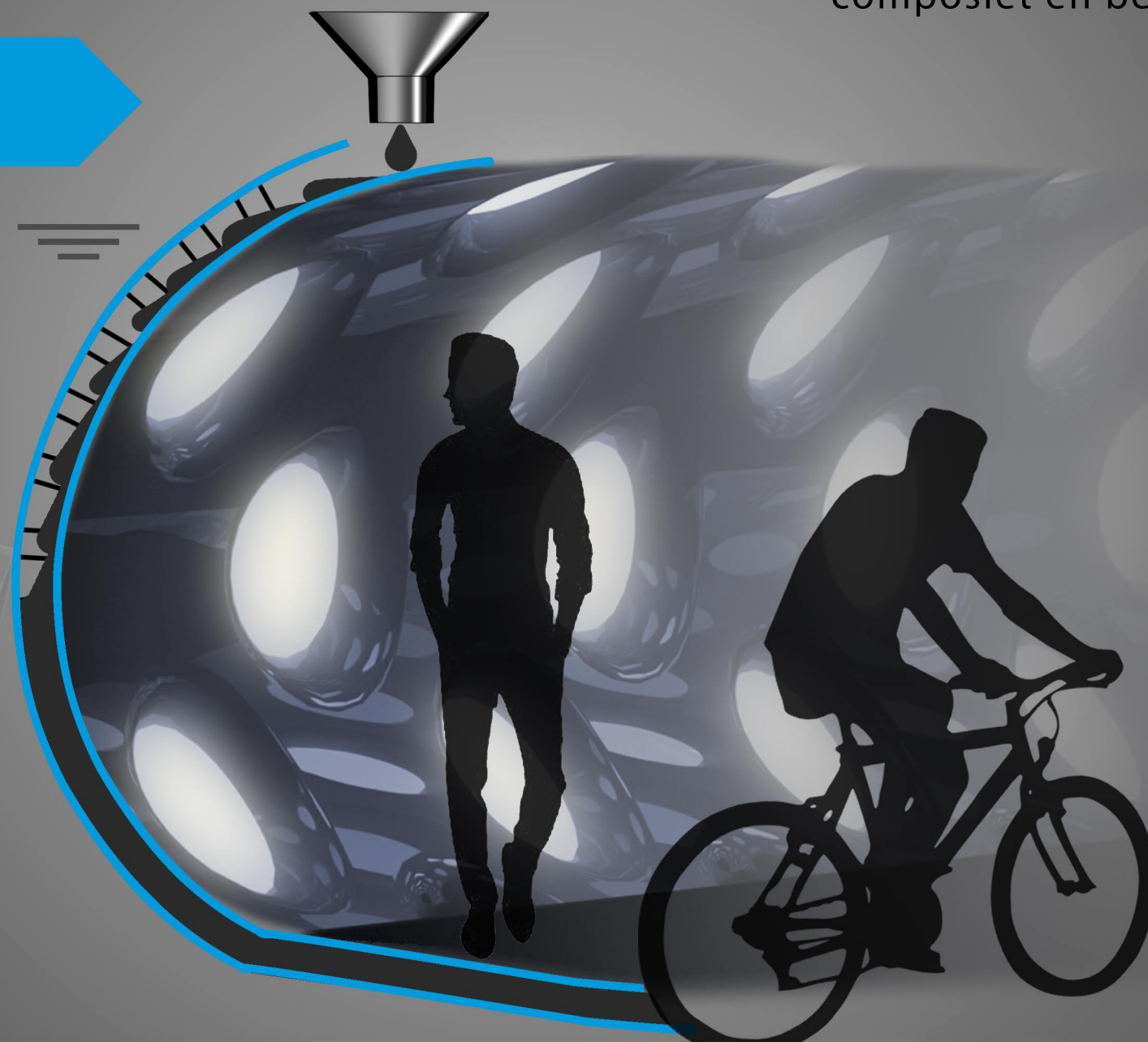


COMPOSIET ALS WAPENENDE BEKISTING

Onderzoek naar constructieve samenwerking van
composiet en beton

Lectoraat Kunststoftechnologie



Februari 2016

LKT-COMH-105559-1604

COLOFON

Titel: Composiet als wapenende bekisting,
Onderzoek naar constructieve samenwerking composiet en beton

Publicatienummer: LKT-COMH-105559-1604

Datum: Februari 2016

Auteurs: Ir. Peter Bosman, Klaas Kooiker, Dirk Winkels

Subsidieverstrekker: Green PAC

Met medewerking van:

Hogeschool Stenden (penvoerder), Emmen
Christelijke Hogeschool Windesheim, Zwolle
Witteveen+Bos, Deventer

Met medewerking van:

Aliancys quality resins
Parabeam

Fotografie: Windesheim Zwolle

Dit is een uitgave van Christelijke Hogeschool Windesheim.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Composiet als wapenende bekisting

Onderzoek naar constructieve samenwerking composiet en beton.

Versie

4.0

Status

Definitief

Auteurs

Peter Bosman	p.bosman@windesheim.nl	
Klaas Kooiker	klaas.kooiker@windesheim.nl	S1022152
Dirk Winkels	dirk.winkels@windesheim.nl	S1036848

In opdracht van

Hogeschool Windesheim Zwolle, Lectoraat Kunststoftechnologie

Begeleiding

Peter Bosman	p.bosman@windesheim.nl
Pieter Schreuder	p.schreuder@windesheim.nl
Wouter Claassen	wouter.claassen@witteveenbos.com

Met dank aan

Aliancys Quality Resins	Ron Verleg
Parabeam	Jaap Jan Kleef

Samenvatting

Veel civiele kunstwerken worden ontworpen voor een levensduur van 100 jaar. De meeste kunstwerken worden gemaakt van gewapend beton: in het werk gestort en of van prefab elementen. De levensduur van betonnen constructies wordt in grote mate bepaald door corrosie van het wapeningsstaal. Huidige maatregelen om te voldoen aan de levensduureisen zijn grootte van de dekking op het wapeningsstaal, grootte van scheurwijdte, cementtype, cementgehalte en water-cementfactor.

Met een materiaal dat niet corrodeert en de trekkrachten op kan nemen, is het eenvoudiger om aan de levensduureisen van de Eurocode te voldoen. Vezel versterkt kunststof heeft beide eigenschappen.

Van beton en wapeningsstaal is bekend hoe deze samenwerken in draagconstructies. Dit onderzoek kijkt naar de constructieve samenwerking tussen beton en een vezel versterkt kunststof wapeningsschil. Deze schil moet dan tevens de bekisting vormen.

Het onderzoek is gestart met een literatuurstudie om te kijken wat al bekend is over de samenwerking tussen beton en vezel versterkt kunststof. Toepassingen van beide materialen wordt voornamelijk gevonden in de vorm van vezel versterkte kunststofwapening gelijmd aan trekzijde ter versteviging van gereede betonnen bruggen. In dit onderzoek is echter gekeken naar gereede vezel versterkt kunststof waar beton tegen aan gestort wordt.

Na de literatuurstudie zijn er proeven gedaan. Ten eerste aanhechtingsproeven tussen gereed vezel versterkt kunststof en aangestort beton. De resultaten waren positief waarna een 3-punts-buigproef is verricht. Bij deze proef is VVK I-profiel getest waarbij de ruimte tussen de flenzen is volgestort met beton. Ter referentie is een VVK I-profiel zonder beton vulling getest. Een en ander om de stijfheid van de hybride ligger en de samenwerking tussen de materialen hierbij op een grotere schaal na te gaan. Uit de buigproeven blijkt dat er constructieve samenwerking is tussen beton en vezel versterkt kunststof, dit is te zien aan het scheurpatroon in het beton, een zelfde patroon als te zien is bij traditioneel staalgewapend beton.

Met deze resultaten is een vertaalslag naar de praktijk gemaakt. Als case is een betonnen onderdoorgang beschouwd die dusdanig dik is, dat deze niet opdrijft. Daarbij is de krachtsverdeling van de betonnen doorsnede bepaald: optredende momenten, dwarskrachten, normaalkrachten en verplaatsingen.

Ter referentie is eerst de nul-variant met traditionele, stalen wapening gedimensioneerd. Vervolgens is alternatieve prefab vezel versterkte kunststof schil gedimensioneerd. Beiden zijn doorgerekend ten aanzien van sterkte, scheurwijdte, doorbuiging, waterdichtheid en transportgewicht. Het alternatief tevens ten aanzien van de schuifspanning tussen beide materialen en het opnemen stortbelasting. In aanvulling op dit onderzoek wordt in eerste instantie aanbevolen onderzoek te doen naar de uitvoeringstechnieken en kosten die nodig zijn om een constructie te maken van een prefab vezel versterkte schil met daarin in beton.

Summary

Many civil structures are designed according to the Eurocode, for a service life of 100 years. The civil structures are usually made of reinforced in-situ poured concrete, or prefabricated concrete elements. The lifetime of these concrete structures is mostly determined by corrosion of the steel-bar reinforcement. Current measures to comply with the lifetime requirements are increasing the coverage on the reinforcing steel, limiting the crack width, increasing the cement content in the concrete and lower water-cement factors.

With a material that cannot corrode and which can take the tensile forces, it is easier to meet the lifetime requirements of the Eurocode. Fibre reinforced plastics meet both of these requirements. It is known that concrete and reinforcement steel can cooperate to withstand the pressure and tensile forces. The reason of this research is to look at the constructive cooperation between concrete and fiber reinforced plastic, with the idea to completely replace the reinforcement steel by a prefabricated fibre-reinforced plastic reinforcement shell, applied in the form of an underpass.

The study started with a literature study, to see what is already known about the cooperation between concrete and a fibre-reinforced plastic. An application of both materials was found in the form of strengthening steel reinforced concrete structures with externally bonded carbon fibre reinforced plastic. A good starting point and reference for this research, where a prefab fibre-reinforced plastic shell will be reinforced with concrete.

After the literature study, tests are done. First, to be able to say something about the attachment in the interface between concrete and fiber reinforced plastic. This is done in the form of double shear tests. The results were positive so we decided to do more tests in the form of three-point-bending tests. At this test two I-beams were tested, one consisting of only fibre-reinforced plastic and one consisting of fibre-reinforced plastic, spread-in with sand grains of 2-4 mm, where the space between the flanges is poured with concrete. This in order to determine the influence on the stiffness of the beams and to examine the cooperation between the materials on a larger scale. The bending tests showed that there is constructive cooperation between concrete and fiber reinforced plastic, this was shown by the cracking pattern in the concrete, a pattern that is also occurs in traditional steel reinforced concrete.

With these results there is made a translation to practice. As case a railway underpass is considered with such a thickness that it won't float up in ground water. A calculation of a concrete cross-section has been done towards moments, shear forces, normal forces and displacements. Herewith at first the traditional solution with steel reinforcement is designed. Subsequently, the alternative with prefabricated fibre-reinforced polymer shell, instead of the steel reinforcement filled with concrete is designed. Both are calculated for strength, crack width, deflection, water tightness and transport weight. The alternative also for interface shear between the two materials and for withstanding concrete pouring load.

It is recommended to do further research to the execution and the costs of prefabricated fiber reinforced polymer shell, filled with concrete.

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport van ons onderzoek naar de constructieve samenwerking tussen prefab vezel versterkt kunststof schil en beton kern, in opdracht van het Lectoraat Kunststoftechnologie van de Hogeschool Windesheim en ingenieursbureau Witteveen+Bos.

Tijdens enkele bijeenkomsten ter voorbereiding op het afstuderen kwamen wij in contact met dhr. Bosman, docent op Windesheim en onderzoeker bij het Lectoraat Kunststoftechnologie. Na wat gesprekken bleek dat hij nog enkele onderzoeken op het gebied van kunststoffen had liggen als onderdeel van een breder onderzoek naar kunststoffen binnen de Civiele Techniek.

Bij dit onderzoek naar de constructieve samenwerking tussen beton en prefab vezel versterkt kunststof wapeningsschil, hebben wij gezocht naar de invloeden van verschillende oppervlakteruwheden van kunststof. Verder hebben we de invloeden op de stijfheid van deze hybride materiaalcombinatie onderzocht.

Klaas heeft VWO afgerond met uitstroomprofiel Natuur en Techniek. Dirk heeft HAVO afgerond met uitstroomprofiel Natuur en Techniek. Tijdens de studie Civiele Techniek heeft Klaas de minor Constructief Ontwerpen gevolgd en Dirk de minor Verkeerstechniek. Allebei hebben wij ervaring opgedaan in de uitvoering van civiele projecten tijdens een half jaar stage. Klaas heeft dat gedaan bij de GMB en Dirk bij de KWS. Daarnaast heeft Klaas een half jaar stage gelopen in de werkvoorbereiding van verschillende projecten bij Van Spijker Bouw in Meppel. Dirk heeft een half jaar stage gelopen bij de Gemeente Dronten als civiel technisch medewerker op de afdeling Ruimtelijke Realisatie en Beheer.

Dit onderzoek was niet mogelijk geweest zonder de medewerking van materiaal- en materieel sponsors. Allereerst willen we Aliancys quality Resins te Zwolle bedanken voor het ter beschikking stellen van de gebruikte hars en vezels.

Daarnaast willen we Parabeam 3D, in de persoon van Jaap Jan Kleef, bedanken voor het beschikbaar stellen van het Parabeam 3D glasvezel.

Verder willen we junior onderzoeker Pieter Schreuder van het lectoraat Kunststoftechnologie bedanken voor het regelen van materieel en materiaal voor het handlamineren van de proefstukken, het helpen daarmee en het meedenken in het ontwerpen en uitvoeren van de proeven.

Ook willen we Witteveen+Bos, in de persoon van Wouter Claassen bedanken voor de tijd en ideeën voor dit onderzoek, ook Esli Bosman, constructeur bij Witteveen+Bos, bedanken wij bij dezen voor het helpen opstellen van ons SCIA model.

Staphorst, 6 juli 2015

Klaas Kooiker
Dirk Winkels

Ik wil beide studenten bedanken voor het doen van hun afstudeeronderzoek bij het Lectoraat Kunststoftechnologie. Dit rapport is de aangepaste en aangevulde versie van hun afstudeerwerk.

Zwolle, 12 februari 2016

Peter Bosman

Inhoudsopgave

Composiet bekisting / wapening	1
Samenvatting.....	3
Summary	5
Voorwoord	7
1. Leeswijzer	13
2. Inleiding	15
3. Probleemstelling.....	17
4. Doelstelling.....	19
5. Vraagstelling	21
5.1 Hoofdvraag	21
5.2 Deelvragen.....	21
6. Methode van aanpak.....	23
6.1 Literatuuronderzoek.....	23
6.2 Experimenteel onderzoek	23
7. Resultaten literatuurstudie	25
7.1 Vezel versterkte kunststoffen	25
7.1.1 Polymeer matrix composieten	26
7.1.2 Harsen.....	27
7.1.3 Thermoplasten	27
7.1.4 Thermoharders.....	28
7.1.5 Vergelijking van de harsen	30
7.1.6 Vezels.....	31
7.1.7 Vezelsoorten.....	31
7.1.8 Sizing.....	32
7.1.9 Vergelijking van de vezels.....	32
7.1.10 Productiemethoden van een vezel versterkt kunststof composiet	33
7.2 Beton	35
7.2.1 Cement	35
7.2.2 Water.....	36
7.2.3 Toeslagmaterialen	37
7.2.4 Hulpstoffen	38
7.2.5 Classificatie van beton.....	38
7.3 Toepassingen van het beton met een prefab vezel versterkte kunststof schil.....	40
7.3.1 Corrosiebestendigheid	40
7.3.2 Elektrische-isolatie (Engels: isolation)	40

7.3.3	Warmte-isolatie (Engels: insulation)	41
7.3.4	Verspaanbaarheid	41
7.3.5	Textuur	41
7.3.6	Weinig onderhoud.....	42
7.3.7	Gewicht.....	43
7.3.8	Licht-doorlatend.....	43
7.3.9	Multifunctioneel	44
7.3.10	Vorm-, materieel en procesvrijheid	44
7.3.11	Gas- en vloeistofdichtheid.....	49
7.3.12	Mechanische eigenschappen op maat.....	49
7.3.13	Milieu-impact	50
7.4	Geselecteerde vezel versterkt kunststof.....	52
7.5	Geselecteerde beton	53
7.5.1	Beton toegepast bij de afschuif- en balkproeven	54
7.6	Beïnvloeding van de schuifsterkte in de interface tussen beton en VVK.....	56
7.6.1	Mechanische adhesie theorie	56
7.6.2	Adsorptie theorie	57
7.6.3	Fysisorptie theorie.....	58
7.6.4	Chemisorptie theorie.....	58
7.6.5	Diffusie theorie.....	58
7.6.6	Elektrostatistische theorie	59
7.6.7	Optimale hechttingsomstandigheden	59
7.6.8	Optredende adhesievormen	60
7.6.9	Geselecteerde oppervlakten	60
8.	Experimenteel onderzoek – opzet en resultaten	63
8.1	Ontwerp dubbele afschuifproef	63
8.2	Resultaten afschuifproeven.....	68
8.3	Ontwerp buigproef.....	74
8.4	Resultaten buigproeven	76
9.	Case	85
9.1	Uiterste grens toestand (UGT)	88
9.1.1	Traditionele stalen wapening	89
9.1.2	Vezel versterkt kunststof huidwapening	91
9.2	Bruikbaarheids grenstoestand (BGT)	95
9.2.1	Traditionele stalen wapening	96
9.2.2	Vezel versterkte kunststof huidwapening	98

9.3	Samenvatting rekken UGT & rekken, E-moduli en scheurwijdtes BGT	99
10.	Conclusies.....	100
11.	Aanbevelingen.....	103
12.	Bronnen	105
	Bijlage A Mindmap	107
	Bijlage B Vezel eigenschappen	109
	Bijlage C Productblad Atlac 430 vinylesterhars.....	111
	Bijlage D Productblad glasvezels	113
	Bijlage E Productblad Parabeam 3D	115
	Bijlage F Productblad CEM I Portland.....	117
	Bijlage G Productblad Sika BV 1 M Plastificeerder	119
	Bijlage H Het maken van de afschuifproefstukken	123
	Bijlage I Het maken van de I-ligger proefstukken.....	131
	Bijlage J Artikel 6.2.5 NEN-EN 1992-1-1	135
	Bijlage K T-toets 5% grenswaarde	139
	Bijlage L Belastingen case.....	141

1. Leeswijzer

De opbouw van het rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 wordt een inleiding gegeven op het onderwerp. In hoofdstuk 3 wordt de probleemstelling toegelicht met daarop volgend in hoofdstuk 4 de doelstelling van dit onderzoek. In hoofdstuk 5 is de vraagstelling geformuleerd waaruit duidelijk wordt welke verschillende onderwerpen zijn onderzocht om tot een antwoord te komen op de hoofdvraag. Vervolgens wordt in hoofdstuk 6 de keuze van de onderzoeksmethoden toegelicht. In hoofdstuk 7 worden de resultaten van de literatuurstudie behandeld. In hoofdstuk 8 zijn de beschrijving en de resultaten van de proeven opgenomen. Hoofdstuk 9 omvat een case, hier wordt aan de hand van de resultaten een praktische toepassing ontworpen, te weten een onderdoorgang. Tot slot zijn in hoofdstukken 10 en 11 de conclusies en de aanbevelingen weergegeven.

2. Inleiding

Veel civiele kunstwerken worden conform de Eurocode ontworpen voor een levensduur van 100 jaar. Kunstwerken worden vaak gemaakt van gewapend beton: in het werk gestort of prefab elementen. Hierbij neem beton de drukkrachten op en wapeningsstaal de trekkrachten. De levensduur van gewapend betonnen constructies wordt in grote mate bepaald door corrosie van het wapeningsstaal. Deze corrosie ontstaat hoofdzakelijk door twee mechanismen: carbonatatie en chloride indringing. Carbonatatie is het indringen van koolstofdioxide in het beton, waardoor de pH-waarde in het beton daalt en de bescherming tegen corrosie van het wapeningsstaal verdwijnt. De chloride indringing is de indringing van zouten uit zeewater of pekkel in het beton, die in het wapeningsstaal putcorrosie veroorzaken.

Om te voldoen aan de levensduureisen zijn huidige maatregelen veelal: grote dekking op het wapeningsstaal, het beperken van scheurwijdte door fijn(mazig)e wapening, dicht maken van betonhuid bijv. door groter cementgehalte, lage water-cementfactor en gunstig cementtype en nabehandelen van betonoppervlakte. Minder gebruikelijk zijn het wapeningsstaal coaten of verzinken. Verder kan een kathodische bescherming aangebracht worden op het wapeningsstaal. Allemaal maatregelen die het corrosieproces van het wapeningsstaal vertragen.

Technische duurzaamheid

Met een materiaal dat niet corrodeert en de trekkrachten op kan nemen, is het eenvoudiger om aan de levensduureisen te voldoen. Vezel versterkte kunststoffen hebben beide eigenschappen. Vezel versterkte kunststof staven worden in bijzondere situaties (zoals koudebruggen) al toegepast als wapening in betonnen draagconstructies.

Uitvoering

De lichte vezel versterkte kunststof schil wordt gemaakt in een fabriek, waarna op de bouwplek het (zware) beton erin gestort wordt. Waarbij de kunststof schil als bekisting gebruikt wordt. Er hoeft geen wapening gevlochten te worden.

Sandwich

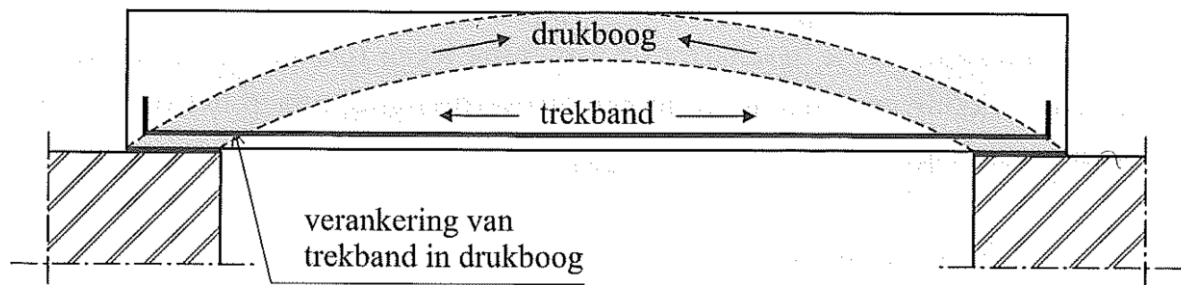
In de civiele techniek wordt vezel versterkt kunststof tot nu toe toegepast in brugdekken en sluisdeuren. Deze worden opgebouwd uit een sandwich constructie van vezel versterkt kunststof met een vulling van schuim respectievelijk licht beton. Wapening aan de buitenkant is zeer efficiënt. Deze vulling wordt constructief verwaarloosd. In het geval van schuim wordt het gebruikt als 'afstandhouder' tussen de sandwich-huiden en in het geval van licht beton ook als 'massa' tegen opdrijven van de sluisdeur.

Samenwerken

Over de eigenschappen van beton en vezel versterkte kunststof afzonderlijk is al veel bekend. Over de samenwerking van de twee materialen, in de beoogde productie volgorde is nog weinig bekend.

3. Probleemstelling

Bij het belasten van een gewapende betonnen ligger op buiging ontstaat een krachterspel in de ligger, waarbij in de bovenzijde van de ligger een druk normaalkracht ontstaat en in de onderzijde een trek normaalkracht. Beton kan alleen drukkrachten opnemen, daarom wordt er voor het opnemen van de trekkrachten stalen wapening toegepast aan de trekzijde van de ligger. De trekkrachten worden door schuifkrachten over gedragen op de wapeningsstaven (Braam & Lagendijk, 2011).

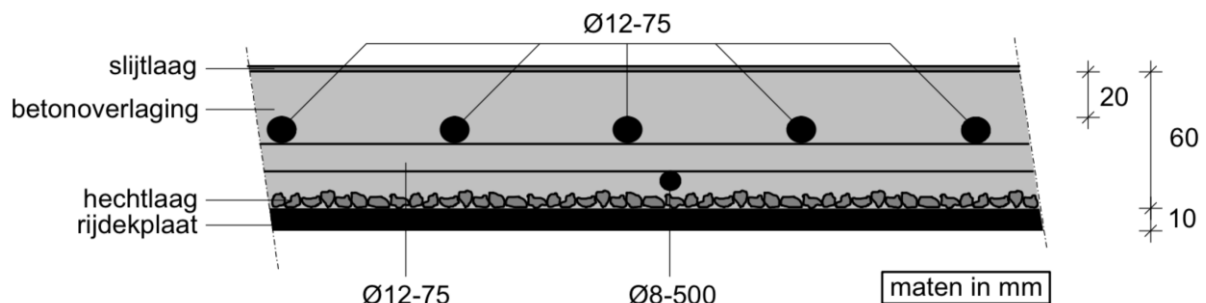


Afbeelding 3.1: Globale krachtswerking gewapend beton

Als er in plaats van stalen wapeningsstaven een vezel versterkte kunststof schil wordt toegepast om de trekkrachten op te nemen, zullen de schuifkrachten door de interface tussen het beton en de vezel versterkte kunststof schil overgedragen moeten worden.

Over het overdragen van schuifspanning in de interface van beton dat tegen prefab vezel versterkt kunststof gestort wordt, is weinig bekend. Er is al wel veel bekend over uitwendige lijmwapening van koolstofvezel, waarbij bestaande betonnen constructies versterkt worden door er koolstofvezel strippen door tussenkomst van epoxylijm (CUR-Aanbeveling 091).

Er zijn meerdere voorbeelden waarbij beton gestort wordt tegen andere vlakken. Bij het storten van beton tegen damwanden worden vaak stalen deuvels aan de damwand gelast, die de schuifspanning overdragen op het staal. Op kunststof kunnen echter geen deuvels gelast worden. Bij het renoveren van stalen bruggen, die gerenoveerd worden in verband met vermoeiing van het staal, wordt hogesterkte beton gestort op het stalen dek. Hierbij wordt het stalen dek eerst voorzien van een hechtlaag, bestaande uit een epoxylaag die ingestrooid wordt met bauxietkorrels (Dilsiz, 2013).

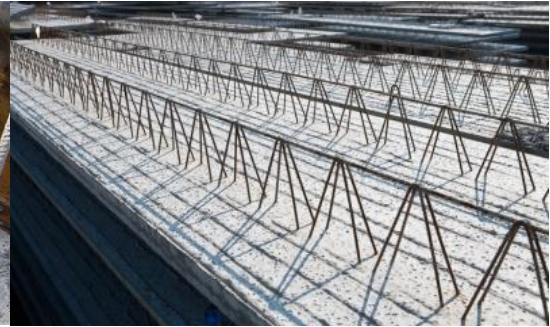


Afbeelding 3.2: Opbouw overlaging met hogesterkte beton op stalen brugdek

Ook bij het storten van beton tegen reeds verhard beton is er sprake van schuifkrachten tussen het 'oude' en 'nieuwe' beton. Voorbeelden hiervan zijn stortnaden bij in het werk gestorte betonnen constructies en het storten van druklagen op prefab elementen. Bij in het werk gestort beton wordt de stortnaad bij reeds verhard ouder beton opgeruwd door middel van boucharderen, bij jong beton wordt de cementshuid van het beton verwijderd door middel van water onder hoge druk. De stekken in het beton hebben een deukelwerking bij het opnemen van schuifkrachten. Bij breedplaatvloeren worden tralieliggers ingestort, die een deukelwerking hebben om de schuifkrachten tussen druklaag en breedplaatvloer over te brengen (Pekso).



Afbeelding 3.3: Stortnaad waarbij cementshuid is verwijderd



Afbeelding 3.4: Tralieliggers op breedplaatvloer

Dit onderzoek is gericht op de constructieve samenwerking van beton dat gestort wordt tegen een prefab vezel versterkte kunststof schil. Hierbij wordt onderzocht welke invloed verschillende oppervlaktebewerkingen van de vezel versterkte kunststof schil hebben op de overdracht van schuifspanning tussen beton en kunststof schil. Voorts wordt onderzocht hoe de materialen samenwerken bij (door)buiging.

4. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is inzicht te krijgen in de constructieve samenwerking van beton gestort tegen een geprefabriceerde vezel versterkte kunststof schil. Hierbij moet het vezel versterkte kunststof de functie overnemen van de traditionele stalen wapening die in beton wordt toegepast.

Om deze samenwerking mogelijk te maken moet de schuifspanning in het beton overgebracht worden op het vezel versterkte kunststof. Dit wordt onderzocht door het toepassen van verschillende oppervlaktebehandelingen op de geprefabriceerde vezel versterkte kunststof schil.

Na een brainstormsessie met Peter Bosman, docent onderzoeker Windesheim en een brainstormsessie met Wouter Claassen, constructeur Witteveen+Bos, is er een mindmap opgesteld. Hier zijn verschillende onderwerpen met betrekking tot de samenwerking tussen beton en vezel versterkt kunststof opgenomen. De mindmap is in bijlage A opgenomen.

5. Vraagstelling

Om het onderzoek te structureren is gebruik gemaakt van een hoofdvraag die is opgedeeld in deelvragen. De antwoorden op de deelvragen helpen bij het beantwoorden van de hoofdvraag.

5.1 Hoofdvraag

In hoeverre is het technisch haalbaar om conventionele wapening in beton te vervangen door een prefab vezel versterkte kunststof (VVK) schil?

Wil deze vervanging nut hebben dan is samenwerking tussen betonnen kern en prefab VVK schil vereist. Deze samenwerking uit zich lokaal in aanhechting op schuif en globaal bijvoorbeeld in de regelmaat van een scheurenpatroon in het beton.

5.2 Deelvragen

1. Wat is VVK (samenstelling, samenwerking, eigenschappen, vrijheden)?
2. Wat is beton (samenstelling, samenwerking, eigenschappen, vrijheden)?
3. Wat zijn mogelijke toepassingen van betonnen kern met een prefab VVK schil?
4. Welke VVK is het meest geschikt als prefab constructieve schil om beton?
5. Welk beton is het meest geschikt als in situ kern met een VVK schil?
6. Hoe kan de schuifsterkte tussen beton en prefab VVK worden beïnvloed?
7. In hoeverre kan de schuifspanning tussen beton en prefab VVK worden overgebracht?
8. Duiden doorbuiging en scheurenpatroon in beton op samenwerking tussen betonnen kern en prefab VVK schil?

6. Methode van aanpak

In dit hoofdstuk is beschreven welke stappen zijn genomen om antwoord te geven op de deelvragen en daarmee indirect op de hoofdvraag. In paragraaf 6.1 wordt beschreven welke deelvragen door middel van de literatuuronderzoek beantwoordt zijn. In paragraaf 6.2 is beschreven welke deelvragen door middel van proeven moesten worden beantwoord.

6.1 Literatuuronderzoek

Zo mogelijk zijn de deelvragen beantwoord met behulp van literatuur. Als basis voor deze literatuurstudie is uitgegaan van de 'CUR aanbeveling 096' (Vezel versterkte kunststoffen in Civiele draagconstructies) (CUR96), het dictaat Composieten Basiskennis (Nijssen, 2013), het dictaat 'Guide to Composites' (Gurit), NEN-EN 1992-1-1+C2:2011 (Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies) en 'CUR aanbeveling 091' (Versterken van gewapend betonconstructies met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening) (CUR-aanbeveling-91). De eersten om basiskennis te verzamelen over composiet (harsen, vezels en de samenwerking daartussen) en beton. De laatsten voor ontwerpregels voor de aanhechting tussen gereed beton en aangestort beton resp. aangelijmd VVK.

Van de in §5.2 genoemde deelvragen, zijn de deelvragen 1, 2, 3, 4, 5 en 6 van dit onderzoek beantwoord door middel van de literatuur.

Bij deelvraag 3 is tevens gebruik gemaakt van de onderzoeksmethode interview, omdat op naar aanleiding van bestaande eigenschappen nieuwe toepassingen zijn onderzocht.

6.2 Experimenteel onderzoek

Van de in §5.2 genoemde deelvragen, zijn deelvragen 7 en 8 van dit onderzoek beantwoord met experimenteel onderzoek en analyse van de resultaten hiervan. Dit omdat in de literatuur hierover onvoldoende te vinden is. Het betreft verkennend onderzoek naar de samenwerking van beton in één veelgebruikte sterkteklasse met prefab VVK.

7. Resultaten literatuurstudie

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de literatuurstudie weergegeven. De deelvragen 1 tot en met 6 van dit onderzoek worden beantwoord.

7.1 Vezel versterkte kunststoffen

Door de toenemende vraag naar duurzame en onderhoudsarme constructies wordt VVK steeds vaker ingezet als constructiemateriaal. Dit materiaal wordt steeds vaker als alternatief voor staal, hout, aluminium en beton toegepast.

In de bouwkundige en civiele sector, waar duurzaamheid en onderhoudsvriendelijk steeds meer bepalende factoren worden, moet de plaats van VVK constructies zich nog aftekenen. VVK behoort tot de composietmaterialen.

Een composiet is een materiaalconstructie, bestaande uit minimaal twee macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen. In dit geval bestaat het composiet uit vezels en kunsthars, ook wel vezel versterkt kunststof genoemd.

Door de samenstelling is VVK heterogeen en anisotroop; de eigenschappen zijn anders van plaats tot plaats in het materiaal en zijn bovendien verschillend in alle richtingen. Kort gezegd worden de goede eigenschappen van de vezels (stijfheid, sterkte, etc.) gecombineerd met de goede eigenschappen van de hars (bescherming tegen vocht, chemische bestendigheid, etc.). Bovendien kan een VVK drukkrachten overbrengen wat een vezel alleen niet kan.

De groep VVK is groot, niet alleen door de diversiteit aan vezels en harsen, maar ook door de vorm waarin vezels in de hars liggen. Dit varieert van zeer korte vezels die in willekeurige richting in de hars verspreid zijn, tot continu vezels die volledig gestrekt liggen.

Composieten worden veelal ingedeeld in de volgende categorieën:

- Metaal matrix composieten (MMC);
- Keramische matrix composieten (KMC);
- Polymeer matrix composieten (PMC).

Metaal matrix composieten

Metaal matrix composieten (MMC) worden steeds vaker toegepast in de auto-industrie. Een metaal, bijvoorbeeld aluminium, wordt gebruikt als matrix, die vervolgens versterkt wordt met vezels of deeltjes siliciumcarbide.

Keramische matrix composieten

Keramische matrix composieten (KMC) worden gebruikt bij toepassingen waar een hoge temperatuurbestendigheid vereist is. Traditionele keramiek waaronder fijn, grof en vuurvaste keramiek vallen worden met name voorzien van korte vezels, dit is veelal om economische redenen. De meest onderzochte en toegepaste technisch keramische matrices zijn SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, BN, ZrO₂ en AlN.

Polymeer matrix composieten

Polymeer matrix composieten (PMC) zijn de meest voorkomende composieten. Deze PMC's zijn beter bekend als FRP (fibre-reinforced polymer/fibre-reinforced plastic) of VVK (vezel versterkt kunststof). Deze composieten hebben een op polymeer gebaseerde hars als matrix met daarbij een grote diversiteit aan mogelijkheden voor vezels zoals, glas-, koolstof- en aramidevezels.

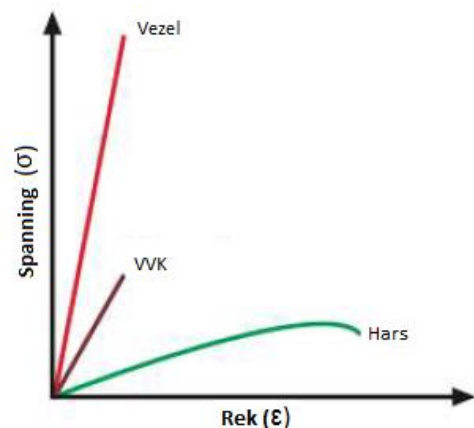
Dit onderzoek richt zich op vezel versterkte kunststoffen, daarom worden de MMC's en KMC's verder buiten beschouwing gelaten (Guide to Composites).

7.1.1 Polymeer matrix composieten

Polymeer harssystemen die gebruikt worden, zoals polyesters, vinylesters en epoxy's hebben zonder versterking van vezels geen uitzonderlijke constructieve eigenschappen zoals staal, hoge treksterkte, wel heeft. De meeste metalen overtreffen deze harsen ruimschoots op het gebied van sterkte- en stijfheidseigenschappen. Harsen hebben wel het voordeel dat ze taai kunnen zijn, eenvoudig gebruikt kunnen worden in ingewikkelde vormen en uitgevoerd kunnen worden in onderhoudsvrije, niet corrosieve vorm.

Materialen zoals glas, aramide en koolstof hebben zeer hoge trek- en druksterktes, maar in 'normale' vorm hebben ze weinig nut in een constructie, omdat bij een te hoge spanning, willekeurig gevormde barsten ontstaan die het gehele materiaal doen bezwijken. Om dit probleem te verhelpen wordt het materiaal in de vorm van vezels geproduceerd. Dit geeft nog steeds willekeurig gevormde barsten, maar slechts lokaal. Het grootste gedeelte van de vezels blijft zijn functie dan echter behouden. Door de vezels te bundelen kan het materiaal tot zijn maximum belast worden. Vezels kunnen hoofdzakelijk spanningen opnemen in de lengterichting, net als de vezels in een touw.

Wanneer hars wordt versterkt met vezels, zoals glas, koolstof of aramide, worden de gunstige eigenschappen van elk materiaal gecombineerd. De taaie hars zorgt voor spreiding van lokale krachten die op het composiet komen te staan tussen de verschillende vezels en beschermt de vezels tegen beschadigingen door afbrokkeling of impact van buitenaf. Hoge sterkte en stijfheid, eenvoudig maken van complexe vormen, goed bestand tegen invloeden van buitenaf en lage dichtheden zijn enkele aspecten die het resulterende composiet beter maakt ten opzichte van veel metalen.



Figuur 7.1 Spanning-rek diagram VVK

Composieten zijn samengesteld uit hars en vezels, hierdoor worden de eigenschappen van het composiet deels bepaald door de hars en deels door de vezel, in figuur 7.1 is dit weergegeven middels een zogenaamd spanning-rekdiagram (Grisnich & Schreuder, 2014).

Kort samengevat worden de eigenschappen van een composiet bepaald door de volgende vijf aspecten:

- De eigenschappen van de hars;
- De eigenschappen van de vezels;
- De verhouding tussen de hars en vezels;
- De plaatsing en oriëntatie van de vezels in het composiet;
- De hechting tussen de hars en vezels.

7.1.2 Harsen

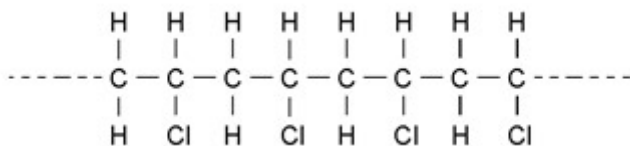
De harsen die worden toegepast in vezel versterkte composieten worden vaak aangeduid als 'polymeren'. Alle polymeren hebben een belangrijke overeenkomst, namelijk dat ze zijn opgebouwd uit lange ketens bestaand uit veel eenvoudig herhaalde eenheden. De hars in een composiet heeft een aantal belangrijke taken:

- Zorgt voor de binding tussen de vezels;
- Brengt de krachten over tussen de vezels;
- Beschermt vezels tegen mechanische belasting;
- Beschermt vezels tegen chemische belasting.

Polymeren zijn onder te verdelen in twee groepen, namelijk, thermoplasten en thermoharders. Het verschil tussen deze twee groepen is het effect van warmte op de materiaaleigenschappen. Elke groep wordt hier onder kort toegelicht.

