

Renovatie stalen brugdekken met een VVK sandwichconstructie



Lectoraat Kunststoftechnologie

Colofon

Titel

Renovatie stalen brugdekken met een VVK Sandwichconstructie

Publicatienummer

LKT-COMH-105559-1802

Datum

23 april 2018

Auteurs

Civiele techniek (#CTW), Hogeschool Windesheim (HW), Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT):

Student onderzoeker HW Robbin Lassche robbinlassche@hotmail.com

Student onderzoeker HW Robin Rook robin_rook93@hotmail.com

Docent onderzoeker HW Peter Bosman p.bosman@windesheim.nl

Opdrachtgevers

Aliancys

Fiberneering

Hogeschool Windesheim, LKT

Ron Verleg

Jasper Bouwmeester

Margie Topp, lector

ron.verleg@aliancys.com

jasper.bouwmeester@fiberneering.com

m.topp@windesheim.nl

Centre of Expertise

Windesheim & Stenden

Green.PAC

Polymer Application Centre www.greenpac.eu

ISBN

978-90-77901-95-3

Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0

Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.



Voorwoord

Voor u ligt het aangepaste afstudeerrapport met als onderwerp 'Renovatie stalen brugdekken met een VVK sandwichconstructie'. Dit afstudeerrapport is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan Hogeschool Windesheim te Zwolle. Dit is gebeurd in opdracht van de afstudeerbedrijven Aliancys en Fiberneering. Daarnaast is er samenwerking geweest met het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) van Hogeschool Windesheim. Wij zijn van februari 2016 tot en met juni 2016 bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van het afstudeerrapport.

In combinatie met onze afstudeerbegeleiders Peter Bosman, Jasper Bouwmeester en Ron Verleg, hebben wij de onderzoeksvragen voor dit afstudeeronderzoek vastgesteld. Omdat het een innovatief onderwerp betreft, kwam er tijdens het onderzoek veel informatie aan het licht wat vaak tot nieuwe vragen leidde. Hierdoor hebben wij ons verder in de stof moeten verdiepen om de onderzoeksvraag uiteindelijk te kunnen beantwoorden. De begeleiders hebben ons hierbij geholpen door mee te denken over bepaalde aspecten, waardoor vragen werden beantwoord en het onderzoek nieuwe impulsen kreeg.

Bij het afstudeeronderzoek hebben wij hulp gehad van Itthipat Lumlerdvoravith, een Thaise uitwisselingsstudent die zijn afstudeeropdracht graag wilde uitvoeren in Nederland. Door een deel van het onderzoek aan hem uit te besteden, konden wij ons op andere aspecten van het onderzoek richten. Hierdoor was het mogelijk het onderzoek breder uit te voeren.

Bij deze willen wij onze begeleiders bedanken voor de begeleiding en ondersteuning tijdens het onderzoekstraject om antwoord te krijgen op onze onderzoeksvraag. Ook willen wij Itthipat Lumlerdvoravith bedanken voor zijn bijdrage aan het onderzoek. Daarnaast willen wij alle respondenten bedanken die mee gewerkt hebben aan dit onderzoek. Zonder hun specialistische kennis was het niet mogelijk geweest om dit onderzoek te kunnen voltooien.

Tevens hebben wij veel gehad aan onze vrienden en familie. Zij hebben mee gedacht bij bepaalde lastige aspecten. Door een frisse blik was het mogelijk om ons te helpen in het onderzoek. Bovendien hebben zij ons moreel ondersteund tijdens het schrijfproces, om dit afstudeerrapport tot een goed einde te brengen.

Wij wensen u veel leesplezier toe.

Robbin Lassche & Robin Rook

Zwolle, 4 juni 2016

Ik heb het afstudeerrapport van beide heren mogen omzetten naar het onderhavige lectoraatsrapport. Vanwege de kwaliteit van het afstudeeronderzoek was dat een plezier om te doen. Die kwaliteit werd ook herkend en beloond door Bouwen met Staal en de Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging (KNCV) middels hun StudentenSTAALprijs 2017 en HBO Poster Polymeerprijs 2018. Ik wil verder Centre of Expertise GreenPAC hartelijk danken voor hun bijdrage aan dit onderzoek.

Peter Bosman

Zwolle, 23 april 2018

Samenvatting

Sinds 1997 is binnen Nederland meer aandacht gekomen voor de vermoeiingsproblematiek van orthotrope stalen brugdekken. Dit naar aanleiding van een inspectie van de tweede van Brienoordbrug, waarbij er verschillende vermoeiingsscheuren werden ontdekt in dekplaat en trogvormige dekplaatverstijvingen. Om veelvuldige verkeershinder door inspecties en reparaties te voorkomen moeten scheuren in alle vaak belaste stalen bruggen worden voorkomen.

Het doel is de haalbaarheid van een alternatieve oplossing voor de vermoeiingsproblemen te onderzoeken: sandwichconstructie bestaande uit schuimkern en een glasvezel versterkte kunststof (GVK) onderflens in plaats van de stalen troggen. Ten opzichte van de huidige oplossing, een hoge sterkte beton (HSB) overlaging, biedt de GVK sandwich overlaging verschillende voordelen:

- lichtere constructie (met name gunstig bij beweegbare bruggen)
- wordt onder de brug aangebracht (minder verkeershinder bij renovatie)
- geen ophoging van de landhoofden (minder raakvlak aanpassingen)

Experimenten laten zien dat een hybride sandwich geschikt gemaakt kan worden om schadevrij de impactbelasting van voorgeschreven vallende lading op te nemen door geen flowmedium/vezels in de interface tussen stalen dekplaat toe te passen. Bovendien deukt de stalen plaat eerder in dan dat er delaminatie of verbrijzelen van de kern optreedt. Er kan een constructie worden verkregen die voldoende impactenergie op kan nemen en die uitwendige signalen afgeeft voordat er inwendige schade optreedt.

De resultaten van een engineeringscase laten zien dat een GVK sandwichconstructie alle overige bezwijkmechanismen moet kunnen weerstaan.

Experimenten laten zien dat met vacuüm infusie van lijm boven het hoofd (van onder af) een volledige benatting onder een dekplaat kan worden verkregen zonder flowmedium/vezels te gebruiken.

Voor vacuüm infusie van lijm is een beknopt uitvoeringsplan opgesteld. Aan de hand daarvan is een kostenraming opgesteld. Zowel directe als indirecte kosten van een GVK sandwichconstructie blijken gunstig te kunnen zijn voor beweegbare bruggen ten opzichte van HSB overlaging.

De GVK sandwich lijkt een technisch haalbare en economisch gunstige oplossing te kunnen vormen voor beweegbare stalen brugdekken met vermoeiingsproblemen.

Summary

Since 1997, the problems of fatigue of orthotropic steel bridges became an important issue. As a result of an inspection of the second 'Van Brienenoord' bascule bridge, it became clear that several fatigue cracks occurred in the steel deck plate and V-shaped deck plate stiffeners. To prevent frequent delays in traffic due to inspection and repair, cracks in orthotropic steel deck of all frequently loaded steel bridges should be prevented.

The goal is to do research to the feasibility of an alternative solution for the fatigue problems: sandwich structure consisting of foam core and glass fibre reinforced plastic (GRP) under-flange replacing the V-shaped deck plate stiffeners. In comparison with the current solution, a high strength concrete (HSC) overlay, the GRP sandwich underlay offers several advantages:

- lighter structure (particularly favourable for movable bridges)
- underlay under bridge deck (less traffic delay during renovation)
- no raise of the abutments (less interface adjustments)

Experiments show that a hybrid sandwich structure can be made that is sufficiently capable to absorb the prescribed impact of falling cargo in case no flow media/fibres are applied in the interface between deck plate and core. Furthermore steel deck plate denting occurs before delamination or core crushing appears. A structure can be obtained that is sufficiently capable to resist impact loads and gives external signals before internal damage occurs.

The results of an engineering case show that a GRP sandwich has to be able to resist all other failure modes.

Experiments show that with vacuum infusion above head (from the lower side) a complete wetting under the deck plate can be accomplished without using flow media/fibres.

For vacuum infusion a brief implementation plan is made. With this a cost estimate is composed. Both the direct and indirect costs of a GRP sandwich structure can appear to be favourable for movable bridges compared to an HSC overlay.

The GRP sandwich seems to be a technically feasible and economically favourable solution for movable steel bridge decks with fatigue problems.

