijk tussen VVHSB en conventioneel beton?

Product(en) : Verslaglegging: Opkomst van VVHSB.
: Verslaglegging: uitvoeringsverschillen, voor en nadelen.
: Verslaglegging: Financiële aantrekkelijkheid.

Bovenstaande producten worden behandeld tijdens het literatuuronderzoek en zal de basis vormen voor de vergelijkingsmatrix en de handleiding.

Deelvraag (DL2) Wat zijn de verschillen in materiaaleigenschappen tussen VVHSB, conventioneel beton en staal?

DL 2.1 Hoe wordt er omgegaan met brandveiligheid?

DL 2.2 Wat zijn de minimale afmetingen voor geluidsbeperking toelaatbaar in de woningbouw?

DL 2.3 Wat zijn de bezwijkmechanismen van de materialen?

DL 2.4 Welk materiaal is het best geschikt voor duurzaam bouwen?

Product(en) : Verslaglegging: materiaaleigenschappen.
: Verslaglegging: Hoe wordt de brandveiligheid gegarandeerd?
: Verslaglegging: Geluidsbestendigheid.
: Calculatie & verslaglegging interne krachtafdracht.

Bovenstaande producten worden behandeld tijdens het literatuuronderzoek en zal de basis vormen voor de vergelijkingsmatrix en de handleiding.

Deelvraag (DI1) interviewvragen

- DI 1.1 Waarom is er bij de bouw van Montevideo voor een groot deel een staalconstructie gebruikt?
- DI 1.2 Wat zijn de financiële uitgangspunten?
- DI 1.3 Is de bouwlocatie van invloed geweest op de keuze van het materiaal?
- DI 1.4 Is de voorkennis van de constructeur of ontwerper van invloed geweest op de keuze van het materiaal?
- DI 1.5 Heeft de aannemer invloed gehad op de keuze van het materiaal?
- DI 1.6 Heeft de architect invloed gehad op de keuze van het materiaal?
- DI 1.7 Is er gekeken naar andere uitvoeringsmogelijkheden?

Product(en) : Verslaglegging interview met de hoofdconstructeur van de Montevideo.

Deelvraag (DH1) Welk materiaal heeft de beste toepassingsmogelijkheden bij de volgende elementen?

- Verdiepingsvloeren ten behoeve van de woningbouw.
- Kolommen.
- Wanden.
- Fundering.

Product(en) : Calculaties per element; Hierin worden de dimensies & krachtopname vastgelegd.

: Verslaglegging calculaties en hypothesen.

: Overkoepelend product met DL1 & DL2; Handleiding voor constructeurs waarin de beste keuze per element wordt toegelicht.

: Overkoepelend product met DL1 & DL2; Vergelijkingsmatrix.

3.2 *Verantwoording*

Het proces dat doorlopen wordt, moet worden verantwoord. Door middel van het bijhouden van logboeken en verslaglegging van gehouden overleggen word het verrichte werk inzichtelijk gemaakt. De volgende documenten zullen worden bijgehouden en toegevoegd in de bijlagen van het hoofdonderzoek:

- Documentatie van overlegmomenten met de bedrijfsbegeleider of derden.
- Reflecties, eindreflectie en POP-reflectie.
- Logboek met urenregistratie.
- Lijst met reeds behaalde/te behalen competenties

3.3 *Plan van aanpak*

Na goedkeuring van het afstudeervoorstel dient er een plan van aanpak op te worden gesteld. Het plan van aanpak is de rode draad voor de afstudeerstage. Het plan van aanpak bevat de volgende onderdelen:

- Afstudeerbedrijf of instelling en contactpersoon indien van toepassing.
- Afstudeergroep
- Afstudeerbegeleiders van BE met de opdrachtformulering.
- Uitwerkingsvoorstel
- Concept tijdsplanning
- Onderwerp(en) van de literatuurstudie
- Overzicht behaalde/te behalen competenties met beroepsproducten volgens bijlage 4A van de afstudeerhandleiding. Er dient een eerste opzet gemaakt te worden van het reflectie/pleidooi (POP) waarin per competentie omschreven wordt hoe en met welke producten en bronnen niveau 3 wordt aangetoond.
- Recente cijferlijst uit Alluris per student.