7.1.3 Thermoplasten

Thermoplasten zijn polymeren die bij verhitting smelten, bewerkbaar worden, en die bij afkoeling weer een vaste vorm aannemen. Dit proces kan vaak herhaald worden als gewenst is zonder noemenswaardige invloed te hebben op de materiaaleigenschappen. Moleculair gezien bestaan thermoplasten uit lange ketens, die in elkaar verstrengeld zitten. Typische thermoplasten zijn polyvinylchloride (PVC), nylon, polypropyleen en polycarbonaat. Thermoplasten kunnen door hun hoge viscositeit lastig worden verstevigd met vezels, dit lukt over het algemeen alleen met hoge temperatuur en hoge druk. Thermoplasten zijn mede daarom voor grote toepassingen in de civiele sector niet geschikt. In geval van (bewuste) brand zou het tot ernstige schade aan bijvoorbeeld bruggen en tunnels kunnen leiden en dan met name op de plaatsen waar het composiet op druk wordt belast. Thermoplasten hebben -in tegenstelling tot thermoharders- als voordeel dat ze door te smelten eenvoudig gerecycled kunnen worden.



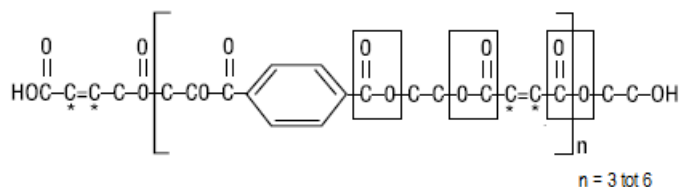
Figuur 7.2: Een gedeelte van een keten polyvinylchloride (PVC)

7.1.4 Thermoharders

Thermoharders smelten bij verhitting niet, maar verbranden uiteindelijk. Thermoharders worden gevormd door een chemische reactie waarbij het hars en de harder of katalysator worden gemengd en een onomkeerbare reactie ondergaan. Eenmaal uitgehard, worden thermoharders niet meer vloeibaar bij verhitting. Boven een bepaalde temperatuur, de glastransitietemperatuur (T_g), worden de mechanische eigenschappen significant anders. Boven de glastransitietemperatuur verandert de kristallijne structuur van de hars in een meer flexibele amorse structuur, het wordt rubberachtig. Boven de glastransitietemperatuur nemen de stijfheid, druksterkte en afschuifsterkte af. Wanneer de temperatuur weer onder de glastransitietemperatuur gebracht dan krijgt het weer de kristallijne structuur met de daarbij behorende eigenschappen. Dit proces, van glastoestand naar rubbertoestand, is wel een omkeerbaar proces. Er bestaan veel verschillende thermohardende harsen die veel worden toegepast in composieten. Deze zijn grofweg in te delen in drie hoofdgroepen, namelijk:

- Polyesters;
- Vinylesters;
- Epoxy's.

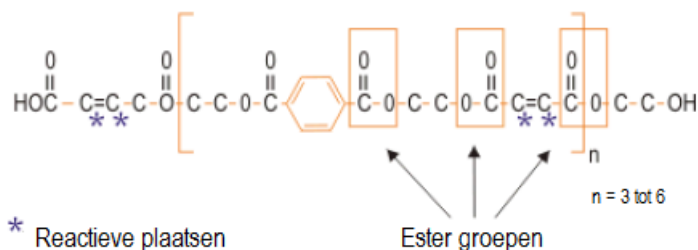
Van de bovengenoemde hoofdgroepen worden hieronder de eigenschappen behandeld.



Figuur 7.3: Een gedeelte van een netwerk polyester

Polyester

Unsaturated Polyester (UP) is vaak een vloeibaar mengsel van onverzadigde polyester en styreen. Deze twee componenten kunnen onder invloed van een verharder, een peroxide of katalysator, met elkaar reageren tot een harde kunststof. Polyesters worden gevormd door een polycondensatiereactie van di-carbonzuur en een di-alcohol, of door een polycondensatiereactie van een groot aantal moleculen met zowel een carbonzuur als een alcoholgroep. (Poly)condensatie is de chemische reactie van monomeren tot polymeer, onder afsplitsing van een klein molecuul, vaak is dit kleine molecuul water. Polyesters worden veelal toegepast in de jachtbouw en auto-industrie.

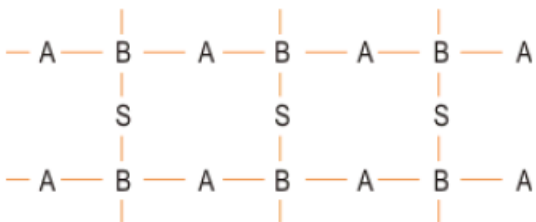


Figuur 7.4: Structuurformule van een isoftaal polyester

In de structuurformule is te zien dat een polyester veel estergroepen bevat, dit maakt een polyester minder water- en chemisch resistent dan een vinylester. De meeste polyesterharsen bestaan uit een oplossing van polyester in een monomeer. Het meest gebruikte monomeer is styreen. Met de toevoeging van styreen en in de aanwezigheid van een katalysator (een peroxide) verknopen de polymeerketens bij de reactieve plaatsen tot een zeer complex driedimensionaal netwerk. In de onderstaande afbeeldingen zijn een ongehard en een uitgehard polyester weergegeven. De 'B' staat voor de reactieve plaatsen van het polyester, en de 'S' staat voor het styreen.



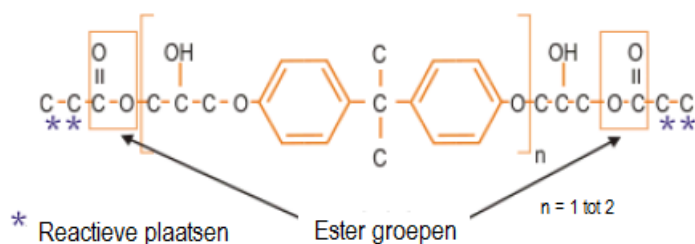
Figuur 7.5: Schematische voorstelling van een ongeharde polyester



Figuur 7.6: Schematische voorstelling van een uitgeharde polyester

Vinylester

Vinylester (VE) is wat betreft de moleculaire opbouw gelijk aan polyester, met dat verschil dat bij een vinylester de reactieve C-C binding aan het uiteinde van de keten zit. Een vinylester bevat minder estergroepen, hierdoor is een vinylester meer water- en chemisch resistent dan een polyester. Door de hoge chemische resistentie worden vinylesters toegepast bij toepassingen in de chemische industrie. Om deze eigenschappen te verbeteren is een hogere temperatuur bij de naharding gunstig.

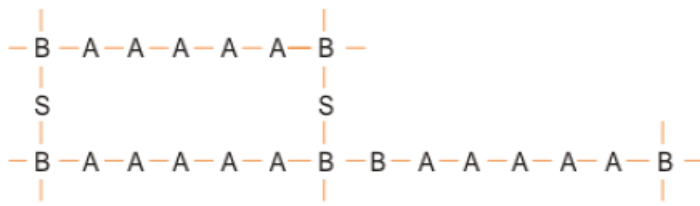


Figuur 7.7: Structuurformule van een typische op epoxy gebaseerde vinylester

In de onderstaande afbeeldingen zijn een ongehard vinylester en een uitgehard vinylester weergegeven. De 'B' staat voor de reactieve plaatsen van het vinylester en de 'S' staat voor het styreen.



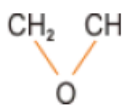
Figuur 7.8: Schematische voorstelling van een ongeharde vinylester



Figuur 7.9: Schematische voorstelling van een uitgeharde vinylester

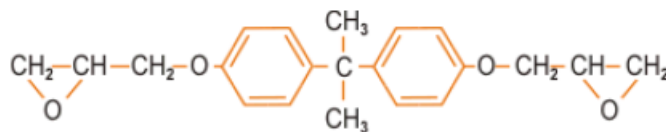
Epoxy

Epoxyhars (EP) wordt gevormd als een lange molecuulketen, vergelijkbaar met een vinylester met de twee reactieve groepen aan het einde van de molecuulketen. De naam epoxy refereert aan een chemische groep bestaand uit een O-atoom gebonden aan twee C-atomen die onderling al gebonden zijn. Onderstaande afbeelding 7.10 toont een geïdealiseerde weergave van een epoxy.



Figuur 7.10: Structuurformule van een eenvoudige epoxy

In een epoxy zitten aan het einde van de molecuulketen geen estergroepen maar epoxygroepen. Door de afwezigheid van de estergroepen is een epoxy beter water- en chemisch resistent dan een vinylester. Belangrijk voordeel van een epoxy is de lage uithardingskrimp.



Figuur 7.11: Structuurformule van een epoxy

Epoxy's verschillen van poly- en vinylesters door de manier van uitharden. Poly- en vinylesters harden uit met behulp van een katalysator. Epoxy's harden uit met behulp van een harder, meestal een amine. Het is belangrijk dat de harder en de epoxy in de juiste verhouding gemengd worden. Bij een onjuiste verhouding zullen de ongeharde hars of de harder achterblijven in het composiet wat de uiteindelijke eigenschappen nadelig zal beïnvloeden (Guide to Composites).

7.1.5 Vergelijking van de harsen

Bij vergelijking van de drie meest gebruikte harsen in algemene zin vallen de volgende zaken op:

- Polyesters zijn goedkoper om te maken dan vinylesters en vinylesters zijn weer goedkoper dan epoxy's;
- Epoxy kent een lagere uithardingskrimp dan polyesters en vinylesters;
- Polyesters (behalve iso-polyester) zijn gevoeliger voor schade door osmose water dat in het kunststof wordt opgenomen en blaasjes veroorzaakt;
- Polyesters en vinylesters hebben een katalysator (en accelerator) nodig om uit te harden, voor epoxy's moeten er twee componenten gemengd worden;
- Voor alle systemen geldt dat een exotherme reactie plaatsvindt.

In tabel 7.1 is een overzichtelijke weergave te zien van de verschillende eigenschappen van de harsen die hierboven behandeld zijn.

Hars	E-modulus (MPa)	Treksterkte (MPa)	Druksterkte (MPa)	Trekrek bij breuk (%)	Uithardings-krimp (%)	Kosten €/Kg
Polyester (UP)	3600	50-80	140-150	2-4	6-8	1,50-2,50
Vinylester (VE)	3400	70-95	-	3-8	5-7	2,50-5,50
Epoxy (EP)	3500	60-90	90-130	3-6	<2	4,00-21,00

Tabel 7.1: Overzicht van de hars eigenschappen (Guide to Composites)

7.1.6 Vezels

Vezels in een composiet zijn bepalend voor de sterkte en stijfheid. De vezels die op constructief gebied worden gebruikt zijn meestal synthetisch van aard en niet direct in de natuur te vinden. Natuurlijke vezels zijn gevoelig voor vocht opname en rotting en kennen een vrij kleine lengte.

Al geruime tijd worden glas-, aramide- en koolstofvezels gebruikt ter versterking van hars. Sinds kort zijn er ook basaltvezels die als versterking worden gebruikt. Van deze genoemde vezels is glasvezel het goedkoopst. Composieten van glasvezels worden daarom het meest gebruikt voor constructieve doeleinden, terwijl de aramide- en koolstofvezel bijvoorbeeld gebruikt worden in kogelwerende vesten respectievelijk wielrenfietsen. De 'CUR 096' richt zich momenteel alleen nog maar op Glasvezel Versterkte Kunststoffen (GVK). In de nieuwe CUR aanbeveling 96 zijn verschillende toevoegingen gedaan, onder andere de toevoeging van koolstofvezel versterkte kunststoffen. Wanneer deze nieuwe CUR uitkomt, is nog niet precies bekend.

7.1.7 Vezelsoorten

Hieronder is een overzicht gegeven van de meest reguliere vezelsoorten, voorzien van een korte toelichting. Dit om een beeld te geven van de mogelijkheden die er zijn op het gebied van vezels. De verdere bijbehorende materiaaleigenschappen zijn opgenomen in bijlage B.

Glasvezel

Zoals eerder vermeld wordt glasvezel hoofdzakelijk gebruikt voor constructieve doeleinden. Hierbij kan gedacht worden aan constructieprofielen, brugdekplanken en roosters maar ook aan scheepsrompen, carrosseriepanelen en ander complexe vormen die toch een bepaalde (hoge) sterkte of (laag) gewicht moeten hebben. Grote voordelen van glasvezel zijn de lage prijs, de grote verkrijgbaarheid en de makkelijke verwerkbaarheid. Nadelen zijn dat het een matig sterke vezel is en matig bestand tegen chemicaliën. Glasvezels zijn verkrijgbaar in veel verschillende types, bijvoorbeeld: E-glas, C-glas, S-glas en AR-glas (Alkali resistent glas) vezels.

Koolstofvezel

Koolstofvezel wordt veel gebruikt in de auto-industrie en voor veel verschillende sporttoepassingen. Hierbij kan worden gedacht aan autosport, zeilsport, atletiek en bobsleeën (Olympische bob van het Nederlandse team is gemaakt door DSM). De trek- en druksterkte en met name ook stijfheid, gecombineerd met het lage gewicht, zijn de grootste voordelen van koolstofvezel. Het grootste nadeel is de relatief hoge prijs, verder kent koolstof weinig demping. Koolstofvezels zijn verkrijgbaar in veel verschillende types, bijvoorbeeld: SM (Standard Modulus), HT (High Tenacity) & HM (High Modulus). Het type HM is redelijk bros ten opzichte van de andere types, de brosheid van een materiaal betekend dat het materiaal zonder veel te rekken, breekt.

Aramidevezels

Aramidevezels zijn lichte, hoogwaardige synthetische vezels met moleculen die door relatief rigide polymeerketens worden gekenmerkt. Aramidevezels zijn er in twee hoofdgroepen: para- en meta-aramiden. Het verschil tussen para- en meta-aramiden is dat para-aramiden een rechte keten vormen, terwijl meta-aramiden geknikte ketens vormen.

De meest voorkomende zijn de para-aramiden: **Twaron**, ontwikkeld door Teijn Aramid in de jaren '70, en **Kevlar**, ontwikkeld door DuPont in 1972, hebben treksterktes die vele malen hoger zijn dan die van staal en een hoge taaheid. Nadeel is dat deze vezels duurder zijn dan glas, veel vocht opnemen, dat ze moeilijk verwerkbaar zijn en dat ze in een composiet beperkt druk op kunnen nemen. Het wordt gebruikt voor verschillende toepassingen zoals, kogelvrije vesten, beschermende kleding, banden, optische vezelkabels en asbestvervanging. Het is eveneens in types als HM verkrijgbaar.

Basaltvezel

Basaltvezel kan gebruikt worden voor veel verschillende toepassingen. Bijvoorbeeld in wapeningsstaven voor beton en in constructieprofielen. Ook is het verkrijgbaar in de vorm van matten. Basaltvezels worden met name gebruikt voor hitte- en geluidsisolatie en voor vuurbestendigheid. Daarnaast worden basaltvezels toegepast in geotextiel, beton, tape, de auto-industrie, wind- en offshore-industrie en voor toepassingen in hoog-corrosieve of alkalische milieus (Grisnich & Schreuder, 2014).

7.1.8 Sizing

Bij het vervaardigen van vezelmateriaal wordt uiteindelijk een dunne film om de vezel aangebracht, met daarin chemicaliën die er onder andere voor zorgen dat de vezel goed aan de hars hecht. Het is de interface tussen vezel en hars. De toegepaste sizing moet compatible zijn voor de gebruikte hars: glasvezel met een sizing voor epoxy hecht goed aan epoxy hars, maar niet aan een vinyl-esterhars. (Nijssen, 2013)

7.1.9 Vergelijking van de vezels

Bij het vergelijken van de meest toegepaste vezels: glas, basalt, aramide en koolstof, in een composiet, zonder specifiek rekening te houden met de verschillende soorten, kan gezegd worden dat glasvezel de goedkoopste is van deze, vervolgens komt de basaltvezel, daarna de aramidevezel en de koolstofvezel is de meest dure van deze drie. De verhouding hiertussen is ongeveer 1:2:5:12 (€/kg).

Vezel	Treksterkte MPa	E-Modulus LR GPa	Dichtheid Kg/m ³	Trek-rek %
Glas	2200	73	2600	3,5
E-glas	2400	69	2500	1,8-3,2
Basalt	2600	85	2650	3,1
Aramide HM	3100	120	1450	
Technora	3400	78		4,6
Koolstof HS	3500	215	1800	
Koolstof HT	4800	235	1700	1,5

Tabel 7.2: Overzicht van verschillende vezels en hun eigenschappen

Wat opvalt in de tabel 7.2 is de verhouding tussen de treksterkte en dichtheid van het materiaal. Gewoon glas is relatief zwaar en heeft relatief lage treksterkte in vergelijking met de koolstof HT vezel. Koolstof is dus is een lichter materiaal met een hogere treksterkte. Aramide valt daar tussen, de Technora vezel bijvoorbeeld, is buigzamer dan de koolstof HT door een veel lagere stijfheid en grotere rekcapaciteit. Dit zegt iets over de keuze binnen een vezel zelf, voor veel toepassingen is er wel een vezel met de benodigde constructieve eigenschappen te selecteren. In bijlage B is een uitgebreid overzicht van de verschillende vezels en hun eigenschappen opgenomen (Nijssen, 2013).

7.1.10 Productiemethoden van een vezel versterkt kunststof composiet

Nu de eigenschappen en de verschillende soorten van de harsen en vezels zijn besproken, wordt in de hieronder volgende paragrafen het een en ander uitgelegd over de productiemethoden van een vezel versterkt kunststof composiet.

De technieken die worden toegepast zijn in te delen in twee categorieën namelijk de open-mal techniek en de gesloten-mal techniek. Dit onderscheid is enigszins willekeurig, het is namelijk goed mogelijk om producten te maken met een combinatie van technieken. Vaak wordt per product, en de hoeveelheid hiervan, een techniek of combinatie van technieken gekozen.

Open-mal technieken

Vezelspuiten

Bij vezelspuiten wordt, met een speciaal spuitpistool, een mengsel van korte vezels en hars op een mal gespoten. De vezelrichting is min of meer willekeurig en de dikte wordt gereguleerd door de duur waarmee een locatie bespoten wordt. Meestal worden hiermee grote objecten gemaakt, of bijvoorbeeld bouwkundige of civiele werken van een coating voorzien.

Handlamineren

Bij handlamineren worden de lamellen een voor een in een mal gelegd en benat met een roller of kwast. Dit is een arbeidsintensief proces, waarbij maatregelen moeten worden genomen tegen het verschuiven van de lamellen. Na het benatten van 2 lamellen moeten deze eerst ontlucht worden, dit kan met een speciale ontluichtingsroller. Het is ook een goedkoop proces, omdat er met eenvoudige gereedschappen gewerkt kan worden en weinig verbruiksmaterialen, zoals vacuümfolie nodig zijn. Handlamineren is ook de methode die tijdens dit onderzoek is toegepast.

Wikkelen

Bij deze techniek worden continue vezels (rovings) om een matrijs (mandrel of kern) gewikkeld. De matrijs wordt in een machine om de langsas geroteerd. Continue vezels worden van rollen getrokken en met hars geïmpregneerd. Vervolgens worden ze naar de roterende matrijs geleid en eromheen gewikkeld. Door de wikkelhoek te wijzigen, zijn de sterkte en stijfheid gericht te sturen. Wanneer de hars voldoende is uitgehard, wordt de matrijs verwijderd. Soms wordt gebruik gemaakt van kernen die kunnen worden uitgespoeld of opgelost, of van 'liners'. Liners zijn dunwandige kernen van staal of kunststof. Deze blijven in het product achter. Enkele producten die gemaakt worden met deze techniek zijn; buizen, drukvaten en hengels. Met deze techniek is de ligging van de vezels (en daarmee de sterkte) goed te sturen. Het is mogelijk om grote, holle producten uit één stuk te maken.

Fibre placement

Bij fibre placement, ofwel vezelplaatsing, wordt vaak met een pre-preg of thermoplastische tape of vezelbundel gewerkt. Deze wordt door een computergestuurde robot in de mal gelegd. Aan het proces komen geen mensenhanden te pas. Een voordeel van deze methode, is dat vezels in het vlak niet recht hoeven te liggen, wat moeilijk te realiseren is met andere methoden. Zonder automatisering is deze methode ondoenlijk.

Pultrusie

Pultrusie is een samenstelling van het werkwoord 'to pull' en het 'extrusie'-proces. Extrusie wordt veel gebruikt bij het maken van profielen. Hierbij wordt het materiaal door een mal geperst met de vorm van de profieldoorsnede. Een vezel versterkt materiaal laat zich niet zo gemakkelijk door een vorm duwen, daarom wordt bij pultrusie het ruwe materiaal door de mal getrokken. Als grondstof

worden meestal een combinatie van vezelbundels en vezelmatten gebruikt, die door een harsbad worden geleid, en vervolgens door de mal. Hierin wordt het profiel uitgehard bij hogere temperaturen (ca 130 °C) en meestal op bepaalde standaardlengte afgezaagd.

Gesloten-mal technieken

Vacuümtechnieken

Er bestaan zeer veel technieken die als vacuümtechnieken gekarakteriseerd kunnen worden, zoals '(VA)RTM' (Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding), of SCRIMP (Seeman's Composite Resin Infusion Molding Process). Deze technieken hebben met elkaar gemeenschappelijk dat het werkstuk met behulp van atmosferische druk geïmpregneerd wordt. Dat kan alleen als het werkstuk luchtdicht wordt afgesloten en aan een zijde de lucht door een vacuümpomp wordt afgezogen.

Het werkstuk kan luchtdicht worden afgesloten met een folie (vacuümfolie). Dan moet het werkstuk wel aan een zijde ondersteund worden door een mal, anders zou het in het vlak in elkaar gedrukt worden.

Infusiestrategie

Bij de infusie van met name grote producten moet er goed nagedacht worden over de aansluitpunten van de harstoevoer en de luchtafvoer op het product. Deze bepalen in grote mate de 'infusiestrategie'. Wanneer er een verkeerde infusiestrategie wordt toegepast, kunnen de volgende twee meest voorkomende problemen optreden:

- Onvolledige infusie door te lang infusiepad: Tijdens de infusie wordt de hars stroperiger en zal steeds minder snel door het product stromen, wanneer er te lange infusiepaden gebruikt worden zal de hars niet overal in het product kunnen komen;
- Onvolledige infusie door onjuist voorkeurspad: De hars zoekt tussen aanvoer en afvoer de weg van de minste weerstand. Bij een vezelpakket, minder goed doorlaatbaar voor hars, waarop over het gehele infusiepad doorstroommedium ligt, goed doorlaatbaar voor hars, zal de hars de voorkeur hebben om door het doorstroommedium te vloeien in plaats van door het vezelpakket. Hierdoor kan 'racetracking' optreden, waarbij droge plekken midden tussen de aanvoerleidingen ontstaan.

Autoclaaf

Een autoclaaf is een, meestal vrij grote, oven, die op druk kan worden gebracht. Omdat een autoclaaf een drukvat is, heeft hij meestal de vorm van een cilinder. Als het werkstuk onder druk wordt gebracht, kan net als bij vacuümtechnieken de overtollige hars worden afgevoerd en het aantal eventuele belletjes in het materiaal verminderen. In tegenstelling tot vacuümtechnieken is er bij een autoclaaf geen maximum van 1 bar druk, maar is er de mogelijkheid om tot enkele tientallen bar te gaan. De oven-functie van een autoclaaf wordt gebruikt om de juiste temperatuurcyclus voor optimale uitharding te doorlopen. Verwarming met een autoclaaf is relatief duur, de afmetingen van het werkstuk zijn beperkt tot de inwendige afmetingen van de autoclaaf (Nijssen, 2013).

7.2 Beton

Beton is een kunstmatig steenachtig materiaal. De basisbestanddelen zijn grind, zand, cement en water. Het materiaal heeft een hoge druksterkte, de treksterkte is echter betrekkelijk laag. De samenhang van de materialen in het beton wordt bereikt door verstenen van het bindmiddel cement door een chemische reactie met water. Door de kwaliteit van de ingrediënten en door verhoudingen tussen de ingrediënten te variëren en eventueel hulpstoffen toe te voegen kunnen de eigenschappen van het beton worden aangepast aan de toepassing. Door het toevoegen van stalen wapening op plaatsen waar trek optreedt in het beton kan de lage treksterkte worden gecompenseerd. Beton kan zowel ter plaatse ('in het werk gestort') als prefab gemaakt worden. (Reinhardt, 1985)

7.2.1 Cement

Cement is het bindmiddel in het beton. Het is een fijngemalen anorganische stof. Hoewel de hoeveelheid cement in beton beperkt is (250 – 400 kg cement per m³ beton), bepaald het toch de meeste eigenschappen van het beton. Vooral chemische eigenschappen zoals bescherming van wapening tegen corrosie en aantasting van beton door een agressief milieu, maar ook andere eigenschappen als verhardingssnelheid en warmteontwikkeling tijdens uitharden worden door het cement bepaald. Cement is een hydraulisch bindmiddel, voor verharding heeft het water nodig. Dit chemische proces wordt hydratatie genoemd. Hydratatie is een exotherme reactie, er komt warmte bij vrij.

De meest toegepaste cementsoorten in Nederland zijn portland- en hoogovencement.

Portlandcement bestaat uit 95% portlandcementklinker en 5% gips. Portlandcementklinker wordt in Nederland gemaakt uit de grondstoffen mergel en klei. Mergel bestaat voor het grootste gedeelte uit kalksteen (CaCO₃). Klei bestaat vooral uit silicium-, aluminium- en ijzeroxiden. Deze grondstoffen worden gebakken in een oven, door deze hitte gaan de grondstoffen chemische reacties met elkaar aan, het sinterproces. Hierbij ontleedt het kalksteen CaCO₃ in CaO en CO₂. Het CO₂ wordt afgevoerd als rookgas. Het CaO reageert met de oxiden SiO₂, Al₂O₃ en Fe₂O₃ tot vier verbindingen: tricalciumsilicaat (3(CaO) * SiO₂ afkorting C₃S), dicalciumsilicaat (2(CaO) * SiO₂ afkorting C₂S), tricalciumaluminaat (3(CaO) * Al₂O₃ afkorting C₃A) en tetracalciumaluminaatferriet (4(CaO) * Al₂O₃ * Fe₂O₃ afkorting C₄AF). Deze stoffen vormen samen portlandcementklinker. Het cement wordt gemaakt door deze klinker te malen. Om de bindtijd van het cement te vertragen wordt gips toegevoegd.

Portlandcement heeft een hoge aanvangssterkte, de hydratatie verloopt dus snel. Hierdoor ontstaat ook veel hydratatiwarmte. Vooral bij lagere temperaturen is dit voordelig.

Hoogovencement wordt gemaakt van hoogovenslak, een bijproduct van het hoogovenproces waarbij ijzer gemaakt wordt uit ijzererts. Deze slak bestaat uit gesteentexoïden die gereageerd hebben met kalk, dat voor dit doel toegevoegd wordt aan het hoogovenproces. De slak wordt afgetapt uit de hoogoven en gegraneerd: de hete massa wordt bespoten met koud water, waardoor het uiteenvalt in kleine korrels. Het granaat wordt vervolgens gemalen.

Puur hoogovencement kan niet als bindingsmiddel fungeren, het moet gemengd worden met een andere cementsoort zoals portland. Hoogovencement is namelijk een latent hydraulische stof, dat wil zeggen, het hydrateert pas als het hiervoor geactiveerd wordt. Het activeren gebeurt door de

aanwezigheid van vrije kalk. De vrije kalk ontstaat bij de hydratatie van het portlandcement. De verhouding tussen hoogoven- en portlandcement is 55 – 75% hoogovenslak en 25 – 45 % portlandcement.

Hoogovencement heeft een dichte poriënstructuur. Hierdoor kunnen schadelijke stoffen moeilijk binnendringen, wat de duurzaamheid bevordert. De hydratatie van hoogovencement gaat vrij langzaam. Hierdoor ontstaat weinig hydratatiewarmte, bij massabeton heeft dit als voordeel dat er weinig krimpspanning optreedt door temperatuurverschillen. Bij lagere temperaturen zal het hydratatieproces van het cement zelfs nauwelijks op gang komen. Nabehandeling is belangrijk bij hoogovencement, doordat het traag hydrateert bestaat de kans dat er water, wat benodigd is voor de hydratatie, verdampt uit het beton, waardoor de sterkte minder wordt.

Zodra cement in aanraking komt met water treden er oplos- en kristallisatieprocessen in werking. Hierdoor ontstaat de binding en verharding door hydratatie. Hierbij ontstaat cementsteen. De belangrijkste bijdrage in de sterkte van het cementsteen wordt geleverd door het C_2S en C_3S . Cementsteen bestaat uit naaldachtige hydraten. Deze naaldjes grijpen in elkaar en oefenen grote aantrekkingskracht uit op elkaar, wat de sterkte van cementsteen verklaart. Tussen de kristallen van het cementsteen bevinden zich zeer kleine poriën, waardoor geen watertransport mogelijk is. Het verhardingsproces gaat jaren door, meestal wordt gerekend met de sterkte na 28 dagen, maar in de tijd zal het cement nog sterker worden. (Verver & Fraaij, 2004)

7.2.2 Water

Het water wat wordt toegevoegd aan het beton mag geen verontreinigingen bevatten. Deze zouden het hydratatieproces van het cement kunnen verstoren. De NEN-EN1008: 2002 'Aanmaakwater voor beton' stelt eisen voor het aanmaakwater. In Nederland kan gewoon kraanwater gebruikt worden voor het aanmaken van water.

De hoeveelheid water die wordt toegevoegd aan het betonmengsel is vrij kritisch. Cement heeft voor volledige hydratatie circa 25% van het cementgewicht aan water nodig, nog eens 15% water wordt vastgehouden in zeer kleine poriën in het verharde cement. Met 40% van het cementgewicht aan water kan het cement dus volledig hydrateren.

De verhouding tussen de massa van het water en de massa van het cement noemt men de water-cement factor (WCF). Deze wordt als volgt bepaald:

$$WCF = \frac{w}{c}$$

waarin:

w = gewicht van het toegevoegde water

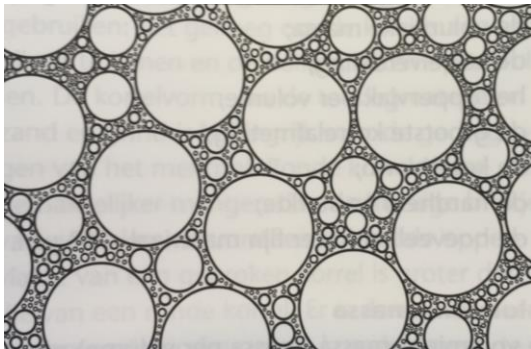
c = gewicht van het toegevoegde cement

Als er meer water wordt toegevoegd aan het mengsel zal dit extra water na verharding verdampen, waardoor er poriën ontstaan in het beton. De sterkte, waterdichtheid en weerstand tegen chemische indringing worden daardoor nadelig beïnvloedt. Toch zal er bij in het werk gestort beton vrijwel altijd meer water worden toegevoegd dan de 40%, dit om de verwerkbaarheid van het beton te verhogen. (Verver & Fraaij, 2004)

7.2.3 Toeslagmaterialen

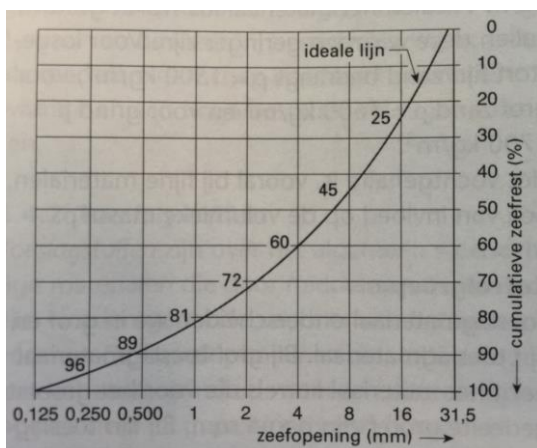
Toeslagmaterialen zijn over het algemeen steenachtige materialen. Traditioneel worden zand en grind gebruikt en tegenwoordig ook steeds vaker een deel betonpuingranulaat. Ze vormen het skelet van het beton. Ruim driekwart van het volume in beton wordt ingenomen door toeslagmaterialen.

Toeslagmateriaal wordt onderscheiden in grof en fijn materiaal. Grof materiaal bestaat uit materiaal met korrels groter dan vier millimeter. Fijn toeslagmateriaal bestaat uit korrels kleiner dan vier millimeter. De korrelverdeling is van grote invloed op de verwerkbaarheid van de betonspecie en op de te bereiken dichtheid en sterkte. Een optimale samenstelling van het toeslagmateriaal is zodanig dat alle ruimten tussen de korrels volledig gevuld worden, zie figuur 7.12.



Figuur 7.12: Volledige opvulling tussen korrelskelet

Dit gaat het beste als de korrelverdeling van de toeslagmaterialen op de ideale zeeflijn liggen (figuur 7.13).



Figuur 7.13: Ideale zeeflijn toeslagmaterialen

De korrelsamenstelling van het te gebruiken grind en zand kan bepaald worden door het materiaal te zeven volgens de NEN-EN 933-2.

Het oppervlak van het toeslagmateriaal moet volledig bedekt worden met cementsteen. Bij veel fijn toeslagmateriaal neemt de oppervlakte per volume-eenheid toe, daarom moet er bij beton met fijne toeslagmaterialen meer cement gebruikt worden.

De grootste korrelafmeting van het toeslagmateriaal wordt bepaald door wapeningsafstanden en dimensies van het te maken product. Het beton moet bij het storten in alle hoeken van de bekisting kunnen komen en de wapening goed omhullen. Eisen hiervoor staan in de NEN-EN 206-1.

Voor het maken van licht- of juist zwaar beton kunnen andere toeslagmaterialen gebruikt worden. Voor licht beton kunnen geëxpandeerde klei- of glaskorrels gebruikt worden, of natuurlijk materiaal zoals Bims (puimsteen). Voor zwaar beton kunnen zware gesteenten of bijvoorbeeld metalen ponsdoppen worden toegepast. (Reinhardt, 1985)

7.2.4 Hulpstoffen

Hulpstoffen worden toegevoegd aan betonspecie om de eigenschappen als verwerkbaarheid en verhardingstijd van het beton te beïnvloeden. Ook eigenschappen van het verharde beton, zoals vorstbestendigheid, kunnen beïnvloed worden door het toevoegen van hulpstoffen.

De verwerkbaarheid van beton kan verbeterd worden door het toevoegen van extra water aan het mengsel. Hierdoor wordt het beton extra vloeibaar. Dit extra water zorgt echter voor poriën in het beton. Daarom kan er beter voor gekozen worden om plastificeerder of zelfs superplastificeerder toe te voegen. Deze zorgen ervoor dat het beton makkelijker verwerkbaar wordt zonder extra water toe te voegen. Hierdoor kan de watercement-factor laag gehouden worden, waardoor het beton sterker wordt.

Een ander soort hulpstoffen zijn bindtijdregelaars. Afhankelijk van het soort stof kan hiermee de bindtijd van het cement versneld of vertraagd worden.

Vertragers worden gebruikt om stortnaden te voorkomen, hydratatiewarmte te verminderen en de verwerkbaarheid te verlengen. Versnellers worden vooral in de prefab industrie toegepast, om de aanvangsterkte van de producten zo hoog mogelijk te krijgen, zodat er snel ontkist kan worden. Hierdoor kan de productiesnelheid groter worden. Veel versnellers zijn gebaseerd op calciumchloride (CaCl_2). Deze versnellers zijn in Nederland alleen toegestaan in ongewapend beton, omdat de chloride-ionen de wapening aantasten.

Om de vorstbestendigheid van beton te vergroten kan een luchtbelvormer worden toegevoegd aan het mengsel. Deze zorgen voor kleine luchtbelletjes in het beton, waardoor opgezogen water dat opgezogen is door het beton bij bevriezen ruimte heeft om uit te zetten, waardoor er minder snel schilfers van het beton zullen knappen. (Blaazer, van Gessel, Glas, Hijlkema, & Ledderhof, 2011)

7.2.5 Classificatie van beton

Verhard beton kan op verschillende manieren worden geclassificeerd, het kan worden ingedeeld op basis van gewicht, sterkteklasse en milieuklasse.

Indeling op basis van gewicht

Er worden drie gewichtsklassen onderscheiden:

- Licht beton: volumieke massa 800 tot 2000 kg/m^3
- Normaal beton: volumieke massa van 2000 tot 2600 kg/m^3
- Zwaar beton: volumieke massa > 2600 kg/m^3

(NEN-EN206-1, 2005)

N.B.: Cellenbeton (gasbeton) is verkrijgbaar van 400 tot 800 kg/m^3 , druksterkte 2 tot 5 N/mm^2 en $E=1000$ tot 3000N/mm^2 . Cellenbeton wordt gemaakt met aluminiumpoeder waardoor eerst waterstofbellen in de specie ontstaan. Cellenbeton wordt in mallen gegoten, verhit tot 190°C onder stoomdruk van 12 bar gebracht. Schuimbeton (celbeton) van 400 tot 1500 kg/m^3 heeft grote cellen en is niet geschikt voor draagconstructies. (joostdevree.nl) Beiden zijn niet geschikt voor een constructieve in-situ toepassing.

Indeling in sterkteklassen

De sterkteklasse van het beton wordt de uitgedrukt in de karakteristieke cilinderdruksterkte van het beton. In tabel 7.3 uit de NEN-EN 1992-1-1. Hierin staan de genormaliseerde sterkteklassen, met daarbij de materiaaleigenschappen van het beton van die klasse. Aan de hand van deze benodigde eigenschappen kan bepaald worden welke sterkteklasse beton benodigd is voor een bepaalde toepassing. (NEN-EN1992-1-1, 2011)

Sterkteklassen voor beton														Vergelijking/Verklaring	
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck}+8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm}=0,30\times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm}=2,12\cdot \ln(1+(f_{cm}/10))$ $> C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7\times f_{ctm}$ 5 % fractiel
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3\times f_{ctm}$ 95 % fractiel
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	zie figuur 3.2 $\epsilon_{c1}^{(0/100)} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	zie figuur 3.2 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1}^{(0/100)}=2,8+27[(98-f_{cm})/100]^4$
ϵ_{cu2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	zie figuur 3.3 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2}^{(0/100)}=2,0+0,085(f_{ck}-50)^{0,53}$
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	zie figuur 3.3 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2}^{(0/100)}=2,6+35[(90-f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	voor $f_{ck}\geq 50$ MPa $n=1,4+23,4[(90- f_{ck})/100]^4$
ϵ_{cu3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	zie figuur 3.4 voor $f_{ck}\geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3}^{(0/100)}=1,75+0,55[(f_{ck}-50)/40]$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	zie figuur 3.4 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3}^{(0/100)}=2,6+35[(90-f_{ck})/100]^4$

Tabel 7.3: Betonsterkteklassen met eigenschappen NEN-EN 1992-1-1

Indeling in milieuklassen

Afhankelijk van het milieu waarin het beton toegepast gaat worden heeft het weerstand nodig tegen bepaalde aantastingen. In de NEN-EN 1992-1-1 is een tabel gegeven met het verband tussen de milieuklasse (X0 / XC# / XD# / XS# / XF# / XA#) en de milieuomstandigheden.

Aan de hand van de milieuklasse kan het soort cement en de minimale hoeveelheid cement in het beton bepaald worden. Ook de hoeveelheid dekking op de wapening komt voort uit de milieuklasse. Verder worden er ook eisen gesteld aan de maximale water-cement factor bij elke milieuklasse. (NEN-EN1992-1-1, 2011)

7.3 Toepassingen van het beton met een prefab vezel versterkte kunststof schil

In dit hoofdstuk worden een aantal mogelijke toepassingen van het beton, gewapend met een prefab kunststof schil, besproken aan de hand van (gunstige) eigenschappen die vezel versterkt kunststof heeft / kan hebben.

De eigenschappen zijn ontleend aan dictaat 'Composieten Basiskennis' (Nijssen, 2013). Bij de eerste vier zijn eerst de toepassingen van glasvezel wapeningsstaven (Schöck, 2010) opgenomen.