Begrippenlijst

Materialen

FRP - VVK	Fibre reinforced plastic	Vezel versterkt kunststof
GRP - GVK	Glass fibre reinforced plastic	Glasvezel versterkt kunststof
HSC - HSB	High strength concrete	Hoge sterkte beton
PVC - PVC	Polyvinylchloride	Polyvinylchloride

Textielsoorten

CSM	Chopped strand mat	mat: gehechte 50 mm vezels in aselekt patroon
CFM	Continuous filament mat	mat: gehechte continue vezel in aselekt patroon
WF	Woven fabric	weefsel: gewoven (gebogen), continue vezels
NCF	Non crimp fabric	legsel: meerdere aan elkaar gestikte UD lagen
UD	Uni directioneel	laag met rechte, continue vezels in 1 richting

Overig

FEM - EEM	Finite element method	Eindige elementen methode
SLS - BGT	Serviceability limit state	Bruikbaarheidsgrenstoestand
ULS - UGT	Ultimate limit state	Uiterste grenstoestand
MCA - MCA	Multi criteria analysis	Multi criteria analyse

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Summary	4
Begrippenlijst	5
1. Inleiding	8
1.1 Aanleiding	8
1.2 Probleemanalyse	8
1.3 Doel- en vraagstelling	12
1.4 Leeswijzer	13
2. Onderzoeksmethoden	14
2.1 Operationalisering	14
2.2 Afbakening	16
3. Vermoeiingsproblematiek	17
3.1 Vermoeiingstypen	17
3.2 Reparatie vermoeiingsscheuren voorafgaand aan HSB overlaging	18
3.3 HSB overlaging	20
3.4 Conclusie	21
4. Vezel versterkte kunststoffen	22
4.1 Opbouw vezel versterkte kunststoffen	22
4.2 Vezelverwerking	23
4.3 Eigenschappen vezel versterkte kunststof sandwichconstructie	23
4.4 Verwerkingsmethoden	27
4.5 Bevestigingsmethoden	30
4.6 Bezwijkmechanismen sandwichconstructie	31
4.7 Vermoeiing staal	32
4.8 Vermoeiing composiet	33
5. Gebruik van sandwichconstructies	35
5.1 Inleiding	35
5.2 Civiele sector	35
6. Gedrag stalen dekplaat-VVK sandwich onder impactbelasting	38
6.1 Inleiding	38
6.2 Impact proef	38
6.3 Resultaten	40
6.4 Conclusie	44

7.	Het ontwerp	45
7.1	Casus	46
7.2	Krachtsverdeling EEM	47
7.3	Vermoeiing stalen dekplaat	48
7.4	Belastingen	49
7.5	Resultaten	49
7.6	Lijmverbinding VVK-onderflens tegen dwarsdrager	50
7.7	Plooicontrol sandwich flenzen	51
7.8	Buigspanningen	51
7.9	Lokale wisselspanningen in dekplaat door wielen	52
7.10	Schuifspanningen	52
7.11	Vervormingen	54
7.12	Eigenfrequentie sandwich	54
7.13	Conclusie	54
8.	Uitvoering	55
8.1	Inleiding	55
8.2	Uitvoeringsmethoden	55
8.3	Bevestigingsmethode	59
8.4	Benattingsproef infuseren van lijm	60
8.5	Uitvoeringsplan prefab variant	62
9.	Economische haalbaarheid	66
9.1	Inleiding	66
9.2	Indirecte kosten	66
9.3	Directe kosten	67
9.4	Conclusie	68
10.	Conclusie	69
10.1	Terugkoppeling deelvragen	69
10.2	Conclusie	70
10.3	Discussie en aanbevelingen	70
11.	Bibliografie	72
	Bijlagen	74

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Sinds 1997 is er binnen Nederland veel aandacht gekomen voor de vermoeiingsproblematiek van orthotrope stalen brugdekken. Dit naar aanleiding van de inspectie van de tweede van Brienenoordbrug waarbij er vermoeiingsscheuren werden ontdekt. Vooral het probleem met de dekplaatscheuren is iets wat voorkomen dient te worden vanwege moeilijke bereikbaarheid door de slijtlaag. Het probleem van de vermoeiingsscheuren is veroorzaakt door de toenemende verkeersintensiteit en verkeersbelasting op de Nederlandse wegen. Voor het oplossen van dit probleem is door Rijkswaterstaat een projectgroep PSR (Problematiek Stalen Rijdekken) ingesteld die deze problematiek is gaan onderzoeken. Hierbij is het overlagen met hoge sterkte beton (HSB) van de dekplaat als oplossing naar voren gekomen. In de praktijk is gebleken dat deze oplossing nadelen en (initiële) problemen met zich mee brengt. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 3. (Hageman, 2009).

De interesse in het onderwerp, renovatie stalen brugdekken door middel van een sandwichconstructie, is ontstaan naar aanleiding van het bijwonen van een afstudeerpresentatie van R. Achterberg en J. van Gorkum over de renovatie van stalen brugdekken door middel van vezel versterkte kunststoffen. Achterberg en Van Gorkum zijn in 2014 afgestudeerd aan de Hogeschool Windesheim in de richting Civiele Techniek. Zij hebben onderzoek verricht naar de mogelijkheid om de vermoeiingsproblematiek op te lossen door het toepassen van vezel versterkte kunststof (VVK). In dit onderzoek is hoofdzakelijk gekeken om VVK onder de stalen troggen te lijmen. (Achterberg & van Gorkum, 2014).

Als aanbeveling is de mogelijke oplossing voorgedragen om de stalen troggen te vervangen door een schuimkern en VVK onderkant. Daarbij ontstaat een lichte, hybride sandwichconstructie met stalen rijdekplaat en een VVK onder-plaat, waarbij de kunststof delen worden gelijmd onder de dekplaat en tussen de lijven stalen dwarsdragers en hoofdliggers zonder een verhoging van het rijdekniveau. Onderzoek punten zijn hierbij (Achterberg & van Gorkum, 2014):

- de opbouw en dimensionering van schuimkern en VVK onder-plaat
- de schuif- en drukverbinding tussen rijdekplaat en kern
- de schuifverbinding tussen schuimkern en stalen lijven
- de moment-druk-verbinding tussen VVK onder-plaat en stalen lijven
- de uitvoeringsaspecten van het vervangen van troggen door de sandwich

1.2 Probleemanalyse

Het probleem bij orthotrope stalen brugdekken

Nadat in 1997 bleek dat er in het beweegbare deel van de, toen nog maar zeven jaar oude, Tweede Van Brienenoordbrug vermoeiingsscheuren aanwezig waren, is door Rijkswaterstaat een onderzoek gestart naar de conditie van stalen bruggen in Nederland. Daartoe is in 1998 de projectgroep Problematiek Stalen Rijdekken (PSR) ingesteld met als doel de oorzaak en omvang van de vermoeiingsproblemen te onderzoeken en oplossingen voor bestaande en nieuwe bruggen te ontwikkelen. Overigens is de vermoeiingsproblematiek bij stalen bruggen niet alleen een Nederlands probleem, maar speelt het wereldwijd in vele landen.

Uit het onderzoek van de PSR-projectgroep kwam naar voren dat vooral de orthotrope stalen bruggen gevoelig zijn voor vermoeiingsscheuren. De oorzaak hiervoor is de sterk toegenomen verkeersintensiteit, dit is terug te zien in figuur 1.1 (Hageman, 2009).



Figuur 1.1 Verkeersintensiteit op de Moerdijk, aansluitend op Van Brienenoordbrug (Hageman, 2009)

Een orthotroop stalen brugdek, zoals weergegeven in figuur 1.2, bestaat uit hoofdliggers en dwarsdragers met als gezamenlijke bovenflens de stalen rijdeklap. De deklap velden worden daarbij ondersteund door troggen, die loodrecht op de dwarsdragers staan.

Naast de toegenomen verkeersintensiteit zijn er andere ontwikkelingen geweest bij vrachtwagens. Vrachtwagens waren eerder bijvoorbeeld voorzien van 4 wielen per as, dit is gereduceerd tot 2 wielen per as, ook wel de super singles genoemd (Scholtens, 1998). Brugdekken vermoeien daardoor eerder, waardoor de levensduur van de constructie vermindert. De levensduur van stalen brugdekken zou berekend zijn op 100 jaar, maar deze beginnen na een jaar of 30 al vermoeiingsmankementen te vertonen bij de onderdelen die in figuur 1.2 zijn onderstreept (Kolstein, 2000).



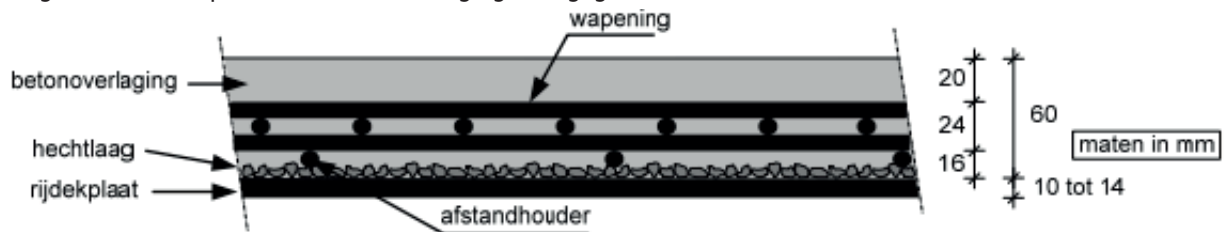
Figuur 1.2 Orthotroop stalen brugdek (Hageman, 2009)

Deze vermoeiingsproblemen bestaan uit vier faalmechanismen (Hageman, 2009):

- Scheurtype 1: Passtuk in trog
- Scheurtype 2: Aansluiting trog op dwarsdrager
- Scheurtype 3: Trog-dekplaat las
- Scheurtype 4: Dekplaatscheur.

De huidige oplossing met HSB-overlaging

Doordat het probleem van vermoeiing optrad, heeft Rijkswaterstaat vanaf 1998 verkennende studies uitgevoerd naar potentiële levensduur verlengende oplossingen van stalen bruggen. (Rijkswaterstaat, 2011). HSB-overlaging is hieruit geselecteerd. Dit is ontwikkeld en getest en daarna op meerdere bruggen toegepast. In figuur 1.3 is de opbouw van HSB-overlaging weergegeven.



Figuur 1.3 Principe van de HSB-overlaging (Hageman, 2009)

De HSB-overlaging biedt de volgende voor- en nadelen:

Voordelen:

- Het dragen en spreiden van de verkeersbelastingen
- Spanningsreductie in de staalconstructie
- Zorgen voor een veilige en comfortabele passage voor het wegverkeer.