3.4 Hoofdverslag

Conform afstudeerprotocol bestaat het hoofdverslag uit de volgende onderdelen:

- Plan van aanpak
- Hoofdverslag (maximaal ca. 12.500 woorden, komt overeen met ca. 30 blz.
 - o Probleemstelling
 - o Probleemanalyse met doelstelling/centrale vraag/onderzoeksvraag
 - o Programma van eisen en randvoorwaarden (gestelde grenzen)
 - o Afweging diverse alternatieven/varianten
 - o Gekozen oplossing met motivatie
 - o Conclusies en aanbevelingen
 - o Een vertaling van het resumé (Eng, Du, Fr, Sp)
- Bijlagen bij het verslag
 - o Agenda's en notulen van besprekingen docenten en derden
 - o Urenverantwoording en tijdsplanning
 - o Groepsreflectie op afstudeertraject
 - o Individuele reflectie op eigen inbreng
 - o Projectsamenvatting (één A4-tje) t.b.v. ABC-jaarboek en mailen naar stage.bct@han.nl
- Proces map
- Competentielijst met beroepsproducten om niveau 3 aan te tonen, deze lijst tevens aanleveren bij het onderwijsbureau (conform bijlage 4 van de afstudeerhandleiding).
- Literatuurstudie
- Ephorusverklaring
- Eindpresentatie met mondelinge toelichting en assessment.
- Digitale editie van het volledige afstudeerwerk in tweevoud (max. 20Mb).

Daarnaast moet het verslag voldoen aan de volgende algemene beoordelingscriteria:

- Beschikbare informatie is geanalyseerd en beoordeeld op bruikbaarheid.
- Producten zijn logisch van opbouw.
- Analyses zijn logisch, daarbij lettend op: juistheid, netheid, compleetheid, werkbaarheid, omschrijving.
- De juiste vakjargon is toegepast.
- Juiste toepassingen van de gekozen methodes.

3.5 *Eindpresentatie*

Als afsluiting van het onderzoek dient er gepresenteerd worden met ondervraging aan de HAN-begeleiders. Tijdens deze presentatie wordt er gekeken of de juiste competentieniveaus zijn behaald zoals vastgelegd in het plan van aanpak. Tijdens de presentatie worden de bevindingen van het onderzoek besproken en een reflectie over het resultaat en het doorlopen proces.

De presentatie wordt als volgt opgebouwd.

De presentatietijd van een individuele afstudeerder is 45 minuten.

- 1/3^e van de tijd is beschikbaar voor de presentatie
- 1/3^e van de tijd stelt de gelegenheid beschikbaar voor examinatoren om vragen te stellen, gevolgd door een discussie.
- De resterende tijd is bedoeld voor overleg om tot een vaststelling te komen van het cijfer voor het afstudeerproject door de examinatoren.

Ter voorbereiding van de afstudeerzitting zal een generale repetitie worden gegeven op de bedrijfslocatie van de ABT.

4 Projectfasering

Het plan van aanpak is een beschrijving van het proces. Dit betekent dat alle projectgrenzen worden bepaald en dat er een planning wordt opgesteld. In dit hoofdstuk wordt beschreven welke onderzoeksmethoden er gebruikt zullen worden tijdens het hoofdonderzoek.

4.1 Type onderzoek

Tijdens het hoofdonderzoek wordt er gebruik gemaakt van hoofdzakelijk twee onderzoeksmethoden. Deze onderzoeksmethoden vormen de basis van het onderzoek. Er zal begonnen worden met een literatuuronderzoek en na afronding zal overgegaan worden op een deskresearch. Onderstaand worden beide hoofdstukken nog kort toegelicht.