7.3.1 Corrosiebestendigheid

Toepassing van VVK wapening wordt allereerst gezocht bij constructies waar ernstige corrosie van traditionele stalen wapening verwacht wordt. Hierbij kan gedacht worden aan constructies die blootgesteld zijn aan dooizouten, zeezout en andere chemische agressieve elementen (waartoe zuurstof en water ook gerekend worden).

Constructies die worden blootgesteld aan dooizouten zijn bijvoorbeeld brugdekken, vloeren van parkeerdekken, barriers langs wegen en zoutopslagloodsen.

Alle constructies in de buurt van de zee worden blootgesteld aan zout uit de zee. Constructies die typisch in deze omgeving aanwezig zijn, zijn kademuren, betonnen zeeweringen, pieren en drijvende aanlegsteigers.

Ook waterkerende constructies in zoet water zijn met name corrosiegevoelig in de waterwisselzone en zijn vaak moeilijk te inspecteren. Hierbij kan gedacht worden aan sluizen.

Corrosie van het wapeningsstaal ontstaat niet alleen door zouten, maar ook door andere agressieve chemische stoffen. Hierbij kan gedacht worden aan lekbakken in de chemische industrie, rioolwaterzuiveringen en zwembaden.

Ook bij ondergrondse constructies kan het kunststof gewapende beton toegepast worden, grond en grondwater kan behoorlijk agressief zijn. Voorbeelden van ondergrondse constructies zijn onderdoorgangen en kelders. (Schöck, 2010)

7.3.2 Elektrische-isolatie (Engels: isolation)

Een andere eigenschap van traditionele stalen wapening is dat het magnetisch en elektrisch geleidend is. Bij bepaalde toepassingen kan dit een probleem zijn, terwijl kunststof wapening niet geleid.

Bij spoorwegen kunnen zwerfstromen of inductiestromen optreden in stalen wapening, wat kan leiden tot put-corrosie of foute signaaloverdracht. Regulier wordt dit voorkomen door toepassen van aarding van het gehele wapenings- en voorspanningssysteem. Door het toepassen van kunststof wapening is dit niet nodig.

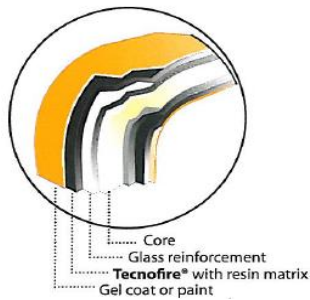
In laboratoria (bijv. MRI scans) en chipsfabrieken mag de wapening soms niet magnetisch zijn voor precieze meet- en productietechnieken. Door het toepassen van dure RVS wapening kan hierin worden voorzien. Kunststof wapening kan een goedkoper alternatief zijn.

In de buurt van hoogspanning (bijv. elektriciteitscentrales en transformatorstations) kan in stalen wapening inductie optreden en daardoor energieverlies. Om spoelen toch dicht bij wapening te kunnen plaatsen kan kunststofwapening een uitkomst bieden. (Schöck, 2010)

7.3.3 Warmte-isolatie (Engels: insulation)

Wanneer een betonnen vloer van binnen doorloopt naar buiten ontstaan koude bruggen. Om koude bruggen te voorkomen zijn materialen nodig die wel kracht maar geen kou overbrengen.

Kunststofwapening voldoet hieraan. (Schöck, 2010)



Phenol hars en basalt vezels kennen gunstig eigenschappen bij hoge temperaturen tijdens brand (200°C resp. 600°C). (Nijssen, 2013).

Voorts kan (ook) een infuseerbare hittewerende bekleding in de mal van de composiet constructie worden opgenomen. Dit zou vergeleken kunnen worden met Promatect zoals bij beton of staal wordt toegepast, Technofire bij composieten is echter niet van buiten te zien. (Technofire)

Figuur 7.14: Hittewerende bekleding

Een en ander kan bij gebouwen en tunnels van belang zijn.

Composiet kan tevens geluidsisolerend worden uitgevoerd, door een betonnen kern met veel massa en/of een schuimkern dat contactgeluid niet doorgeeft.

7.3.4 Verspaanbaarheid

Bij reguliere betonconstructies is een taaie wapening gewenst omdat de constructie daarmee kan waarschuwen voordat deze bezwijkt. Wanneer de gewapende betonconstructie ook eenvoudig doorboort moet kunnen worden, kan brosse wapening echter de voorkeur genieten. Composiet wapening kan dan uitkomst bieden. Bijvoorbeeld in de soft-eyes van de diepwanden voor zeer grote tunnelboormachines. (Schöck, 2010)

Wellicht ook bij veel in te boren kleine ankers. Voorts is bros versterkt materiaal aan het einde van de levensduur makkelijker te breken en te scheiden.

7.3.5 Textuur

De oppervlakte van niet gecoat vezel versterkt kunststof kan al relatief glad zijn en in diverse kleuren worden uitgevoerd door pigment in de hars mee te mengen. Voorzien van een gelcoating (aan te brengen in de mal) of een topcoating (nadien aan te brengen) kan elke ruwheid, kleur en glansgraad worden verkregen. Dit kan een zeer hoogwaardige uitstraling opleveren. (Nijssen, 2013)

In geval van kunststof schil kan dit een voordeel bieden bij betonconstructies met zichtvlakken bijvoorbeeld randelementen, gevelementen, kolommen en onderdoorgangen.

Bij fietstunnel Grimberg zijn in hoogglans composiet voorzetplaten toegepast in de betonnen bak. Verder zijn er hoogglans composiet randelementen toegepast bij het ecoduct Grimberg. (Nolden, 2014)



Figuur 7.15: Onderdoorgang (a) en Ecoduct (b) De Grimberg N350 Rijsen-Wierden 2013.

Oppervlaktes kunnen voorts worden behandeld met bijv. (nano)coatings (uit diverse bronnen) om:

- een kleur en / of glansgraad te behouden (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- corrosie te weren (denk aan staal)] (ROK1.2, 2013)
- UV straling te filteren (denk aan hout)] (ROK1.2, 2013) (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- graffiti makkelijk te kunnen verwijderen (denk aan beton en metselwerk) (Gevelmeesters, 2015)
- algen niet aan te laten groeien (denk aan schepen, steigers, kades) [anti-fouling] (Deltares TNO, 2015)
- waterafstotend te worden (denk aan beton) [hydrofoberen] (ROK1.2, 2013)
- vuilafstotend te worden (denk aan glas en beton) (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- anti-condens coating (denk aan autoramen) (Sanders, 2012)
- anti-statische coating (Sanders, 2012)
- anti-reflectie coating (denk aan brillenglazen)
- reflectie coating, zodat onderliggend materiaal de buitenlucht temperatuur volgt (Technisch Weekblad, 2015) (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- water minder snel te laten aanvriezen (denk aan autoramen, slijtlaag) (Tissink, 2016)
- bacteriën of microben te weren (anti-bacterial/microbial) (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- wrijvingsarme slijtvaste coating (Galvan, 2017)
- krasvaste / krasbestendige coating (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- brandvertrager (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- isolerend (Arbouw-rapport11-154, 2011)
- verminderen van luchtvervuiling / fijnstof (denk aan asfalt, geluidscherm, tunnelwand) (Arbouw-rapport11-154, 2011)

Dit soort coatings kunnen toegepast worden op beton gevulde prefab VVK schil, ze kunnen immers prima hechten aan de hars. Om geluid te absorberen en / of reflecteren kan de textuur van composiet tevens gemanipuleerd worden.

7.3.6 Weinig onderhoud

VVK steekt vooral gunstig af in onderhoudskosten ten opzichte van staal. (Nijssen, 2013)

Onderstaand wordt VVK vergeleken met gewapend beton ten aanzien van de twee meest relevante onderhoudsaspecten.

Constructieve integriteit

Betonconstructies hebben -mits goed ontworpen én goed uitgevoerd- binnen de levensduur geen corrosie van stalen wapening óf Alkali-Silica-Reactie van beton te verwachten. Steeds vaker worden daarom DCM contracten door beheerders afgesloten, waarin naast Design en Construct (ontwerp en

uitvoering) ook Maintenance (onderhoud) voor een substantiële periode wordt gecontracteerd. Full service bouworganisaties worden dan zelf met de gevolgen van onzorgvuldigheden geconfronteerd, en hebben er zelf ook belang bij dit te voorkomen.

Bij het toepassen van een kunststof schil zijn -mits goed ontworpen én goed uitgevoerd- binnen de levensduur eveneens geen onderhoudskosten ten behoeve van constructieve integriteit te verwachten.

Vervuiling / graffiti

Een ander onderhoudsaspect is het verwijderen van vervuiling / graffiti. Bij beton kunnen de volgende maatregelen worden genomen:

- A) Afwachten – geen coating beton beschadigd bij verwijderen graffiti
- B) Biologische coating 1/4 jaar graffiti verwijderbaar met warm water, verwijdert ook de coating
- C) Chemische coating 1/12 jaar graffiti min. 5x verwijderbaar met milieuvriendelijk oplosmiddel
- D) Nano/siliconen coating 1/17j. graffiti en posters min. 5x verwijderbaar met poetsen

Per systeem lopen de preventieve kosten lopen op, en de curatieve kosten af bij vaak en veel verwijderen van graffiti.

Bij VVK zijn dezelfde maatregelen mogelijk. Omdat het oppervlakte van VVK gladder is dan van beton, zal het anti graffiti coatingverbruik per vierkante meter iets lager zijn. Voorst kan het zo zijn dat een glad, hoogwaardig oppervlak minder uitnodigt tot vervuiling, dit is echter speculatief. (Gevelmeesters, 2015)

7.3.7 Gewicht

Lichte constructies hebben een voordeel bij bewegende constructies zoals beweegbare bruggen en sluisdeuren. Het kost immers minder energie om ze te versnellen. Bij sluisdeuren is het gunstig als de deur even zwaar is als het opdrijvend vermogen, dan worden de scharnieren minder belast. (Peeters, 2015)

Afbouw onderdelen die minder wegen kunnen ook voordelen hebben voor de belasting op de hoofddraagconstructie en tijdens de uitvoering. Hierbij kan gedacht worden aan randelementen en gevelementen.

Gewapend betonnen hoofddraagconstructies zijn van zichzelf relatief zwaar vanwege het beton. Het voordeel van lichtgewicht schil (als bekisting + wapening) kan worden behaald tijdens separate productie en transport van kunststof schil en beton per mixer naar de bouwlocatie. Daarbij zijn geen zware hijsvoorzieningen nodig. De zware beton kern binnenin de kunststof schil zorgt er bij constructies in het (grond)water ook voor dat de constructie minder de neiging heeft om op te drijven.

Voor de kern kan hierbij gedacht worden aan licht beton ($\sim 1.000 \text{ kg/m}^3$) in de onderwaterdelen van sluisdeuren of zwaar beton ($\sim 4.000 \text{ kg/m}^3$) in vloeren van onderdoorgangen of kelders.

7.3.8 Licht-doorlatend

VVK kan licht-doorlatend worden uitgevoerd: glas(vezel) is translucet en hars kan hierop geselecteerd worden.

Een infrastructureel voorbeeld hiervan is te vinden in de randelementen van viaducten in de N201, waarbij energiezuinige LED verlichting is toegepast die tegelijk aangaat met de openbare verlichting (Loon, 2015)



Figuur 7.16: Vijf viaducten in de N201 bij Hoofddorp 2013

Een prefab VVK schil kan translucient worden uitgevoerd ten behoeve van verlichting, terwijl de kern gevuld wordt met beton.

7.3.9 Multifunctioneel

Bij VVK is een hoge mate van integratie van functies mogelijk, zoals niet geleiden (zie §7.3.2 & §7.3.3), niet uitzetten (zie §7.3.12), licht gewicht (zie §7.3.7) en onzichtbaar voor radar (zie §7.3.13)

Gebruikelijke nevenfuncties die betonconstructies vervullen d.m.v. in te storten onderdelen zijn mantelbuizen voor Kabels en leidingen (K&L) zoals:

- Hemelwaterafvoer (HWA)
- Openbare verlichting (OV) (zie Licht-doorlatend §7.3.8).

Deze kunnen tevens in de betonnen kern worden opgenomen.

7.3.10 Vorm-, materieel en procesvrijheid

Ronde vorm

In de VS zijn sinds 2008 diverse boogbruggen gerealiseerd –zie figuur 7.17- met bogen van buizen van glas- en koolstofvezel versterkte kunststof in situ gevuld met zelf verdichtend beton (zonder te verdichten). De hars is een epoxy-vinyl ester vanwege technische duurzaamheid, taaheid en hechting met beton. Het beton is een portlandcement dat enigszins uitzet en goed hecht aan het composiet. Daaroverheen zijn glasvezel versterkte kunststof damwandprofielen voorzien van een druklaag in situ beton.

“A Hybrid bridge system combining benefits of high-performance composites with durability and cost savings of cast-in-place concrete”

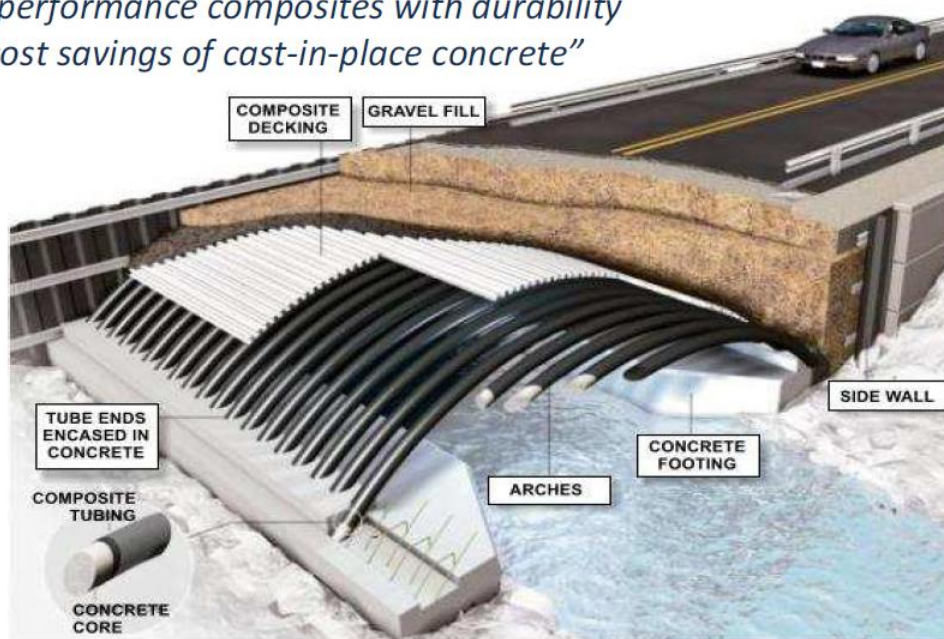
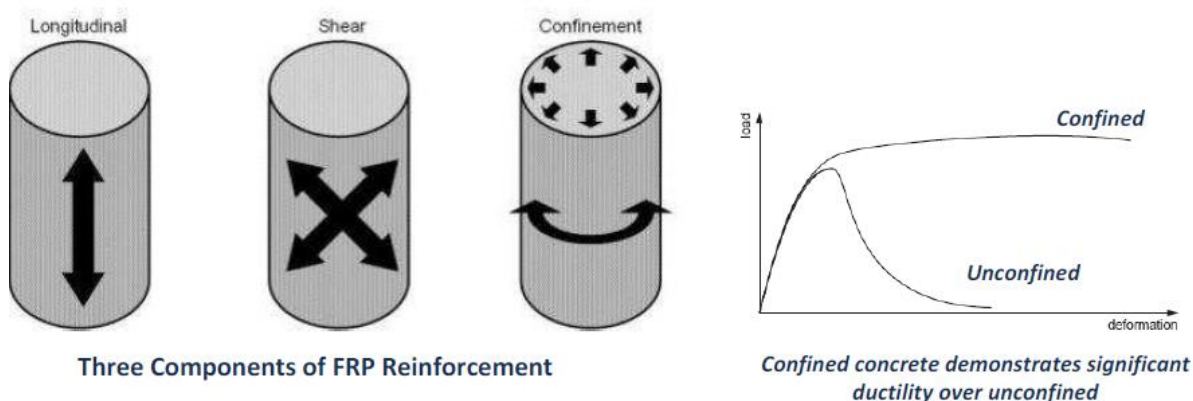


Image Credit – NY Times/University of Maine

Figuur 7.17: Composiet-beton Boogbruggen University of Maine 2008-2015

De buizen vormen naast de bekisting drie wapeningsfuncties (zie figuur 7.18) voor het beton: hoofdwapening, dwarskrachtwapening en omsluitingswapening waardoor het opgesloten beton een taai bezwijkpatroon op druk krijgt. (Malnati, 2015 May)



Figuur 7.18: Ronde buizen: krachtswerking composiet & karton omhulling

Ronde elementen zijn zeer geschikt om uit te voeren met composiet huid omdat een dunne huid de stortdruk kan opnemen totdat het beton hard is zonder dat er bekistingsgordingen of centerpennen nodig zijn. Dit geldt ook voor kartonnen bekisting, al betreft dit een verloren bekisting die geen wapeningsfunctie vervult.

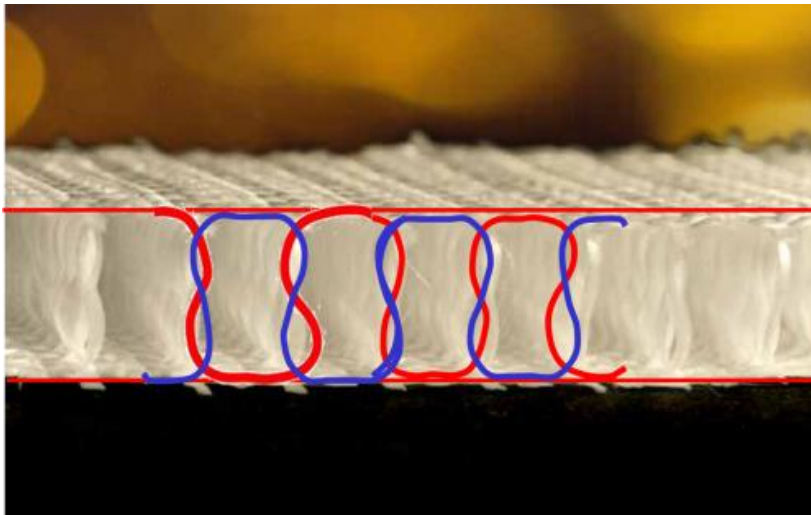


Evenals bij kartonnen bekisting is een toepassing voor de hand liggend bij ronde (al dan niet gebogen) kolommen van viaducten en gebouwen.

Platte vorm

Parabeam (zie figuur 7.19) is een product van glasvezels wat na impregneren resulteert in een composiet sandwich met holle kernruimtes. Tijdens het impregneren met een roller (open productie) veert de gebreide verbinding tijdelijk in. Tot nog toe zijn slechts diktes tot enkele centimeters beschikbaar. (Parabeam)

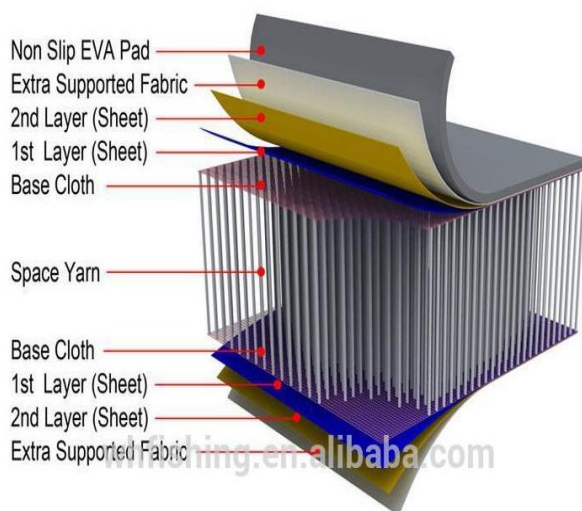
Het breiproces kost bij deze dikte ruwweg 4x de glas materiaalprijs. (Kleef, 2016)



Figuur 7.19: Parabeam principe (Parabeam)

Pas als Parabeam in grotere diktes en grotere verbindingsafstanden gemaakt kan worden, wordt toepassing met in situ betonnen kern haalbaar. De dure Parabeam huiden kunnen dan dun blijven, en worden waar nodig lokaal verdikt met regulier, goedkope UD glasvezel legfels. De verbindingen kunnen de functie van centerpennen vervullen en van dwarskrachtwapening mits deze alkali beschermd/bestendig zijn door impregneren of AR sizing.

Drop stitch fabric (zie figuur 7.20) is een product dat bedoeld voor opblaasbare platen, en wordt bijvoorbeeld toegepast als bootvloeren. Drop stitch fabrics bestaan daarbij uit een flexibele polyester fabric voorzien van flexibele PVC coatings om een flexibele, slijtvaste luchtdichte huid te vormen. (<http://zebec.co.kr>, 2016)



• Table of Fabric

Items	Unit	DSF01	DSF02	DSF03	DSF04
Color	Standard	Light Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey
Space Yarn	Denier	500	500	500	500
	Interval(mm)	78(±5%)	100(±5%)	150(±5%)	200(±5%)
Base Cloth	Denier	1000	1000	1000	1000
	inch*inch	16*32	16*32	16*32	16*32
Coating Thickness	mm	1.1(±0.1)	1.1(±0.1)	1.1(±0.1)	1.1(±0.1)
Total Weight	g/m ²	2,100(±200)	2,100(±200)	2,300(±200)	2,300(±200)
Total Width	m	155(±10)	155(±10)	155(±10)	155(±10)
Total Length	m/roll	20	20	20	20
Tensile Strength	N/5cm	1400x2000(±200)	1400x2000(±200)	1400x2000(±200)	1400x2000(±200)
Adhesion Strength	N/5cm	150x150(±20)	150x150(±20)	150x150(±20)	150x150(±20)
Recommanded Pressure	psi	10	10	10	10
Max. Pressure	psi	16	16	16	16

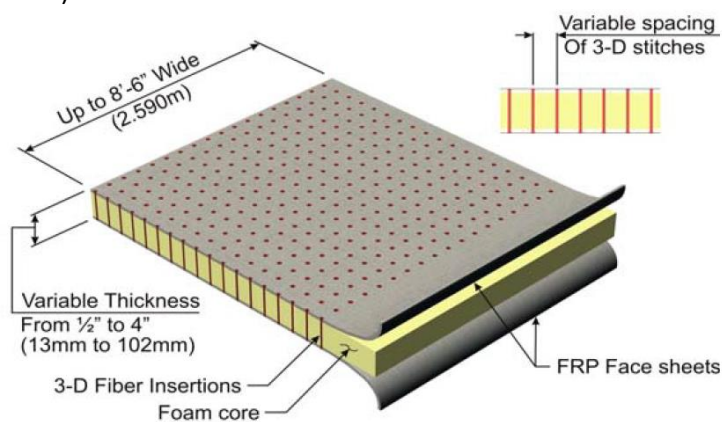
* This information is the best currently available specification and the above figures are the average of test results.

Figuur 7.20: Drop stitch principe (<http://zebec.co.kr>, 2016)

Om het toe te kunnen passen in het concept van prefab vezel versterkte kunststof huiden met in situ betonnen kern kan de thermoplastische (polyester?) fabric mogelijk worden vervangen door een AR-glasvezel fabric voorzien van een luchtdichte coating die zowel goed aan beton als aan vinylester hecht. Het geheel kan worden opgepompt, waar nodig omgeven door extra UD glasvezel legfels waarna deze vacuüm geïnfuseerd worden met thermohardende polyester hars.

3D FRP Sandwich panel (zie figuur 7.21) is een sandwich product met een kunststof schuimkern en vezel versterkte kunststof horizontale huiden (2D) die onderling verbonden zijn met verticale lijnvormige vezel verbindingen (3D).

Dit soort panelen worden met pultrusie gemaakt, en kent daarom beperkte afmetingen. De verbindingen worden in de sandwich geïnjecteerd bij het pultrusie proces, daarbij worden de vezels omgeven met hars. Deze verbindingen werken o.a. gunstig voor dwarskracht (sterkte en stijfheid) en voor samenhang van de huiden (tegen voortgaande delaminatie onder bijv. vallend voorwerp). (Reis, 2004)



Figuur 7.21: 3D FRP sandwich paneel (Reis, 2004)

Om het toe te kunnen passen in het concept van prefab vezel versterkte kunststof huiden (wapening / bekisting) met in situ betonnen kern zal de schuimkern dikker en verwijderd moeten worden. Deze tijdelijke schuimkern moet gesloten cellen hebben, en kan geselecteerd worden met een kernmateriaal dat a) zeer licht is, b) een thermoplastisch is en c) een zeer laag smeltpunt heeft. Voor het verwijderen kan gedacht worden aan chemicaliën (denk aan aceton) of smelten.

Searfoam (zie figuur 7.22) is een sandwich product met een kunststof schuimkern en vezel versterkte kunststof horizontale huiden (2D) die onderling verbonden zijn met diagonale lijnvormige vezel verbindingen (3D).

De afmetingen zijn vooralsnog(?) beperkt tot 40 mm dikte. De verbindingen werken o.a. gunstig voor dwarskracht (sterkte en stijfheid) en voor samenhang van de huiden (tegen voortgaande delaminatie onder bijv. vallend voorwerp). (Vernin, 2016 March)

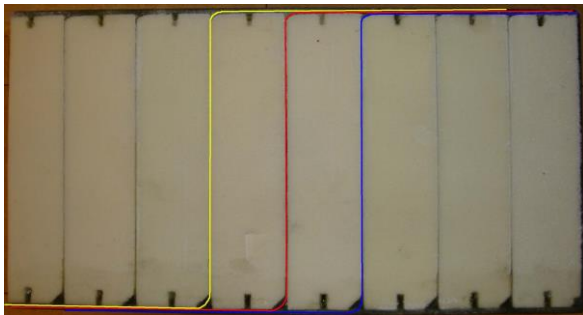


Figuur 7.22: Searfoam (Vernin, 2016 March)

Om het toe te kunnen passen in het concept van prefab vezel versterkte kunststof huden (wapening / bekisting) met in situ betonnen kern zal de schuimkern dikker en verwijderd moeten worden. Deze tijdelijke schuimkern moet gesloten cellen hebben, en kan geselecteerd worden met een kernmateriaal dat a) zeer licht is, b) een thermoplastisch is en c) een zeer laag smeltpunt heeft. Voor het verwijderen kan gedacht worden aan chemicaliën (denk aan aceton) of smelten.

Infracore (zie figuur 7.23) is een sandwich product met een kunststof schuimkern en vezel versterkte kunststof huden die onderling verbonden zijn met lijnvormige vezel verbindingen.

Dit soort panelen worden op maat met vacuüm infusie gemaakt, en kent daarom geen afmetingsbeperkingen. Deze verbindingen werken gunstig voor dwarskracht en voor samenhang van de huden (tegen voortgaande delaminatie onder bijv. vallend voorwerp). (Peeters, 2015)



Figuur 7.23: Infracore sandwich paneel (Peeters, 2015)

Om het toe te kunnen passen in het concept van prefab vezel versterkte kunststof huden (wapening / bekisting) met in situ betonnen kern zal de schuimkern moeten worden verwijderd. Hiervoor geldt hetzelfde als voor een 3D FRP sandwich paneel.

Tijdelijke Core

Een tijdelijke kern kan gemaakt worden door middel van de “koffiepak methode”. De kern bestaat uit een voorgevormde folie met daarin fijne korrels die door vacuüm trekken tot een tijdelijke, vaste vorm gemaakt worden. Vezelstructuren worden om de vaste kerndelen heen gelegd/gewikkeld en in de mal gelegd. Daarna de hars vacuüm infuseren en na uitharden de korrels (en eventueel de folie) verwijderen.

De folie is eventueel dusdanig te maken dat deze vaker te gebruiken is.

De tijdelijke kerndelen kunnen in de fabriek of in-situ worden verwijderd en in situ worden gevuld met beton. Zo’n 15 jaar geleden zijn o.a. een 8,5m windmolenblad en een giek gemaakt met deze verloren kerntechniek of **Smart core** technology. Tussen kerndelen kunnen lijven worden toegepast zoals bij Infracore.



Figuur 7.24: koffiepak

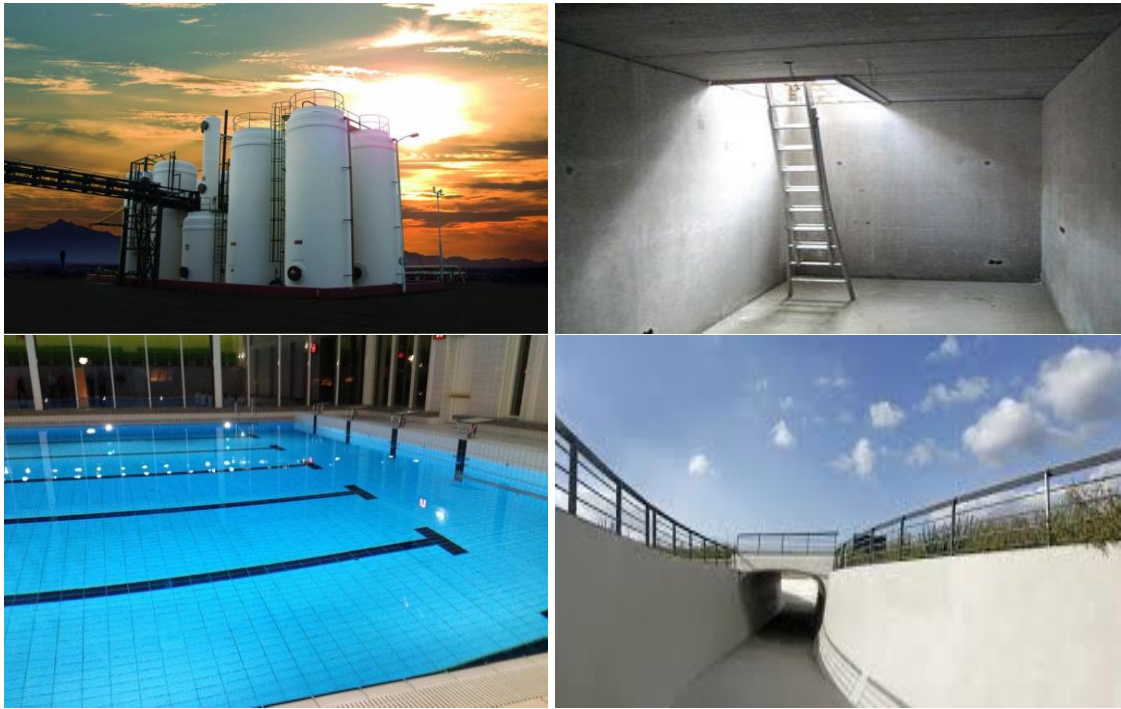
Een meer recente techniek (wordt o.a. voor de bmw i8 gebruikt) zijn kernen die geblazen worden uit een thermoplastisch materiaal. Deze worden met een vloeistof gevuld om ze vorm- en drukvast te maken; daarna worden ze omvlochten met koolstofvezel. Deze prefabs worden dan in de matrijs gelegd, de kernvloeistof op druk gebracht en de hars via (HP) RTM geïnjecteerd. Na uitharden wordt de vloeistof eruit gehaald en het product afgewerkt, de thermoplastische kern (liner) blijft in het composiet. Deze methode lijkt vooral voor grootschalige productie van producten met beperkte afmeting geschikt.

(Loof, 2016)

7.3.11 Gas- en vloeistofdichtheid

Conform CUR aanbeveling 96 blijven vezel versterkte kunststof constructies ongescheurd tot een trek-rek van 0,27%. Dit wordt gehanteerd als BGT criterium voor langdurig belasting door grondwater, oppervlaktewater, opslagtanks voor andere vloeistoffen of drukvaten. (CUR96)

Waterdichtheid is van belang bij onder meer zwembaden, rioolwaterzuiveringen en ondergrondse constructies zoals kelders of onderdoorgangen. Vloeistof- en ook gasdichtheid is van belang bij opslag van chemische stoffen.



Figuur 7.25: Dichte constructies: opslag chemische stoffen, kelder, onderdoorgang en zwembad

7.3.12 Mechanische eigenschappen op maat

Door te variëren met vezeltype, vezelrichtingen, hars en kern kunnen eigenschappen van VVK worden gemanipuleerd. Sterkte, stijfheid, taaheid en thermische uitzetting zijn binnen grenzen stuurbaar. Glasvezel versterkte kunststoffen staan bekend om hun grote sterkte, modale stijfheid en lage taaheid.

Bij het Stedelijk museum in Amsterdam is een VVK gevel toegepast zonder dilataties. Dit is mogelijk door het composiet zodanig samen te stellen dat het niet uitzet bij temperatuurvariaties (vezels die korter worden compenseren matrix dat langer wil worden). Hiervoor zijn koolstof en/of aramide vezels nodig met een negatieve uitzettingscoëfficiënt, welke duur zijn. Dit geldt ook voor vezels met grote stijfheid of taaheid. (Grisnich & Schreuder, 2014)



Figuur 7.26: Stedelijk Museum A'dam – VVK gevel 2011 Figuur 7.27: Viaduct over de A27 Houten – VVK dek 2012

Over de A27 bij Houten heeft het composieten dek dezelfde uitzettingscoëfficiënt gekregen als de stalen vakwerkconstructie, om de gelijmde verbinding tussen beide niet onnodig te belasten. Omdat de fundering binnen een bestaande vliesconstructie is geprojecteerd, was een hier lichte brug nodig. (Peeters, 2015)

Omdat beton en staal dezelfde uitzettingscoëfficiënt hebben kan ook een glasvezel composieten schil met dezelfde uitzettingscoëfficiënt worden gemaakt als een betonnen kern.

7.3.13 Milieu-impact

Het Nederlandse woord duurzaamheid is onder te verdelen in durability (technische duurzaamheid) en sustainability (milieu-impact). Composiet en beton zijn beiden technisch zeer duurzaam uit te voeren: zie 7.3.1 Corrosiebestendigheid en 7.3.6 Weinig onderhoud. Sustainability en biobased composieten worden hieronder behandeld.

Sustainability

Het maken van glas- of koolstofvezels en petrochemische hars kost (evenals staal, cement en asfalt) veel energie.

Recycling van composiet is nog niet ver ontwikkeld; dat van beton, staal en asfalt wel. Kunststof huid en beton –beiden bros– zijn makkelijker te breken/scheiden dan regulier gewapend beton met taaie stalen wapening (zie 7.3.4 Verspaanbaarheid). Het composiet wordt meestal verbrand, bijvoorbeeld in cementovens.

Recycling van hars is technisch mogelijk maar (nog) niet op de markt, de resterende vezels zijn voornamelijk onvoldoende herbruikbaar vanwege vervuiling en beschadiging van de sizing.

(Bosman, Biocomposiet brugdek - onderzoek naar milieu-impact, 2016)

Bio-based composieten

Hars (deels) uit bio-olie is technisch mogelijk en inmiddels voorzichtig beschikbaar. Deze zijn volop afgestemd/getest in combinatie met traditionele vezels, en nog nauwelijks met bio-vezels.

Bio-vezel composieten zijn bij onderwater toepassingen (nog) niet technisch duurzaam. Dit komt door uitzetten van de vezels bij vochtopname van meer dan 20%. Bij vochtige omstandigheden (buiten) is technische duurzaamheid wel te verzekeren door een te onderhouden coating. (Bosman, Biocomposiet brugdek - onderzoek naar lange duur gedrag, 2015)

Het selecteren en behandelen van technische bio-vezels kosten veel energie. Verder zijn bij vacuüm infusie circa 20% lagere vezelvolumefracties te halen. Bio-vezel composiet is thermisch te recyclen (verbranden), de vezel past dan in de bio cyclus, de hars wordt dan echter niet hergebruikt in de technische cyclus. Al met al is de milieu-impact van biovezel-composiet (vooralsnog?) niet gunstig, voorts zijn UD bio-vezels (vooralsnog?) erg duur. Het materiaal staat nog in de kinderschoenen. Om te zien of het een relevant constructiemateriaal kan worden is meer onderzoek en ontwikkeling nodig. (Bosman, Biocomposiet brugdek - onderzoek naar milieu-impact, 2016)

Bio-vezels kennen een grote demping en worden soms toegevoegd aan koolstof en/of glasvezel composieten om minder trillingsgevoelig composiet te maken. Voorts zijn bio-vezels slecht zichtbaar voor radar (dit geldt trouwens ook voor D-glas vezels). (Nijssen, 2013)

Bio-vezels zijn derhalve (vooralsnog) alleen interessant bij bijzondere draagconstructies.

7.4 Geselecteerde vezel versterkt kunststof

Op basis van de resultaten uit de literatuurstudie is er voor de proeven die bij dit onderzoek gedaan zijn een vinylester hars (Atlac 430) versterkt met glasvezel toegepast. Het productblad van de Atlac 430 is opgenomen in bijlage C. Het productblad van de geselecteerde glasvezel is opgenomen in bijlage D.

In tabel 7.1 is een overzicht gegeven van drie verschillende harsen, polyester, vinylester en epoxy. Qua eigenschappen zijn de verschillen onderling niet heel groot. Een vinylester bevat minder estergroepen dan een polyester, hierdoor is een vinylester meer water- en chemisch resistent dan een polyester. Bijkomende motivatie voor een vinylester is de bestandheid tegen het hoge basische milieu van jong beton ($\text{pH} \geq 12$).

Zoals genoemd in §7.1.9 is glasvezel de goedkoopste vezel. Bij dit onderzoek is daarom gebruikt gemaakt van UD-glasvezels. Bovendien is het makkelijk verwerkbaar.

Daarnaast moet er rekening worden gehouden met het hoge basische milieu van beton ($\text{pH} \geq 12$) als de vezel direct in aanraking komen met het beton. Bij dit onderzoek kan dat het geval zijn met de parabeam 3D overlaagde kunststof plaatjes. Parabeam 3D is een glasweefsel dat bestaat uit twee deklagen die aan elkaar verbonden zijn met verticale afstandsdraden. Deze afstandsdraden zijn in de deklagen geweven en vormen zo een integrale sandwich structuur, hierover meer in §7.3.10. Het productblad van de toegepaste Parabeam 3D is opgenomen in bijlage E. Deklagen en afstandsdraden worden geïmpregneerd met hars voordat deze in contact komen met beton. Onbekend is of de impregnering van de afstandsdraden dan voldoende is om deze vezels alkali beschermd te maken.

Glasvezels die direct in contact komen met het beton moeten alkali resistent (AR) zijn. Het resistent maken tegen alkali wordt gedaan door zirkonia (ZrO_2) toe te voegen tijdens het productie proces van de glasvezels (www.concretenetwork.com).

Hierdoor wordt de glasvezel echter brosser en is het niet geschikt voor Parabeam. Alternatief is een speciale AR sizing, waardoor de vezels duurder worden. (Kleef, 2016)



Figuur 7.28: Parabeam 3D glasweefsel (Parabeam a zcl company)

7.5 Geselecteerde beton

Bij het kiezen van een betonmengsel wordt normaliter gekeken naar de vereiste druksterkte en naar de milieuklasse. Aan de hand van deze eisen wordt bepaald welk en hoeveel cement toegepast wordt. In de NEN-EN 1992-1-1, wordt in bijlage E hieronder te zien in figuur 7.25, een indicatie gegeven voor de minimum sterkteklasse waar het beton aan moet voldoen bij een bepaalde milieuklasse.

	Milieuklassen volgens tabel 4.1									
Corrosie										
	Corrosie ingeleid door carbonatatie				Corrosie ingeleid door chloriden *			Corrosie ingeleid door chloriden afkomstig uit zeewater		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Indicatieve sterkteklasse	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Betonschade										
	Geen risico	Aantasting door vorst/dooi-wisselingen					Chemische aantasting			
	X0	XF1	XF2		XF3		XA1	XA2	XA3	
Indicatieve sterkteklasse	C12/15	C30/37	C25/30		C30/37		C30/37		C35/45	

Figuur 7.29: Indicatieve minimum sterkteklasse

De milieuklassen XC, XD en XS richten zich op corrosie van de wapening door respectievelijk carbonatatie, chloriden niet afkomstig uit zeewater en chloriden afkomstig uit zeewater. Als het beton gewapend wordt met vezel versterkt kunststof, in plaats van staal, zijn deze milieuklassen niet van toepassing, omdat het kunststof niet corrodeert.