Nadelen:

- Toename van het gewicht levert problemen op voor met name beweegbare bruggen
- Landhoofden moeten worden aangepast op de toegenomen hoogte van het dek
- Voor de uitvoering dient een groot deel van de brug afgesloten te worden (Hageman, 2009)
- De HSB-overlaging heeft een lange uithardingstijd
- Uitvoeringsgevoelig vanwege het hoge wapeningsgehalte en strenge uitvoeringstoleranties.

De methode werkt tot nog toe succesvol, maar had aanvangsproblemen bij het testproject:

Daar bleek dat het beton slecht verdicht was, met kans op holle ruimtes. Dit leidt tot gaten in het beton en versnelling van vervanging van het wegdek, wat juist voorkomen moet worden. Een gevolg van slechte verdichting is terug te zien in figuur 1.4.



Figuur 1.4 Gat in HSB wegdek (Hageman, 2009)

Na de kinderziektes biedt HSB-overlaging nu volledige oplossing tegen scheurtypes 3 en 4.

HSB helpt tegen scheurtype 1 en 2: passtuk in trog en scheurtype respectievelijk aansluiting trog op dwarsdrager vanwege het verhogen van de stijfheid van de dekplaat, maar het probleem wordt hiermee niet volledig opgelost. (Hageman, 2009)

Onderzoek

Rijkswaterstaat staat nog steeds open voor alternatieve oplossingen. Hierbij kan worden gedacht aan zowel variaties op de huidige HSB-overlaging als aan nieuwe versterkingsmethoden (Dijk, 2015).

In voorgaand onderzoek van R. Achterberg en J. van Gorkum is de mogelijkheid bekeken om de renovatie van stalen brugdekken uit te voeren met behulp van een versterking van vezel versterkte kunststoffen (VVK) onder de troggen. Als vervolgonderzoek hierop, is een orthotroop stalen brugdek beschouwd waarvan de troggen onder het brugdek worden vervangen door een VVK sandwichconstructie.

Figuur 1.5 laat de sandwichconstructie zien die in dit onderzoek als startpunt gebruikt is voor bestaande constructies. De schuim-kernhoogte is 0,3 m om de VVK onderflens aan te laten sluiten op bestaande onderdelen van het stalen dek.



Figuur 1.5 VVK sandwich ingepast in bestaand dek

De verwachte **voordelen** van VVK-onderlagen ten opzichte van HSB-overlagen zijn:

- De vermoeiingsproblemen van alle 4 scheurtypes worden volledig opgelost
- Een sandwichconstructie geeft met een kernhoogte van 0,3 m geen gewichtstoename, zie Tabel 1.1
- Het bestaande rijdek niveau kan worden gehandhaafd
- De uitvoering kan lokaal of gefaseerd worden uitgevoerd, met minder drastische verkeershinder
- Alleen bij de verharding van slechts 1 dag moeten verkeerstrillingen worden beperkt, met minder langdurige verkeershinder.

Brugdek	Nul-variant (uitgangssituatie)	Met HSB-overlaging (gerepareerd)	Met VVK-sandwich aan onderzijde (gerepareerd)
Gewicht (kg/m ²)	313	493	315

Tabel 1.1 Gewichtsvergelijking: Nul-variant, HSB overlagen & VVK onderlagen.

Voor gewichtsberekening zie Bijlage A

De verwachte **nadelen** van VVK-onderlagen ten opzichte van HSB-overlagen zijn:

- Na vallende lading zou delaminatie kunnen ontstaan tussen stalen dekplaat en de kern, die vervolgens kan groeien
- Sandwichconstructie moet vanaf de onderzijde van de brug worden aangebracht en boven het hoofd werken is lastig
- Onbekendheid met (de samenwerking van) de materialen.

1.3 Doel- en vraagstelling

Het doel van dit onderzoek is: het ontwikkelen van een betrouwbare en economisch interessante VVK sandwichconstructie om de stalen troggen te vervangen bij een orthotrope stalen brug.

De hoofdvraag is:

Kunnen de vermoeiingsproblemen bij orthotrope stalen brugdekken technisch en economisch worden opgelost door het vervangen van de stalen troggen door een vezel versterkte kunststof sandwich?

Voor gestructureerde beantwoording van de hoofdvraag zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. Wat zijn de problemen bij orthotrope stalen brugdekken, hoe ziet de huidige oplossing eruit en wat zijn hiervan de beperkingen?
2. Hoe is de werking (faalmechanismen en rekenregels) van reguliere VVK sandwich draagconstructies?
3. Hoe gedraagt een stalen dekplaat-VVK sandwich constructie zich onder een vallende lading (aanvullend faalmechanisme)?
4. Wat zijn de benodigde afmetingen en materiaalspecificaties voor een sandwichconstructie t.b.v. de vergelijking met HSB overlagen?
5. Welke uitvoeringsmethode is het meest geschikt om onder een stalen dek een VVK sandwich aan te brengen?
6. Is een VVK sandwich economisch aantrekkelijk ten opzichte van HSB-overlagen?

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt behandeld hoe het onderzoek opgebouwd is, welke onderzoeksmethoden er zijn gebruikt en de onderzoek afbakening.

Hoofdstuk 3 geeft aan welke problemen zich voordoen bij een orthotroop stalen brugdek en wat hiervoor tot nu toe de geëigende oplossing is.

Hoofdstuk 4 beschrijft de algemene informatie over vezel versterkte kunststoffen.

In hoofdstuk 5 zijn de verschillende sectoren uitgewerkt waar sandwichconstructies in gebruikt worden.

In hoofdstuk 6 is het gedrag van de stalen dekplaat-VVK sandwichconstructie onder impactbelasting vastgesteld. Dit is gedaan met behulp van experimenten.

In hoofdstuk 7 staat het ontwerp van de VVK sandwichconstructie beschreven om deze te kunnen vergelijken met de HSB overlagen.

In hoofdstuk 8 is de beste uitvoeringsmethode voor VVK sandwich bepaald en uitgewerkt tot een uitvoeringsplan.

In hoofdstuk 9 is de economische haalbaarheid van VVK sandwich vergeleken met de HSB-overlagen.

In hoofdstuk 10 is er antwoord gegeven op de hoofdvraag en deelvragen. Op basis van het onderzoek zijn hier aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

In hoofdstuk 11 staan de gebruikte bronnen van dit onderzoek.

2. Onderzoeksmethoden

2.1 Operationalisering

In deze paragraaf is beschreven met welke methoden de deelvragen zijn geoperationaliseerd.

2.1.1 Deelvraag 1

Wat zijn de problemen bij orthotrope stalen brugdekken, hoe ziet de huidige oplossing eruit en wat zijn hiervan de beperkingen?

Er is al veel bekend over de problemen van vermoeiing bij orthotrope stalen brugdekken. Voor het beantwoorden van deze vraag is daarom gebruikt gemaakt van literatuur. Rijkswaterstaat heeft een onderzoek laten verrichten door Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V. over de vermoeiingsproblemen van de Van Brienoordbrug die in 1997 ontdekt zijn tijdens een inspectie. Er is van dit onderzoek een rapport opgesteld dat informatie biedt over de problemen die vermoeiing veroorzaken en de huidige oplossing (HSB). De HSB-overlaging is eerst in een pilotproject uitgevoerd, waarbij de uitvoering nauwkeurig is beschreven om te bepalen of deze oplossing mogelijkheden biedt. (Hageman, 2009)

Naast dit onderzoek, zijn er andere onderzoeken naar vermoeiingsproblemen in stalen bruggen gedaan:

- Renovatie stalen bruggen door middel van vezel versterkt kunststof door R. Achterberg en J. van Gorkum (Achterberg & van Gorkum, 2014)
- Levensduurverlenging van vermoeiingsgevoelige orthotrope stalen brugdekken met Engineered Cementitious Composite door G. Dilsiz (Dilsiz, 2013).

2.1.2 Deelvraag 2

Hoe is de werking (faalmechanismen & rekenregels) van reguliere VVK sandwich draagconstructies?

Er is al veel bekend over de werking van VVK-sandwich draagconstructies, alleen is dit nog niet bekend bij een breed publiek. Voor het beantwoorden van deze vraag is daarom gebruik gemaakt van literatuuronderzoek, waarbij voornamelijk gebruik is gemaakt van het boek Composieten Basiskennis (Nijssen, Composieten basiskennis, 2012).

Omdat er weinig bekend is over de toepassing van sandwichconstructies onder stalen platen is er middels literatuuronderzoek informatie ingewonnen over sandwich draagconstructies in de toepassingsgebieden:

- Luchtvaart
- Scheepsbouw
- Transport
- Civiele Techniek
- Windenergie

Daarbij is tevens een verdiepingsslag in de mechanica van sandwichconstructies gedaan. Er is onder meer gebruik gemaakt van Google Scholar.

2.1.3 Deelvraag 3

Hoe gedraagt een stalen dekplaat-VVK sandwich constructie zich onder een vallende lading (aanvullend faalmechanisme)?

Voor vallende lading worden experimenten verricht op stalen dekplaat op een kern omdat hiervoor geen literatuur voor handen is. Er is wel literatuur beschikbaar van omtrent valtesten van Royal Haskoning DHV voor delaminatie in de VVK dekplaat als gevolg van vallend lading (Souren & Tromp, 2013). Valhoogte en massa worden hieruit overgenomen.

Er is een brainstormsessie belegd met specialisten uit de opleiding Civiele techniek en het lectoraat Kunststoftechnologie om een ontwerpvisie te ontwikkelen die rekening houdt van vallende lading.

2.1.4 Deelvraag 4

Wat zijn de benodigde afmetingen en materiaalspecificaties voor een VVK sandwichconstructie om deze te kunnen vergelijken met HSB een overlaging?