4.2 Literatuuronderzoek

Gezien het onderwerp specifieke kennis vereist wordt er begonnen met een literatuuronderzoek. Tijdens dit onderzoek zal de kennis over dit onderwerp vergaard worden. De deelvragen spelen hierbij een grote rol. Omdat het onderwerp VVHSB reeds uitvoerig beschreven is wordt door middel van de deelvragen gezocht naar onderwerpen specifiek voor dit onderzoek.

4.3 Deskresearch

Nadat het literatuuronderzoek afgerond is wordt er begonnen met het deskresearch. Tijdens dit onderzoek worden de verzamelde gegevens van het literatuuronderzoek gecatalogiseerd en verwerkt. De gegevens zullen worden uitgediept en worden geplaatst in het hoofdverslag.

4.4 Projectplanning

Om het project in goede banen te laten lopen is er een planning opgesteld waarin houvast wordt geboden. Met behulp van een planning wordt duidelijk of het project nog op schema ligt en of er enkele punten zijn waar wat extra tijd voor genomen kan worden. Onderstaand wordt ingegaan op een aantal belangrijke data en enkele mijlpalen die behaald moeten worden. De mijlpalen worden toegelicht per week en de uiterlijke datum is dan ook de laatste werkdag van de aangegeven week. Uitgesloten zijn de vakanties gegeven op de HAN gezien er op dat moment nog wel gewerkt kan worden op de bedrijfslocatie. Ter info zijn de vakantiedata onder de planning toegevoegd.

Datum	Toelichting
Week 36 4 Sept '17	Start van de afstudeerstage, tevens start van het PVA (concept): <i>Dient gereed te zijn voorafgaande aan het afstudeersemester. Het eerste concept is gereed bij het eerste contact met beide begeleiders van BE.</i>
Week 36 Uiterlijk vrijdag 8 Sept '17	Inleveren gespecificeerd afstudeervoorstel bij het onderwijsbureau: <i>Op A-4 formaat: zie bijlage 1 van de afstudeerhandleiding, digitaal inleveren: leden AFO-groep / samenvatting onderwerp van afstuderen / beoogde bedrijfsbegeleiders (indien aanwezig) / voorkeur voor begeleidende HAN-docent(en) aangeven / cijferlijsten uit Alluris digitaal aanleveren.</i>
Week 37	Plan van aanpak (concept): <i>Dient gereed te zijn in het blok voorafgaande aan het afstudeersemester. Het eerste concept is gereed bij het eerste</i>

	<i>contact met beide begeleiders van BE.</i>
Uiterlijk week 40	Specifiek en definitief plan van aanpak is afgerond en wordt ter goedkeuring voorgelegd bij ABT & de HAN: <i>Probleemdefinitie + vraagstelling bekend / subvragen bekend / te bestuderen kennisbronnen bekend / planning realistisch / nagedacht over literatuurstudie / definitief PVA goedkeuren door begeleiders van BE / beroepsproducten zijn ingevuld in de competentielijsten conform bijlage 4.</i>
Week 52 t/m 1	Tussen de kerst en Nieuwjaar is ABT gesloten.
Uiterlijk week 5	Tentamens: <i>Uiterlijk in week 5 dienen de achterstallige tentamens met een voldoende te zijn afgesloten, voor de tussenpeiling.</i>
Week 6	Tussenpeiling uitvoeren: <i>Formulier indienen bij onderwijsbureau conform bijlage 3 van de afstudeerhandleiding / cijferlijsten uit Alluris digitaal aanleveren. Bij deze peiling wordt een verwachting uitgesproken over de haalbaarheid van de eerstvolgende afstudeerzitting door beide begeleiders van BE.</i>
Uiterlijk week 10	Inleveren afstudeerproject met bijlagen: <i>Hoofdverslag / bijlagen (deelonderzoeken) / procesverslag / literatuurstudie / bijlage 4A / in 3-voud op papier en digitaal op stick/CD/DVD / Ephorusverklaring</i>
Week 11 & 12	Beoordeling AFO door HAN-begeleiders en door extern gecommiteerde: <i>Van schriftelijke werk / hierbij wordt beoordelingsformulier afstuderen (bijlage 4A en 4B) gebruikt en ingevuld (competentielijst / beoordelingsformulier)</i>
Week 14	Afstudeerzitting (openbaar toegankelijk) en beoordeling: <i>Van mondelingen toelichting en beantwoording van vragen volgend uit het schriftelijke werk met de beoordeling door de assessoren HAN en de gecommiteerde.</i>
Uitreiking diploma en afstudeerfeest	Diploma-uitreiking voor faculteit Techniek, afdeling BE: <i>Bouwkunde en Civiele Techniek op dezelfde datum, zie jaarrooster / via studentenzaken wordt iedereen tijdig geïnformeerd en uitgenodigd / per afstudeerder maximaal 3 personen mee te nemen. Het afstudeerfeest wordt georganiseerd door studievereniging TRIFONIUS en aangeboden door de HAN.</i>
Afronding Studie	Uitschrijven van de opleiding: <i>Pas regelen na de reactie van studentzaken (eerst dient alles rond te zijn voor je getuigschrift).</i>