De milieuklassen XF en XA richten zich op schade van het beton zelf. Door vorst-dooiwisselingen kan water, dat zich in poriën in het beton bevindt, bevriezen en daardoor uitzetten. Hierdoor kunnen scheuren in het beton ontstaan. Met chemische aantasting wordt vooral aantasting door zuren bedoelt, die het basische beton aantasten.

Beton dat aan alle zijden is ingesloten door vezel versterkt kunststof kan ook niet worden aangetast door chemische stoffen. Ook zal er zich weinig water bevinden in de poriën van het beton, doordat het geen water aan kan zuigen door de kunststof schil.

De enige bepalende factor voor het te gebruiken beton is dus de druksterkte van het beton. Gebruikelijke betonsterkteklassen voor in situ beton zijn C25/30 à C35/45.

Voor het bepalen van de maximale korrelgrootte van de toeslagmaterialen wordt gekeken naar de wapeningsafstanden en de afmetingen van het te maken product. Maaswijdte van wapening is niet meer van toepassing, maar het beton moet het te maken product wel goed vullen. Hier moet dus de maximale korrelgrootte van het mengsel op aangepast worden.

Bij constructies waarbij het beton wordt gestort in een geprefabriceerde kunststof schil kan het lastig zijn om het beton te verdichten met trilnaalden. Daarom zal bij kunststof gewapende constructies de voorkeur uitgaan naar zelfverdichtend beton. Dit is beton wat niet mechanisch verdicht hoeft te worden, maar door het toevoegen van superplastificeerder en fijne toeslagmaterialen zelf optimale verdichting bereikt.

7.5.1 Beton toegepast bij de afschuif- en balkproeven

Toeslagmateriaal

Door de geringe afmetingen van de afschuifproefstukken was het toepassen van een betonmengsel met toeslagstoffen met een diameter tot 32 millimeter geen optie. Vooral bij de proefstukken met het paraboom materiaal was beton met heel fijn toeslagmateriaal nodig, aangezien de vezeltjes vrij dicht op elkaar staan. Daarom is ervoor gekozen om helemaal geen grind toe te passen, maar betonzand met een maximale korrelgrootte van 4 mm. Voor de andere proefstukken kon in principe wel een grotere korrel gebruikt worden, maar omdat de enige variabele in het onderzoek het oppervlak van het kunststof moest zijn, is ervoor gekozen om alle proefstukken met hetzelfde beton te maken. Volgens officiële begrippen is een mengsel met toeslagmateriaal dat kleiner is dan 4 mm geen beton, maar mortel. Dit is echter slechts een benaming, de eigenschappen zijn vergelijkbaar.

<i>Samenstellende delen</i>	<i>Vloeibaar</i>	<i>Verhard</i>
Cement en water	Cementlijm of cementpasta	Cementsteen
Cement + water + toeslagmateriaal ≤ 4 mm	Mortelspecie	Mortel
Cement + water + toeslagmateriaal $< \text{en} \geq 4$ mm	Betonspecie	Beton

Tabel 7.4: Benaming van verschillende samenstellingen

Cement

Als cement is gekozen voor portlandcement conform de aanbeveling bij deze toepassing in de USA: zie §7.3.10. Door portlandcement te gebruiken wordt tevens een hogere beginsterkte gerealiseerd, waardoor de proefstukken eerder beproefd kunnen worden. Het toegepaste cement is ENCI CEM I 42,5 N. Het productblad van dit cement is toegevoegd in bijlage F. Omdat het specifieke oppervlak van alleen zand vrij groot is ten opzichte van een mengsel met grind, moest er vrij veel cement gebruikt worden. De volumeverhouding zand - cement is gehouden op 3:1.

Water-cementfactor

Om het beton zo sterk mogelijk te maken is ervoor gekozen om de water-cementfactor zo laag mogelijk te houden. Voor elke kilo cement is 0,4 kilo water gebruikt, oftewel een water-cementfactor van 0,4.

Hulpstoffen

Bij een watercementfactor van 0,4 is het mengsel nauwelijks plastisch, dus slecht te verwerken. Daarom is een plastificeerder toegepast, namelijk Sika® BV 1 M con 36%. Het productblad van deze plastificeerder is toegevoegd in bijlage G. Van dit product is 0,2% van het cementgewicht aan het mengsel toegevoegd, door het te mengen met water.

In onderstaande tabel zijn de hoeveelheden van de gebruikte producten voor het maken van ongeveer dertig liter beton weergegeven:

product	hoeveelheid	eenheid
Zand 0-4 mm	40	liter
ENCI CEM I 42,5 N	13,3	liter
	16,1	kilogram
Water (40 % van het cementgewicht)	6,4	liter
Sika® BV 1 M con 36% (0,2 % van het cementgewicht)	32,2	gram

Tabel 7.5: Gebruikte ingrediënten voor het toegepaste beton

De druksterkte van het mengsel is bepaald door het drukken van kubussen. Deze kubussen worden gestort op hetzelfde tijdstip als de proefstukken. Op het moment dat de proefstukken getest worden, zijn ook de kubussen gedrukt, zodat de betondruksterkte op het moment van testen bekend is.

7.6 Beïnvloeding van de schuifsterkte in de interface tussen beton en VVK

Om de afschuifsterkte te beïnvloeden, moet eerst begrepen worden waardoor deze tot stand komt. De afschuifsterkte is direct afhankelijk van de hechting van het beton aan de vezel versterkt kunststof schil. Door de hechting te beïnvloeden wordt ook de afschuifsterkte beïnvloed. De hechting komt tot stand doordat het cement door middel van verschillende hechtingsmechanismen hecht aan het vezel versterkte kunststof.

De hechting van het beton aan de oppervlakte van de vezel versterkte plaat is te zien als een lijmverbinding. Bij een normale lijmverbinding bestaat de verbinding uit twee substraten met daartussen een hechtmiddel. Bij de hechting van het beton op het oppervlak van het vezel versterkte kunststof vormt het vezel versterkte kunststof het ene substraat en is het hechtmiddel het uithardende cement. Het tweede substraat wordt gevormd door het skelet van het beton.

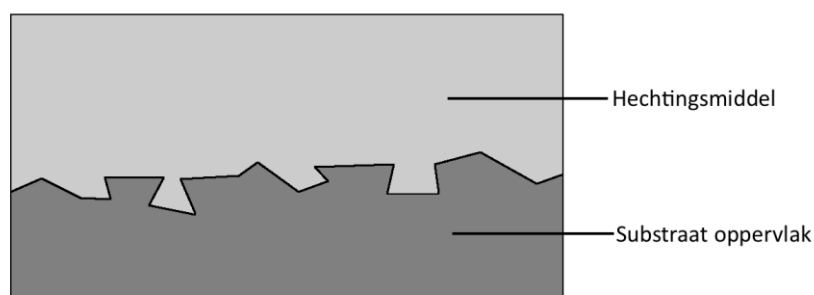
Bij lijmverbindingen staan twee begrippen centraal: adhesie en cohesie. Adhesiekrachten treden op tussen moleculen van twee verschillende materialen. Cohesiekrachten zijn aanwezig tussen de moleculen van één materiaal. Bij een lijmverbinding zijn er dus adhesiekrachten aanwezig tussen substraat en het hechtmiddel. Cohesiekrachten zullen aanwezig zijn tussen de moleculen van het hechtmiddel. Als een van deze mechanismen faalt, faalt de lijmverbinding.

Cohesie is alleen afhankelijk van de eigenschappen van het hechtmiddel, dus het cement. Adhesie is een wisselwerking tussen de eigenschappen van de substraten en het hechtmiddel, waarbij er verschillende hechtingsmechanismen te onderscheiden zijn (Ebnesajjad & Landrock, 2014).

Er zijn verschillende theorieën die het fenomeen adhesie proberen te beschrijven, maar er is niet één theorie die alle gevallen van adhesie verklaart. Combinaties van verschillende theorieën zijn dus vereist om alle gevallen te verklaren.

7.6.1 Mechanische adhesie theorie

De mechanische adhesie theorie (*'interlocking'*) verklaart het fenomeen adhesie door porositeit en oppervlakteruwheid van het substraat. Elk materiaal heeft, als het wordt bekeken op microscopisch niveau, een ruw oppervlak. Dit oppervlaktereliëf wordt door het hechtmiddel opgevuld, wat resulteert in haakweerstand tussen lijm en substraat.



Figuur 7.30: Mechanische adhesie

Afgezien van de oppervlakteruwheid en porositeit van het substraat oppervlak is de haakweerstand afhankelijk van het vullend vermogen van het hechtmiddel. Het hechtmiddel moet goed penetreren

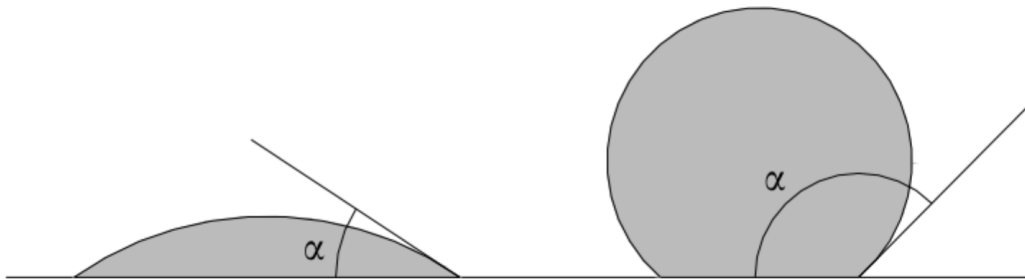
in de poriën en het reliëf van het substraat oppervlak. Dit vullend vermogen is direct gerelateerd aan de viscositeit van het hechtmiddel.

De mechanische adhesie theorie houdt geen rekening met de onverenigbaarheid (*'incompatibility'*) die kan bestaan tussen het hechtmiddel en het substraat. Het kan hechting aan substraten met lage ruwheid niet verklaren. Ook het gebrek aan hechting tussen ruwe substraatoppervlakken met onverenigbare lijm kan niet verklaard worden met deze theorie. (Lee, 1991)

7.6.2 Adsorptie theorie

De adsorptie theorie bestaat uit twee verschillende vormen van binding: fysisorptie en chemisorptie. Voordat adsorptie op kan treden moet het oppervlak van het substraat goed benat zijn (*'wetting'*). Benatting zegt iets over de gelijkmatige verdeling van het hechtingsmiddel over het oppervlak van het substraat. Vooral bij fysisorptie is dit belangrijk, omdat de krachten die bij deze vorm van adsorptie optreden slechts over heel kleine afstand actief zijn. Benatting is het evenwicht tussen de oppervlaktespanning van het hechtingsmiddel en de oppervlakte energie van het substraat.

Als het hechtingsmiddel een lagere oppervlaktespanning heeft dan de oppervlakte energie van het substraat, is het in staat om het oppervlak van het substraat goed te benatten. Dit wordt onder andere bedoeld met verenigbaarheid (*'compatibility'*) van het hechtingsmiddel en substraatoppervlak. Als het hechtingsmiddel een hogere oppervlaktespanning heeft dan de oppervlakte energie van het substraat, zal het er als een druppel bovenop liggen, waarbij de contacthoek tussen het substraatoppervlak en het hechtingsmiddel meer dan 90° zal zijn.



Figuur 7.31: Benatting: links goede benatting, contacthoek $< 90^\circ$; rechts slechte benatting, contacthoek $> 90^\circ$

Het verschil in oppervlaktespanning en oppervlakte energie zorgt er voor dat het substraatoppervlak trekt aan het hechtingsmiddel, waardoor al adhesie ontstaat. Voor deze theorie hoeft het hechtingsmiddel dus niet, zoals bij de mechanische theorie, te penetreren in het oppervlak van het substraat, de adhesie wordt gevormd door het contact tussen substraat en hechtingsmiddel.



Figuur 7.32: Close-up foto van waterdruppel op kunststof oppervlak

Zoals op bovenstaande foto te zien is liggen waterdruppels vrij bol op het kunststof oppervlak. De benatting van het kunststof zal dus niet optimaal zijn. (Ebnesajjad & Landrock, 2014) (Lee, 1991)

7.6.3 Fysisorptie theorie

Fysisorptie is een vorm van adsorptie. Als de oppervlakte van het substraat bij de adsorptie goed benat wordt, komen de moleculen van het hechtingsmiddel en het substraat zo dicht bij elkaar dat er intermoleculaire krachten ontstaan. Deze krachten staan ook wel bekend als Van der Waalskrachten. Deze krachten treden op tussen alle moleculen die heel dicht bij elkaar in de buurt zijn. Van der Waals kracht kan als het ware gezien worden als de zwaartekracht tussen moleculen.

Een andere intermoleculaire kracht die op kan treden zijn waterstofbruggen. Voor waterstofbruggen moet het molecuul een specifieke groep bevatten, namelijk een waterstofatoom gebonden aan een negatief geladen zuurstof-, stikstof- of fluoratoom. Het waterstofatoom wordt door deze binding sterk positief geladen. Hierdoor trekt het negatief geladen atomen van andere moleculen aan. (Ebnesajjad & Landrock, 2014) (Lee, 1991)

7.6.4 Chemisorptie theorie

Chemisorptie is een andere vorm van adsorptie. Bij deze vorm hecht het hechtmiddel aan het oppervlak van het substraat door chemische intermoleculaire bindingen. Hierbij verandert dus de moleculaire structuur van het oppervlak van het substraat en van het hechtmiddel. Intermoleculaire verbindingen zijn op te delen in covalente bindingen, ion bindingen en metallische verbindingen (hoewel de laatste twee strikt genomen geen moleculaire bindingen zijn omdat ionen en metalen geen moleculen hebben). Chemisorptie kan alleen ontstaan als de moleculen van het hechtmiddel en het substraat met elkaar kunnen reageren. (Ebnesajjad & Landrock, 2014) (Lee, 1991)

7.6.5 Diffusie theorie

De diffusie theorie stelt dat adhesie tussen polymeren plaatsvindt door de mobiliteit van de ketens in de polymeren. Bij goede verenigbaarheid tussen de polymeren kunnen de ketens van de materialen

in elkaars oppervlakten penetreren, waardoor verankering plaatsvindt. De mobiliteit van de ketens en mate van penetratie in het oppervlak wordt bepaald door het moleculaire gewicht. Korte polymeerketens hebben een hoge mobiliteit en kunnen het oppervlak makkelijker penetreren dan lange polymeerketens (Ebnesajjad & Landrock, 2014).

7.6.6 Elektrostatistische theorie

Deze theorie stelt dat de hechting plaatsvindt als gevolg van elektrostatistische effecten tussen de lijm en het hechtoppervlak. Tussen het kleefmiddel en hechtoppervlak vindt elektronen overdracht plaats. Hierdoor treden elektrostatistische krachten op in de interface tussen kleefstof en hechtoppervlak. Deze krachten zorgen voor hechting tussen de twee stoffen. (Ebnesajjad & Landrock, 2014)

7.6.7 Optimale hechtingsomstandigheden

Om de hechting zo optimaal mogelijk te maken moeten de omstandigheden voor bovenstaande hechtingsmechanismen zo optimaal mogelijk zijn. Dit betekent voor de verschillende hechtingsmechanismen het volgende:

- Mechanische hechting: Een oppervlak wat zo ruw en zo poreus mogelijk is;
- Benatting: een oppervlak met een hoge oppervlakte energie en een hechtmiddel met lage oppervlaktetension;
- Fysisorptie: Voor de Van der Waals krachten is een goede benatting belangrijk. Bij een ruw oppervlak is er meer oppervlak waaraan van der Waalskrachten kunnen ontstaan ten opzichte van een glad oppervlak, dus een ruw oppervlak zorgt voor meer fysisorptie;
- Chemisorptie: Chemisorptie is vooral afhankelijk van de materialen, deze moeten met elkaar reageren. Dit kan alleen door materiaalkeuze worden beïnvloedt. Door het opruwen van het oppervlak ontstaat er wel meer specifiek oppervlak waaraan de reacties kunnen plaatsvinden;
- Diffusie: Mobiliteit van de polymeerketens is belangrijk voor deze vorm van hechting. Korte ketens zijn mobieler dan lange ketens, maar lange ketens kunnen zich meer verankeren. Diffusie is dus afhankelijk van de eigenschappen van de polymeer en kan dus alleen door materiaalkeuze worden beïnvloedt;
- Elektrostatistische hechting: Elektrostatistische hechting is afhankelijk van hoe makkelijk de stoffen elektronen uitwisselen met elkaar. Dit is een materiaaleigenschap. Dit kan worden beïnvloedt door de materiaalkeuze.

7.6.8 Optredende adhesievormen

Om te weten hoe de afschuifsterkte te beïnvloeden is, is het interessant om te weten welke adhesiemechanismen op zullen treden tussen het kunststof en het beton.

Op basis van de materialen kan gezegd worden welke mechanismen niet op zullen treden. Diffusie zal niet optreden, omdat beton geen polymeer is. Chemisorptie zal ook niet optreden, omdat de gebruikte polymeer een hoge weerstand tegen alkalische omgeving heeft en dus niet zal reageren met het beton.

Mechanische adhesie, benatting en fysisorptie zullen wel optreden. Elektrostatische adhesie zal mogelijk optreden, maar deze vorm van adhesie levert slecht kleine hechtingskrachten, dus is niet erg interessant om veel onderzoek naar te doen.

7.6.9 Geselecteerde oppervlakten

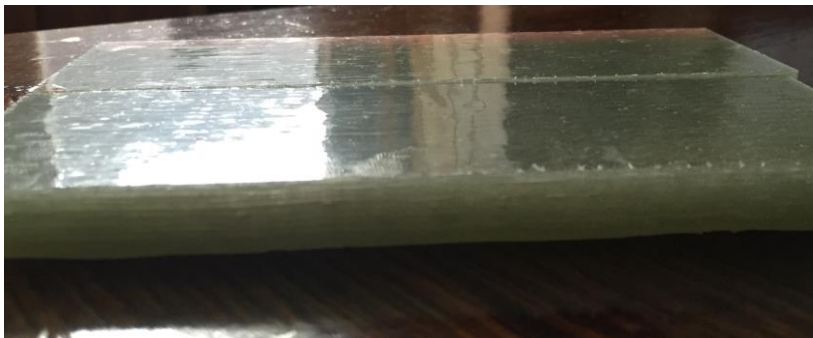
In dit onderzoek zijn zes verschillende oppervlakten getest op afschuiving:

- Glad oppervlak;
- Oppervlak opgeruwd door een grove peelply te gebruiken bij lamineren van het kunststof;
- Oppervlak opgeruwd door het kunststof na uitharden te schuren met korrel 60;
- Glad kunststof oppervlak dat vlak voor het beton storten ingesmeerd wordt met epoxy, het beton wordt dus tegen het nog niet uitgeharde epoxy aan gestort;
- Oppervlak van opengesneden Parabeam[®] 3d fabric;
- Oppervlak van het kunststof bij het lamineren ingestrooid met grof zand.

Onderstaand worden deze kort doorgenomen in relatie met bovenstaande hechtingstheorieën.

Glad oppervlak

Het gladde oppervlak ondergaat geen oppervlaktebewerking, dit is het referentieoppervlak voor de andere oppervlakken.



Figuur 7.33: Oppervlak gladde kunststof

Grove peelply

Door het toepassen van een grove peelply wordt het specifieke oppervlak vergroot. Hierdoor is er meer oppervlak waarop fysisorptie plaats kan vinden. Ook is het oppervlak ruwer, waardoor meer mechanische hechting zal ontstaan.



Figuur 7.34: Oppervlak proefstukken waarop peelply is toegepast

Geschuurd oppervlak

Door het schuren van het oppervlak van het kunststof wordt het specifieke oppervlak vergroot. Hierdoor is er meer oppervlak waarop fysisorptie plaats kan vinden. Ook zal er meer mechanische hechting optreden omdat het oppervlak ruwer is.

Zoals te zien op onderstaande foto is alleen geschuurd op de plek waar beton tegen het kunststof komt.



Figuur 7.35: Oppervlak van geschuurde proefstukken

Oppervlak voor storten behandeld met epoxy

Door het oppervlak van het kunststof voor het storten te behandelen met epoxy ontstaat er een extra lijmlaag tussen het beton en het kunststof. De epoxy hecht zich aan het kunststof een aan het verhardende beton, en het verhardende beton hecht zich aan de natte epoxy. Dit is dus niet een pure vorm van beton tegen een hard kunststof storten.

Oppervlak overlaagd met Parabeam 3D

Door het kunststof oppervlak te overlagen met opengeknipt Parabeam, voor productblad zie bijlage E, ontstaat er een borstelig oppervlak met kleine rechtopstaande vezeltjes van circa 8 millimeter hoog. Deze worden verankerd in het beton, als een soort kleine ankertjes. Hierdoor ontstaat mechanische verankering. Ook het specifieke oppervlak van het kunststof neemt toe, waardoor meer fysisorptie kan ontstaan.



Figuur 7.36: Oppervlak met Parabeam 3D

Instrooien van oppervlak met grof zand

Het instrooien van het kunststof oppervlak met grof zand (korrel tussen twee en vier millimeter) heeft als effect dat er meer specifiek oppervlak ontstaat, waardoor er meer fysisorptie kan ontstaan. Ook is het oppervlak ruwer, dus ontstaat er meer mechanische hechting.

Bij beton is bekend dat cement prima hecht aan zand, en het kunststof hecht ook prima aan het zand. Hierdoor wordt als het ware een tussenlaag gevormd waar beide materialen goed aan hechten.



Figuur 7.37: Oppervlak ingestrooid met zand 2-4 mm

8. Experimenteel onderzoek – opzet en resultaten

In dit hoofdstuk worden opzet en resultaten van experimentele proeven weergegeven. Met de resultaten wordt antwoord gegeven op de deelvragen 7 en 8 van dit onderzoek.

Na het onderzoeken van de verschillende hechtingstheorieën die zijn uitgelegd in §7.6, zijn er proeven ontworpen om de grootte van de afschuifspanning bij verschillende oppervlakten, in de interface, te berekenen en te bepalen (§8.1): van de drie ontwerpvarianten is alleen het gekozen ontwerp toegelicht. In §8.2 zijn de resultaten van de afschuifproeven te vinden.

In bijlage H is een fotocollage opgenomen van het maken en testen van de afschuifproefstukken.

Daarnaast zijn er twee I-liggers beproefd middels een driepunts-buigproef om inzicht te krijgen in de samenwerking van de gecombineerde materialen beton en vezel versterkt kunststof zoals toegepast in dit onderzoek. In respectievelijk §8.3 en §8.4 zijn het gekozen ontwerp en de resultaten van de beproefde I-liggers opgenomen.

In bijlage I is een fotocollage opgenomen van het maken en testen van de I ligger proefstukken.

Alle VVK delen van de proefstukken zijn gemaakt met behulp van handlamineren. Als basis voor het ontwerpen van de proefstukken is uitgegaan van het dictaat Composieten Basiskennis (Nijssen, 2013) en voor het berekenen van (CUR96). Voor het berekenen aan beton is uitgegaan van de (NEN-EN1992-1-1, 2011).

Verder zijn de beproevingsontwerpen gecontroleerd door Peter Bosman, docent onderzoeker op Hogeschool Windesheim en Wouter Claassen, hoofdconstructeur bij Witteveen+Bos. Voor het veilig omgaan en werken met harsen is er een Safety, Health en Environment training gevolgd, deze werd verzorgd door lector Dr. Margie Topp van het lectoraat Kunststoftechnologie van Windesheim.

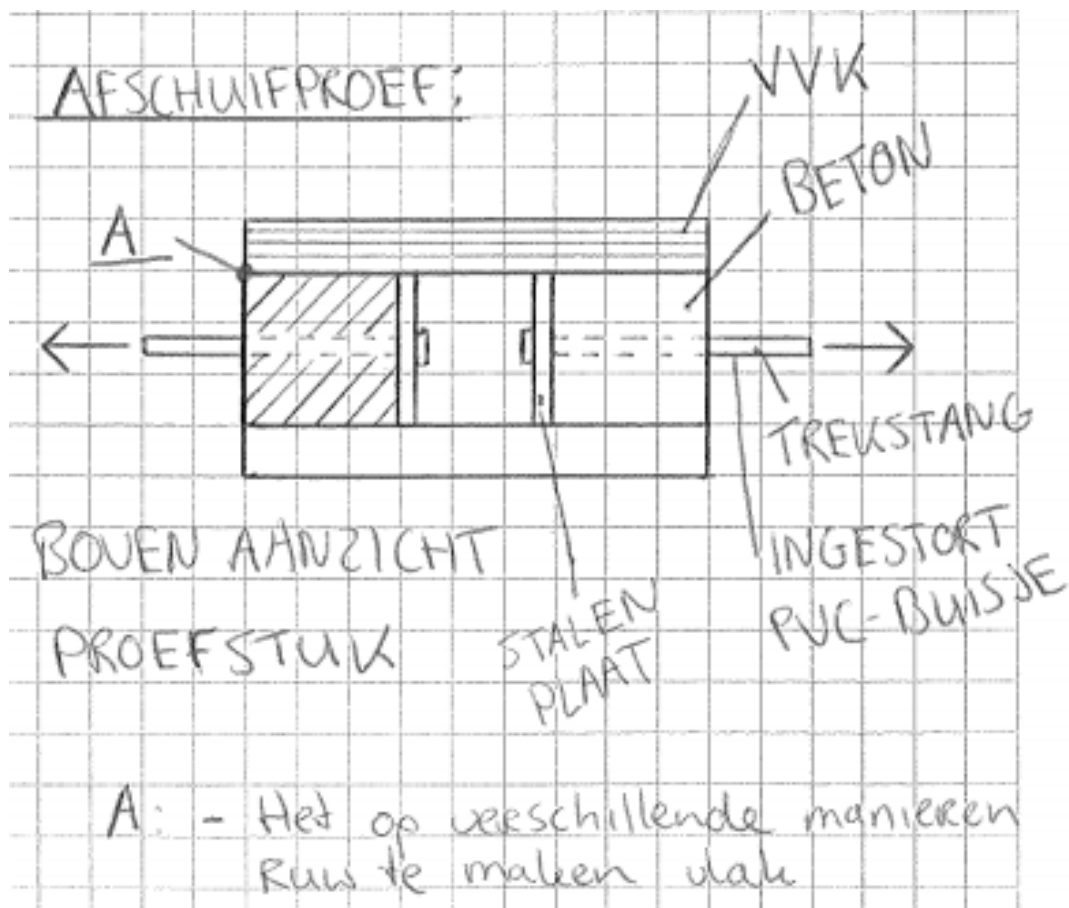
8.1 Ontwerp dubbele afschuifproef

Bij een enkele afschuifproef kunnen buiging en afpelspanning de afschuiving negatief beïnvloeden. Met de dubbele afschuifproef (zie figuur 8.1) kan inzicht verkregen worden in de schuifspanning in de interface; de krachten liggen in deze situatie immers op dezelfde werklijn. De bezwijkkracht is eenvoudig te vertalen naar afschuivingscapaciteit van de interface.

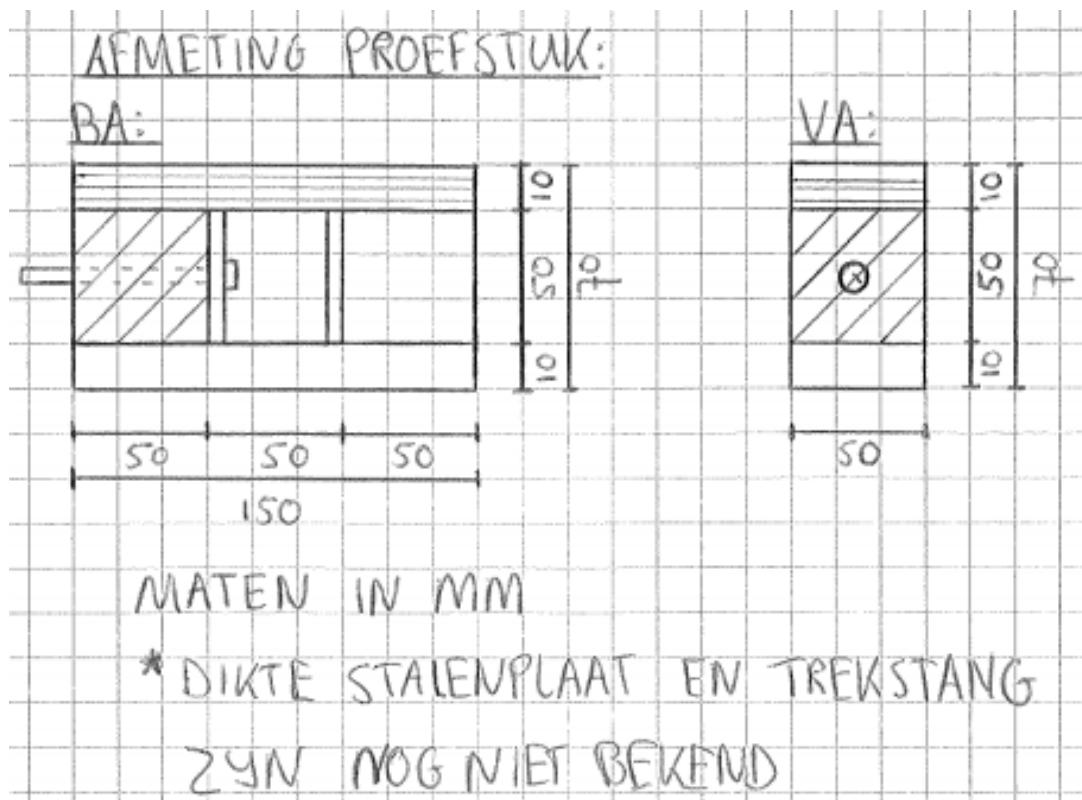


Figuur 8.1: Dubbele afschuivingsproef

Het schetsontwerp voor de dubbele afschuivingsproefstukken tussen beton en kunststof is te zien in de figuren 8.2 en 8.3.



Figuur 8.2: Ontwerp van het proefstuk voor de dubbele afschuivingsproef



Figuur 8.3: Afmetingen proefstuk

Zoals te zien in de schets bestaat het proefstuk uit de volgende onderdelen:

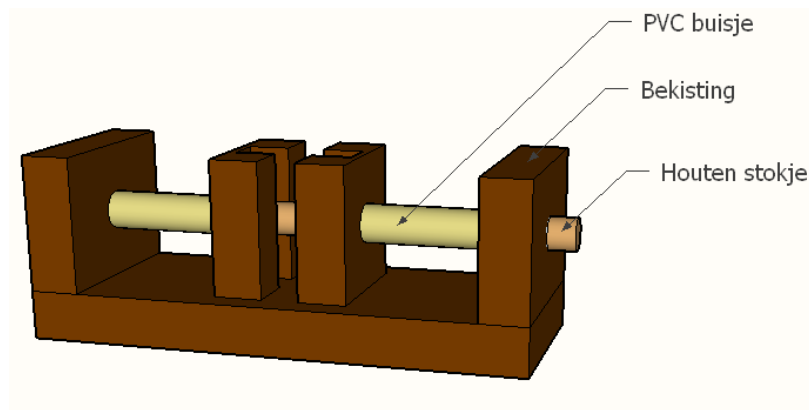
- Twee vezel versterkte kunststof plaatjes van 150x50x10mm;
- Twee blokjes beton van 50x50x50mm, (later tegen het VVK gestort);
- Twee stalen plaatjes van 45x45x5mm;
- Twee stalen trekstangen (M12).

De stalen trekstangen zijn toegepast om het beton op druk te belasten en het vezel versterkte kunststof op trek.

De kunststof plaatjes zijn één centimeter dik gemaakt, zodat ze niet zouden bezwijken op trek en er zo min mogelijk rek optreedt in het kunststof. Rek zorgt namelijk voor extra belasting op de interface tussen beton en kunststof.

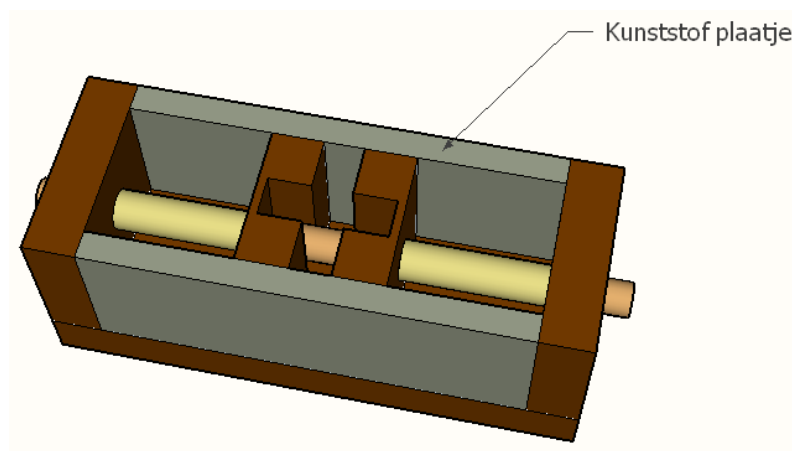
Om de trekstang te bevestigen is er een pvc-buisje in het beton mee gestort. De betrouwbaarheid van de resultaten hangt deels af van de uitlijning van de trekstangen.

Voor de uitlijning is gebruikt gemaakt van een houten stokje, die tijdens het storten van het beton door het gehele proefstuk zat. Na het storten van het beton kon het stokje eenvoudig verwijderd worden en daarmee ruimte creëren voor de trekstang.



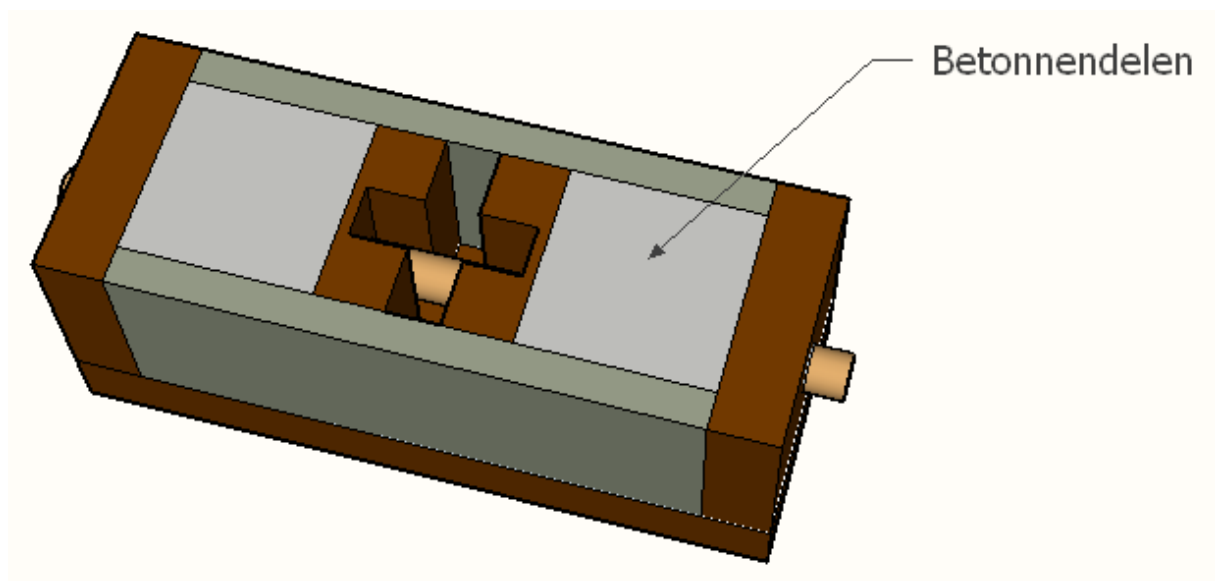
Figuur 8.4: Bekisting voor de proefstukken

De bekisting is zo niet helemaal gesloten. Dit is omdat de kunststof plaatjes, waar het beton tegen aan wordt gestort, ook de functie van bekisting hebben (figuur 8.5).

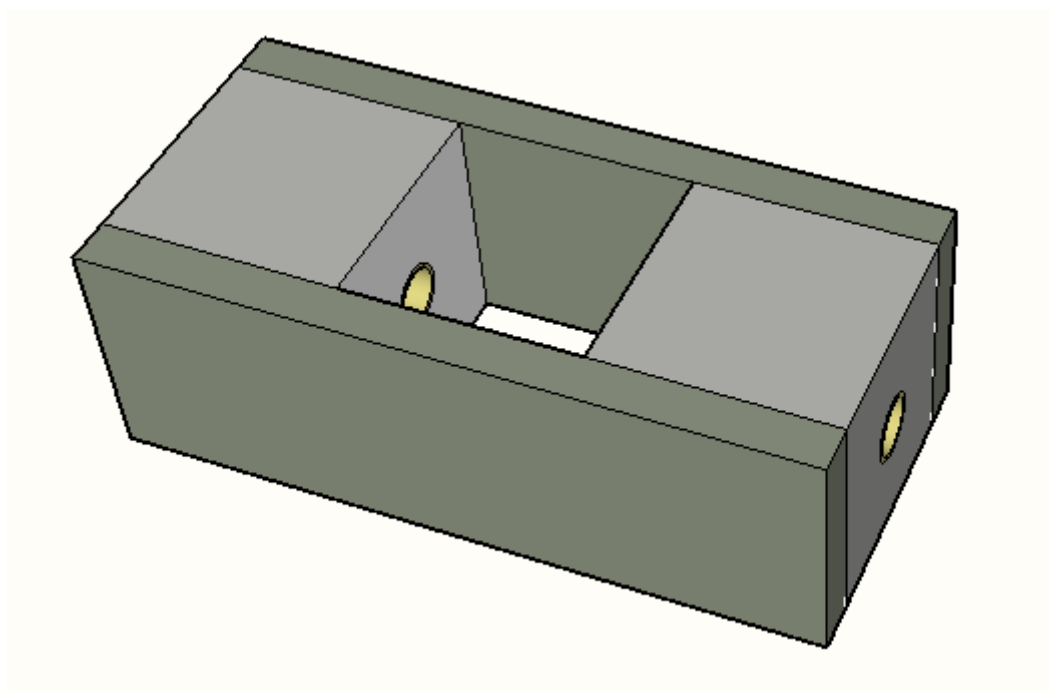


Figuur 8.5: Kunststof plaatjes tevens functionerend als bekisting

Van elk behandeld oppervlak, zoals besproken in §7.5.9, zijn drie proefstukken gemaakt. Dit betekent dat er in totaal 18 proefstukken zijn gemaakt en getest.



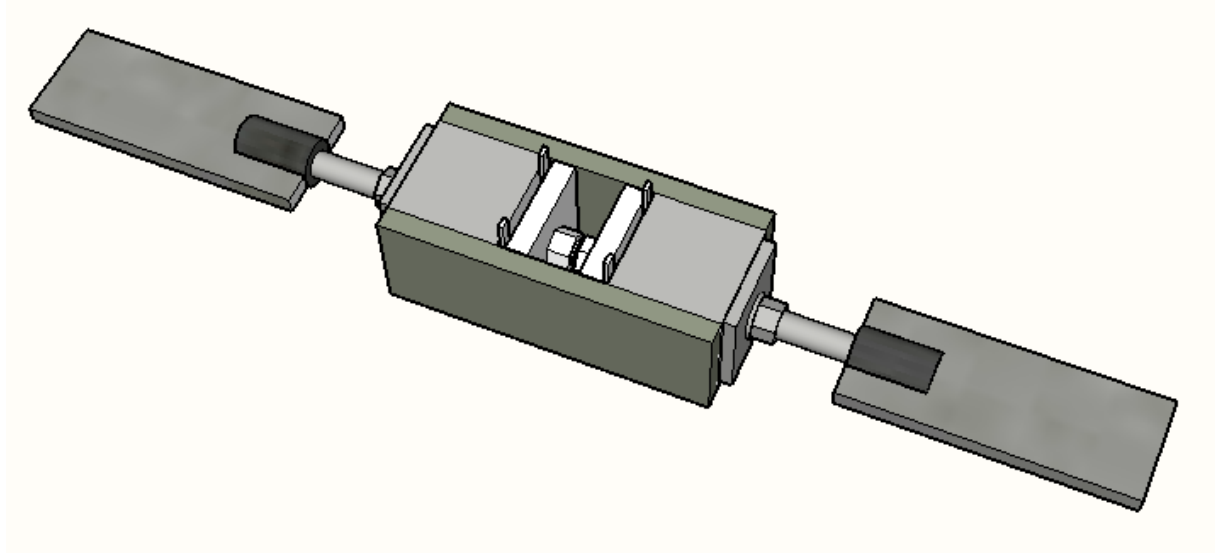
Figuur 8.6: Volledige bekisting gevuld met beton



Figuur 8.7: Proefstuk na ontkisten

De proefstukken zijn voorzien van een trekstang (figuur 8.8). De plaatjes aan beide uiteinden zijn zo gemaakt dat deze precies in de bekken van de trekbank passen. Op deze manier worden de gehele klemoppervlakken van de bekken gebruikt.