Voor deze vraag is simulerend onderzoek toegepast in de vorm van ontwerpen / engineeren. Er is gebruik gemaakt van berekeningen en tekeningen aan de hand van een case waarin een vergelijking met het traditionele opbouw wordt verricht. Alle bekende bezwijkmechanismen (sterkte, stijfheid, stabiliteit, vermoeiing) zijn getoetst aan de hand van bekende mechanica rekenregels en bekende mechanische eigenschappen van gebruikte materialen.

Hierbij worden met een geschikte materiaalkeuze (kern, VVK, lijm) gecontroleerd:

- lokale buiging dekplaat en kerndrukspanning door wielbelasting
- bezwijken van flenzen door globale moment (trek: breken en druk: verbrijzelen)
- plooien van gedrukte flenzen
- druk VVK onderflens tegen de dwarsdrager (hars)
- schuifspanning door dwarskracht (kern en lijmlaag)
- vermoeiing bij trek, druk en afschuiving, ten gevolge van aslasten
- buigvervorming (flenzen) en afschuifvervorming (kern)
- eigenfrequentie in relatie tot trilling.

Voor het bepalen van de krachtsverdeling is gebruik gemaakt van software op basis van Eindige Elementen Methode.

2.1.5 Deelvraag 5

Welke uitvoeringsmethode is het meest geschikt om onder een stalen dek een VVK sandwich aan te brengen?

Voor het beantwoorden van deze vraag is er een vergelijkend onderzoek toegepast. Er is gekeken naar de twee uitvoeringsmethodes om een sandwichconstructie onder een stalen brugdek te bevestigen, te weten 'in situ' en 'prefab'. Voorts is er gekeken naar twee bevestigingsmethodes om de kern te verbinden aan de stalen dekplaat, te weten 'handmatig lijmen' en 'infuseren van lijm'. Deze varianten zijn op voorhand bepaald aan de hand van een brainstormsessie samen met alle begeleiders.

Voor de afweging van de varianten is gebruik gemaakt van Multicriteria-analyses (MCA).

Om de benutting bij infuseren van lijm te kunnen beoordelen is een experiment uitgevoerd. In dit experiment is niet geïnfuseerd onder een stalen plaat maar onder een glazen plaat. Dit om de benutting te kunnen zien.

Van de geselecteerde uitvoeringsmethode is een beknopt uitvoeringsplan geschreven. Dit uitvoeringsplan bevat een stapsgewijze opbouw van de uit te voeren werkzaamheden.

2.1.6 Deelvraag 6

Is een VVK sandwich economisch aantrekkelijk ten opzichte van HSB overlagen?

In voorgaande onderzoek is reeds onderzoek gedaan naar de kosten van een sandwichconstructie ten opzichte van HSB-overlagen, waarbij VVK onder de troggen werd verbonden. Vanwege het ontbreken van een begroting over HSB-overlagen was daar op een vereenvoudigde manier een vergelijking gemaakt. In deze vergelijking waren alleen de directe kosten meegenomen van de sandwichconstructie. (Achterberg & van Gorkum, 2014)

Door in dit onderzoek ook de indirecte kosten mee te nemen, zijn de totale kosten van de uitvoeringsmethodes met elkaar vergeleken. Hiermee is er een completere vergelijking verkregen.

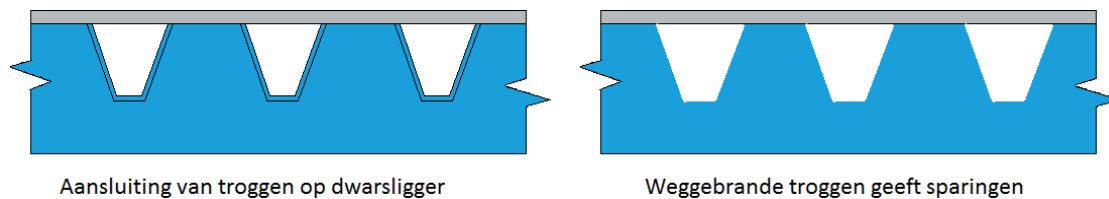
2.2 Afbakening

Het onderzoek richt zich primair op een oplossing tegen vermoeiing bij orthotrope stalen brugdekken van **beweegbare bruggen** omdat daarbij het gewicht en de niveauhoogte van het brugdek van groot belang zijn.

Er wordt alleen een 'volle' of '**zuivere**' **sandwich** constructie met stalen bovenplaat, schuimkern en VVK onder-plaat beschouwd, dus zonder (VVK) lijven; conform Figuur 4.8. Dit is eenvoudiger te ontwerpen en te realiseren én beperkt het aantal verbindingen.

Uitgangspunt is dat dwarsdragers lijven hebben zonder sparingen.

Er zijn namelijk orthotrope brugdekken waarbij de troggenstukken tussen de dwarsdragers zijn gelast én orthotrope brugdekken waarbij de troggen door sparingen in de dwarsdrager lopen. In dat laatste geval wordt er van uitgegaan dat na het wegbranden van de troggen de sparingen constructief worden dichtgelast.



Figuur 2.1 Stalen dek met doorgestoken troggen, met en zonder troggen

Voor het bepalen van de meest geschikte uitvoeringsmethode worden prefab en in situ vergeleken. Voor het bepalen van de meest geschikte bevestigingsmethode worden handmatig lijmen en infuseren van lijm vergeleken.

3 Vermoeiingsproblematiek

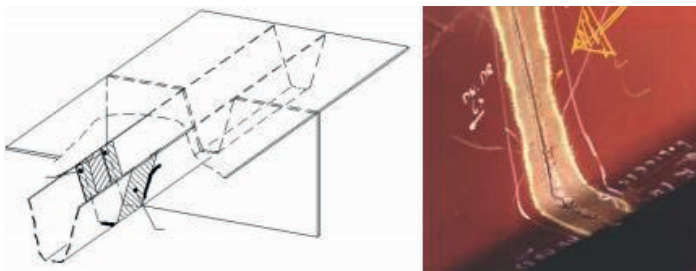
In dit hoofdstuk is behandeld welke problemen zich voordoen in een orthotrope stalen brugdek door het faalmechanisme vermoeiing. Na de beschrijving van de problemen is de huidige oplossing van HSB-overlagen beschouwd.

3.1 Vermoeiingstypen

Om inzicht te krijgen in wat het vermoeiingsprobleem in stalen brugdekken nu precies inhoudt, is ingegaan op de problemen die zich voordeden bij de Van Brienenoordbrug. Na inspectie van dit stalen brugdek is duidelijk geworden dat bij deze brug, door vermoeiing, zichtbare scheurvorming is ontstaan. Wat opvalt bij deze inspecties is, dat 4 verschillende scheurtypen het meest voorkomen.

Scheurtype #1: Passtuk in trog

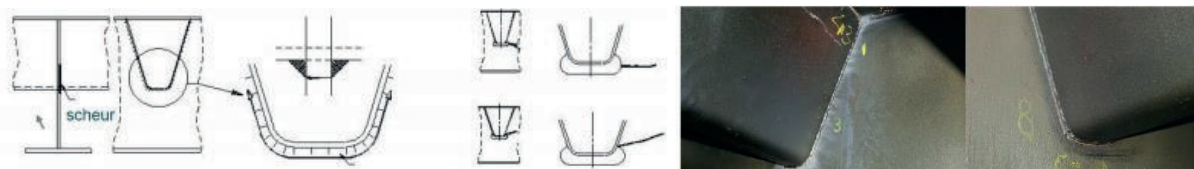
Om de troggen aan elkaar te verbinden wordt er een passtuk toegepast, een klein stukje van een trog. Deze is aan beide uiteinden van de troggen gelast (Figuur 3.1). In deze lasverbinding ontstaan scheurtjes door optredende spanningswisselingen. Bij voorkeur worden de passtukken bij een momenten nulpunt van de trog toegepast.



Figuur 3.1 Passtuk in trog

Scheurtype #2: Aansluiting trog op dwarsdrager

De troggen dragen hun krachten af naar de dwarsdragers. De troggen zijn veelal door sparingen in de dwarsdrager heen gestoken (al dan niet met mouseholes¹), en soms tussen dwarsdragerlijven zonder sparingen. De troggen zijn doormiddel van een las verbonden aan de dwarsdragers (Figuur 3.2). Deze verbindingen, bij het steunpuntmoment van de troggen, zijn een zwakke plek waarin scheurtjes ontstaan door optredende spanningswisselingen.

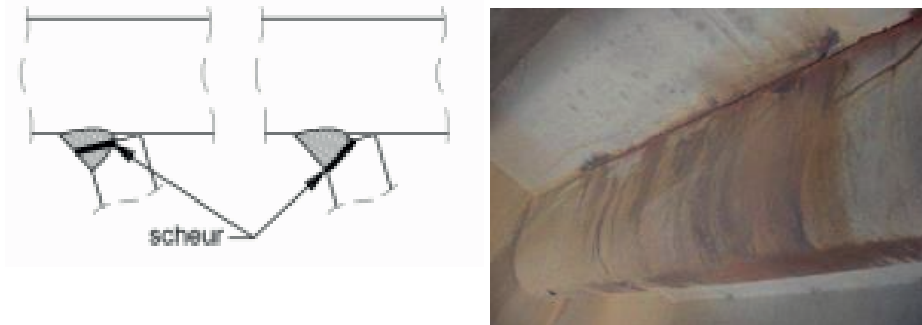


Figuur 3.2 Aansluiting trog op dwarsdrager

¹ Een sparing in de dwarsdrager onder de aansluiting met de trog zodat de spanning gereduceerd wordt.