Vakantierooster van de HAN-begeleiders

Week	Toelichting
42	Herfstvakantie
52 t/m 1	Kerstvakantie
7	Voorjaarsvakantie
18	Meivakantie

5 **Kwaliteitsbeheersing**

Om de kwaliteit van het onderzoek te garanderen zijn er een aantal standaarden vastgelegd. Deze standaarden zijn in het leven geroepen zodat meerdere partijen gebruik kunnen maken van de documenten zonder dat deze aangetast worden.

5.1 *Documentbeheer*

Er zijn een aantal afspraken gemaakt met betrekking tot het beheren van de documenten. Hoewel het onderzoek eigendom is van ABT blijft het beheer van het onderzoek bij Dhr. Rick Schönthaler. Er zijn echter lees rechten verleend aan de medewerkers van ABT en aan de medewerkers van de faculteit Built Environment van de onderwijsinstelling Hogeschool Arnhem en Nijmegen. Er worden diverse versies aangemaakt na een significante verandering in het document en de oude versie wordt behouden.

5.2 *Opslag*

Alle documenten die worden gemaakt zullen lokaal opgeslagen worden op de werklaptop van ABT en worden gesynchroniseerd met google drive. Zodra een conceptversie is afgerond zal deze worden opgeslagen op een projectschijf binnen de Cloud van ABT.

Er wordt gebruik gemaakt van de standaard mappenstructuur van ABT zodat de informatie ordelijk en overzichtelijk blijft.

5.3 *Format*

De verslaglegging van het onderzoek wordt gemaakt in Microsoft Word. Eventuele tabellen en calculaties zullen worden gemaakt in Microsoft Excel. Er wordt een gedetailleerde planning gemaakt van het onderzoek in Microsoft Project. Zodra een versie afgerond is en als definitief kan worden aangemerkt word hier een PDF van gemaakt.

5.4 *Kwaliteitsbewaking ABT*

Om de doelstellingen van de opdrachtgever te behalen wordt er één maal in de twee weken een overleg ingepland met Ing. Michaël Menting om alle partijen op de hoogte te houden. Tijdens dit overleg wordt er gekeken naar de voortgang van het onderzoek en is er ruimte voor eventuele bijsturing. De documenten zullen gemaakt worden in de huisstijl van ABT.

5.5 *Kwaliteitsbewaking HAN*

Vanuit de onderwijsinstelling zijn er een aantal voorwaarden gesteld waar aan moet voldoen. Het onderzoek zal opgezet worden zoals beschreven in de handleiding: "Afstuderen handleiding en bijlagen course 15-16" en zal worden getoetst aan de hand van het statuut: "opleidingsstatuut Civiele Techniek Voltijd 2017-2018" waarin het afstudeerproject beschreven staat op P138-140. Daarnaast zal er periodiek een overleg plaatsvinden met twee HAN-begeleiders waar er wordt gekeken over de voortgang en er ruimte is voor eventuele bijsturing.