Bij de eerste drie testen bezweek het beton op trek i.p.v. de interface op afschuiving. Daarop is de proefopstelling aangepast.



Figuur 8.8: Aangepaste proefopstelling

De aangepaste proefopstelling (figuur 8.8) heeft extra stalen plaatjes aan de buitenzijden en dikkere stalen platen achter de ankers. Daarbij wordt de ankerkracht zover mogelijk naar de interfaces gebracht door tussenkomst van rubber oplegstroken, zodat zo min mogelijk buiging in het beton ontstaat. Door de extra buitenplaten is het beton volledig omsloten en bezwijkt daardoor niet voortgaand na een eventuele initiële buigscheur.

In de afbeeldingen 8.9 & 8.10 is de definitieve proefopstelling en een bezwiken proef te zien. Hier is goed te zien dat het beton intact is gebleven en het proefstuk op afschuiving is bezwiken. De resultaten met deze definitieve proefopstelling zijn te vinden in de volgende paragraaf.



Figuur 8.9: Definitieve proefopstelling



Figuur 8.10: Een op afschuiving bezwiken proefstuk

8.2 Resultaten afschuifproeven

In deze paragraaf zijn de resultaten van de afschuifproeven gepresenteerd in tabel 8.1a), b) en c).

Glad oppervlak:

Test nr.	Bezwijkkracht (N)	Schuifspanning (N/mm ²)
1	2425	0,49
2	3629	0,73
Gemiddelde	3027	0,61
Standaard Deviatie n=2	851	0,17
Standaard Deviatie n=8		0,13

Geschuurd oppervlak:

Test nr.	Bezwijkkracht (N)	Schuifspanning (N/mm ²)
1	6554	1,31
2	5397	1,08
3	5022	1,00
Gemiddelde	5657	1,13
Standaard Deviatie n=3	798	0,16
Standaard Deviatie n=12		0,14

Tabel 8.1 a): Resultaten afschuifproeven

Oppervlak ingesmeerd met epoxy:

Test nr.	Bezwijkkracht (N)	Schuifspanning (N/mm ²)
1	8814	1,76
2	7804	1,56
3	4768	0,95
Gemiddelde	7128	1,43
Standaard Deviatie n=3	2105	0,42
Standaard Deviatie n=12		0,36

Peelply oppervlak:

Test nr.	Bezwijkkracht (N)	Schuifspanning (N/mm ²)
1	2953	0,59
2	10530	2,11
3	7989	1,60
Gemiddelde	7157	1,43
Standaard Deviatie n=3	3856	0,77
Standaard Deviatie n=12		0,66

Tabel 8.1 b): Resultaten afschuifproeven

Oppervlak ingestrooid met grind:

Test nr.	Bezwijkkracht (N)	Schuifspanning (N/mm ²)
1	9035	1,81
2	6024	1,20
3	7754	1,55
Min	7604	1,52
Standaard Deviatie n=3	1511	0,30
Standaard Deviatie n=12		0,26

Parabeam oppervlak:

Test nr.	Bezwijkkracht (N)	Schuifspanning (N/mm ²)
2	12410	2,48
4	12370	2,47
6	13580	2,72
Gemiddelde	12786	2,56
Standaard Deviatie n=3	687	0,14
Standaard Deviatie n=12		0,12

Tabel 8.1 c): Resultaten afschuifproeven

Bij proefstukken met het oppervlak overlaagd met parabeam scheurde eerst het beton, steeds bij een kracht van ongeveer 9500 N. Door het extra stalen plaatje tegen de buitenkant was er echter zo'n samenhang dat er doorgetrokken kon worden tot ook de interface bezweek.

De spanning in de interface is verkregen door de trekkracht te delen door de belaste oppervlakte van $2 * 50 * 50 = 5.000 \text{ mm}^2$.

Elk proefstuk kent 4 afschuifvlakken. De karakteristieke waarde is bepaald met n=12 (of 8) omdat deze met n=4 (of 2) in sommige gevallen zelfs onder 0 komt. Zie bijlage K.

Tijdens het storten van het beton tegen de kunststof oppervlakken zijn ook beton kubussen gestort, dit om de druksterkte van het beton te bepalen. Op dezelfde dag dat de afschuifproeven gedaan zijn, zijn ook de kubussen op druk getest. De resultaten zijn opgenomen in tabel 8.2.

Kubusnummer	Bezwijkkracht (kN)	Druksterkte (N/mm ²)
1	945	42,0
2	987	43,9
3	899	39,9
4	974	43,3
5	993	44,2
	Gemiddelde	42,66
	Standaarddeviatie	1,76
	Karakteristieke waarde	39

Tabel 8.2: Resultaten drukproef beton behorend bij afschuifproeven

In NEN-EN 1992-1-1 artikel 6.2.5 wordt een formule gegeven voor de afschuifweerstand in het aansluitvlak tussen op verschillende tijdstippen gestort beton. Het volledige artikel is bijgevoegd in bijlage J. Hieronder is de vereenvoudigde versie voor ongewapend beton zonder normaalkracht gegeven:

$$V_{Rdi} = c * f_{ctd}$$

V_{Rdi} = de rekenwaarde van de afschuifwaarde in het aansluitvlak

c = een factor die afhangt van de ruwheid van het aansluitvlak

f_{ctd} = de rekenwaarde van de treksterkte van het beton

Deze formule is ook toegepast op het storten van beton tegen kunststof oppervlakken.

In de norm wordt gerekend met de f_{ctd} . Deze is als volgt gedefinieerd:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c}$$

γ_c is de materiaalfactor voor beton, deze is gelijk aan 1,5. Deze factor houdt onder meer rekening met het feit dat de sterkte een lagere waarde aan kan nemen dan de karakteristieke waarde (de aangenomen 5% ondergrens) en model- en uitvoeringsonzekerheden. Deze moet echter niet worden meegenomen bij het vergelijken van de c -waarde, alleen bij dimensioneren van constructies.

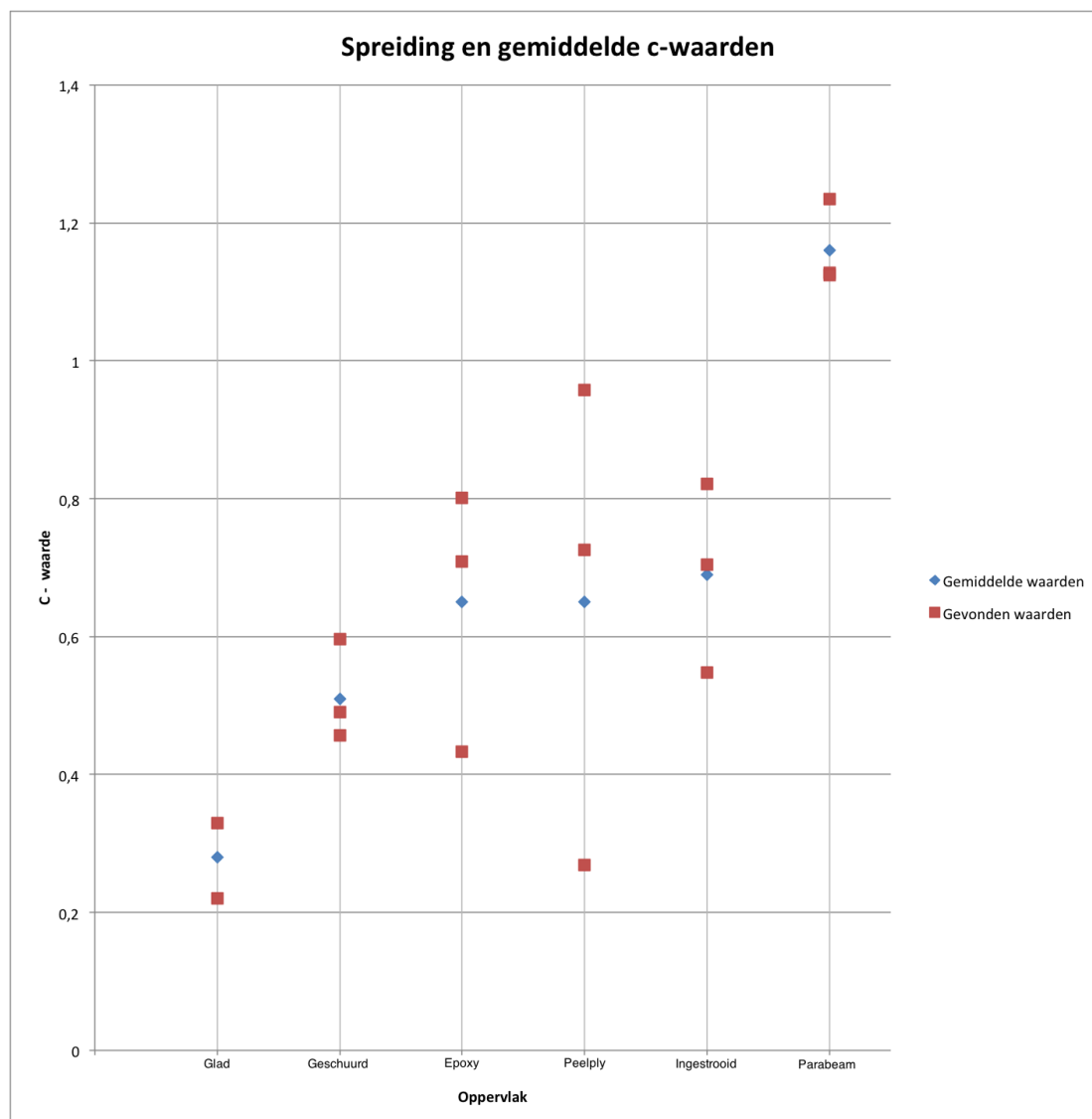
Door de gevonden afschuifspanningen in de interface te delen door de $f_{ctk,0,05}$ wordt de c voor de kunststof oppervlakken gevonden. De $f_{ctk,0,05}$ staat voor de karakteristieke ondergrens van de treksterkte van beton. Voor beton C32/39 is deze gelijk aan 2,1 N/mm².

(NEN-EN1992-1-1, 2011)

De waarden van c van de kunststof oppervlakken bij de proeven zijn opgenomen in tabel 8.3 en weergegeven in figuur 8.11.

Nummer	Oppervlak	Gemiddelde	Standaard Deviatie	Variatie coëfficiënt	Karakteristieke waarde
1	Glad	0,29	0,06	21%	0,17
2	Geschuurd	0,54	0,07	12%	0,42
3	Epoxy	0,68	0,17	25%	0,37
4	Peelply	0,68	0,31	46%	0,12
5	Ingestrooid	0,72	0,12	17%	0,50
6	Parabeam	1,22	0,06	5%	1,11

Tabel 8.3: Resultaten afschuifproeven uitgedrukt in c - statistisch



Figuur 8.11: Waarden voor de factor c van verschillende oppervlakken

Ter vergelijking:

In NEN-EN 1992-1-1 artikel 6.2.5 zijn waarden gegeven voor c in geval beton tegen beton wordt gestort. Deze is ingedeeld in vier categorieën: zeer glad, glad, ruw en geprofileerd.

Zeer glad: Een oppervlak gestort tegen een bekisting in staal, kunststof of speciaal bewerkt hout; $c = 0,025$ tot $0,10$

Glad: Door een glijbekisting of extrusie gevormd oppervlak, of een vrij oppervlak zonder verdere behandeling na het trillen; $c = 0,20$

Ruw: Een oppervlak met ruwheden van tenminste 3 mm en tussenafstanden van ongeveer 40 mm, verkregen door harken, zichtbaar zijn van toeslagmateriaal of andere methoden die een soortgelijk gedrag opleveren; $c = 0,40$

Geprofileerd: Een oppervlak met vertandingen; $c = 0,50$

(NEN-EN1992-1-1, 2011)

Deze gemeten waarden zijn allemaal hoger dan de gegeven waarden in de eurocode. De karakteristieke waarden niet allemaal.

Voor het oppervlak ingesmeerd met epoxy geldt “bij een goede voorbereiding van het betonoppervlak zal de hechtsterkte gelijk zijn aan de betontreksterkte” (CUR-aanbeveling-91) : ‘Versterken van gewapend betonconstructies met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening’. Ofwel beton is maatgevend en niet de gelijmde interface.

Deze bovengrens blijkt niet geheel uit figuur 8.11 in de vergelijking tussen epoxy en de andere oppervlaktes (behoudens Parabeam). Mogelijk komt dit door het gering aantal meetwaarden en bieden grotere proefaantallen toch bevestiging van deze bovengrens.

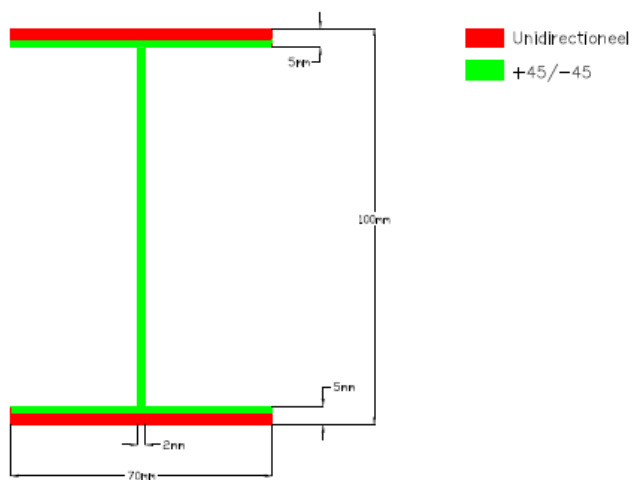
8.3 Ontwerp buigproef

Naast de afschuifproeven zijn er twee driepunts-buigproeven gedaan met balkjes, één met een VVK I-ligger waarbij de ruimte tussen de flenzen gevuld was met beton en één met alleen een VVK I-ligger. Dit om de invloed op stijfheid van de liggers te bepalen en de samenwerking tussen de materialen na te gaan op een grotere schaal. De met beton gevulde ligger is ingestrooid met zandkorrels 2-4mm.

De overspanning bij de proeven is 1,0m. Voor de liggers geldt $b \times h = 70\text{mm} \times 100\text{mm}$.

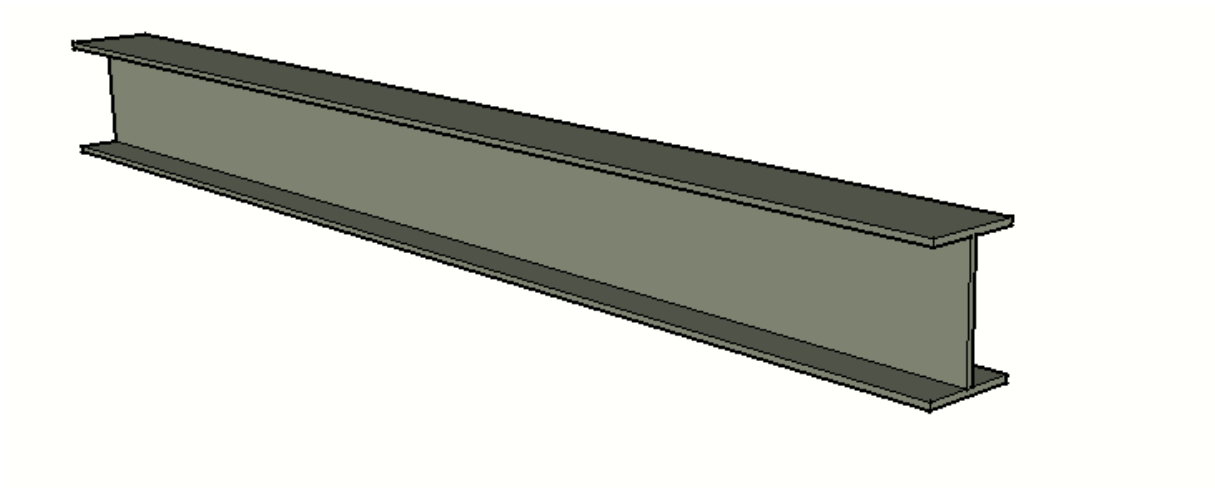


Figuur 8.12: De drukbank van Windesheim

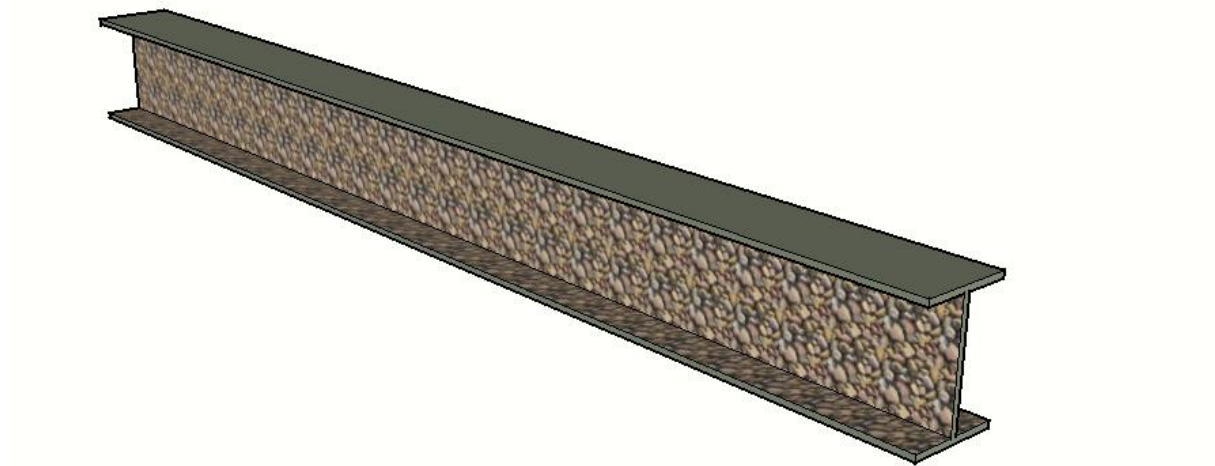


Figuur 8.13: Resulterende doorsnede (I)

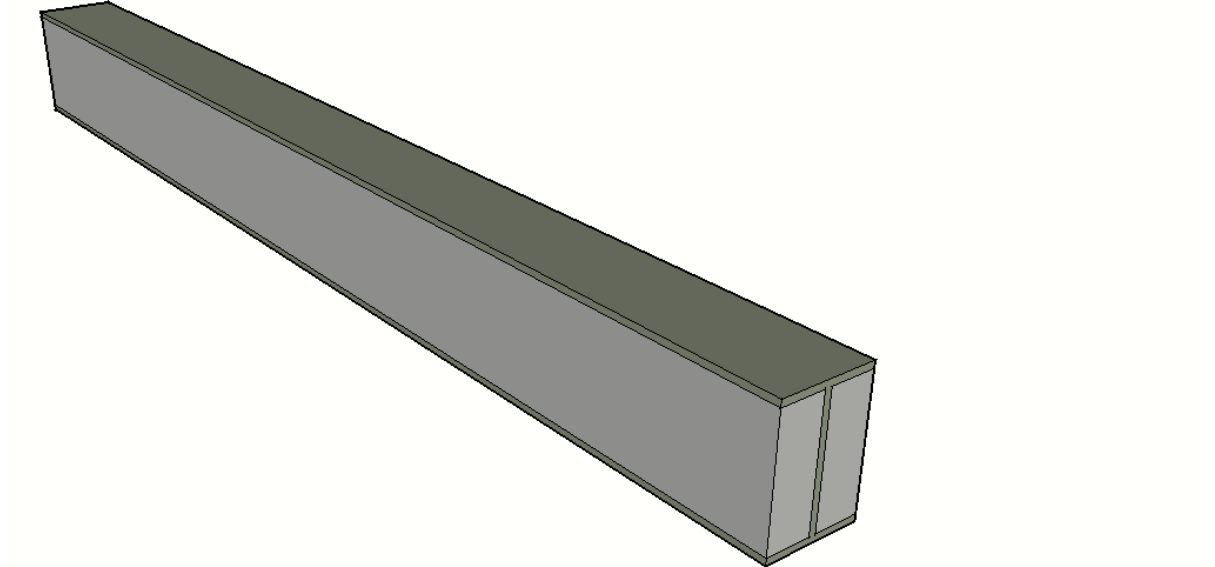
De vezels in het 2,0 mm dikke lijf zijn onder $\pm 45^\circ$ geplaatst en de hoek omgevouwen bij de flenzen. De overige vezels zijn uni-directioneel (UD). De flenzen zijn 5,0 mm dik. Het vezelvolumegehalte bedraagt circa 50%.



Figuur 8.14: VVK ligger



Figuur 8.15: VVK ligger ingestrooid



Figuur 8.16: VVK ligger ingestrooid en gevuld met beton

8.4 Resultaten buigproeven

In het hier onder volgende hoofdstuk zijn de resultaten opgenomen van de beproefde I-liggers zoals weergegeven in figuren 8.16 en 8.18.

Het I-profiel van alleen kunststof bleek erg kipevoelig (zie figuur 8.19) door het dunne lijf. Bij grotere krachten tordeerde het profiel en schoot zelfs onder de drukbank weg. Daarom is er slechts één waarde van doorbuiging en kracht, zoals te vinden in tabel 8.1.



Figuur 8.17: Kipevoeligheid kunststof balk

Doorbuiging (mm)	Kracht (kN)
4,50	12,00

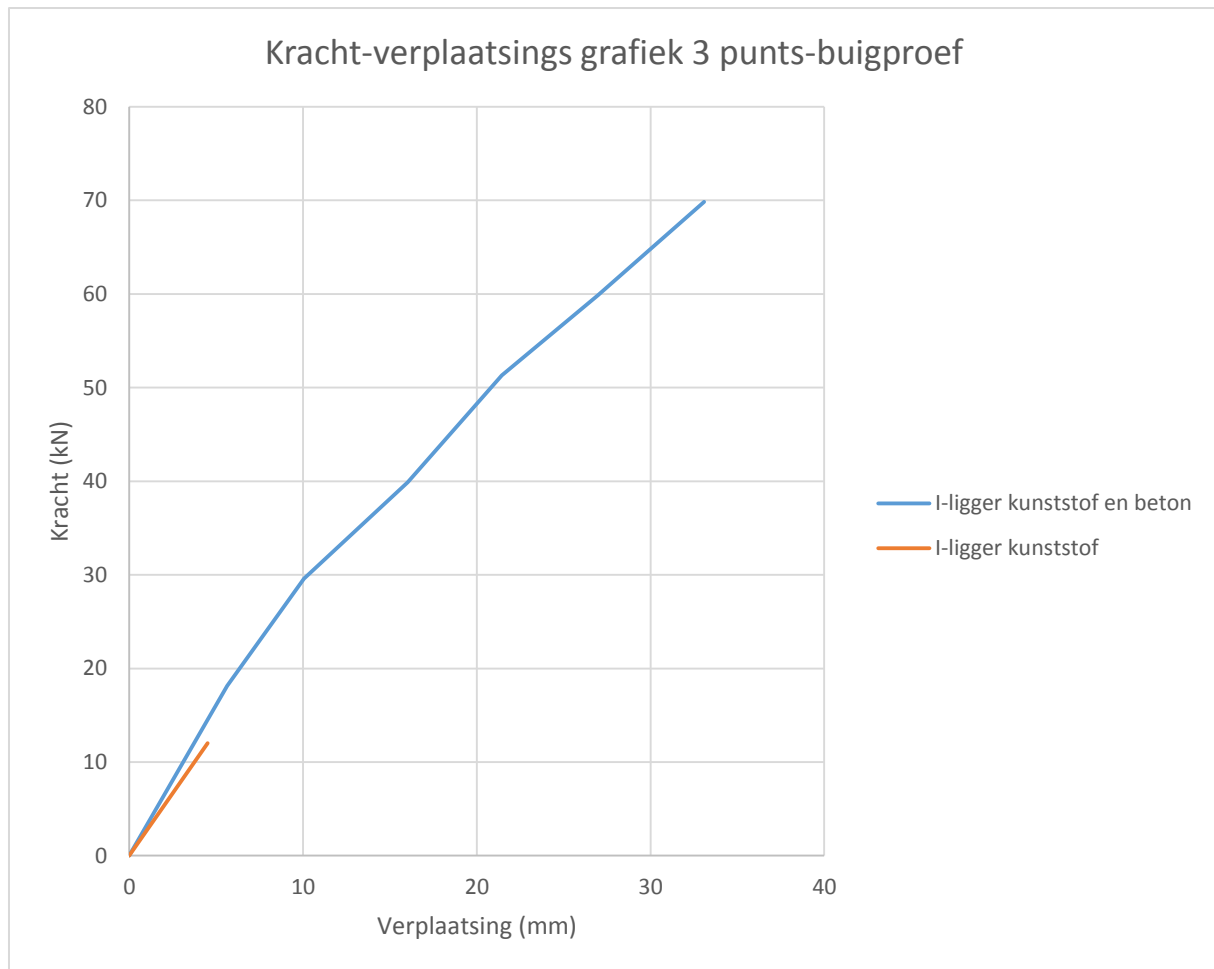
Tabel 8.4: Resultaten driepunts-buigproef zonder beton

De ligger met beton kon grotere krachten en vervormingen weerstaan (zie figuur 8.121). In tabel 8.2 zijn de resultaten te vinden voor de ligger met beton.

Doorbuiging (mm)	Kracht (kN)
5,63	18,14
10,05	29,59
16,03	39,87
21,44	51,32
26,97	59,86
33,09	69,85

Tabel 8.5: Resultaten driepunts-buigproef met beton

De resultaten van beide liggers zijn grafisch weergegeven in figuur 8.20.



Figuur 8.18: Resultaten uitgezet in een grafiek



Figuur 8.1: Doorbuiging I-balk gevuld met beton

Visuele waarnemingen

Bij het belasten van het balkje met beton in de buigproef ontstond er een bekend scheurenpatroon in het beton. Deze scheuren ontstaan door trek in het beton. Als het VVK en het beton niet zouden samenwerken zouden enkele grote scheuren in de betondoorsnede ontstaan. Er ontstonden echter, zoals op onderstaande foto te zien is, meerdere kleine scheuren (h.o.h. ruwweg 20 à 30mm). Dit scheurenpatroon is ook te zien bij traditioneel staalgewapend beton. Het optredende scheurenpatroon duidt op constructieve samenwerking tussen VVK en beton.



Figuur 8.202: Scheurenpatroon in het belaste beton

Interpretatie sterkte

Bezwijken wordt bereikt bij 69,85 kN, dit komt overeen met een buigend moment van 17,46 kNm. Indien beton wordt verwaarloosd kan de 17,46 kNm worden teruggerekend naar een rek van -1,75% en +1,75% in de uiterste vezels. De karakteristieke bezwijkrekken van UD-lamellen zijn -1,3% en +1,9% [CUR 96 achtergrondrapport]. De karakteristieke druk bezwijkrek wordt zonder meenemen van het beton dus fors overschreden.

Indien beton wordt meegerekend kan de 17,46 kNm worden teruggerekend naar een rek van -1,2% en +1,8% in de uiterste vezels. Het bezwijken strookt dus met de literatuurwaarden voor bezwijkrekken, bovendien zijn beide bezwijkrekken uitgenut. De karakteristieke druk bezwijkrek van beton is -0,35% (plastisch vanaf -0,175%, zie ook figuur 8.25). Deze bezwijkrek wordt fors overschreden. Mogelijk is de plastische tak van beton op druk groter bij omsloten beton.

Interpretatie stijfheid

Met onderstaande formule kan voor een driepunts-buigproef de buigstijfheid EI worden afgeleid:

$$w = \frac{F * l^3}{48 * EI}$$

waarin

w = doorbuiging in mm

F = kracht in N

l = overspanning in mm

E = elasticiteitsmodulus in N/mm²

I = oppervlaktetraagheidsmoment in mm⁴

Hieruit volgen de onderstaande waarden voor EI:

	doorbuiging [mm]	kracht [N]	EI [Nmm ²]
zonder beton	4,5	12.000	55.555.555.556
met beton	5,63	18.140	67.125.518.058
	10,05	29.590	61.339.137.645
	16,03	39.870	51.816.905.802
	21,44	51.320	49.867.848.259
	26,97	59.860	46.239.648.993
	33,09	69.850	43.977.284.174

Tabel 8.6: Buigstijfheid I-profielen

Met behulp van de regel van Steiner is de buigstijfheid van de balkjes tevens berekend. Hierbij is uitgegaan van een vezelvolumegehalte van 50%, de stijfheid van de hars is verwaarloosd. De elasticiteitsmodulus van glasvezels is 72.000 N/mm². Van het composiet is de elasticiteitsmodulus dus 50% x 72.000 = 36.000 N/mm². Voor de 45°/-45° vezels is de elasticiteitsmodulus gecorrigeerd met √2, omdat de vezels niet in de hoofdrichting van de overspanning liggen.

E_i = elasticiteitsmodulus van het onderdeel

b_i = breedte van het onderdeel

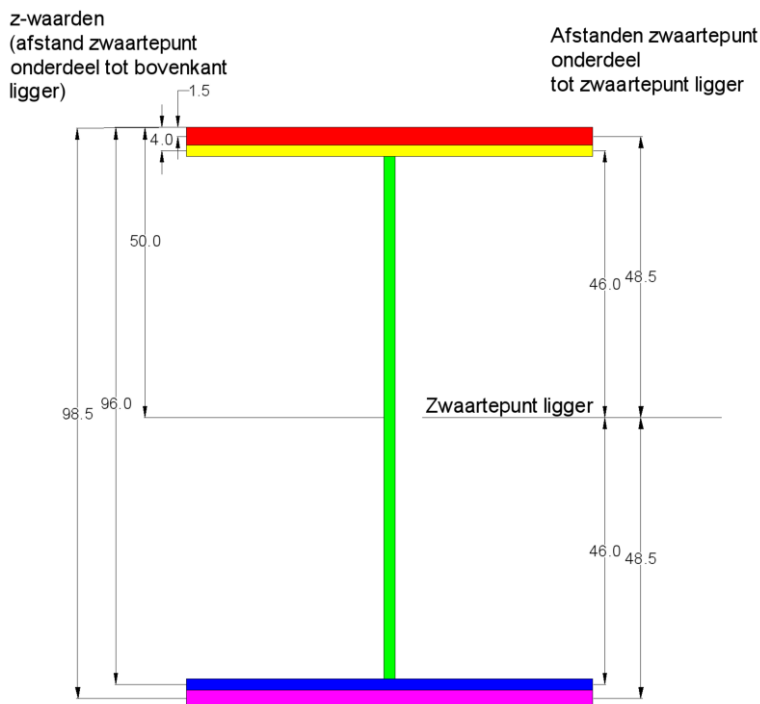
h_i = hoogte van het onderdeel

A_i = oppervlakte van het onderdeel

z_i = afstand van het zwaartepunt van het onderdeel tot de zwaartepunt geheel

$E_i I_i$ = buigstijfheid van het onderdeel, waarbij $I_i = b_i h_i^3 / 12$

$A_i \cdot z_i^2 \cdot E_i$ = verschuivingsterm van het onderdeel t.o.v. het geheel



Figuur 8.21: Zwaartepunten en afstanden ligger zonder beton

Steiner berekening voor kunststof balkje zonder beton:

onderdeel	E_i	b_i	h_i	A_i	z_i	$E_i I_i$	$A_i \cdot z_i^2 \cdot E_i$	
UD bovenflens	36.000	70	3	210	-48,5	5.670.000	17.783.010.000	
45/-45 bovenflens	25.456	70	2	140	-46,0	1.187.939	7.541.039.263	
45/-45 lijf	25.456	2	90	180	0,0	3.092.885.061	0	
45/-45 onderflens	25.456	70	2	140	+46,0	1.187.939	7.541.039.263	
UD onderflens	36.000	70	3	210	+48,5	5.670.000	17.783.010.000	Totale EI :
						3.106.600.940	50.648.098.526	53.754.699.466

Tabel 8.7: Berekende buigstijfheid kunststof I-profiel

De berekende waarde van de buigstijfheid ($EI = 53,75 \text{ kNm}^2$) van het kunststof balkje zonder beton komt goed overeen met de uit de meting afgeleide waarde ($EI = 55,55 \text{ kNm}^2$).

Uit drukproeven van beton dat gebruikt is voor de I-ligger met beton blijkt dat de druksterkte rondom C25/30 ligt. Hierbij hoort een E-modulus van 31.000 N/mm^2 .

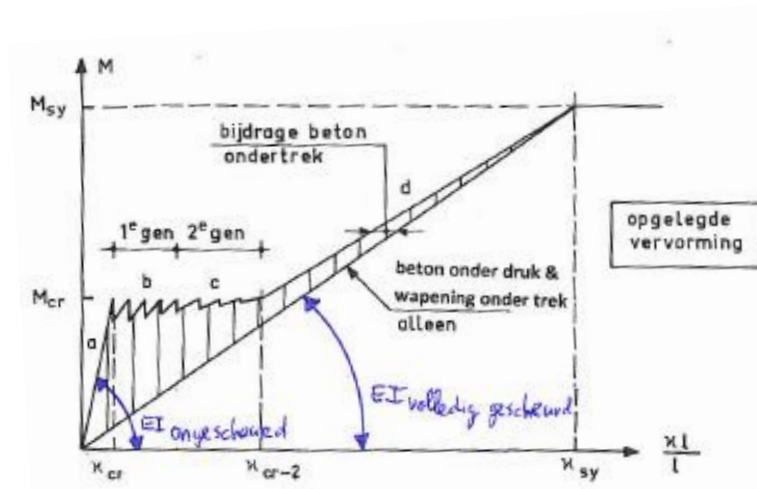
Steiner voor kunststof balkje met ongescheurd beton:

onderdeel	E_i	b_i	h_i	A_i	z_i	$E_i I_i$	$A_i * z_i^2 * E_i$	
UD bovenflens	36.000	70	3	210	-48,5	5.670.000	17.783.010.000	
45/-45 bovenflens	25.456	70	2	140	-46,0	1.187.939	7.541.039.263	
45/-45 lijf	25.456	2	90	180	0	3.092.885.061	0	
45/-45 onderflens	25.456	70	2	140	+46,0	1.187.939	7.541.039.263	
UD onderflens	36.000	70	3	210	+48,5	5.670.000	17.783.010.000	
Beton druk & trek	31.000	68	90	6120	0	128061000000	0	Totale EI:
						131.167.600.940	50.648.098.526	181.815.699.466

Tabel 8.8: Berekende buigstijfheid I-profiel met beton zonder rekening te houden met scheuren beton

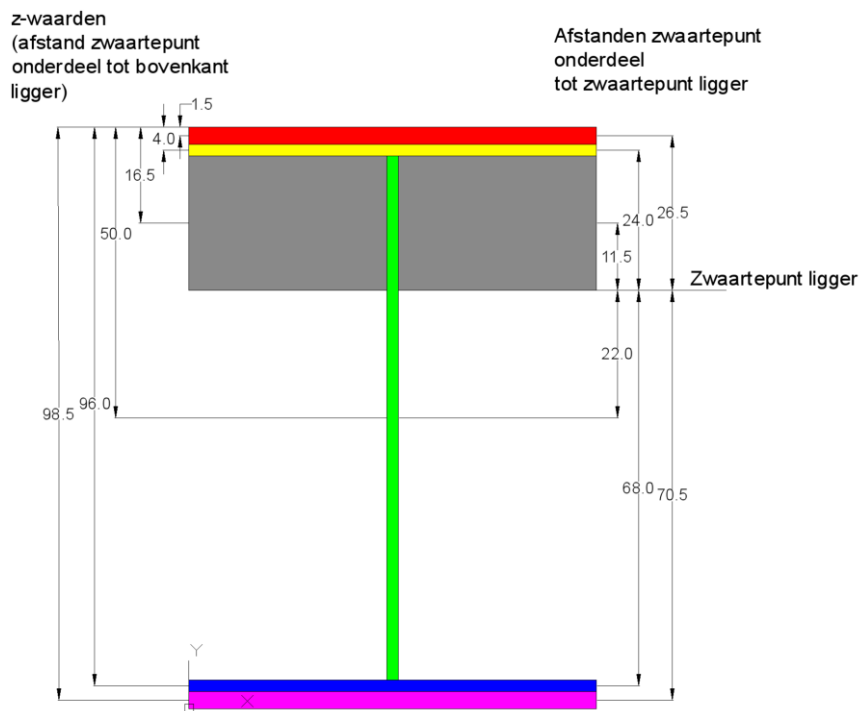
De berekende stijfheid van het balkje met ongescheurd beton ($EI = 181,8 \text{ kNm}^2$) is bijna 3 maal zo hoog als de uit de meting afgeleide waarde ($EI = 67,1 \text{ kNm}^2$). Dit komt omdat het beton bij 4,5kNm al lang gescheurd is. Immers bij 4,5kNm zou de trekspanning in het ongescheurde beton $(4,5 * 10^6) * 45 * 31.000 / (181,8 * 1^9) = +34,5 \text{ N/mm}^2$ zijn, terwijl C25/30 scheurt van 1,8 tot 3,3 N/mm^2 . Het scheurmoment met $f_{cm} = 2,6 \text{ N/mm}^2$ bedraagt $M_{cr} = 0,34 \text{ kNm}$ ($F = 1,4 \text{ kN}$).

Vervolgens is een doorsnede berekening gemaakt m.b.v. Steiner waarbij het beton onder trek is verwaarloosd. De verdelingsfactor $1 - \zeta = 0,5(M_{cr}/M)^2 = 0,5(0,34/4,5)^2 = 0,003$ (NEN-EN1992-1-1, 2011) geeft ook aan dat het betondeel onder trek (tension stiffening) verwaarloosd kan worden bij 4,5 kNm.



Figuur 8.22: Moment-kromming diagram gewapend beton

Hierdoor verschuift het zwaartepunt van de totale balk naar boven. Met een iteratieve berekening zijn de hoogte van de drukzone vastgesteld. De hoogte van de drukzone is $5 + 23 = 28 \text{ mm}$.