Scheurtype #3: Trog-dekplaat las

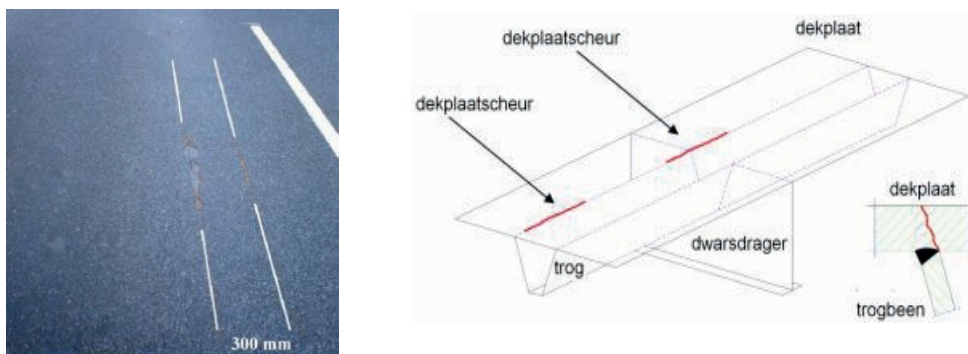
Dit scheurtype ontstaat in de lasverbinding tussen de troggen en de dekplaat. Hierbij kan er langs de hele laslijn scheurvorming ontstaan door de optredende spanningswisselingen (Figuur 3.3). Deze scheurtjes kunnen doorgroeien tot in de dekplaat.



Figuur 3.3 Trog-dekplaat las

Scheurtype #4: Dekplaatscheur

De dekplaatscheur ontstaat bij de aansluiting van de trog aan de dekplaat en bij de aansluiting van de dwarsdrager aan de dekplaat. Echter is hierbij niet de lasverbinding die het begeeft, maar de dekplaat zelf waar scheuren in ontstaan (Figuur 3.4). Door afdracht van wiellasten naar de lijven van de troggen en naar de dwarsdragers ontstaan er spanningspieken in de dekplaat bij de verbindingen.



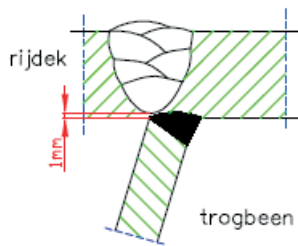
Figuur 3.4 Dekplaatscheur

Met een HSB-overlaging (Hoge-Sterkte Beton) kan de vermoeiingsschade structureel worden verminderd, deze is beschreven in §3.3. Voordat deze wordt uitgevoerd moeten bestaande vermoeiingscheuren in de dekplaat eerst geïnspecteerd en worden gerepareerd (TNO, 2010), dit staat beschreven in §3.2.

3.2 Reparatie vermoeiingsscheuren voorafgaand aan HSB overlaging

Bij een enkelvoudige dekplaatscheur met een lengte kleiner dan 500 mm is de standaard reparatiemethode "Boven-1 gutsen & dichtlassen van dekplaatscheur". Deze staat weergegeven in Figuur 3.5. Deze methode mag alleen worden toegepast in combinatie met een permanente spanningsvermindering zoals met een HSB-overlaging (Jong A.F.N., 2012).

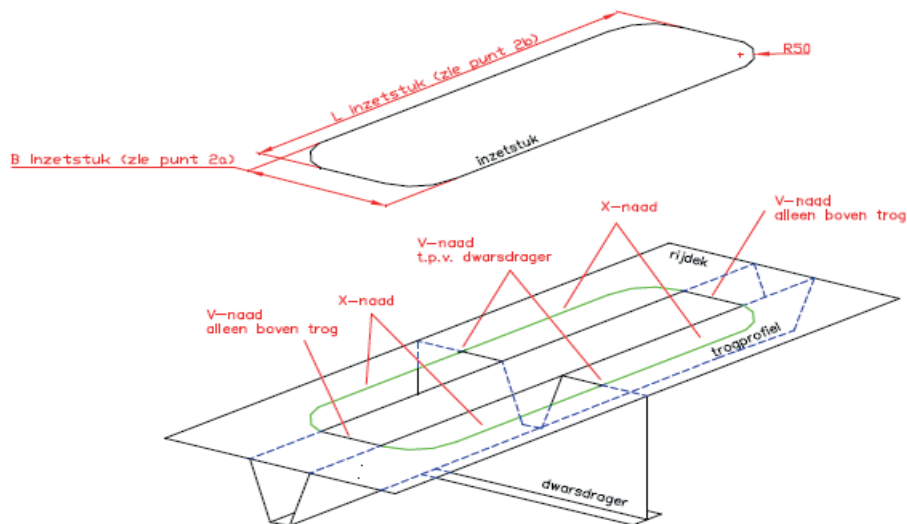
Schematische schets lasuitvoering



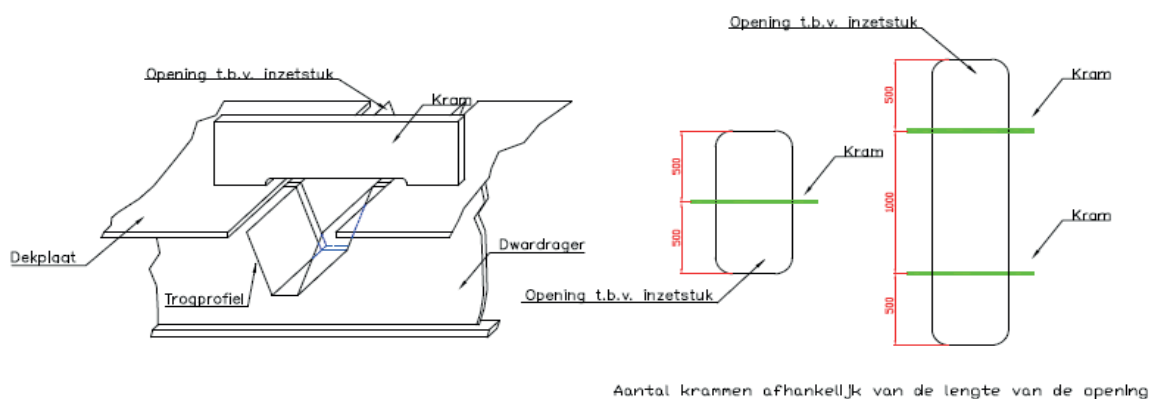
Figuur 3.5 Reparatie nr. B1: gutsen & dichtlassen enkelvoudige dekplaatscheur <500mm

Bij meervoudige dekplaatscheuren is de standaard reparatiemethode "Boven-4 inzetstuk dekplaatscheuren". Deze staat weergegeven in Figuur 3.6. Om de krachtswerking van het brugdek tijdens de reparatie te waarborgen zijn tijdelijke kramen noodzakelijk, ruwweg 1 kram per meter opening. In Figuur 3.7 staat een voorbeeld van een dekplaatkram weergegeven die de bovenflens functie van de dwarsdrager tijdelijk waarneemt (Jong A.F.N., 2012).

Schematische schets reparatie (exclusief kram)



Figuur 3.6 Reparatie nr. B4: inzetstuk plaatsen bij meervoudige dekplaatscheuren



Figuur 3.7 Tijdelijke kram bij reparatie B4: inzetstuk plaatsen

Indien delen van troggen worden vervangen (reparatie Onder-3) dan mag er:

- tijdens wegbranden van trogdelen geen verkeer aanwezig zijn op drie trogprofielen aan weerszijden van de te repareren trog. Dat wil zeggen op 1,8 m naast de te repareren troggen
- tijdens lassen van nieuwe trogdelen geen verkeer worden toegelaten op gehele brugdek in verband met trillingen
- alleen gelijktijdig gerepareerd worden aan trogstukken in elkaars verlengde nadat dit in overleg met de opdrachtgever is vastgesteld (Jong A.F.N., 2012).

Naar inschatting² van de heer A.F.N. de Jong van Rijkswaterstaat, auteur van 'Eisen rijdekreparaties' (Jong A.F.N., 2012), mag er:

- ook tijdens wegbranden van hele troglijnen geen verkeer op 2,0 m vanuit het hart van de weg te branden trog worden toegelaten. Op basis van zijn ervaring verwacht hij dat de stalen dekplaat er recht bij blijft staan als er één troglijn onderuit wordt gebrand
- ook tijdens lijmen geen verkeer mag worden toegelaten op het gehele brugdek. Dit op basis lijmervaring bij stalen bruggen.

3.3 HSB overlaging

Uit onderzoek van Rijkswaterstaat is gebleken dat HSB-overlaging, voorlopig, een goede oplossing is voor het verminderen van vermoeiing in orthotrope stalen brugdekken. De HSB-overlaging heeft de volgende eigenschappen:

- **Spanningsreductie in de staalconstructie**
Het voornaamste doel van de overlaging is het reduceren van de spanningen in de dekplaat van orthotrope stalen brugconstructies door middel van verhoging van het traagheidsmoment om zo de vermoeiing tegen te gaan en de levensduur te verlengen.
- **Veilige en comfortabele passage wegverkeer**
De HSB-overlaging neemt de functie van het asfalt over en dient een veilige en comfortabele passage van het wegverkeer te kunnen waarborgen. Er wordt een epoxy slijtlaag aangebracht voor stroefheid en de dikte van de HSB laag is verlopend om on-vlakheden in de staalconstructie teniet te doen.
- **Dragen verkeersbelasting**
HSB dient in staat te zijn om de belastingen te dragen ten gevolge van lokale wiellasten, maar ook belastingen ten gevolge van globale belastingen van de brug. Door relatief veel wapening en een hoog cementgehalte is dit haalbaar.