6 Persoonlijk ontwikkelingsplan

De opleiding Civiele Techniek aan de HAN kent in totaal 9 competenties welke zijn onderverdeeld in 6 technische en 3 generieke HBO-competenties. Voor het behalen van een bachelor-graad moeten minimaal 5 van de 9 competenties op niveau drie worden afgesloten, waarvan ten minste twee van de generieke HBO-competenties.

6.1 *Reeds behaalde competenties*

Tijdens het schoolproject van course 9 & 10, in combinatie met mijn halfjaar stage in Zuid-Afrika zijn de volgende competenties ten goede afgesloten op niveau 2 (gevorderd):

Technische competenties

- 1 Initiëren en sturen
- 2 Ontwerpen
- 3 Specificeren
- 4 Realiseren
- 5 Beheren
- 6 Monitoren, toetsen en evalueren

Generieke HBO-competenties

- 7 Onderzoeken
- 8 Communiceren en samenwerken
- 9 Managen en innoveren

Tijdens mijn onderzoek is het de bedoeling om bovenstaande competenties af te sluiten op niveau 3 (bachelor). In '**Bijlage C – Competentielijst**' zal dieper worden ingegaan op de definitie van de competenties en hoe er is besloten om deze af te sluiten op niveau 3.

6.2 *Doel*

Ik heb inmiddels een breed scala aan ervaring opgedaan op verschillende werkgebieden. Ik heb stage gelopen in de werkvoorbereiding/uitvoering. Ik heb gekeken of de politieacademie iets voor mij was door middel van een minor politiekunde te doen. Uiteindelijk ben ik er uit dat ik graag wil werken bij een werkvoorbereider, dat ligt mij toch het beste. Ik ben echter nog niet klaar met studeren. Na mijn afstuderen heb ik een half jaar ter voorbereiding op mijn start met de master Structural Engineering in Delft. Ik zou graag een graad hoger willen halen, iets meer verdieping in de stof. Met als hoofdrichting Structural Engineering wil ik graag een specialisatiegraad halen in Concrete Structures. Om deze reden ben ik op zoek gegaan naar een bedrijf dat mij wilde steunen in het onderwerp VVHSB. Dit onderwerp sluit perfect aan bij mijn vervolgstudie en mijn verdere doelen.

Begrippenlijst

Alluris	: Het studentinformatiesysteem binnen de HAN.
Competentie	: Een geïntegreerd geheel van kennis en inzicht, vaardigheden en attitudes.
Ephorus	: Een programma voor plagiaatcontrole.
Faculteit	: Organisatorische eenheid van de HAN waarin instituten met verwante opleidingen zijn samengebracht.
HAN	: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
Hoogbouw	: <i>“Een te bouwen bouwwerk waarin een vloer van een gebruiksgebied hoger dan 70 m boven of lager dan 8 m onder het meetniveau ligt”</i> volgens bouwbesluit 2012 Artikel 2.14
Ing.	: Ingenieur, bachelor graad
Ir.	: Ingenieur, master graad
Major	: De hoofdrichting van de bachelor opleiding waarin de student zijn beroepscompetenties ontwikkelt.
Minor	: Deel van de postpropedeutische fase van de bachelor opleiding dat gericht is op verbreding of verdieping van de studie.
Onderwijsinstelling	: De Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN).
Opdrachtgever	: ABT Velp
Opdrachtnemer	: Rick Schönthaler
Prefab	: Prefabriceert beton
PVA	: Plan van aanpak
VVHSB	: Vezel versterkt hoge sterktebeton
Werkdag	: Dag niet zijnde zaterdag, zondag, officiële feest- of vakantiedag

Referenties

- HBO-kennisbank
- Intern project bij ABT, Montevideo – Rotterdam
- Opleidingsstatuut aangeleverd door de HAN: “Opleidingsstatuur Civiele Techniek Voltijd 2017-2018”
- Afstudeerhandleiding aangeleverd door de HAN: “Afstuderen handleiding en bijlagen course 15-16”
- Bouwbesluit 2012
- <http://www.aboutcivil.org/burj-khalifa-design-construction-structural-details.html>
- https://www.rilem.net/gene/main.php?base=500218&id_publication=422