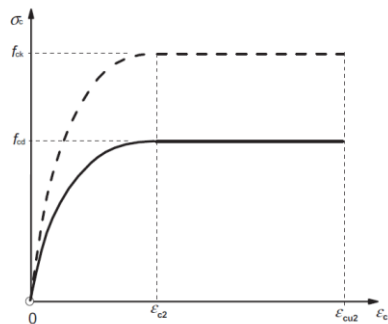
Figuur 8.23: Zwaartepunt en afstanden ligger met drukdeel beton

Onderdeel	E_i	b_i	h_i	A_i	z_i	E_i	$A_i \cdot z_i^2 \cdot E_i$	
UD bovenflens	36.000	70	3	210	-26,5	5.670.000	5.483.273.848	
45/-45 bovenflens	25.456	70	2	140	-24,0	1.187.939	2.127.220.725	
45/-45 lijf	25.456	2	90	180	+22	3.092.885.061	2.131.589.494	
45/-45 onderflens	25.456	70	2	140	+69,0	1.187.939	16.270.663.680	
UD onderflens	36.000	70	3	210	+70,5	5.670.000	37.116.632.620	
beton drukdeel	31.000	68	23	1.593	-34,0	2.259.875.725	6.779.627.176	Totale EI
						5.366.476.665	69.909.007.543	75.275.484.208

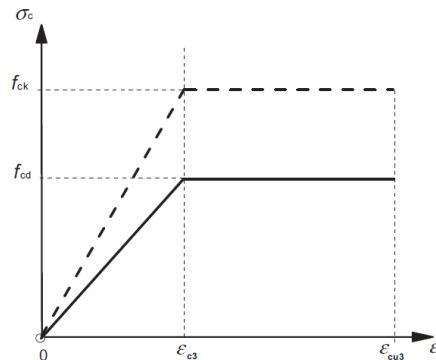
Tabel 8.9: Berekende buigstijfheid kunststof I-profiel met ongescheurde betondeel

De berekende waarde van de buigstijfheid ($EI = 75,3 \text{ kNm}^2$) van het kunststof balkje met alleen het beton drukdeel overschat de uit de meting afgeleide waarde ($EI = 67,1 \text{ kNm}^2$) nog steeds.

De maximale drukspanning in het beton bedraagt $(-4,5 \cdot 10^6) \cdot 24 \cdot 31.000 / (75,3 \cdot 1^9) = 44,9 \text{ N/mm}^2$. Bij hoge spanningen zakt de E-modulus, neem $E = f_{ck} / \epsilon_{c3} = 25 / 1,75\text{‰} = 14.300 \text{ N/mm}^2$:



Figuur 3.3 — Parabool-rechthoekdiagram voor beton onder druk



Figuur 3.4 — Bi-lineaire spanning-rekrelatie

Figuur 8.24: Niet lineaire drukverloop beton –2 Eurocode benaderingen

Onderdeel	E_i	b_i	h_i	A_i	z_i	EI_i	$A_i \cdot z_i^2 \cdot E_i$	
UD bovenflens	36.000	70	3	210	-32,9	5.670.000	8.167.684.972	
45/-45 bovenflens	25.456	70	2	140	-30,4	1.187.939	3.286.858.953	
45/-45 lijf	25.456	2	90	180	15,6	3.092.885.061	1.119.501.556	
45/-45 onderflens	25.456	70	2	140	61,6	1.187.939	13.536.666.438	
UD onderflens	36.000	70	3	210	64,1	5.670.000	31.092.501.691	
beton drukdeel	14.300	68	29	1.997	-14,7	1.935.984.852	6.158.280.805	Totale EI
						5.159.361.208	63.361.494.415	68.520.855.623

Tabel 8.10: Berekende buigstijfheid kunststof I-profiel met ongescheurde betondeel en gereduceerde E-modulus

De berekende waarde van de buigstijfheid ($EI = 68,5 \text{ kNm}^2$) van het kunststof balkje met alleen het beton drukdeel én met gereduceerde E-modulus komt goed overeen met de uit de meting afgeleide waarde ($EI = 67,1 \text{ kNm}^2$).

De maximale drukspanning in het beton bedraagt daarbij $(-4,5 \cdot 10^6) \cdot 29,4 \cdot 14.300 / (68,5 \cdot 1^9) = 27,6 \text{ N/mm}^2$. Dit valt net buiten de lineaire tak van de bi-lineaire spanningsrek relatie van C25/30 beton onder druk. Bij grotere momenten blijkt de EI verder af te nemen, dit kan verklaard worden omdat het betonaandeel onder verder in de plastische tak komt.

De betonvulling zorgt derhalve conform verwachting voor een toename van de buigstijfheid van 20% bij de eerste belastingstap. Voorts vormt het beton een prima plooiesteun voor dunne VVK-delen. De rol van kipsteun vervult een schuimkern bij VVK sandwich doorgaans ook, terwijl het geen bijdrage levert in de stijfheid. Het betreft slechts 20% omdat de momenten ver boven het scheurmoment liggen. Dit is in de case duidelijk gunstiger.

9. Case

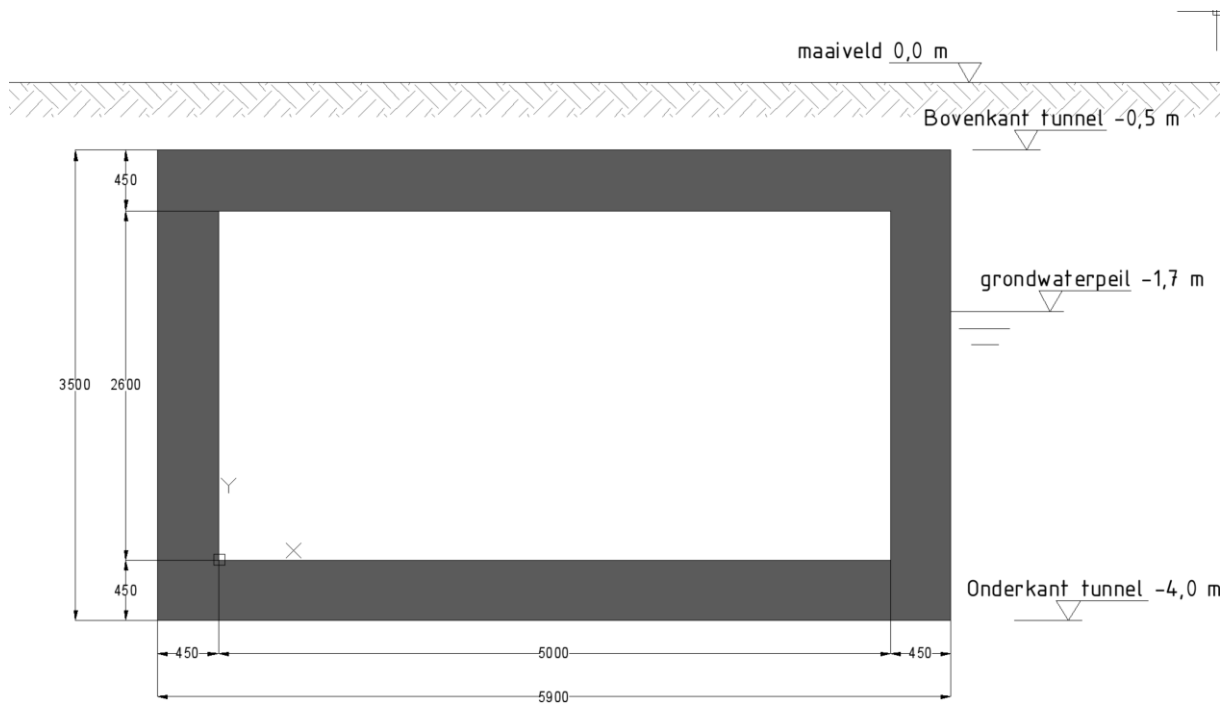
Om te onderzoeken of composiet huidwapening met de in de proeven gevonden eigenschappen voor afschuiving en stijfheid toegepast kan worden in een draagconstructie is er een case opgesteld.

De case bestaat uit een onderdoorgang onder enkele sporen, voor langzaam-verkeer, met inwendige maten van 5 meter breed en 2,6 meter hoog. Het grondwater staat 1,2 meter onder de bovenkant van de onderdoorgang. De onderdoorgang is gefundeerd op staal. De grondslag bestaat uit zand. De gesloten doorsnede bedraagt 10m, de toeritten worden niet gezien.

Composiet kan daarbij van veel van haar gunstige eigenschappen (zie §7.3.1 t/m §7.3.13) in meer of mindere mate benutten:

- | | |
|--------------------------------------|---|
| - Corrosiebestendig | water, zuurstof, zure grond |
| - Elektrisch-isolerend | zwerfstroom |
| - Warmte-isolerend | n.v.t. |
| - Verspaanbaar | eenvoudiger te slopen |
| - Textuur | hoogwaardig uiterlijk (binnen), wrijvingsarm (bu) |
| - Weinig onderhoud | anti graffiti gecoat |
| - Licht gewicht | vervoer zonder beton |
| - Licht doorlatend | inwendige armaturen t.b.v. OV |
| - Multifunctioneel | kabels & leidingen K&L t.b.v. HWA, OV, etc. |
| - Vorm-, materieel en procesvrijheid | parabeam / drop stitch fabric |
| - Gas- en vloeistofdicht | grondwater, één lengte gesloten deel |
| - Mechanische eigenschappen op maat | uitzettingscoëfficiënt als beton |
| - Duurzaamheid | n.v.t. |

Eerst is een berekening gemaakt voor een traditioneel staalgewapende variant in B500B, daarna voor dezelfde afmetingen een kunststof gewapende variant. Voor de kunststof gewapende variant is uitgegaan van een prefab kunststof schil van glasvezelcomposiet, waarin beton gestort wordt. Dit heeft voordelen qua uitvoering, zo hoeft er geen wapening meer te worden gevlochten en niet meer bekist te worden, omdat de kunststof schil werkt als wapening. In beide gevallen is uitgegaan van C30/37.



Figuur 9.1: Situatieschets onderdoorgang

Opdrijven

Met voorgaande gegevens is eerst het benodigde gewicht van de onderdoorgang bepaald, om opdrijven te voorkomen. De variabele hierin is de wanddikte van de onderdoorgang. Voor opdrijven geldt de wet van Archimedes: *'De opwaartse kracht die een lichaam in vloeistof ondervindt is even groot als het gewicht van de verplaatste vloeistof'*. Volgens de NEN-EN 1997-1 moeten hier nog belastingsfactoren aan worden toegevoegd, krachten die opdrijven tegengaan moeten vermenigvuldigd worden met 0,9 en krachten die opdrijven veroorzaken moeten worden vermenigvuldigd met 1,2. Voor het gewicht van beton moet volgens de NEN-EN 1997-1 $23,8 \text{ kN/m}^3$ worden aangehouden, voor het gewicht van water 10 kN/m^3 . De bovenbelasting, in de vorm van grond, ballastbed e.d. op de onderdoorgang, wordt veiligheidshalve niet meegenomen in de berekening voor het opdrijven. Dit omdat deze bovenbelasting (tijdelijk) verwijderd kan worden. Hetzelfde geldt voor asfalt in de onderdoorgang.

De opdrijvende kracht is met deze waarden als volgt:

$$F_{\text{opdrijvend}} = 1,2 * \text{volume in grondwater} * 10 \text{ kN/m}^3$$

De kracht die het opdrijven tegengaat is als volgt:

$$F_{\text{opdrijvingtegen gaand}} = 0,9 * \text{volume beton} * 23,8 \text{ kN/m}^3$$

Bij het gelijkstellen van bovenstaande formules wordt wanddikte 450 mm gevonden, ingevuld:

$$F_{\text{opwaarts}} = 1,2 * 5,9 \text{ m} * (4,0 \text{ m} - 1,7 \text{ m}) * 10 \text{ kN/m}^3 = 163 \text{ kN/m}' \uparrow$$

$$F_{\text{neerwaarts}} = 0,9 * 2 * (5,9 \text{ m} + 2,6 \text{ m}) * 23,8 \text{ kN/m}^3 = 164 \text{ kN/m}' \downarrow$$

Inclusief belastingsfactoren is de neerwaartse kracht dus gelijk aan en opwaartse kracht.

Belastingen op de onderdoorgang

Op de onderdoorgang werken de volgende belastingen:

- Eigen gewicht
- Grondwaterdruk (naast en onder)
- Grondkorreldruk (op en naast)
- Verkeersbelasting in de onderdoorgang
- Verkeersbelasting op de onderdoorgang
- Verkeersbelasting naast de onderdoorgang (extra hor. gronddruk tegen de wanden)

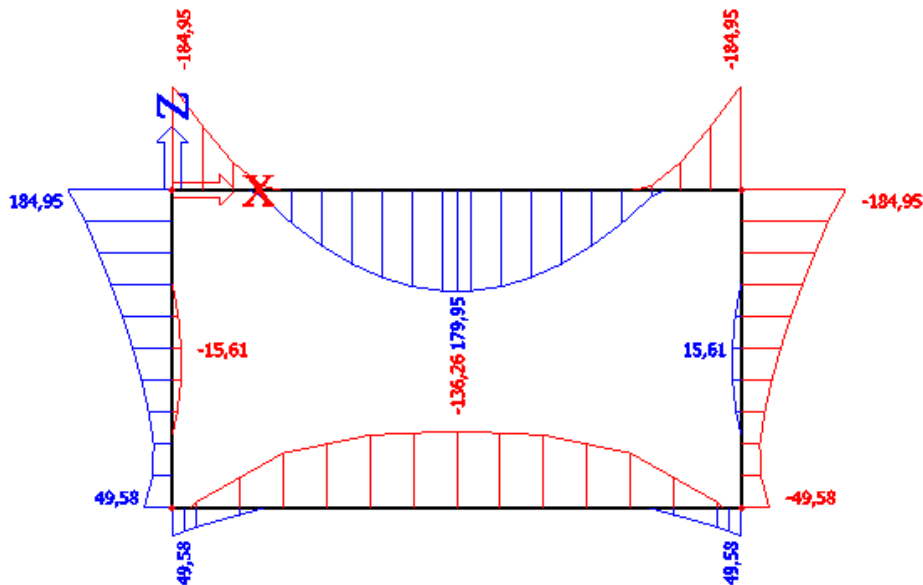
Dit worden belastinggevallen genoemd. Met de belastinggevallen worden belastingcombinaties gevormd. Beiden zijn uitgewerkt in bijlage L.

Onder de vloer is naast waterbelasting ter ondersteuning een bedding aangehouden met een beddingconstante van 80.000 kN/m^3 . Met deze beddingconstante resulteert bij alle belastingscombinaties overall een oplegdruk. (en nergens trek).

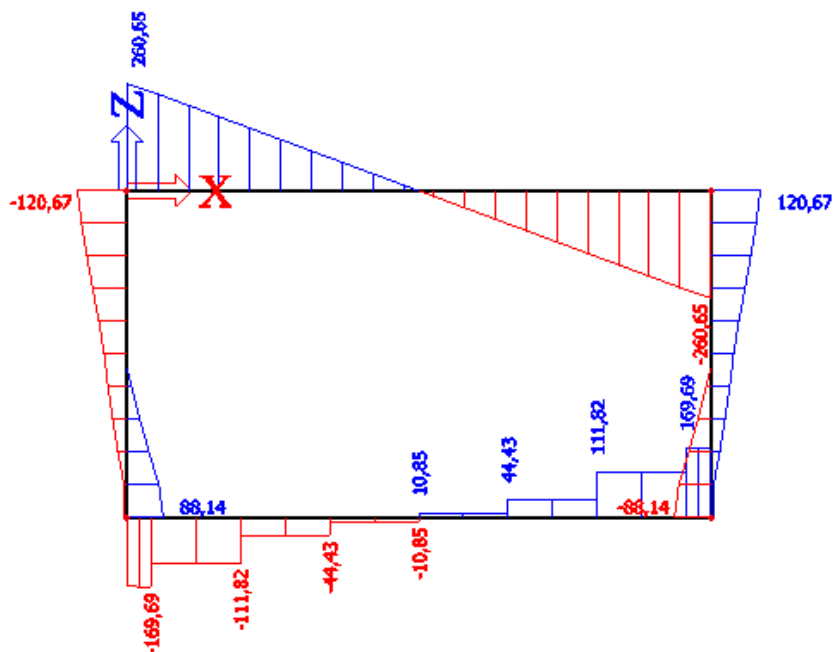
Rustende belasting in de vorm van asfalt in de onderdoorgang is niet meegenomen, dit omdat het verwaarloosbare invloed heeft op de snedekrachten.

9.1 Uiterste grens toestand (UGT)

Alle gegevens van de onderdoorgang zijn ingevoerd in een Scia-model. Dit programma berekent de inwendige snedekrachten in de onderdoorgang. De omhullenden van UGT-momentenlijn en UGT-dwarskrachtenlijn zijn in de volgende figuren getoond.



Figuur 9.2: Maatgevende momenten UGT uit Scia Engineer



Figuur 9.3: Maatgevende dwarskrachten UGT uit Scia Engineer

9.1.1 Traditionele stalen wapening

Momenten

De hoogte van de drukzone x_u in het beton kan berekend worden met onderstaande formule gebaseerd op bilineaire druk diagram, zie figuur 8.26 rechter zijde:

$$x_u = \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{4 \beta M_{Ed}}{\alpha b f_{cd}}}}{2 \beta}$$

M_{Ed} = rekenwaarde moment

d = nuttige hoogte doorsnede in casu $h=450\text{mm}-35\text{mm}-10\text{mm}-10/2\text{mm}=400\text{mm}$

α & β coëfficiënten drukfiguur in casu $\alpha=0,75$ & $\beta=0,39$

b = breedte doorsnede in casu $b=1000\text{ mm}$

f_{cd} = rekenwaarde druksterkte beton in casu $f_{cd}=30/1,5=20\text{ N/mm}^2$

Met de hoogte van drukzone x_u kan de normaalkracht in de drukzone van het beton berekend worden, door de x_u te vermenigvuldigen met de α , de f_{cd} en de breedte van de doorsnede. Deze normaalkracht N_c moet een koppel vormen met de trekkracht in de wapening N_s . Door de N_s te delen door de f_{yd} van de stalen wapening van 435 N/mm^2 wordt de oppervlakte van de wapening gevonden.

M_{ed} (kNm)	x_u (mm)	N (kN)	$A_{s,req}$ (mm ²)	toegepaste wapening	$A_{s,prov}$ (mm ²)
98 (= M_{cr}) min. wap.	16,6	249	572	Ø10-120	654
185 (180) dek wand	31,8	477	1097	Ø10-120 + Ø10-120	1309
136 (49) vloer	23,2	348	800	Ø10-120 + Ø10-240	982

Tabel 9.1: Hoofdwapening bij maatgevende momenten

Dwarskracht

De maximale dwarskracht ontstaat in de bovenste hoeken van de onderdoorgang, namelijk 260 kN.

De v_{ed} is $260.000\text{ N} / (1000\text{ mm} * 400\text{ mm}) = 0,65\text{ N/mm}^2$.

De maximale schuifspanning die beton zonder dwarskrachtwapening kan opnemen wordt met formule (6-3N) van (NEN-EN1992-1-1, 2011):

$$v_{c,min} = 0,035 * \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)^{\frac{3}{2}} * f_{ck}^{\frac{1}{2}}$$

Invullen levert $v_{min} = 0,43\text{ N/mm}^2$ op. Aanwezige langswapening kan dit verhogen (in casu is dat verwaarloosbaar). Door het beton kan dus sowieso $0,43 * 400 * 1000 = 172\text{ kN}$ dwarskracht opgenomen worden.

De dwarskracht in de wand en vloer kan worden opgenomen door het beton. Bij het dek wordt beugelwapening (haarspelden) toegepast in de eerste meters de dwarskracht op te nemen.

Haarspelden

Zodra de betoncapaciteit wordt overschreden, moet de volledige dwarskracht worden afgewapend. Omdat de schuifspanning laag is (in casu voor C30/37 lager dan $3,28 \text{ N/mm}^2$), mag gerekend worden met drukdiagonalen onder een hoek van $\Theta = 21,8^\circ$.

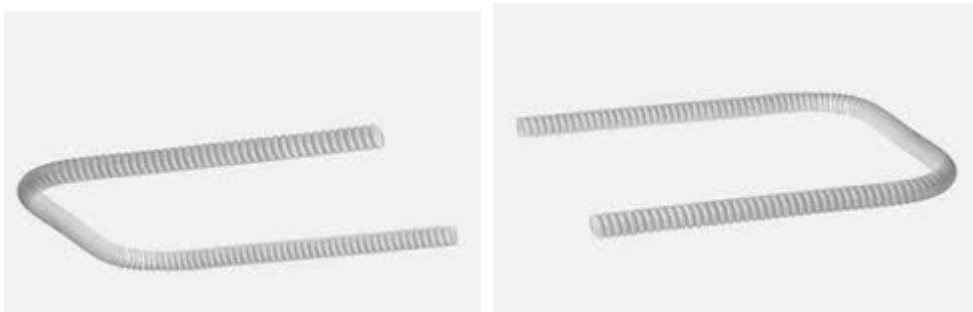
$$A \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right] > \frac{V_d [N]}{0,9 * d[m] * b[m] * f_{yd} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] * \cot \Theta}$$

Met 260 kN , $d=0,4 \text{ m}$, $b = 1,0 \text{ m}$, $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$, $\cot(21,8^\circ) = 2,5$ volgt:

$$A > 664 \text{ mm}^2/\text{m}^2$$

Verankerde spijlen $\emptyset 10\text{-}300\text{-}360$: $727 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ volstaat (bijv. haarspelden $\emptyset 10\text{-}300\text{-}720$)

Waarbij er in de overspanningsrichting om de 300 mm haarspelden worden toegepast die steeds 6 hoofdwapeningsstaven h.o.h. 60 mm omgeven.



Figuur 9.4: Twee haarspelden die in elkaar geschoven worden zijn aan de uiteinden verankerd

9.1.2 Vezel versterkt kunststof huidwapening

Rekenwaarde sterkte glasvezel versterkt kunststof

De toelaatbare spanning in de vezels is bepaald met behulp van (CUR96):

$$f_{t,d} = \frac{R}{\gamma_m * \gamma_c}$$

R = karakteristieke treksterkte met 0,8x2,4% rekgrens: $0,0192 * 72.000$ (E-modulus) = 1.382 N/mm^2

(R = karakteristieke druksterkte met 1,2 % rekgrens: $0,0120 * 72.000$ (E-modulus) = 864 N/mm^2)

$$\gamma_m = \gamma_{m1} * \gamma_{m2}$$

γ_{m1} = partiële materiaalfactor vanwege onzekerheden in het verkrijgen van de juiste materiaaleigenschappen; gelijk aan 1,35

γ_{m2} = partiële materiaalfactor vanwege onzekerheden in materiaaleigenschappen door de aard van de samenstellende delen en afhankelijk van de productiemethode; voor vacuüminjectie zonder naharden gelijk aan 1,4

$$\gamma_m = 1,35 * 1,4 = 1,89$$

γ_c is de totale conversiefactor voor voorziene effecten van temperatuur, tijd, omgevingsinvloeden, tijdsduur van de belasting en cyclische belasting op de materiaaleigenschappen.

$$\gamma_c = \gamma_{ct} * \gamma_{cv} * \gamma_{ck} * \gamma_{cf}$$

γ_{ct} = conversiefactor voor temperatuur; gelijk aan 1,1

γ_{cv} = conversiefactor voor vochteffecten; voor constructies voortdurend blootgesteld aan natte omstandigheden gelijk aan 1,3

γ_{ck} = conversiefactor voor kruipeffect. Wordt berekend met $\gamma_{ck} = t^n$ Met $t = 876.000\text{h}$ (100y) en $n=0,01$ (voor UD) volgt $\gamma_{ck} = 1,15$ voor de permanente belastingen

γ_{cf} = conversiefactor voor vermoeiing gelijk aan 1,1, hoeft alleen voor stijfheid gerelateerde grenstoestanden te worden toegepast

$$\gamma_c = 1,1 * 1,3 * 1,15 * 1,0 = 1,64 \text{ voor sterkte (1,81 voor stijfheid).}$$

$$f_{t,d} = \frac{1382}{1,89 * 1,64} = 446 \text{ N/mm}^2 \text{ t.a.v. vezel} \quad \& \quad 37,5\% \times 446 = 167 \text{ N/mm}^2 \text{ t.a.v. composiet}$$

Het vezel versterkte kunststof bestaat ook voor een deel uit hars en ander georiënteerde vezels. Hiervoor is een vezelpercentage van 37,5% aangehouden (50% vezel volume fractie en 75% vezels effectief in hoofdrichting). De geringe bijdrage van de sterkte van de hars wordt verwaarloosd.

Momenten

Het berekenen van de vezel versterkt kunststof wapening voor de momenten verloopt op soortgelijke manier als voor staalgewapend beton. Alleen wordt nu gewerkt met de maximale spanning die in de glasvezels en composiet mag optreden, en heeft de wapening geen plastische tak.

De x_u is veranderd ten opzichte van de staalgewapende variant omdat de nuttige hoogte nu de hele hoogte van de doorsnede bedraagt, omdat de wapening zich in de uiterste vezel bevindt. Door de N_c te delen door de $f_{t,d}$ van de glasvezels is de oppervlakte van de langsvezels bepaald.

M_{ed} (kNm)	x_u (mm)	N (kN)	$A_{\text{kunststof}}$ (mm ²)	dikte kunststof (mm)
98 brosse trekbreuk	38,5	226	1.300	1,35
136 wand/vloer	45,0	309	1.850	1,85
185 wand/dek	50,3	434	2.600	2,6

Tabel 9.2: Vezel versterkt kunststof wapening voor maatgevende momenten

Aan de trekzijde is een glasvezel versterkt kunststof huid nodig met een dikte van 2,6mm. Aan de drukzijde heeft een zo'n huid geen extra bijdrage op de draagcapaciteit van het moment.

Ter referentie: indien het beton wordt vervangen door een schuimkern dan is ten behoeve van de momentcapaciteit aan weerzijden van de kern een glasvezel versterkt kunststof huiddikte nodig van 3,8mm. Dan zou de onderdoorgang echter opdrijven.

Dwarskracht

Bij een zuivere sandwich wordt de dwarskracht opgenomen door de kern: hier beton.

De v_{ed} is $260.000 \text{ N} / (1000 \text{ mm} * (450-5) \text{ mm}) = 0,58 \text{ N/mm}^2$ in het beton.

De maximale schuifspanning die beton zonder dwarskrachtwapening kan opnemen wordt met formule (6-3N) van (NEN-EN1992-1-1, 2011):

$$v_{min} = 0,035 * \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)^{\frac{3}{2}} * f_{ck}^{\frac{1}{2}}$$

Invullen levert $v_{min} = 0,41 \text{ N/mm}^2$ op. Aanwezige langswapening kan dit verhogen.

Voorzichtigheidshalve wordt dit effect voor kunststof wapening echter niet meegenomen, dit omdat in de formules het wapeningspercentage geënt is op stalen wapening. De $0,41 \text{ N/mm}^2$ levert een dwarskracht van $0,41 * 1000 * (450-5) = 184 \text{ kN}$. De dwarskrachten in de wanden en vloer kunnen dus door alleen het beton opgenomen worden, in dek echter niet over de gehele lengte.

De eerste meters van het dek kunnen worden versterkt door hogere betonkwaliteit, deuvels of lijven.

Ophogen betonkwaliteit

Bij C60/75 is ook in het dek geen dwarskrachtwapening nodig.

Kunststof deuvels

De kunststof deuvels worden op dezelfde manier berekend als haarspelden voor stalen wapening.

Zodra de betoncapaciteit wordt overschreden, moet de volledige dwarskracht worden afgewapend. Omdat de schuifspanning laag is (in casu voor C30/37 lager dan $3,28 \text{ N/mm}^2$), mag gerekend worden met drukdiagonalen onder een hoek van $\theta = 21,8^\circ$.

$$A \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right] > \frac{V_d [N]}{0,9 * d[m] * b[m] * f_{yd} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] * \cot \theta}$$

Met 260kN, $d=0,445\text{m}$, $b = 1,0\text{m}$ $f_{yd} = 0,5 \times 1.382 / (1,89 \times 1,64) = 222 \text{ N/mm}^2$ (met 0,5 = vezelvolumen%)
 en $\cot(21,8^\circ) = 2,5$ volgt:

$$A > 1.170 \text{ mm}^2/\text{m}^2$$

Verankerde deuvels $\emptyset 12-300-300$: $1.256 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ volstaat.



Figuur 9.5: Deugel met verdikte koppen (ter verankering)

Kunststof lijven

Lijven h.o.h. 0,5m moeten elk $0,5\text{m} \times 244\text{kN/m} = 122\text{kN}$ dragen.

Bij vezels in $\pm 45^\circ$ is de capaciteit:

$$f_{td} = \text{trek/drukspanning vezel versterkt kunststof} = 0,5 \times 864 / (1,89 \times 1,64) = 139 \text{ N/mm}^2$$

(met 0,5 = vezelvolumen%)

Daarmee is een lijfdikte nodig van:

$$t = 122\text{kN} / 450\text{mm} / 139\text{N/mm}^2 = 2,0 \text{ mm}.$$

Indien geen kunststof huid aan de bovenkant wordt toegepast, moet het lijf iets dikker.

Langsschuifspanning tussen beton en vezel versterkt kunststof

De optredende langsschuifspanning wordt berekend met formule (6-20) van EN1992-1-1:

$$\tau = \frac{\beta * V}{b * z}$$

τ = langsschuifspanning

β = verhouding tussen langstrekkkracht in kunststof en totale langstrekkkracht: 1,0

V = dwarskracht, voor dek 244 kN

b = breedte = 1000mm

z = hefboomsarm tussen trek en druk 432mm ($450\text{mm} - 50,3\text{mm} / 3 = 2,6\text{mm}/2$)

$$\tau = \frac{1,0 * 244000}{1000 * 432} = 0,56 \text{ N/mm}^2$$

In de NEN-EN 1992-1-1 wordt in artikel 6.2.5 een formule gegeven voor de afschuifweerstand in beton-beton stortvlakken (gestort op verschillende tijdstippen). In hoofdstuk 8.2 lijkt het veilig te zijn deze ook toe te passen voor kunststof beton stortvlakken.

$$V_{Rdi} = c * f_{ctd}$$

V_{Rdi} = de rekenwaarde van de afschuifwaarde in het aansluitvlak, moet dus minimaal 0,60N/mm² zijn voor het dek

c = een factor die afhangt van de ruwheid van het aansluitvlak

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} = \frac{2,0}{1,5} = 1,33 \text{ N/mm}^2 \text{ (rekenwaarde v/d treksterkte) voor C30/37.}$$

In tabel 9.3 zijn de benodigde afschuifconstanten / ruwheden te zien voor enkele betonkwaliteiten.

Betonkwaliteit	Benodigde c –waarde kunststof huid (ruwheid betonhuid)		
	vloer	wanden	dek
C30/37	0,30 (< ruw)	0,19 (< glad)	0,42 (< geprofileerd)
C40/50	0,26 (< ruw)	0,13 (< glad)	0,31 (< ruw)
C55/67	0,20 (< glad)	0,12 (< glad)	0,30 (< ruw)

Tabel 9.3: Benodigde afschuifconstanten voor kunststof huid / ruwheid voor betonhuid

Opnemen stortbelasting

De optredende hydrostatische vloeistofdruk bedraagt 3,05m x 23,8kN/m³ = 72,6kN/m² aan de bovenkant van de vloer (dit is een conservatieve waarde voor de stortbelasting bij snel storten). De bovenhuid kan door een glasvezelnet aan de onderhuid op zijn plaats gehouden worden. De wandhuiden kunnen door een glasvezelnet bij elkaar worden gehouden.

Met kortdurende stortbelasting bedraagt de conversiefactor voor kruip 1,0 i.p.v. 1.15. Derhalve bedraagt de sterkte van glasvezel centerpennen:

$$f_{t,d} = \frac{1,382}{1,89*1,43} = 511 \text{ N/mm}^2 \text{ t.a.v. vezel} \quad \& \quad 50\% \times 511 = 256 \text{ N/mm}^2 \text{ t.a.v. composiet}$$

Het benodigde glasoppervlakte bedraagt daarmee 1,3x72.600N/m² / 256N/mm² = 369mm²/m² (met $\gamma_f=1,3$). Eerder genoemde deuvels ø 12-300-300 in het dek komen overeen met 1.257mm²/m² hetgeen ruim voldoet. Een fijnmaziger composiet verbindingsnet van ø 1,1-50-50 ofwel 380mm²/m² voldoet reeds voor vloer en wanden; binnen dit net kan zelfverdichtend beton goed stromen.

De ontwerpbelasting op de composiet huid bedraagt dan 1,3x72,6 = 94,4 kN/m² = 0,0944 N/mm², waarbij:

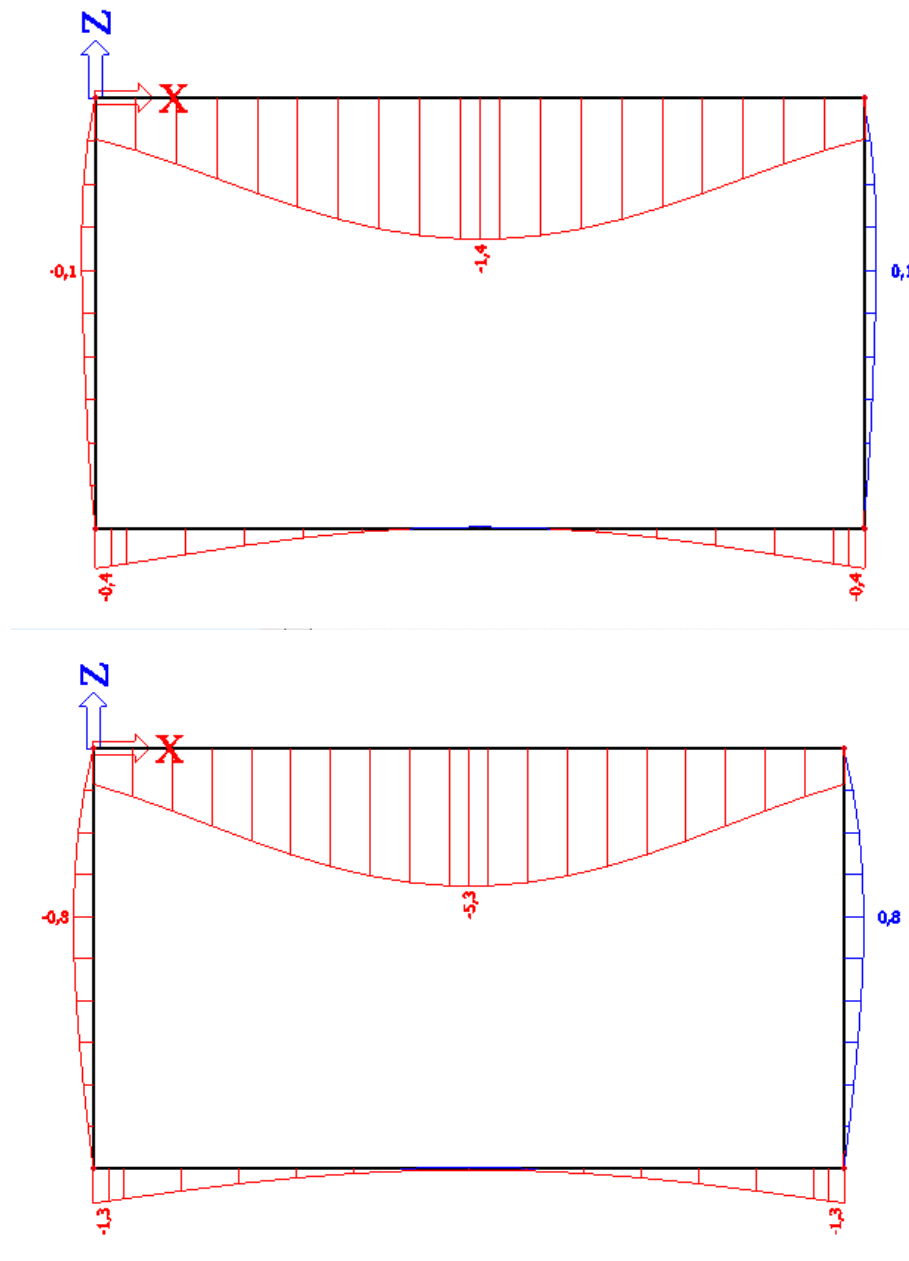
$$\begin{aligned} M &= 0,132 \times 0,0944 \times 50^2 = 31 \text{ Nmm/mm} && \text{hetgeen met 2,6 mm huiddikte leidt tot} \\ \sigma &= 31 / (2,6^2 / 6) = 27,5 \text{ N/mm}^2 && \text{lokaal in het composiet, en} \\ \sigma &= 27,5 / 0,5 / 25\% = 220 \text{ N/mm}^2 && \text{in de 25\% dwarsvezels (met vezelvolumen = 0,5), en} \\ &&& << 864 / (1,89 * 1,43) = 320 \text{ N/mm}^2 \\ \delta &= 0,0058 * 0,0726 * 50^4 / ((72.000 * 0,5 * 50\%) * 2,6^3 / 12) = \\ &&& 0,10 \text{ mm} && << L / 250 = 0,20 \text{ mm} \end{aligned}$$

9.2 Bruikbaarheids grenstoestand (BGT)

De doorbuiging en scheurwijdte worden berekend in de bruikbaarheids grens toestand (BGT). De belastingsgevallen en belastingcombinaties zijn hierin hetzelfde als in de UGT, alleen de belastingfactoren zijn allemaal 1,0.

Doorbuiging

De doorbuigingen voor de staalgewapende variant volgen uit het Scia model:



Figuur 9.6: Doorbuiging uit Scia – SLS belasting combinaties: Boven: beton + grond; Onder: beton + grond + trein op dek

Deze doorbuigingen zijn bepaald met de (gescheurde equivalente) E-modulus voor dek en wanden van $(33\% \times 33.000 \approx) 11.000 \text{ N/mm}^2$ en een beddingsconstante van de ondergrond van $80.000 \text{ kN/m}^2/\text{m}'$. De treinbelasting bedraagt 50 kN/m^2 , deze kan zowel op het dek als op naastliggende aarde baan werken. De indrukking van de naastliggende aarde baan door treinbelasting bedraagt $50 \text{ kN/m}^2 / 80.000 \text{ kN/m}^3 = 0,6 \text{ mm}$.

De extra doorbuiging in het veldmidden door treinbelasting ten opzichte van de omgeving bedraagt derhalve: $5,3 - 1,4 - 0,6 = 3,3 \text{ mm}$.

Bij spoorbruggen mag de doorbuiging niet meer dan $L/600$ bedragen conform (NEN-EN1990, 2011) artikel A2.4.4.2.3. In dit geval met $L=5,45 \text{ m}$ betreft dat $9,1 \text{ mm}$. Bij een constructiehoogte van 450 mm voldoet de constructie vanaf een equivalente E-modulus van ruwweg 5.000 N/mm^2 .

Ter zijde: bij wegverkeer eist Rijkswaterstaat (ROK1.2, 2013) dat de doorbuiging bij betonconstructies minder is dan $L/1000$ voor $L < 3,0 \text{ m}$, $L/300$ voor $L > 10 \text{ m}$ en daartussen interpoleren. Interpolatie levert voor $L=5,45 \text{ m}$ een toelaatbare doorbuiging op van $13,6 \text{ mm}$ ($=L/400$). Deze doorbuigingseis voorkomt trillinghinder.

9.2.1 Traditionele stalen wapening

Doorbuiging

Op basis van de voor de sterkte benodigde stalen wapening bedraagt de E-modulus van het dek 11.000 N/mm^2 . Deze voldoet ruim aan de minimaal benodigde E-modulus van 5.000 N/mm^2 , die hoort bij de maximaal toegestane doorbuiging.

De doorbuigingen zijn bepaald uitgaande van $E_c = 33.000 \text{ N/mm}^2$.

Bij langdurende belasting reduceert de E-modulus van ongescheurd beton met φ (in casu $1,7$ tot $E_{c,t} = 12.000 \text{ N/mm}^2$). De doorbuiging onder treinbelasting is echter kortdurend, bovendien is deze kortdurende belasting dominant.

Bij gescheurd beton reduceert de E-modulus naar mate van overschrijden van het scheurmoment m.b.v. de verdelingsfactor $\zeta = 1 - 0,5(M_{cr}/M_{freq})^2$ (formule 7.19).

In casu 75% van niet gescheurde en 25% van de volledig gescheurde modulus. De niet gescheurde modulus is 33.000 N/mm^2 en bij de gebruikte wapening is de volledig gescheurde modulus ruwweg 3.500 N/mm^2 .