Echter zijn er ook enkele nadelen bij het toepassen van een HSB overlaging:

- Toename van het gewicht levert problemen op bij beweegbare bruggen
- Landhoofden moeten worden aangepast op de toegenomen hoogte van het dek
- Voor de uitvoering dient een groot deel van de brug afgesloten te worden
- De HSB-overlaging heeft een lange uithardingstijd.

De HSB-overlaging is primair bedoeld voor het voorkomen van de dekplaatscheur (scheurtype #4) en in iets mindere mate voor de langlasscheur dekplaat (scheurtype #3). Beide worden afdoende opgelost, al hoewel niet wordt uitgesloten (gezien de grote laslengte en de relatief beperkte inspectiemogelijkheden) dat na aanbrengen van de HSB-overlaging nog langlasscheuren kunnen worden gevonden.

² Gedeelde inschatting in telefonisch contact 7 februari 2018 tussen A.F.N de Jong en P.G.F. Bosman

Voor de scheuren in de passtukken (scheurtype #1) leidt de HSB-overlaging niet primair tot een spanningsreductie aan de onderzijde van de trog waar de scheur meestal begint. Echter, door de grotere stijfheid van dekplaat met de HSB-overlaging wordt een lokale belasting veel beter over de troggen gespreid, waardoor toch een reductie van de spanningen optreedt en dus een verlenging van de levensduur en beperking van de scheurgroeisnelheid. Opgemerkt kan worden, dat de passtukproblematiek in hoge mate afhankelijk is van de lasdetailering en de kwaliteit van de uitvoering. Dit verschilt zeer sterk per brug, waardoor het alleen brugafhankelijke problemen betreft. Uitsluiten van nieuwe scheuren in de passtukken is niet mogelijk.

De scheur op de aansluiting van de trog aan de dwarsdragers (scheurtype #2) komt bij bruggen met doorgestoken troggen niet veel voor. Het beton werkt hiervoor indirect mee op dezelfde manier als bij het passtuk. Dit scheurtype komt wel regelmatig voor bij bruggen met tussengelaste troggen.

Bij bruggen met tussengelaste troggen speelt echter de dekplaatscheur (scheurtype #4) weer veel minder, zodat de HSB-overlaging, die vanuit de dekplaatproblematiek is bedacht, daar niet een direct logische oplossing is. (Hageman, 2009).

3.4 Conclusie

Alle scheuren in het staal moeten gerepareerd alvorens een HSB overlaging wordt toegepast.

HSB overlaging biedt een oplossing voor scheur trog-dekplaatlas (#3) en dekplaatscheur (#4).

HSB overlaging helpt bij scheur passtuk in trog (#1) en scheur in aansluiting trog op dwarsdrager (#2). Dit vanwege het verhogen van de stijfheid van de dekplaat, maar het probleem is hiermee niet volledig opgelost.

4. Vezel versterkte kunststoffen

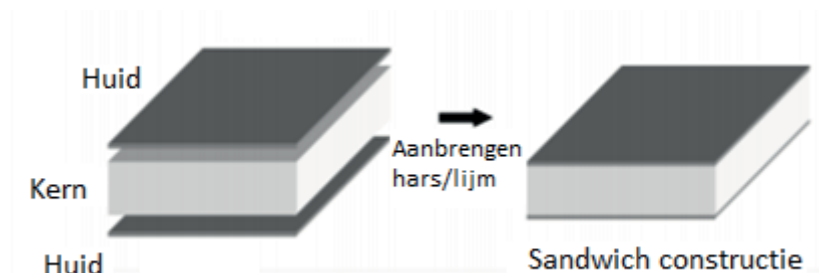
Dit hoofdstuk beschouwt vezel versterkt kunststof (VVK). Vezels worden gebruikt om kunststof sterker en stijver te maken. Kunststof wordt gebruikt om vezels in te bedden, vormvast te maken, druk op te kunnen laten nemen en te beschermen.

4.1 Opbouw vezel versterkte kunststoffen

Vezel versterkte kunststoffen zijn composieten. "Een composiet is een materiaalconstructie, bestaande uit minimaal 2 macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen" (Nijssen, Composieten basiskennis, 2012). Een vezel versterkte kunststof (VVK) composiet bestaat uit vezels en een kunststofhars. Voor de vezels worden doorgaans glasvezel gekozen. Soms worden duurdere koolstof of aramide vezels met hoogwaardige eigenschappen gekozen of natuurvezels voor een bio-VVK. Als matrix (verharde hars) wordt bij draagconstructies doorgaans een thermoharder gekozen, omdat deze bij hogere temperaturen niet smelt. Meestal wordt gekozen voor een onverzadigde polyester (UP) en soms voor een duurdere en meer bescherming biedende vinylester (VE) of epoxy (EP). De hars is meestal van petrochemische oorsprong, en soms van biobased oorsprong. De samenwerking tussen vezels en de matrix is belangrijk voor de materiaaleigenschappen van de resulterende VVK.

De vezels in een composiet zorgen voor de sterkte en stijfheid en de matrix zorgt voor de samenhang/samenwerking tussen de verschillende lagen. Composieten kunnen in verschillende samenstelling worden toegepast. Door vezels in meerdere richtingen toe te passen kunnen verschillende materiaaleigenschappen verkregen worden in verschillende richtingen. Dit kan berekend worden met de klassieke laminaat theorie. (Nijssen, 2013)

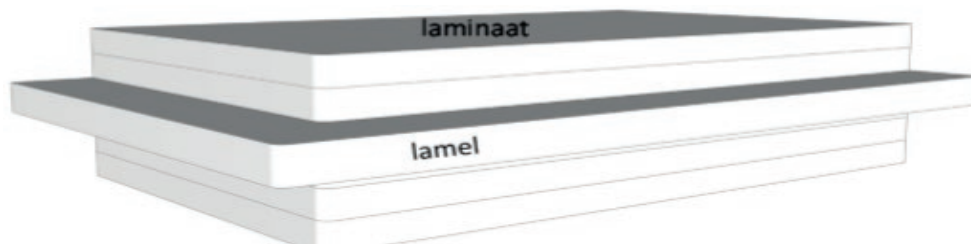
In de meeste industrieën zijn composieten met geringe diktes van enkele millimeters tot centimeters gangbaar, in de civiele techniek komt men echter grotere diktes tegen. Daarom wordt er vaak gebruik gemaakt van VVK sandwichconstructies. Een sandwichconstructie bestaat uit twee dunne huiden met daar tussen een lichtgewicht kern (Figuur 4.1).



Figuur 4.1 Opbouw VVK sandwich

4.2 Vezelverwerking

Kunststof composieten zijn meestal opgebouwd uit laminaten. Een laminaat is laagsgewijs opgebouwd uit lamellen met verschillende vezelrichtingen en diktes. Een lamel is een elementaire laag VVK met in beginsel orthotrope materiaaleigenschappen (Figuur 4.2).



Figuur 4.2 Overzicht lamel en laminaat

Voor de het ontwerpen met VVK's in constructieve toepassingen wordt in Nederland de CUR-96 (2018) aanbeveling gebruikt. In deze CUR-Aanbeveling voor glasvezelversterkte kunststoffen (GVK) zijn de lamellen als volgt ingedeeld:

UD-lamellen (UD-rovings, UD-tapes, UD-legsels)

- Bij deze lamellen zijn rechte vezels slechts in één richting georiënteerd (uni-directioneel)
- De materiaaleigenschappen in vezelrichting verschillen sterk van die loodrecht op de vezelrichting
- Het vezelvolumepercentage van UD-lamellen kan, afhankelijk van het type verwerking, variëren tussen 25% en 70%.

Weefsel lamellen (woven roving WR, woven fabric, woven cloth)

- Bij wefselflamellen zijn gekromde vezels in twee onderling loodrechte richtingen georiënteerd
- De materiaaleigenschappen in de vezelrichtingen verschillen van die onder een hoek met de twee vezelrichtingen
- Het vezelvolumepercentage van wefselflamellen kan, afhankelijk van het type weefsel en het productieproces, variëren tussen 25% en 55%.

Mat-lamellen (continue & discontinue vezelmat (CSM) en spuitrovings)

- Bij mat-lamellen zijn de vezels kriskras in alle richtingen georiënteerd
- De materiaaleigenschappen zijn in alle richtingen in het lamelvlak nagenoeg gelijk
- Het vezelvolumepercentage van mat-lamellen kan, afhankelijk van het type mat en het productieproces, variëren tussen 10% en 30%. (CUR96, 2018)

4.3 Eigenschappen vezel versterkte kunststof sandwichconstructie

Een sandwich-materiaal is een constructie bestaand uit een boven- en een onderlaag van relatief sterk en stijf materiaal. Deze wordt op afstand van elkaar gehouden door een tussenlaag, die doorgaans minder stijf en sterk, en veelal zeer licht is. Door middel van een hars of lijm worden deze delen aan elkaar bevestigd. Voor zowel de huiden, als de kern, kan uit een groot scala aan materialen gekozen worden. Hierdoor kunnen de eigenschappen van een vezel versterkte kunststof sandwichconstructie sterk variëren. Het voordeel van het toepassen van een sandwichconstructie is de gunstige verhouding tussen de stijfheid in het gewicht (Figuur 4.3).