Daarmee wordt de gewogen modulus $75\% \times 3.500 + 25\% \times 33.000 = 11.000 \text{ N/mm}^2$. (NEN-EN1992-1-1, 2011)

Scheurwijdte

De scheurwijdte in gewapend beton is afhankelijk van de optredende spanning in het gebruiksstadium in het wapeningsmateriaal. Met stalen wapening geldt:

$$\sigma_{s,freq} = \frac{M_{freq}}{M_{Ed}} * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}}$$

De scheurwijdte die maximaal op mag treden hangt af van de milieuklasse waaraan de constructie moet voldoen. Voor deze case zijn dat milieuklassen XA2, XF4 en XC4. Daarbij hoort een maximale scheurwijdte van $0,3 \text{ mm}$ (en eisen aan de betonsamenstelling).

M_{ed} [kNm]	M_{freq} [kNm]	$A_{s,req}$ (mm ²)	$A_{s,prov}$ (mm ²)	$\sigma_{s,freq}$	toegepaste wapening
185 (dek&wand)	135	1.097	1.309	266	ø10-60
136 (vloer)	98	800	982	260	ø10-120 + ø10-240
	$M_{cr} = 98$				

Tabel 9. 4: Staalspanning in gebruiksstadium

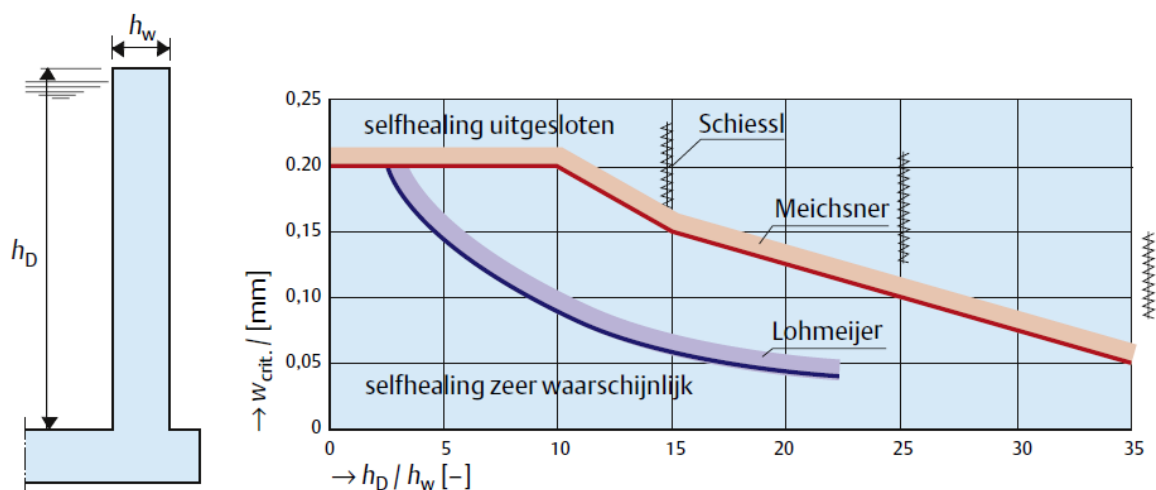
In de NEN-EN1992-1-1 staan tabellen waarin voor de maximale scheurwijdte en de optredende staalspanning de maximale staafdiameter en staafafstand genoemd worden. Aan één van deze eisen moet voldaan worden. Bij 280 N/mm² hoort een maximale hart op hart afstand van 150 mm of een maximale staafdiameter van 12mm, aan beiden wordt ruim voldaan.

De tabellen zijn gebaseerd op formule 7.9 voor rek en formule 7.11 voor scheurafstand, beiden eveneens uit NEN-EN1992-1-1.

(NEN-EN1992-1-1, 2011)

Waterdichtheid

Voorwaterdichte elementen wordt een dikte van minimaal 150mm aanbevolen. De waterdichtheid kan dan worden gerealiseerd door voldoende grote drukzone: > 50 mm of voldoende kleine scheurwijdte: 0,05 à 0,20mm (door self healing) bij doorgaande scheuren. (NEN-EN1992-3:NB, 2011)



Figuur 9.7: Toelaatbare doorgaande scheurwijdte t.a.v. waterdichtheid (Wegen, 2005)

Bij een waterhoogte van 1,85m en een wanddikte van 0,45m bedraagt $h_D/h_w = 4$. Daarbij mag de scheurwijdte van doorgaande trekscheuren 0,20mm bedragen. Aan deze scheurwijdte wordt alleen in het buitenste deel van buigscheuren (0,30mm) niet voldaan. De drukzone van 67mm (>50mm) kan de waterdichtheid echter reeds alleen verzorgen.

Transport

Het transportgewicht bedraagt bij 1,0m mootlengte 20 ton. Dit valt binnen het regulier toegestane over de weg te transporteren gewicht (24 ton van oplegger + lading met 3 assen h.o.h. ~1,35m). De afmetingen per moot van 1,0m 3,5m x 5,9m (dxhxb) zijn standaard te vervoeren. Voor de 10 moten is elk een transport nodig.



9.2.2 Vezel versterkte kunststof huidwapening

Doorbuiging

Op basis van de voor de sterkte benodigde 2,6mm VVK huidwapening bedraagt de E-modulus van het dek 9.750 N/mm^2 . Dit voldoet ruim aan de minimaal benodigde E-modulus van 5.000 N/mm^2 , die hoort bij de maximaal toegestane doorbuiging.

Ter oriëntatie:

Om tot dezelfde EI te komen voor de kunststofgewapende variant als voor de staalgewapende variant moet:

- de glasvezelwapening tot 6,0mm worden vergroot; of
- koolstofvezelwapening worden toegepast van slechts 1,8mm; dan wel
- de constructiehoogte worden vergroot met 200mm.

Ter referentie: indien het beton wordt vervangen door een schuimkern dan is ten behoeve van de doorbuiging aan weersijden van de kern een glasvezel versterkte kunststof huiddikte nodig van 15mm. Dan zou de onderdoorgang echter opdrijven.

Scheurwijdte

Scheurwijdte controle bij beton dat gewapend is met een vezel versterkt kunststof schil is onnodig voor wat betreft corrosie. Bij meer dan 0,5 à 1,0 mm scheurwijdte kan de interlocking in de scheuren echter verloren gaan, en daarmee de betonbijdrage voor dwarskracht. Daarom is de scheurwijdte alsnog bepaald. De scheurwijdte bedraagt 1,4mm bij een kunststof huiddikte van 2,6mm en 0,8mm bij een huiddikte van 4,3mm.

De scheurwijdte berekening is gebaseerd op de bovengrens van formule 7.9 voor rek en formule 7.14 voor scheurafstand. (NEN-EN1992-1-1, 2011)

Waterdichtheid

Voor waterdichte betonelementen wordt een dikte van minimaal 150mm aanbevolen. De waterdichtheid kan dan worden gerealiseerd door voldoende grote drukzone: $> 50 \text{ mm}$ of voldoende kleine scheurwijdte: 0,05 à 0,20mm (door self healing) bij doorgaande scheuren. (NEN-EN1992-3:NB, 2011)

Bij een waterhoogte van 1,85m en een wanddikte van 0,45m mag de scheurwijdte van doorgaande scheuren 0,20mm bedragen. Aan deze scheurwijdte wordt in een groot deel van de buigscheuren (0,60mm) niet voldaan. De drukzone van 60mm ($>50\text{mm}$) kan de waterdichtheid echter reeds alleen verzorgen.

De VVK huid aan de drukzijde is sowieso waterdicht, en die aan de trekzijde evenzo bij een huiddikte van 4,3mm, dit omdat de trekrek dan precies de scheurvrije grens van +0,27% betreft (zie §7.3.11).

Transport

Het transportgewicht bedraagt bij 10m mootlengte aan kunststof huiden slechts enkele tonnen. De afmetingen in een stuk 10,0m 3,5m x 5,9m (lxb) zijn lastig te vervoeren. De lengte van 10,0m is geen probleem, de hoogte van 3,5m evenmin, de breedte van 5,9m is echter veel groter dan de regulier toegestane breedte van 2,5m. Er is derhalve 1 bijzonder transport nodig waarvoor twee rijstroken tegelijk vrijgemaakt moeten worden, bijvoorbeeld in de nachtelijke uren.

9.3 Samenvatting rekken UGT & rekken, E-moduli en scheurwijdtes BGT

In tabel 9.5 en 9.6 is een overzicht van de rekken en spanningen in UGT respectievelijk BGT voor de snede met het grootste moment met daarin stalen wapening en diverse alternatieven voor vezel versterkte kunststof wapening / huid.

Drukszijde	Kern	Trekzijde	M_k [kNm]	σ_s / σ_o [%]	rek toelichting
beton		$A = 1.100 \text{ mm}^2 / \text{m}^2$ stalen wapening	185	-3,5 / +35	-3,5‰ = stuit beton +35‰ = vloeien wapening
beton		t= 2,6mm glascomposiet huid	185	-0,8 / +6,2	+6,2‰ = max composiet -3,9‰ = min composiet
beton		t= 4,3mm glascomposiet huid	185	-0,6 / +3,9	
beton		t= 1,3mm carboncomposiet huid	185	-0,6 / +3,9	
t= 4,3mm huid glascomposiet	beton	t= 4,3mm glascomposiet huid	185	-0,6 / +3,9	
t= 3,8mm huid glascomposiet	r-PET Schuim	t= 3,8mm glascomposiet huid	185	-3,9 / +3,9	

Tabel 9.5: UGT wapeningsdimensionering en rekken voor diverse materialen

Drukszijde	Kern	Trekzijde	E_{sneur} [N/mm ²]	E_{gem} [N/mm ²]	σ_s / σ_o (in scheur) resp. gem. [%]	κ {in scheur} & gem. [1/m]	Scheurwijdte in beton [mm]
beton		$A = 1.180 \text{ mm}^2 / \text{m}^2$ stalen wapening	3.500	11.000	{-0,4 / +2,0}	{1/195} & 1/620	0,3
beton		t= 2,6mm glascomposiet huid	1.600	9.750	{-0,5 / +4,5}	{1/195} & 1/620	1,4
beton		t= 4,3mm glascomposiet huid	2.600	10.500	{-0,4 / +2,7}		0,8
beton		t= 6,0mm glascomposiet huid	3.500	11.000	{-0,3 / +2,0}	{1/195} & 1/620	0,6
beton		t= 1,3mm carboncomposiet huid	2.600	10.500	{-0,3 / +2,0}		0,8
		t= 1,8mm carboncomposiet huid	3.500	11.000	{-0,3 / +2,0}	{1/195} & 1/620	0,6
t= 6,0mm huid glascomposiet	beton	t= 6,0mm glascomposiet huid	3.500	11.000	{-0,3 / +2,0}	{1/195} & 1/620	0,6
t= 15mm glasc.	r-PET Schuim	t= 15mm glascomposiet huid	n.v.t.	5.000	-0,4 / +0,4	1/620	n.v.t.
t= 36mm glasc.		t= 36mm glascomposiet huid		11.000			

Tabel 9.6: BGT wapeningsdimensionering, buigstijfheid, krommingen, rekken en scheurwijdtes voor diverse materialen

10. Conclusies

Technisch blijkt het haalbaar om prefab vezel versterkt kunststof (VVK) schil met een betonnen kern te laten samenwerken, waarbij trek wordt opgenomen door de wapeningsschil en druk grotendeels door het beton.

Een gunstige materiaalcombinatie hiervoor is VVK met glasvezels (kosten) en vinylester hars (alkalibestendig) en zelfverdichtend beton met portlandcement (weinig verhardingskrimp).

De samenwerking is afhankelijk van de mechanische eigenschappen van beide materialen en van de mate van aanhechting tussen beide materialen. De mechanische eigenschappen van beide materialen zijn bekend. Bij beton heeft druksterkteklasse invloed op de mechanische eigenschappen, milieuklasse is niet relevant.

De mate van aanhechting tussen beide materialen is experimenteel beproefd (kwalitatief) en blijkt - in lijn met literatuur- afhankelijk van de oppervlakte ruwheid van de prefab kunststof schil. Door de aanhechtsterkte te delen door de treksterkte van het beton (in casu $2,1 \text{ N/mm}^2$ voor C32/39) wordt de parameter c verkregen, hetgeen de gebruikelijke presentatiewijze in de betonwereld is. Hoe ruwer het oppervlak hoe groter de aanhechttingscapaciteit, zie tabel 10.1.

Kunststofoppervlak	Gemiddelde waarde c	Karakteristieke waarde c	Te vergelijken met "Beton"oppervlak
Glad kunststof	0,28	0,17	> "zeer glad" $c = 0,025$ à $0,10$
Geschuurd kunststof	0,51	0,42	> "glad" $c = 0,20$
Ingestrooid met zand	0,69	0,50	> "ruw" $c = 0,40$
Parabeam	1,16	1,11	> "geprofileerd" $c = 0,50$

Tabel 10.1: Gevonden c -waarden stortvlak beton-kunststof vergeleken met EN 1992-1-1 stortvlak beton-beton

Vezels dwars op de huid (Parabeam) vergroten de aanhechttingscapaciteit nog meer. Deze dwarsvezels kunnen ook dienen voor de samenhang van de huiden bij het opnemen stortbelasting ("centerpennen") mits deze verbonden zijn aan beide huiden. Om deze "centerpen"-vezels ook de functie van dwarskrachtwapening te laten vervullen, moeten ze alkalibestendig zijn.

Uit de resultaten van deze verkennende afschuifproeven lijken de afschuifparameters voor storten van beton-beton een goede eerste schatting op te leveren voor het storten van beton tegen kunststof.

Om (gescheurd) beton een grote bijdrage in de stijfheid te geven van prefab vezel versterkt kunststof (VVK) schil met een betonnen kern, zijn relatief dikwandige constructies gunstig die tot niet veel meer dan het scheurmoment worden belast. Dit is veelal het geval bij constructies die niet mogen opdrijven in (grond)water.

De case van een spooronderdoorgang bevestigt dit. Uit de berekening met vloer, wanden en dek van 450 mm is gebleken dat de glasvezel versterkt kunststof schil een dikte van ruwweg 3 mm moet hebben om de buigwapeningsfunctie overal te kunnen vervullen. Ondanks dat de E-modulus van kunststof wapening lager is dan die van staal, is bij de dimensionering sterkte maatgevend. Bij wanden en vloer kan de C30/37 betonnen kern de dwarskracht alleen opnemen, bij het dek is dwarskrachtwapening nodig. Om de optredende langs schuifspanningen tussen betonnen kern en

kunststof huid op te nemen volstaat glad oppervlak van het prefab kunststof bij de wanden, is een ruw oppervlak nodig bij de vloer en een ruw/geprofileerd oppervlak nodig bij het dek.

Het scheurenpatroon van de in situ betonnen kern in een proefopstelling met een prefab VVK schil bevestigd dat beiden goed kunnen samenwerken.

11. Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden een aantal aanbevelingen voor een mogelijk vervolgonderzoek gedaan. Deze aanbevelingen volgen uit de resultaten die naar voren zijn gekomen bij de verschillende proeven die gedaan zijn.

Uitvoeringstechniek

Het maken van een vezel versterkt kunststof schil voor bijvoorbeeld de onderdoorgang van de case is onbekend terrein. Hierbij moeten grote hoeveelheden vezels en hars verwerkt worden. Ook de productietechniek is onbekend terrein. Aanbevolen wordt om vervolgonderzoek te doen middels proeven door platen te maken met 'drop stitch fabric' en deze te testen met 4-punts buigproeven.

Kosten

Een ander interessant vervolgonderzoek is een desk study naar de Life Cycle Costs van een constructie van prefab vezel versterkt kunststof gewapend beton en deze vervolgens te vergelijken met een traditionele staalgewapende constructie. In deze vergelijking worden kosten uit alle fasen meegenomen, dus initiële bouwkosten, onderhoudskosten tijdens de operationele fase en sloopkosten.

Milieu impact

De impact op het milieu van een constructie gemaakt van prefab vezel versterkt kunststof gewapende beton zou vergeleken kunnen worden met een staalgewapende variant.

Met name de technische haalbaarheid en energie die het kost om beton en VVK te scheiden zijn onbekend. Hiertoe worden sloopprouven aanbevolen.

Kwantitatieve proeven

In dit onderzoek zijn kwalitatieve proeven voor de c-waarden van de verschillende oppervlakken uitgevoerd. Om met statistische betrouwbaarheid iets te kunnen zeggen over deze waarden worden er meer proeven aanbevolen. Voorts bij meerdere betonsterktes.

Lange duur en vermoeiing

In dit onderzoek is niet gekeken naar de effecten van langdurige belasting en vermoeiing, alleen naar kortdurende belastingen. Met name de hars van vezel versterkt kunststof is kruipgevoelig. Vervolgonderzoek in de vorm van literatuuronderzoek wordt aanbevolen.

Krimp van beton

Beton krimpt tijdens en na het uitharden. Dit komt door autogene en uitdrogingskrimpt en het beton koelt af. Uitdrogingskrimpt lijkt niet relevant met een omhulling door het vezel versterkte kunststof.

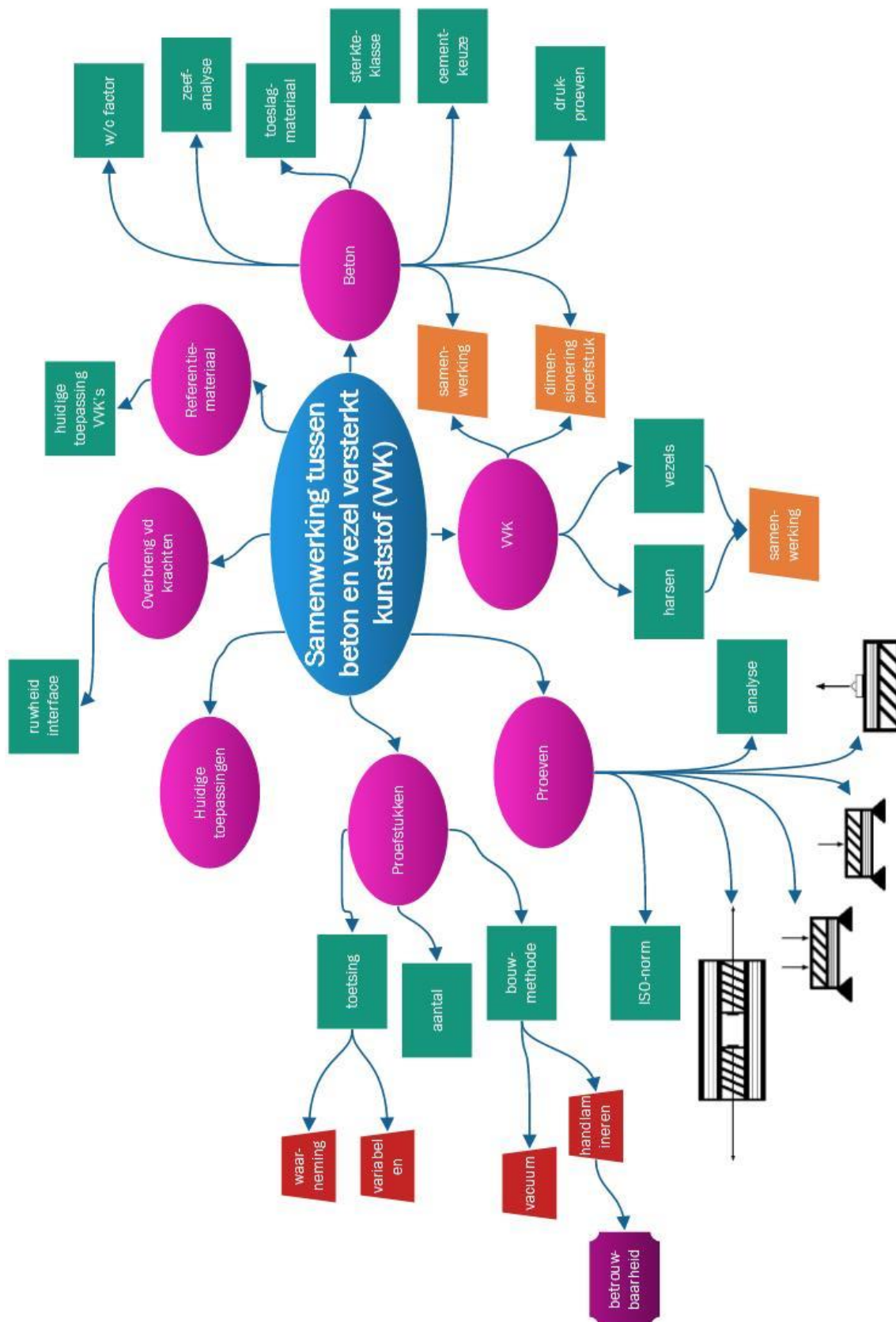
Als het beton in de kunststof schil krimpt, ontstaat er spanning in de interface tussen beton en kunststof. Vervolgonderzoek in de vorm van literatuuronderzoek wordt aanbevolen.

12. Bronnen

- Arbouw-rapport11-154. (2011). *Gebruik van nanoprodukten in de Nederlandse Bouwnijverheid*. Harderwijk: Arbouw, voor gezond en veilig werken.
- Blaazer, A., van Gessel, F. T., Glas, G., Hijlkema, D., & Ledderhof, J. (2011). *Bouwproducten* (3e ed.). ThiemeMeulenhoff.
- Bosman. (2015). *Biocomposiet brugdek - onderzoek naar lange duur gedrag*. Zwolle: Windesheim.
- Bosman. (2016). *Biocomposiet brugdek - onderzoek naar milieu-impact*. Zwolle: Windesheim.
- Braam, C. R., & Lagendijk, P. (2011). *Constructieer Gewapend Beton/ Cement en Beton 2* (5e ed.).
- ConcreteNetwork. (sd). Opgeroepen op Juni 2015, van www.concretenetwork.com:
<http://www.concretenetwork.com/glass-fiber-reinforced-concrete/ar-glass-fibers.html>
- CUR96, C.-c. 1. (sd). *Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies CUR aanbeveling 096*. Gouda.
- CUR-aanbeveling-91. (sd). *Versterken van gewapend betonconstructies met uitwendig gelijkde koolstofvezelwapening CUR aanbeveling 091*.
- Deltares TNO. (2015). *Antifouling recreatievaart Emmisieschattingen diffuse bronnen Emmisieregistratie*.
- Dilsiz, G. (2013). *Levensduurverlenging van vermoeiingsgevoelige orthotrope stalen brugdekken met Engineered Cementitious Composite (ECC)*. Thesis, TU Delft.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2014). *Adhesives Technology Handbook*. Elsevier.
- Galvan, D. (2017). *Nanocomposite coatings. Processing, structure and tribological performance*. Groningen: RUG.
- Gevelmeesters. (2015).
- Grisnich, W. R., & Schreuder, P. (2014). *Uitzettingsvrij composiet brugdek*. Zwolle: Hogeschool Windesheim.
- Gurit. (sd). *Guide to Composites*.
<http://zebec.co.kr>. (2016, januari).
<http://zebec.co.kr/english/accessories/Drop%20Stitch%20Fabric.htm>.
- Kleef, J. (2016, Januari 4). Prefab VVK schil te vullen met beton - mogelijkheden. (P. Bosman, Interviewer)
- Lee, L. H. (1991). *Fundamentals of Adhesion* (1e ed.). Springer US.
- Loof, R. d.-6.-5. (2016, maart 29). Tijdelijke kern technieken. (P. Bosman, Interviewer)
- Loon, M. v. (2015). Opgehaald van <http://utec-composites.nl/>.
- Malnati, P. (2015 May). Reinforced plastics move into non-traditional markets. *Plastics Engineering*, 14-17.

- NEN-EN1990. (2011). *Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp*. Delft: NEN.
- NEN-EN1992-1-1. (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies*. Delft: NEN.
- NEN-EN1992-3:NB. (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 3: Constructies voor keren en opslaan van vloeistoffen*. Delft: NEN.
- NEN-EN206-1. (2005). *Beton - Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit*. Delft: NEN.
- Nijssen, R. (2013). Composieten basiskennis. In R. Nijssen, *Composieten basiskennis*.
- Nolden, M. (2014). Bij het Twentse Rijssen kunnen dieren eindelijk veilig de provinciale weg oversteken, maar hun oversteek wordt duur betaald. *BK*, 60-64.
- Parabeam. (sd). *Parabeam a zcl company*. Opgehaald van www.parabeam.nl
- Peeters, J. (2015). www.engineersonline.nl. Opgeroepen op Mei 2015, van <http://www.engineersonline.nl/download/DEF%20Presentatie%20Jan%20Peeters.pdf>
- Pekso, D. H. (sd). *Breedplaatvloer*. Opgeroepen op Mei 2015, van www.dehoop-pekso.nl: <http://www.dehoop-pekso.nl/nl/producten/category:vloeren-en-wanden/product:breedplaatvloer.htm>
- Reinhardt, H. W. (1985). *Beton als constructiemateriaal: eigenschappen en duurzaamheid*. Delft: Delftse Universitaire Pers.
- Reis, E. (2004). 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. *Behavior of FRP sandwich panles for transportation infrastructure*. Calgary.
- ROK1.2. (2013). *Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken*. RWS Rijkswaterstaat RTD.
- Sanders, G. (2012). *Exploring the Frontiers of Macromonomer Chemistry*. Eindhoven (TU): BOXPress.
- Schöck. (2010, juli). Combar. *Technische informatie*, p. 40.
- Technisch Weekblad. (2015). Koelhoudende verf. *Technisch Weekblad*.
- Technofire. (sd). Technofire for Composites / Resin infused Technofire. *Bedrijfsbrochure*.
- Tissink, A. (2016). Veel minder strooien op antivriesasfalt. *Cobouw*, <http://www.cobouw.nl/artikel/1614376-veel-minder-strooien-op-antivriesasfalt>.
- Vernin, N. (2016 March). Alternatives to balsa wood in wind turbine blades. *JEC Composites Magazine*, 103 , 86-87.
- Verver, M. W., & Fraaij, A. L. (2004). *Materiaalkunde* (3e ed.). Wolters-Noordhoff bv.
- Wegen, G. v. (2005). Waterdichtheid van beton. *Cement*, 24-26.

Bijlage A Mindmap



Bijlage B Vezel eigenschappen

Materiaaltype	Treksterkte Mpa	E-modulus LR Gpa	E-modulus DR Gpa	Dichtheid kg/m ³	Trek-rek %
Glas	2200	73	73	2600	3,5
E-glas	2400	69		2500	1,8-3,2
	1500-3000	72			
	3400	72		2600	
S-glas	3450	86		2500	
Quartz glas	3700	69		2200	
AR-glas					
Carbon HS	3500	160-270		1800	
Carbon IM	5300	270-325		1800	
Carbon HM	3500	325-440		1800	
Carbon UHM	2000	440+		2000	
Carbon HT	4800	235	15	1700	1,5
Carbon	3500-7000	230-450			0,7-2,0
Aramide LM	3600	60		1450	
Aramide HM	3100	120		1450	
	3600	120	5,4	1450	2,8
Aramide UHM	3400	180		1470	
Twaron	2400-3600	60-120			2,2-4,4
Technora	3400	78			4,6
Aramide					
Nomex					22
Vectran NT	1100	52		1400	
Vectran HT	3200	75		1400	
Vectran UM	3000	103		1400	
Zylon AS	5800	180		1540	2,5
Zylon HM	5800	270		1560	3,5
UHMWU PE	2200-3900	52-132			3,4
Dyneema				970	
PET	1100				10-15
Aluminium	400	1069		2700	
	600	70		2800	
Beton C30/37					
Staal (S5 Grade)	450	205		7800	
Staal	370	0,2	0,2	7890	25
Titanium	950	110		4500	
	1300	110		4500	

Uitzettingsvrij composiet brugdek, pagina 82
Uitzettingsvrij composiet brugdek, pagina 82
[http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/Technical Information 2005.pdf](http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/Technical%20Information%202005.pdf)



Product Data Sheet

Atlac 430

Chemical/physical nature

Atlac 430 is an epoxy bisphenol A vinyl ester, dissolved in styrene.

Performance

Atlac 430 provides resistance to a wide range of acids, alkali, and bleaches for the use in corrosive environments in the chemical processing industry. The favourable combination of thermal resistance and elongation makes this resin suitable for applications exposed to intermittent temperatures.

Major applications

Atlac 430 can be used in all fabrication methods, but is especially adapted to meet the requirements of filament winding, centrifugal casting, hand lay-up and spray-up applications.

Approvals

Cured non-reinforced Atlac 430 conforms to type 1310 according to DIN 16946/2 and is classified group 5 according to DIN 18820/1. According to EN13121/2 Atlac 430 is classified group 7A.

Product specifications upon delivery

Property	Range	Unit	TM
Viscosity, 23 °C	440 - 500	mPa.s	2013
Colour, Lico 200	0.0 - 5.5	G	2017
Solids content, IR	59 - 62	%	2033
Appearance	clear	-	2265
Cure time from 25 to 35 °C	10 - 15	Min	2625
Cure time from 25 °C to peak	17 - 24	Min	2625
Peak temperature	140 - 160	°C	2625

Remarks

TM2013: 22/100 s⁻¹/23 °C

TM2625: 2.0 g Butanox LPT-IN and 1.0 g Accelerator NL 49P (both AKZO-Nobel) added to 100 g resin

Properties of the liquid resin (typical values)

Property	Value	Unit	TM
Density, 23 °C	1060	kg/m ³	-
Refractive index	1.5675	-	2150
Flash point	33	°C	2800
Acid value, as such	7	mg KOH/g	2401
Stability, no init., dark, 25 °C	6	Mon	-

Typical values of cast unfilled resin

Property	Value	Unit	TM
Density, 20 °C	1145	kg/m ³	-
Tensile strength	95	MPa	ISO 527-2
Mod. of elasticity in tension	3.6	GPa	ISO 527-2
Elongation at break	6.1	%	ISO 527-2
Flexural strength	150	MPa	ISO 178
Mod. of elasticity in bending	3.4	GPa	ISO 178
Elongation in flex	6.5	%	ISO 178
Impact res. - unnotched sp.	28	kJ/m ²	ISO 179
Heat deflection temp. (HDT)	105	°C	ISO 75-A
Glass transition temp. (Tg)	130	°C	DIN 53445

Curing conditions

Cured with 1 ml Butanox LPT-IN (AKZO-Nobel) and 0.5 ml Co-oc. solution (1 % Co in styrene) added to 100 g resin. Cured 24 h at room temperature and 24 h at 80 °C. For HDT and Tg dyn post-curing 24 h at 120 °C.

Properties of cured glass reinforced resin (typical values)

Property	Value	Unit	TM
Density	1440	kg/m ³	-
Glass content	38.6	%	ASTM D 2584
Tensile strength	138	MPa	ISO 527-2
Mod. of elasticity in tension	10	GPa	ISO 527-2
Flexural strength	210	MPa	ISO 178
Mod. of elasticity in bending	10	GPa	ISO 178
Linear expansion	30 x 10 ⁻⁶	K ⁻¹	-
Thermal conductivity	0.2	W/m.K	DIN 52612

Curing conditions

Cured with 1 ml Butanox LPT-IN (AKZO-Nobel) and 0.5 ml Co-oc. solution (1 % Co in styrene) added to 100 g resin. Cured 24 h at room temperature and 24 h at 80 °C. Laminates were based on 4 layers of 450 g/m² chopped strand mat.

Product Data Sheet



Atlac 430

Processing

Atlac 430 normally exhibits tack-free cure. However, the surface may not be cured completely. To ensure tack-free curing of surfaces exposed to air, suitable additives (e.g. paraffin solution) should be added.

The final state of cure may further be optimised by post-curing at elevated temperatures (e.g. 80 or 100 °C) for several hours. Post-curing is especially recommended if parts made from Atlac 430 are intended for contact with chemicals.

Atlac 430 may be cured using MEK-Peroxide with a low content of hydrogen peroxide (e.g. Butanox LPT-IN, Curox M-102, with CHP and cumene hydroperoxide (e.g. Trigonox 239, Luperox Cu 50 VE).

Guidelines before use

The resin should be conditioned at a well defined, application dependant temperature (usually 15 °C minimum for a MEKP/Co cure).

Storage guidelines

The resin should be stored indoors in the original, unopened and undamaged packaging, in a dry place at temperatures between 5°C and 30°C and the properties might change during storage. Shelf life is reduced at higher temperatures.

The shelf life of styrene containing unsaturated polyesters will be significantly reduced when exposed to light. Store in dark and in 100% light tight containers only.

Material Safety

A Material Safety Data Sheet of this product is available on request.

Test Methods

Test methods (TM) referred to in the table(s) are available on request.

Date of Issue: May 13 Version: 010389/11.0

The user is held to check the quality, safety and other properties of the product referred to herein. The information and recommendations in this document are to the best of our knowledge, reliable. However, no rights whatsoever can be derived from this document or the information contained therein by any party, other than those expressly accepted by a selling entity of the Royal DSM group of companies ("DSM Selling Entity") in a binding sale and purchase agreement for product referred to herein. For the avoidance of doubt THE ROYAL DSM GROUP OF COMPANIES MAKE NO WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING THOSE OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR PURPOSE. Unless explicitly agreed to otherwise in writing by the DSM Selling Entity, all offers, quotations, sales and deliveries of DSM products are subject to the General Conditions of Sale of such DSM Selling Entity.

This document has been issued by DSM Composite Resins on behalf of the DSM Selling Entity. For more information: www.compositeresins.com

Page 2 of 2

HEALTH • NUTRITION • MATERIALS

Glasvezel

E-glas

Legsel UD-non crimp

1150 g/m²

Vezelrichting 0/90°

Waarvan:

150 g/m² ± 45° stiksel

Technical Data Sheet

For Parabeam® 3D Laminates with Polyester resin*

Parabeam® 3D Glass Fabrics

Fabric Type	PARAGLASS										PARATANK		
	3	5	8	10	12	15	18	22	3	4.5	6		
For laminated thickness²													
Laminate	mm	3.0	5.0	8.0	10.0	12.0	15.0	18.0	22.0	3	4.5	6	
Face	mm	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	
Weight†													
Fabric	kg/m²	0.78	0.84	0.93	1.43	1.50	1.60	1.72	1.68	0.75	0.85	0.90	
Laminate	kg/m²	1.64	1.76	1.95	3.01	3.15	3.36	3.61	3.53	1.80	2.05	2.20	
Thermal Properties													
Thermal Conductivity λ	DIN 52616 W/mK	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	
Thermal Resistance R	m²KW	0.05	0.09	0.13	0.13	0.16	0.19	0.22	0.28	0.05	0.07	0.11	
Mechanical Properties													
Compressive strength σc	ASTM 365 N/mm²	typ 8.8	4.8	2.7	1.5	1.1	1.0	0.9	0.4	8.0	7.0	4.0	
	min	7.8	3.7	2.0	1.4	1.0	0.9	0.7	0.3	7.1	5.4	4.0	
Shear strength τ	ASTM 273 N/mm²	typ 1.0	0.8	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	1.5	2.9	2.3	
	min	0.9	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	1.3	1.0	
Shear modulus Gc	ASTM 273 N/mm²	typ 5.7	9.5	13.4	7.3	6.9	2.0	1.8	0.8	80.0	70.0	60.0	
	min	4.2	7.6	10.3	1.8	1.7	1.2	0.8	0.6	12.0	45.0	20.0	
Bending stiffness EI	ASTM 363 Nm²	typ 0.9	3.2	7.5	18.1	26.2	38.0	55.9	44.0	1.0	1.9	4.1	
	min	0.5	2.8	6.8	13.6	21.6	25.6	31.3	32.8	0.8	1.6	3.0	

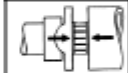
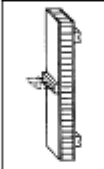
Note: All mechanical and thermal properties are obtained on laminates prepared according to the Application Instruction. The mechanical properties are divided in two categories: typical and minimum. A typical value is the mean average of a number of test values and a minimum value is the minimum property. The values differ with the direction of the fabric. Weirder results in better mechanical properties than warp direction.

Legend:
 * Standard polyester resin with average mechanical properties
 † For laminate with a plate angle of 70°/80°
 ‡ Glass/ resin ratio according to Resin consumption table

Parabeam Industrie- en Handelssonderaem b.v.
 Hoogendsestraat 49, 5705 AL Helmond ■ P.O. Box 134, 5700 AC Helmond ■ The Netherlands
 Tel: +31(0) 492 570625 ■ Fax: +31(0) 492 570733 ■ E-mail: sales@parabeam.nl ■ www.parabeam3d.com

Determination Data

Parabeam® 3D Glass Fabrics

Thickness Average thickness of laminate NOT dry fabric. Final laminate thickness may differ due to: • Tolerance of fabric height ($\pm 0,4$ mm) • Used resin • Lamination method •	
Compressive strength Compression Test according to ASTM365	 $\sigma_c = \frac{P_{max}}{W \cdot l}$  $\tau = \frac{P_{max}}{W \cdot l}$ $G_c = \frac{h}{W \cdot l} \cdot \frac{dP}{ds}$
Bending stiffness Three Point Bending Test according to ASTM393	 $E = \frac{L^3}{48 \cdot I} \cdot \frac{d^3P}{ds}$ Where L : Support Length I : Moment of Inertia

This technical data sheet is available for general use by Parabeam b.v., Parabeam® distributors and other interested parties. Parabeam shall not be responsible or liable in any way for loss or damage resulting from such use, or for the violation of any National, Federal, State or Municipal regulation with which it may conflict.

Parabeam Industrie- en Handelsonderneming b.v.
Hoogheidsestraat 49, 5705 AL Helmond ■ P.O. Box 134, 5700 AC Helmond ■ The Netherlands
Tel: +31(0) 492 570625 ■ Fax: +31(0) 492 570733 ■ E-mail: sales@parabeam.nl ■ www.parabeam3d.com

Portlandcement

CEM I

CEM I

Mai 2007



CEM I 42,5 N

CEM I 52,5 N

CEM I 52,5 R

CEM I 52,5 R HES

CEM I 52,5 R LA

ENCI
Technische Voorlichting
Postbus 3233
5203 DE 's-Hertogenbosch
Tel: 073 640 12 20
Fax: 073 640 12 18
tv@encd.nl
www.encd.nl

CBR Cementbedrijven
Afdeling Technische Voorlichting
Terhulpesteenweg 185
1170 Brussel
Tel: 02 678 35 10
Fax: 02 675 23 91
communication@cbr.be
www.cbr.be

Productomschrijving

Portlandcement is een grijs cement dat verkregen wordt door het malen van de hoofdc component portlandcementklinker. In functie van een bepaalde maalfijnheid wordt een cement vervaardigd in de sterkte- klassen 42,5 of 52,5. Afhankelijk van de sterkteklasse wordt dit cement gekenmerkt als een cement met een normale of hoge begin- sterkte. Portlandcement CEM I voldoet aan de eisen zoals gesteld in de Europese cementnorm EN 197-1, inclusief wijzigingsblad A1. Deze norm geeft eisen ten aanzien van de samenstelling op bestanddelen, chemi- sche eisen, mechanische en fysische eisen.

Samenstelling

De eisen aan de samenstelling zijn uitgedrukt in procenten ten opzichte van de som van alle hoofd- en nevenbestanddelen. Dit totaal wordt nog vermeerderd met het nodige calciumsulfaat om het bindingsgedrag te regelen.

Cementsoort	Hoofbestanddelen (in massa %)	Nevenbestanddelen (in massa %)
	Portlandcementklinker (K)	
CEM I	95 - 100	0 - 5

Mechanische en fysische eisen

De sterkteklasse van een cement bepaalt de minimale druksterkte gemeten na 28 dagen op normprisma's. Voor elke normsterkteklasse zijn twee beginsterkteklassen opgenomen, een klasse met normale beginsterkte aangeduid met N en een klasse met een hoge beginsterkte aangeduid met R.

Het begin van de binding is een maat voor het opstijfgedrag van een cementpasta. Aan de eis van vormhoudendheid moet worden voldaan om aan te tonen dat een cementpasta niet gevoelig is voor expansie.

Sterkteklasse	Druksterkte in MPa				Begin van de binding (min.)	Vormhoudendheid (mm)
	Beginsterkte		Normsterkte			
	2 dagen	7 dagen	28 dagen			
42,5 N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10
52,5 N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	—				



Speciale eigenschappen

Cement dat voldoet aan de in EN 197-1 gestelde eisen is voorzien van een CE-markering. Daarnaast kan cement nog gecertificeerd worden op een aantal andere specifieke eigenschappen. Deze eigenschappen komen tot uiting in de naamgeving van het cement. De naamgeving is afhankelijk van de norm op basis waarvan de speciale eigenschap is gecertificeerd. CBR en ENCI brengen de volgende typen portlandcement CEM I op de markt:

- CEM I 42,5 N;
- CEM I 52,5 N;
- CEM I 52,5 R;
- CEM I 52,5 R HES;
- CEM I 52,5 R LA.

Portlandcement CEM I is leverbaar met de volgende certificaten:

Type cement	Certificaat		
	CE	KOMO	BENOR
	EN 197-1	NEN 2550	PTV 602
CEM I 42,5 N	*	*	
CEM I 52,5 N	*	*	*
CEM I 52,5 R	*	*	
CEM I 52,5 R HES	*		*
CEM I 52,5 R LA	*		*

Betekenis van de naamgeving:

Naamgeving	Betekenis	Eis	Norm
HES	Hoge aanvangssterkte	Bijkomende eis druksterkte op één dag ≥ 20 MPa	NBN B 12 - 110
LA	Begrensd alkaligehalte	Gehalte aan alkaliën uitgedrukt als $\text{Na}_2\text{O-eq} \leq 0,60$ (in massa %)	NBN B 12 - 109

Toepassingsgebied

Dit cement wordt toegepast bij het fabriceren van betonproducten en in sommige gevallen ook in stortklaar beton wanneer het zeer kort na het storten ontkist moet worden. In stortklaar beton kan dit cement bij koud weer ook gebruikt worden in combinatie met of ter vervanging van een hoogovencement om een voldoende sterkteontwikkeling te verkrijgen. Door het begrensd alkaligehalte is het cement van het type LA geschikt voor het gebruik met alle traditionele granulaten zonder risico voor een reactie tussen de alkaliën in het cement en de granulaten (ASR). Voor een optimaal resultaat bij het gebruik van dit cement in mortel of beton, moeten in elk geval de gangbare regels bij het aanmaken, het verwerken en de nazorg in acht genomen worden.



Aanvullende informatie

De in dit productblad gegeven informatie is zeer algemeen en bevat de minimale eisen waaraan het cement volgens de relevante normen moet voldoen. CBR en ENCI produceren de in dit productblad beschreven cementen op verschillende locaties. Op aanvraag zijn er, per cementtype en per fabriek, aanvullende informatiebladen beschikbaar bij de vermelde adressen.

Bijlage G Productblad Sika BV 1 M Plastificeerder

Productinformatieblad
Editie: 1, 2010
Identificatienummer: 100 BV 1 M
Versie NL: 1/12/2010
Sika® BV 1 M



Cert. 1506-08- S

Sika® BV 1 M con 36% PL

Plastificeerder, waterreducerder

Conform de norm NBN EN 934-2

Product- omschrijving

Plastificeerder, waterreducerder.

Toepassingen

Sika® BV 1 M is geschikt voor toepassing in alle betonsoorten. Met Sika® BV 1 M kan bij gelijkblijvende water-cementfactor de betonspecie sterk geplastificeerd worden. Ook kan bij gelijkblijvende consistentie de water-cementfactor verlaagd worden. Zichtbeton krijgt een beter uiterlijk. Het verpompen van de betonspecie wordt vergemakkelijkt. Bij hoge dosering Sika® BV 1 M vertraagt de bindingstijd van beton.

Sika® BV 1 M kan gebruikt worden met andere hulpstoffen (raadpleeg Sika Nederland B.V.)

Voordelen

- Door toepassing van Sika® BV 1 M wordt de oppervlaktespanning van het aanmaakwater gereduceerd en komen cement en toeslagmaterialen beter met water in aanraking. De betonspecie wordt homogener en beter verwerkbaar. "Bleeding" of ontmenging wordt tegengegaan. De betonspecie laat zich eenvoudiger transporteren, verdichten en afwerken, wat leidt tot een kostenbesparing bij de verwerking van de betonspecie
- Doordat het mengsel beter te verdichten is, wordt het mogelijk om zeer dicht beton te maken. De betondruksterkte wordt verhoogd, de waterdichtheid van het beton verbeterd, en de weerstand bij vorst-dooicycli en agressieve invloeden vergroot

Productinformatie

Vorm

Uiterlijk Vloeibaar

Kleur Donkerbruin

Verpakking Vat à 200 ltr (verloren verpakking)
Container à 1000 ltr (met statiegeld)

Opslag

Opslagcondities Opslaan op een vorstvrije plaats en bij niet te hoge temperaturen.

Houdbaarheid 12 Maanden



Sika® BV 1 M 1/3

Technische gegevens

Soortelijk gewicht	1,190 kg/l $\pm$ 0,030 (bij +20°C)
Vriespunt	-2°C
Na ₂ O Eq.	Maximum 0,5%
pH	5,0 $\pm$ 1,0 (bij +20°C)
Droge stofgehalte	36,0% $\pm$ 1,8 (4u bij +105°C op zandbed)
Cl ⁻ ionengehalte	Minder dan 0,10%
Toxiciteit	Niet van toepassing
Kleurcode	Geel

Systeeminformatie

Verwerkingscondities

Dosering	Al naar gelang van het gewenste plastificerende effect: 0,2 à 0,8 % van het cementgewicht. Wij adviseren vooraf een geschiktheidsproef uit te voeren. Een belangrijk bindingsvertraging is mogelijk met sommige cementen bij maximale dosering. Dosering als vertrager: 0,5 à 1,0% van het cementgewicht naargelang het gewenste effect. De temperatuur speelt een belangrijke rol; het is dus aangewezen om proeven uit te voeren.
Verenigbaarheid	Sika® BV 1 M is verenigbaar met alle Sika superplastificeers, Sika vertragers en Sika stabilisatoren. Sika luchtbelvormers dienen gescheiden toegevoegd te worden.
Controle	Sika® BV 1 M wordt bij fabricage streng op kwaliteit gecontroleerd. Sika® BV 1 M is voorzien van volgende productcertificaten : BENOR, KOMO, AFNOR en UBERWACHUNG. De producent van Sika® BV 1 M is in het bezit van het ISO 9001 HBC Sika certificaat.

Uitvoering

Verwerking	Het product kan verwerkt worden vanaf +1°C. De verwerkbaarheidsduur van het beton is afhankelijk van meerdere parameters zoals het cementtype, het cementgehalte, het watergehalte en de temperatuur
------------	--

Waardenbasis

Alle technische gegevens vermeld in dit productinformatieblad zijn gebaseerd op laboratoria testen. Actueel gemeten gegevens kunnen verschillend zijn door omstandigheden buiten de controle van Sika Nederland B.V.

Veiligheids- en gezondheidsvoorschriften

Voor informatie en advies over de veilige hantering, opslag en verwijdering van chemicaliën verwijzen wij de gebruiker naar het recentste veiligheidsinformatieblad die fysische, ecologische, toxicologische en andere veiligheidsgegevens bevat.

Herinnering

Onze hulpstof kan niet als verantwoordelijk worden gesteld voor een eventuele kleurverandering van het beton in de tijd.
Onze producten dienen zorgvuldig te worden opgeslagen, toegepast en behandeld.

Wettelijke informatie

De informatie, en met name de aanbevelingen met betrekking tot de toepassing en het eindgebruik van Sika producten, wordt in goed vertrouwen verstrekt op basis van de huidige kennis en ervaring van Sika met producten die op de juiste wijze zijn opgeslagen, behandeld en toegepast onder normale omstandigheden. In de praktijk zijn de verschillen in materialen, onderlagen en werkelijke omstandigheden ter plaatse zodanig dat er geen garantie kan worden ontleend met betrekking tot verhandelbaarheid of geschiktheid voor een bepaald doel, noch enige aansprakelijkheid voortvloeiend uit enige juridische relatie, op basis van deze informatie, of uit enige schriftelijke aanbevelingen of enig ander advies dat wordt gegeven. De eigendomsrechten van derden dienen te worden gerespecteerd. Alle bestellingen worden aanvaard onder de huidige verkoop- en leveringsvoorwaarden. Gebruikers dienen altijd de meest recente uitgave van het productveiligheidsinformatieblad te raadplegen voor het betreffende product. Exemplaren hiervan worden op verzoek verstrekt.



Sika Nederland B.V.
Postbus 40390
3504 AD Utrecht
Nederland

Telefoon +31 (0) 30 241 01 20
Fax +31 (0) 30 241 44 82
www.sika.nl

Sika® BV 1 M 3/3

Bijlage H Het maken van de afschuifproefstukken

De proefstukken zijn gelamineerd door middel van handlamineren. Hierbij wordt de hars met behulp van een verfröller geïmpregneerd in de vezels. In deze bijlage wordt stap voor stap uitgelegd hoe de proefstukken gemaakt zijn.

Stap 1: Tafel bedekken met plastic vacuüm-folie, zodat het gemaakte product na uitgehard te zijn makkelijk van de tafel verwijderd kan worden.



Figuur H.1: Tafel bekleedt met vacuümfolie

Stap 2: Knippen van de vezels: de glasvezels werden aangeleverd op een rol en moesten voor verwerking op maat worden geknipt.



Figuur H.2: Glasvezel op rol

Stap 3: Mengen van de hars: de vinylester-hars moet gemengd worden met versneller en peroxide om de verhardingsreactie op gang te brengen. Voor handlamineren wordt uitgegaan van een gelijke gewichtsverhouding glas en hars, door het wegen van de te lamineren vezels kan de hoeveelheid hars worden bepaald.



Figuur H.3: Hars



Figuur H.4: Hars vermengd met versneller



Figuur H.5: Hars vermengd met versneller en peroxide

Stap 4: Impregneren van de glasvezels met hars. Met behulp van een verfröller wordt de hars geïmpregneerd in de glasvezels.



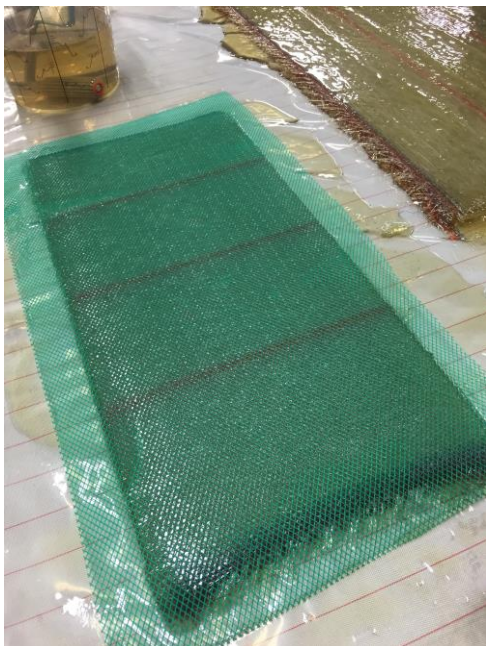
Figuur H.6: Impregneren van de hars in de glasvezels

Stap 5: Ontluchten van laminaat. Na het impregneren van elke twee lagen glasvezels moet het laminaat ontlucht worden met behulp van een ontluchtingsroller. Dit moet vanuit het midden van het laminaat naar de buitenkant, zodat de lucht kan ontsnappen.



Figuur H.7: Ontluchten van het laminaat

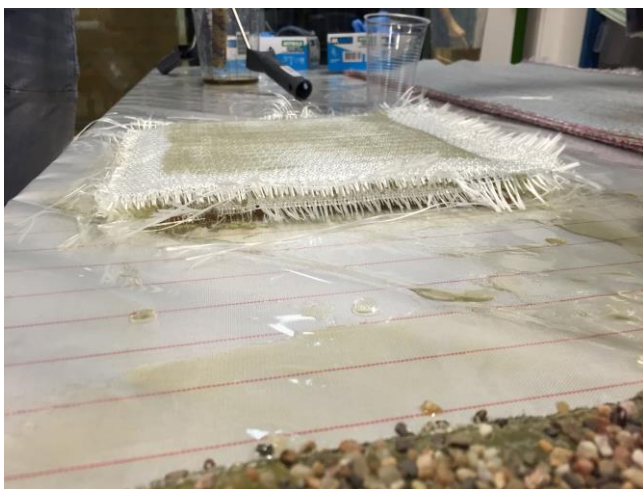
Stap 6: Aanbrengen verschillende oppervlakken. Het peelply, instrooizand en parabeam is aangebracht terwijl de hars nog niet uitgehard was. Hierdoor is het ingelamineerd in het kunststof. De andere bewerkingen werden uitgevoerd op het verharde kunststof.



Figuur H.8: Peelply op laminaat



Figuur H.9: Ingestrooid laminaat



Figuur H.10: Parabeam 3D

Stap 7: Zagen van de laminaten. Met behulp van een tegelzaag met diamantblad zijn de vezel versterkt kunststof platen in strookjes van 5 * 15 cm gezaagd.



Figuur H.11: Zagen van kunststof met tegelzaag

Stap 8: Maken van bekistingen voor het storten van het beton.



Figuur H.12: Bekistingen voor afschuifproefstukken

Stap 9: Plaatsen vezel versterkt kunststof plaatjes in bekistingen



Figuur H.13: Kunststof plaatjes in bekistingen

Stap 10: Storten van beton



Figuur H.14: Beton gestort in de bekistingen

Stap 11: Ontkisten van de proefstukken



Figuur H.15: Proefstukken ontkist

Stap 12: Testen proefstukken



Figuur H.16: Proefopstelling afschuifproef

Bijlage I Het maken van de I-ligger proefstukken

De proefstukken zijn gelamineerd door middel van handlamineren. Hierbij wordt de kunststof hars met behulp van een verfroller geïmpregneerd in de vezels. In deze bijlage wordt stap voor stap uitgelegd hoe de proefstukken gemaakt zijn.

Het lijf van de I-liggers is gemaakt van 45/-45° graden legsels, de flenzen van 0° UD legsel. Het mengen van de hars en knippen van de legsels gingen op dezelfde manier als bij de afschuifproefstukken.

Stap 1: Lamineren van twee helften van het lijf om twee hulpvormen



Figuur I.1 Lamineren van lijfhelften

Stap 2: Samenstellen van het lijf door de balkjes tegen elkaar te klemmen



Figuur I.2: Samengesteld lijf

Stap 3: Lamineren van de flenzen



Figuur I.3: Flenzen van de I-ligger gelamineerd

Stap 4: Instrooien van ene balkje door binnenkant in te smeren met hars en vervolgens zand 2-4 mm in te strooien



Figuur I.4: Instrooien balkje

Stap 5: Op maat slijpen van balkjes



Figuur 1.5a: Op maat geslepen balkje

Figuur 1.5b: Ingestrooid balkje op maat gemaakt

Stap 6: Storten van beton tegen ingestrooid balkje



Figuur 1.6: Bekisting om kunststof balkje

Stap 7: Ontkisten balkje



Figuur 1.7: Ontkist balkje met beton

Stap 8: Drukken van de balkjes met driepunts-buigproef



Figuur 1.8: Drukken van balkje met beton in drukbank

Bijlage J Artikel 6.2.5 NEN-EN 1992-1-1

NEN-EN 1992-1-1+C2:2011

6.2.5 Afschuiving in het aansluitvlak tussen op verschillende tijdstippen gestort beton

(1) In aanvulling op de eisen van 6.2.1 – 6.2.4 behoort de schuifspanning in het aansluitvlak tussen op verschillende tijdstippen gestort beton ook aan het volgende te voldoen:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (6.23)$$

V_{Ed} is de rekenwaarde van de schuifspanning in het aansluitvlak; deze wordt gegeven door:

$$V_{Ed} = \beta V_{Ed} / (z b_l) \quad (6.24)$$

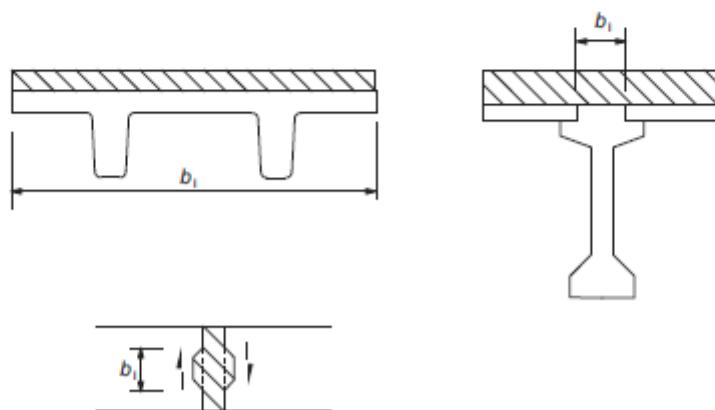
waarin:

- β is de verhouding van de langskracht in het laatst gestorte betongedeelte tot de totale langskracht in de druk- of trekzone, beide berekend voor de beschouwde doorsnede;
- V_{Ed} is de dwarsschuifkracht;
- z is de hefboomsarm van de samengestelde doorsnede;
- b_l is de breedte van het aansluitvlak (zie figuur 6.8);
- V_{Rd} is de rekenwaarde van de afschuifweerstand in het aansluitvlak en wordt gegeven door:

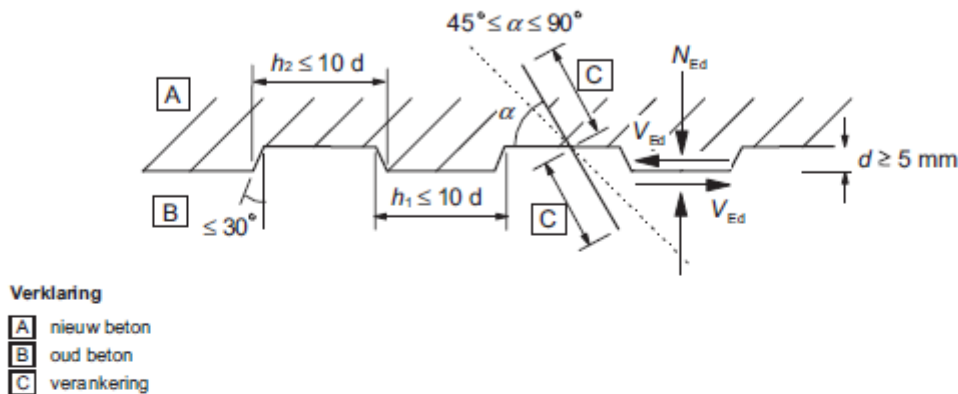
$$V_{Rd} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{ctd} \quad (6.25)$$

waarin:

- c en μ zijn factoren die afhangen van de ruwheid van het aansluitvlak (zie (2));
- f_{ctd} is gedefinieerd in 3.1.6 (2)P;
- σ_n is de spanning per oppervlakte-eenheid veroorzaakt door de minimale uitwendige normaalkracht loodrecht op het aansluitvlak die tegelijk met de dwarskracht kan optreden, positief voor druk, waarbij $\sigma_n < 0,6 f_{ctd}$, en negatief voor trek. Als σ_n een trekspanning is, behoort $c f_{ctd}$ gelijk aan 0 te worden genomen;
- $\rho = A_s / A_c$;
- A_s is de oppervlakte van de wapening die het aansluitvlak kruist, inclusief eventuele gewone dwarskrachtwapening, met voldoende verankering aan beide zijden van het aansluitvlak;
- A_c is de oppervlakte van de verbinding;
- α is gedefinieerd in figuur 6.9 en behoort te zijn beperkt tot $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;
- v is een sterkte-reductiefactor (zie 6.2.2 (6)).



Figuur 6.8 — Voorbeelden van aansluitvlakken



Figuur 6.9 — Vertande stortvoeg

(2) Bij gebrek aan meer gedetailleerde informatie mogen oppervlakken zijn geclassificeerd als zeer glad, glad, ruw of geprofileerd, met de volgende voorbeelden:

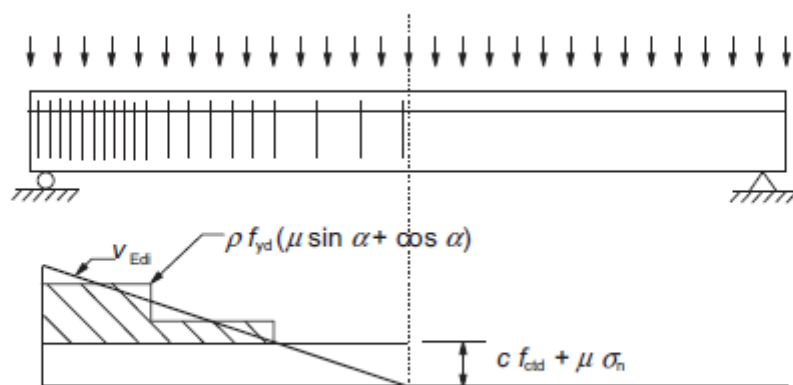
- [C1] — zeer glad: een oppervlak gestort tegen een bekisting in staal, kunststof of speciaal bewerkt hout: $c = 0,025$ tot $0,10$ en $\mu = 0,5$;
- [C1] — glad: door een glijbekisting of extrusie gevormd oppervlak, of een vrij oppervlak zonder verdere behandeling na het trillen: $c = 0,20$ en $\mu = 0,6$;
- [C1] — ruw: een oppervlak met ruwheden van ten minste 3 mm en tussenafstanden van ongeveer 40 mm, verkregen door harken, zichtbaar zijn van toeslagmateriaal of andere methoden die een soortgelijk gedrag opleveren: $c = 0,40$ en $\mu = 0,7$;
- geprofileerd: een oppervlak met vertandingen volgens figuur 6.9: $c = 0,50$ en $\mu = 0,9$.

(3) Een getrapte verdeling van de dwarswapening mag zijn gebruikt, zoals aangegeven in figuur 6.10. Indien de verbinding tussen de twee verschillende betononderdelen verzekerd is door wapening (balken met tralieliggers), mag de bijdrage van het staal aan v_{Ed} gelijk aan de resultante van de krachten van iedere diagonaal zijn genomen, op voorwaarde dat $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$.

(4) De afschuifweerstand in langsrichting van geïnjecteerde verbindingen tussen plaat- of wandelementen mag zijn berekend volgens 6.2.5 (1). In gevallen waarin de verbinding significant gescheurd kan zijn, behoort c gelijk aan 0 te zijn genomen voor gladde en ruwe verbindingen en aan 0,5 voor geprofileerde verbindingen (zie ook 10.9.3 (12)).

(5) Onder vermoeiings- of dynamische belastingen behoren de waarden voor c in 6.2.5 (1) te zijn gehalveerd.

136



Figuur 6.10 — Afschuifdiagram dat de vereiste wapening in het aansluitvlak weergeeft

Bijlage K T-toets 5% grenswaarde

Met behulp van de T-toets uit de statistiek kan de 5% ondergrens bepaald worden van de c-waarden.

De formule hiervoor luidt als volgt:

$$5\% \text{ ondergrens} = x - t * \frac{\sigma S}{\sqrt{n}}$$

x = populatiegemiddelde

t = excentriciteit, zegt hoeveel standaarddeviaties van het gemiddelde afgeweken wordt. Deze is afhankelijk van het aantal proeven en is voor n = 2: 6,314 en voor n = 3: 2,92

S = Schatting van de standaarddeviatie van de populatie. Deze wordt berekend als volgt:

$$S = \sigma * \sqrt{\frac{n}{n-1}}$$

σ = standaarddeviatie uit proeven

n = aantal proeven

Hieruit volgen onderstaande waarden:

oppervlak	gemiddelde c	standaard deviatie c	aantal proeven n	S	5% ondergrens
Glad	0,28	0,08	2	0,11	-0,21
Geschuurd	0,51	0,07	3	0,09	0,36
Epoxy	0,65	0,19	3	0,23	0,25
Peelply	0,65	0,35	3	0,43	-0,07
Grind	0,69	0,14	3	0,17	0,41
Parabeam	1,16	0,06	3	0,08	1,03

Zoals te zien zijn de 5 % ondergrenswaarde van de c fors lager dan de gemiddelde waarden. Een aantal waarden zijn zelfs negatief. Dit komt door de spreiding van de gemeten waarden in combinatie met het kleine aantal metingen.

Elk proefstuk kent 4 afschuifvlakken waarvan de zwakste schakel bezwijkt en de gemeten sterkte bepaald. De andere drie onafhankelijke bezwijksterktes zijn minimaal zo groot, maar blijven onbekend. Door voor deze bezwijksterkte conservatief dezelfde bezwijkwaarde aan te houden, groeit het aantal proeven naar n=12 (of 8) en wordt de karakteristieke waarde gunstiger.

Hieruit volgen onderstaande waarden:

oppervlak	gemiddelde c	standaard deviatie c	aantal proeven n	K _x	5% ondergrens
Glad	0,28	0,08	8	1,96	0,17
Geschuurd	0,51	0,07	12	1,80	0,42
Epoxy	0,65	0,19	12	1,80	0,37
Peelply	0,65	0,35	12	1,80	0,12
Grind	0,69	0,14	12	1,80	0,50
Parabeam	1,16	0,06	12	1,80	1,11

Als toetsingsgrootheid voor de druksterkte wordt de karakteristieke waarde (f_{ck}) gehanteerd. Deze is gedefinieerd als de waarde behorende bij het 5%-percentielpunt van de druksterkte bepaald conform NEN 5968 en wordt berekend als:

$$f_{ck} = f_{cq} - t \cdot s_f$$

waarin:

- f_{ck} = karakteristieke waarde voor de druksterkte [N/mm^2];
- f_{cq} = gemiddelde druksterkte van n proefstukken [N/mm^2];
- s_f = standaardafwijking in de druksterkte van n proefstukken [N/mm^2];
- t = coëfficiënt, afhankelijk van het aantal proefstukken, zie tabel 1.

De waarden in tabel 1 zijn ontleend aan NEN 1047, blad 7.1 (éénzijdige toetsing met $\alpha=0,05$)

Tabel 1 - t als functie van het aantal proefstukken

aantal proefstukken (n)	t
6	2,02
12	1,80
18	1,74
36	1,69

5

$$f_{fctk,i} = f_{fctm,i} - k_x \cdot s_p$$

Hierin is:

$f_{fctk,i}$ - Karakteristieke waarde van de buigtreksterkte ($i = 1$ of 4).

$f_{fctm,i}$ - Gemiddelde waarde van de buigtreksterkte.

k_x - Factor afhankelijk van het aantal proefstukken volgens onderstaande tabel.

$$s_p = \text{Standaardafwijking} = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctm,i} - f_{fct,i})^2}{(n-1)}}$$

$f_{fct,i}$ - Individuele waarde uit de beproeving.

VC - Variatiecoëfficiënt (standaardafwijking/gemiddelde waarde).

Tabel 1 - k_x als functie van het aantal proefstukken

n	1	2	3	4	5	6	8	10	12	20	30	∞
$k_{x,bekend}$	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,71	1,68	1,67	1,64
$k_{x,onbekend}$			3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,89	1,76	1,73	1,64

Onbekend wil zeggen dat de variatiecoëfficiënt van de populatie niet bekend is.

$$\begin{aligned} f_{fctk,i} &= f_{fctm,i} - k_x \cdot VC \cdot f_{fctm,i} \\ &= (1 - k_x \cdot VC) f_{fctm,i} \end{aligned}$$

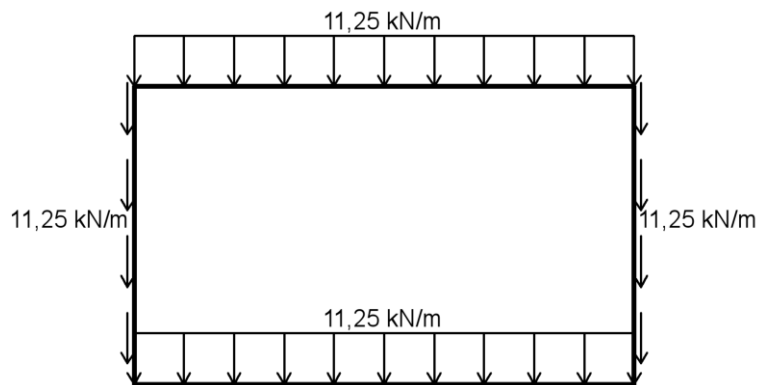
Bijlage L Belastingen case

In deze bijlage zijn de verschillende belastingsgevallen en belastingscombinaties op de onderdoorgang toegelicht.

BELASTINGSGEVALLEN

Eigen gewicht

Het eigen gewicht van de onderdoorgang bestaat uit het beton waarvan het gemaakt is. Het beton heeft een gewicht van 25 kN/m^3 . Bij een wanddikte van 450 mm geeft dit een belasting van $11,25 \text{ kN/m}$. Het eigen gewicht is een constante belasting.



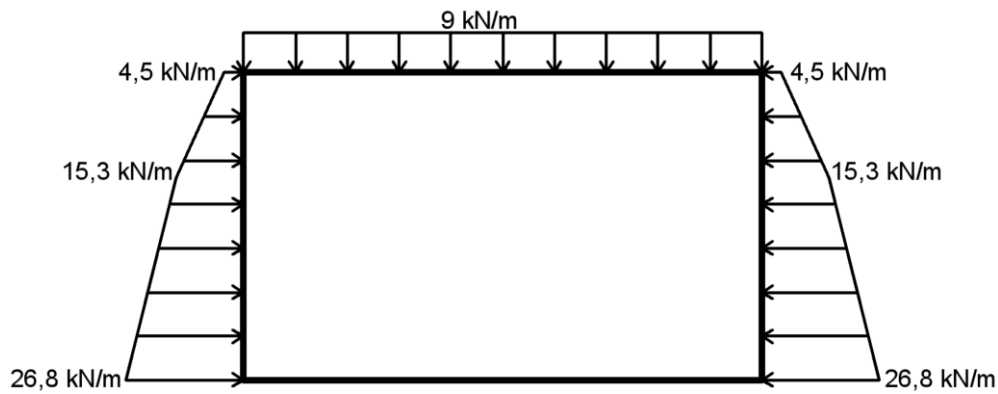
Figuur L.1: Belastinggeval eigen gewicht

Grondbelasting

De grondbelasting bestaat uit twee delen: de verticale belasting van het zand bovenop de onderdoorgang en de horizontale belasting van het zand tegen de wanden. Het gewicht van het zand is 18 kN/m^3 als het droog is en 20 kN/m^3 als het nat is. Eerst worden alle verticale gronddrukken berekend. Vervolgens worden de horizontale gronddrukken tegen de wanden berekend door de verticale gronddruk te vermenigvuldigen met de neutrale horizontale factor K_0 van 0,5. De grondbelasting is een constante belasting.

Peil t.o.v. maaiveld	Peil t.o.v. bovenkant tunnel	Verticale korreldruk	Horizontale neutrale korreldruk
0		0	0
-0,5	0	9	4,5
-1,7	-1,2	30,6	15,3
-4	-3,5	53,6	26,8

Tabel L.1: Horizontale en verticale gronddrukken



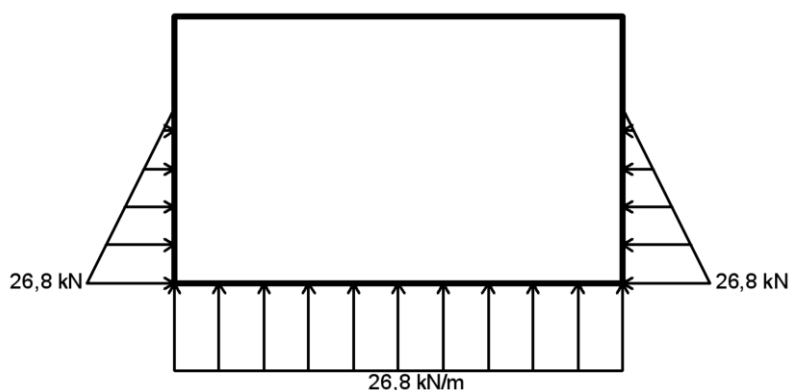
Figuur L.2: Belastinggeval gronddruk

Grondwaterbelasting

De grondwaterbelasting bestaat uit het water dat tegen de wanden van de onderdoorgang drukt en de oprijvende kracht tegen de onderkant van de onderdoorgang. Het grondwaterpeil staat op 1,2 meter onder de bovenkant van de onderdoorgang. Op de bovenste 1,2 meter van de onderdoorgang is er dus geen grondwaterbelasting. Daaronder neemt de belasting toe volgens het hydrostatisch drukmodel. De oprijvende kracht is 23 kN/m^2 . De grondwaterbelasting is een constante belasting.

Peil tov maaiveld	Peil tov bovenkant tunnel	Waterdruk
0		0
-0,5	0	0
-1,7	-1,2	0
-4	-3,5	23

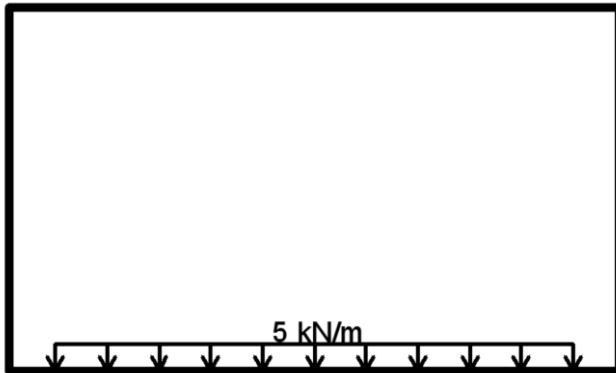
Tabel L.2: Hydrostatische grondwaterdruk



Figuur L.3: Belastinggeval grondwaterdruk

Verkeersbelasting in de onderdoorgang

De onderdoorgang wordt belast door voetgangers en fietsers. Volgens de NEN-EN 1991-2 moet hiervoor een belasting van 5 kN/m^2 worden aangehouden. De verkeersbelasting in de onderdoorgang is een variabele belasting.

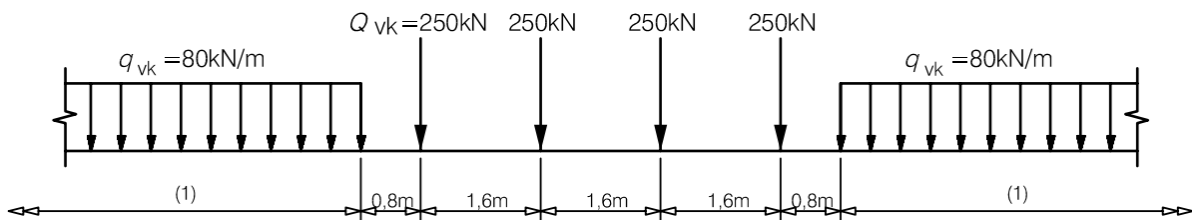


Figuur L.4: Belastinggeval verkeer in onderdoorgang

Deze belasting wordt rechtstreeks door de bedding gedragen, en is voor de krachtswerking van het geheel niet relevant.

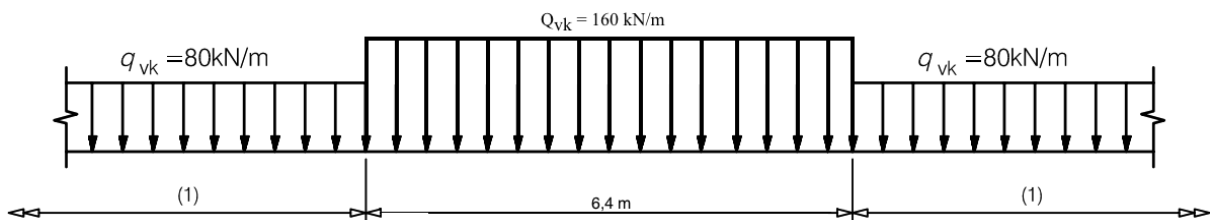
Verkeersbelasting op de onderdoorgang

De verkeersbelasting op de onderdoorgang bestaat uit de treinen die over de onderdoorgang rijden. Voor de treinbelasting is een model opgenomen in de NEN-EN1991-2:



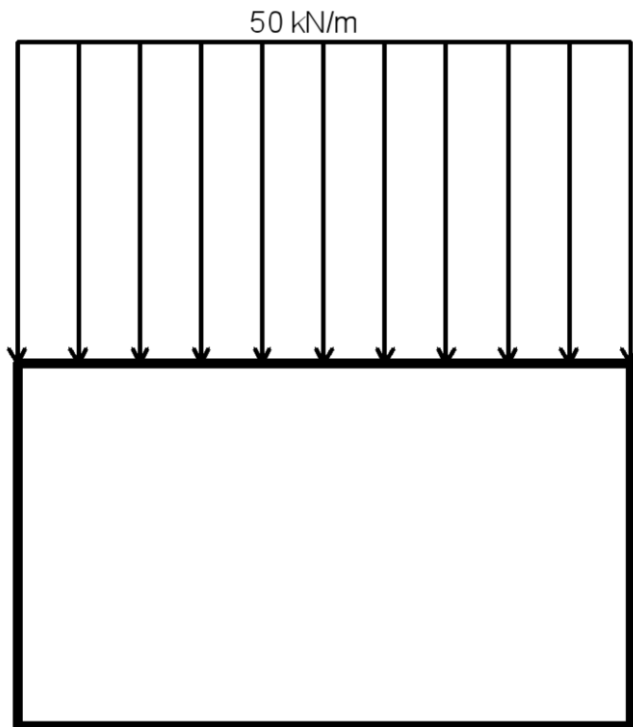
Figuur 0.5: Model 71 NEN-EN 1991-1 statische belasting van een trein

Deze is vereenvoudigt naar onderstaand model:



Figuur L.6: Vereenvoudigd model 71

Omdat er gekeken wordt naar de belasting op één meter onderdoorgang is deze belasting gedeeld door 3,2 (treinen zijn ongeveer 3 meter breed). De treinbelasting is een variabele belasting.



Figuur L.7: Belastinggeval verkeer op onderdoorgang

Verkeersbelasting naast de onderdoorgang

Verkeer naast de onderdoorgang zorgt voor een bovenbelasting op de grond naast de onderdoorgang. Hierdoor wordt de horizontale belasting op de wanden groter. Bij een belasting van 50 kN/m^2 naast de onderdoorgang wordt de extra horizontale belasting $0,5 * 50 = 25 \text{ kN/m}^2$ op de wanden. Dit is een variabele belasting



Figuur L.8: Belastinggeval verkeer naast de onderdoorgang

BELASTINGSCOMBINATIES

Met de belastinggevallen kunnen verschillende belastingcombinaties gevormd worden. Hierbij worden verschillende belastingen op dezelfde tijd in rekening gebracht. De constante belastingen moeten volgens de NEN-EN 1990 vermenigvuldigd worden met een belastingsfactor van 1,2 en de variabele belastingen met een belastingsfactor van 1,5. Om de belastingcombinaties makkelijk te kunnen weergeven zijn er afkortingen gegeven aan de belastinggevallen:

Belastinggeval	Afkorting	Belastingsfactor
Eigen gewicht	EG	1,2
Grond(water)belasting	GB	1,2
Verkeer op onderdoorgang	VOO	1,5
Verkeer naast onderdoorgang	VNO	1,5

Tabel L.3: Afkortingen van de belastinggevallen

Met de belastinggevallen zijn de volgende combinaties gevormd:

Belastingcombinatie	Belastinggevallen in combinatie
Constante belastingen	$1,2 \cdot EG + 1,2 \cdot GB$
Verkeer op onderdoorgang	$1,2 \cdot EG + 1,2 \cdot GB + 1,5 \cdot VOO$
Verkeer naast onderdoorgang	$1,2 \cdot EG + 1,2 \cdot GB + 1,5 \cdot VNO$
Verkeer op en naast onderdoorgang	$1,2 \cdot EG + 1,2 \cdot GB + 1,5 \cdot VOO + 1,5 \cdot VNO$

Tabel L.4: Belastingcombinaties op onderdoorgang