			
Relatieve buigstijfheid	1	7.0	37
Relatieve buigsterkte	1	3.5	9.2
Relatief gewicht	1	1.03	1.06

Figuur 4.3 Verhouding van de dikte t.o.v. stijfheid, sterkte en gewicht

4.3.1 Vezels

De vezels in een composiet zorgen voor de sterkte en stijfheid. Door het toevoegen van vezels in de richting van de belasting in een composiet, is de kunststof in de vezelrichting vele malen sterker en stijver dan de kunststof zelf. Loodrecht op de vezels is dit echter aanzienlijk lager, omdat de vezels als spanning-concentraties in de kunststof veroorzaken. In de praktijk worden laminaten daarom met lamellen met vezels in verschillende richtingen toegepast. In deze paragraaf zijn de eigenschappen van de meest gebruikte vezels: glas-, koolstof- en aramide vezels nader toegelicht. In Figuur 4.4 staan de eigenschappen van de meest voorkomende vezels. (Nijssen, Composieten basiskennis, 2012)

Eigenschap	E-glas	Carbon	Aramide
Stijfheid [GPa]	70-80	160-440	60-180
Breuksterkte [MPa]	2400	2000-5300	3100-3600
Breukrek [%]	2.6	1-1.5	1.7
Dichtheid [kg/m ³]	2500-2600	1800-2000	1540
Breuklengte [km]	96	187	238

Figuur 4.4 Eigenschappen vezels

Glasvezels zijn de goedkoopste vezels. Glasvezel heeft goede sterkte en stijfheid eigenschappen. Onder andere is het daarom de meest gebruikte vezel in composieten. Glasvezel wordt voornamelijk in algemene toepassingen gebruikt. Er zijn veel verschillende soorten glasvezels verkrijgbaar. E- en S-glas zijn het meest bekend. S-glas heeft iets betere sterke en stijfheid eigenschappen, maar is duurder. Enkele belangrijke eigenschappen van glasvezel zijn (Inholland, 2011):

- Goede algemene eigenschappen en brede toepasbaarheid
- Relatief goedkoop tegenover de andere vezels
- Hogere sterkte dan staal.

Koolstofvezels hebben de hoogste specifieke sterkte en stijfheid van deze vezels. Koolstofvezel wordt daarom vaak gebruikt in lichtgewicht constructies onder andere vliegtuigen, ruimtevaart, auto's, zeiljachten etc.

Enkele belangrijke eigenschappen van koolstof zijn:

- Hoge sterkte/gewicht verhouding
- Goede vermoeiing eigenschappen
- 'Slecht' bestand tegen impact
- Gevoelig voor UV
- Elektrisch geleidend
- Duurder dan aramide en glasvezels
- Stijfheid.

Aramidevezels zijn voornamelijk geschikt in toepassingen waar veel slijtage, impact of wrijving plaats vindt. Bijvoorbeeld in kogelvrije vesten, (fiets)-helmen, wieldeuren in vliegtuigen, brandwerende kleding, maar ook wordt Nomex (aramide variant) veel gebruikt als honingraat (kern materiaal). Enkele belangrijke eigenschappen van aramide zijn:

- Hoge weerstand tegen impact
 - Slecht bestand tegen vermoeiing
 - 'Slecht' bestand tegen UV
 - Niet met normaal gereedschap te snijden, knippen of zagen vanwege taaheid
 - Hoge vochtabsorptie.
- (Inholland, 2011)

4.3.2 Kunststoffen

Om een composiet te maken, zijn er niet alleen vezels nodig, maar ook kunststof. Kunststof lijkt op het eerst gezicht niet een logische keuze, omdat het de sterkte en stijfheid van de vezelmaterialen gedeeltelijk teniet doet. Toch is de kunststof onontbeerlijk. De belangrijkste, en meest voor de hand liggende reden is, dat het kunststof als 'lijm' optreedt en de vezels bij elkaar houdt. Door het omhullen met kunststof van een vezel kan een vezel een drukbelasting opnemen; het wordt ondersteund door het kunststof. Een tweede reden voor het gebruik van kunststof is dat de kunststof de vezels laat samenwerken, omdat de kunststof belastingen van de ene vezel op de andere vezel kan overdragen door schuifspanningen. Zo worden externe belastingen beter verdeeld over de vezels in een composiet, dan in een droge vezelbundel. Wanneer een van de vezels het begeeft wordt de belasting verdeeld over de andere vezels. Daarnaast werkt het kunststof als een soort bescherming van de vezels tegen externe factoren zoals: vocht, chemicaliën en ultraviolet licht (UV) en is vaak bepalend voor kleur en oppervlaktekwaliteit, lichtdoorlatendheid en brandveiligheid.

Er zijn verschillende soorten kunststoffen die in composieten worden gebruikt. De meest relevante kunststoffen zijn in deze paragraaf behandeld. Allereerst is het zaak om de kunststofmatrices te verdelen in twee categorieën, omdat veel van de verwerkingsmethoden afhangen van welke categorie ze toebehoren. (Nijssen, Composieten basiskennis, 2012)

Kunststoffen zijn onder te verdelen in:

- Thermoplasten
- Thermoharders

Thermoplasten

Thermoplasten zijn polymeren die bij verhitting smelten, bewerkbaar worden, en die bij afkoeling weer een vaste vorm aannemen. De meeste on-versterkte gebruiksplastics zijn thermoplasten. Moleculair gezien bestaan thermoplasten uit lange ketens, die in elkaar verstrengeld zijn. Bij verhitting ontstaat er enige bewegingsvrijheid door de atoombewegingen. Thermoplasten zijn over het algemeen niet geschikt voor impregneren van een vezelversterking wege hun hoge viscositeit onder druk en temperatuur.

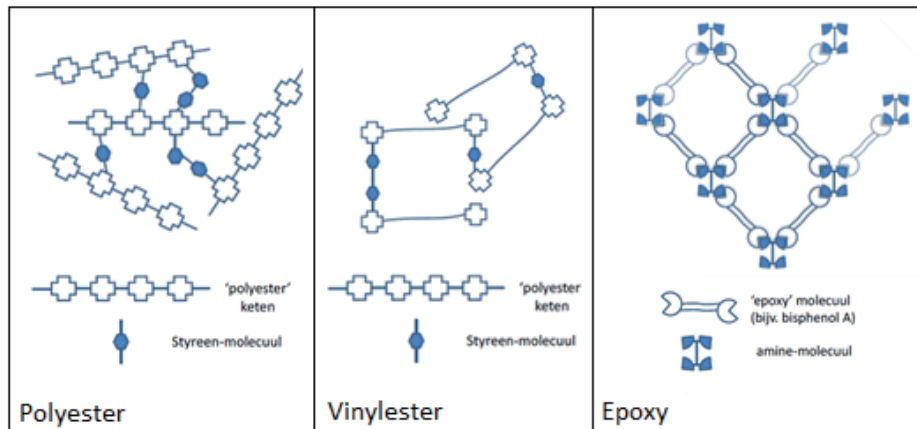
Thermoharders

Thermoharders zijn aanvankelijk vloeibaar en kunnen uitharden. Na uitharding smelten ze bij verhitting niet, maar verbranden uiteindelijk als de temperatuur verder wordt opgevoerd. Moleculair gezien bestaan de meeste thermoharders uit relatief korte ketens, die ervoor zorgen dat de niet-uitgeharte kunststoffen een zeer lage viscositeit hebben. Uitharding gebeurt door het op gang brengen van een chemische reactie, waarbij de korte ketens bindingen met elkaar aangaan en een driedimensionaal netwerk vormen. De meeste gebruikte thermoharde kunststoffen zijn:

- **Onverzadigde polyester**
Polyester composieten worden, mede vanwege de lage prijs en de gemakkelijke verwerkbaarheid, erg veel toegepast. Bij polyester zijn de belangrijkste componenten (onverzadigde polyester ketens en styreen (Figuur 4.5) al gemengd. De uitharding wordt opgestart onder invloed van een katalysator (bijv. een peroxide).
- **Vinylester**
Vinylesters worden voornamelijk gebruikt in toepassingen waar een hogere chemische weerstand nodig is dan de polyester kan bieden. Vinylesters zijn daarnaast veel minder gevoelig voor vocht. Het kan bijvoorbeeld als bescherm laag gebruikt worden over een polyester constructie die veel aan water wordt blootgesteld. In Figuur 4.5 wordt een schematische weergave gegeven van de bindingen tussen het styreen-molecuul en de vinylester keten.

- Epoxy

Epoxy materialen zijn duurder en moeilijker verwerkbaar en worden daarom minder toegepast. Echter met de opkomst van vacuüminjectietechnieken is het marktaandeel hiervan wel gestegen. Een voordeel van het toepassen van vezel versterkt epoxy is dat de vermoeiingsterkte stukken beter is ten opzichte van polyesters. Chemisch werkt epoxy heel anders dan polyesters en vinylesters. De kunststof ontstaat door samenvoeging van twee componenten, van een epoxy-molecuul en een amine. Bij het toevoegen van beiden componenten ontstaat er een dicht netwerk van ketens, dat regelmatig is dan de structuur van vinylester (Figuur 4.5).



Figuur 4.5 Harsstructuren

Materiaaleigenschappen

In Figuur 4.6 zijn enkele materiaaleigenschappen van de genoemde thermoharders weergegeven. Deze hangen echter sterk af van de chemische samenstelling. De waarden geven een indicatie.

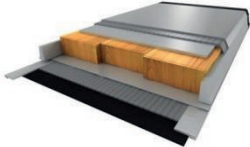
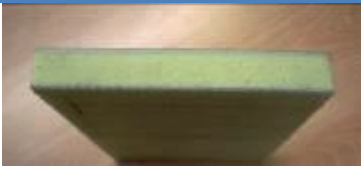
Eigenschap	Eenheid	Polyester	Vinylester	Epoxy
Soortelijke massa	Kg/m ³	1.15 - 1.25	1.12 - 1.16	1.15 - 1.30
Treksterkte	Mpa	40 - 85	65 - 80	90 - 130
Druksterkte	Mpa	140 - 150	120 - 130	90 - 130
Elasticiteitsmodulus	Gpa	2.4 - 4.6	±3.5	2 - 5
Breukrek	%	1.2 - 4.5	3 - 6	2 - 5
Therm. Uitz. Coef.	10 ⁻⁶ /K	80 - 150	70 - 120	60 - 90
Krimp	%	5 - 8	3 - 7	1 - 3
Prijs	€/kg	1 - 3.5	4 - 4.5	7 - 14

Figuur 4.6 Materiaaleigenschappen thermoharders

4.3.3 Kernmateriaal

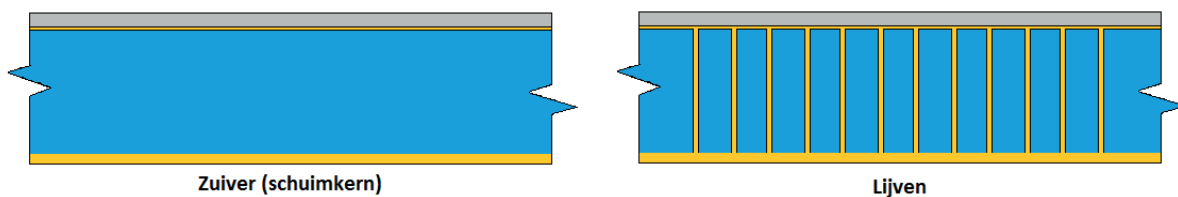
De primaire functie van de kern in een sandwichconstructie is om de stabilisatie te bieden aan de deklagen door deze op afstand te houden en het opnemen van de meeste afschuifbelasting door de dikte. Om deze taak efficiënt uit te voeren, moet de kern zo stijf en zo licht mogelijk zijn en moet uniform voorspelbare eigenschappen leveren in de omgeving (zoals hoge vochtigheid) waarin het eindproduct moet worden toegepast. Er worden doorgaans drie verschillende soorten kernen gebruikt (Figuur 4.7):

- (Balsa)hout
- Kunststof schuim met gesloten cellen
- Honingraatstructuur.

Kern typen		
(Balsa)hout	Schuim	Honingraatstructuur
		

Figuur 4.7 Verschillende typen kern voor VVK sandwich

Een kern in een sandwichconstructie kan bestaan uit een volle kern, dat wil zeggen dat er geen lijven tussen de huiden zit die de schuimkern onderbreken. Mocht de kern niet genoeg dwarskracht kunnen opnemen of te veel vervormen, dan kunnen er lijven worden toegepast, ook wel dwarschotten of 'shear webs' genoemd. De afschuiving van de kern is hierdoor niet meer bepalend (Figuur 4.8).



Figuur 4.8 Overzicht kern sandwichconstructie

4.4 Verwerkingsmethoden

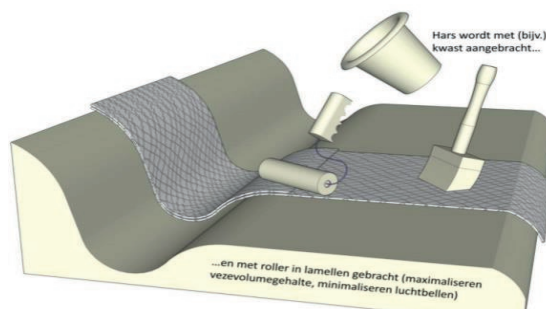
Hieronder volgt een overzicht van algemeen gangbare technieken. Het is goed mogelijk om producten te maken met een combinatie van technieken. De kunst is om bij elk product de meest geschikte methode te vinden. Aan de hand van de verwerkingsmethode kan het vezelvolumepercentage berekend worden (figuur 4.9).

	Mat	Weefsel	UD en Legsel
Hand-lamineren	10% - 20%	n.v.t.	n.v.t.
Vezelspuiten	10% - 20%	25% - 40%	40% - 50%
Vacuüm- of drukinjectie	20% - 30%	40% - 50%	50% - 60%
Pultrusie	20% - 30%	40% - 55%	50% - 70%

Figuur 4.9 Overzicht haalbare vezelvolumepercentages in relatie tot techniek

4.4.1 Hand-lamineren

Met hand-lamineren worden de losse lamellen één voor één in een mal gelegd. Deze worden vervolgens benat met een roller of kwast (Figuur 4.8). Dit is een arbeidsintensief proces, waarbij maatregelen moeten worden getroffen tegen het verschuiven van de lamellen. Het hand-lamineren vereist weinig investering, omdat met eenvoudige gereedschappen gewerkt wordt (enkelvoudige open mal). Verder zijn weinig verbruiksmaterialen nodig. (Nijssen, 2013)



Figuur 4.8 Hand lamineren (hand lay-up)

4.4.2 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; de dikte wordt gereguleerd door de duur waarmee een locatie bespoten wordt. Meestal worden hiermee grote objecten gemaakt zoals bootrompen, vijvers of zwembaden. Maar de methode wordt ook gebruikt om bijvoorbeeld bouwkundige of civiele werken van een coating voorzien. (Nijssen, 2013)

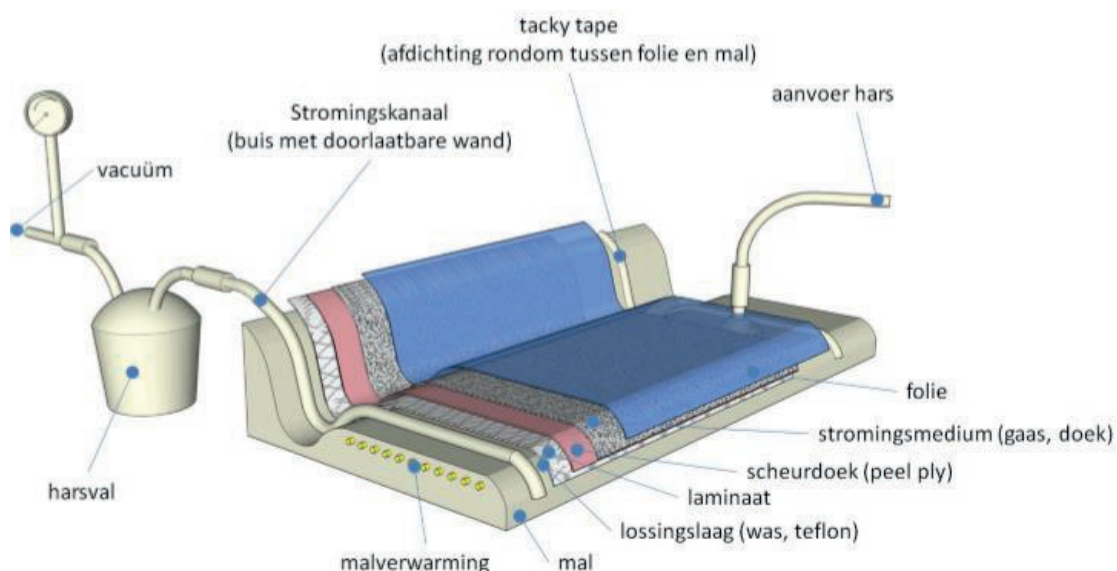
4.4.3 Vacuüm – of drukinjectie

Bij deze techniek wordt het werkstuk met behulp van druk met hars geïnjecteerd. Dit is alleen mogelijk als het pakket aan versterking en kernmaterialen luchtdicht wordt afgesloten. Meestal wordt aan één zijde de lucht door een vacuümpomp wordt afgezogen en wordt aan de andere kant de vloeibare hars met atmosferische druk of overdruk geïnjecteerd.

Het is mogelijk een werkstuk luchtdicht afsluiten met een stuk plastic (vacuümfolie). Echter moet het werkstuk wel aan één zijde ondersteund worden door een mal, anders kan het in het vlak in elkaar gedrukt worden (kreukelen). Deze vacuüm-folie (Engels: vacuum-infusion) techniek geeft een product met alleen een glad oppervlak aan de mal-zijde.

Een andere manier is om een rigide onder- en boven-mal te gebruiken; hiermee is het meestal makkelijker het juiste vezelvolumegehalte te verkrijgen en een juiste oppervlaktekwaliteit te krijgen aan beide zijden van het werkstuk. Dit is onder andere aan te bevelen bij de vervaardiging van proefstukken voor materiaaltesten. Deze methode staat bekend onder de naam Resin Transfer Moulding (RTM) en hierbij kan ook aan de injectiekant een hogere druk worden toegepast dan de atmosferische druk (dit is bij vacuum-folie techniek niet mogelijk).

Het principe van vacuümtechniek is vrij eenvoudig, de productkwaliteit is goed en er kunnen grote producten en redelijk grote series mee gemaakt worden. In Figuur 4.9 wordt een vacuüminfusie- opstelling met de bijbehorende hulpmiddelen weergegeven.



Figuur 4.9: Hulpmiddelen bij vacuümtechniek

In een mal, in de vorm van het eindproduct, wordt in eerste instantie een lossingslaag aangebracht, zodat het product na uitharden uit de mal gehaald kan worden (de meeste harsen zijn prima lijmen). Vervolgens wordt het laminaat volgens de specificaties opgebouwd. Bij een eenzijdige mal wordt vaak nog scheurdoek ('peel ply') toegepast: dit is wederom een soort lossingslaag, maar zorgt er ook voor dat de uiteindelijke oppervlaktestructuur een bepaalde ruwheid krijgt (bijv. gunstig voor lijmen of coaten). Soms wordt over een deel van het product een doek of gaas gelegd, die ervoor zorgt dat de hars overal in het product kan komen vóórdat uitharding optreedt. Tenslotte wordt het hele pakket afgedicht met vacuümfolie.

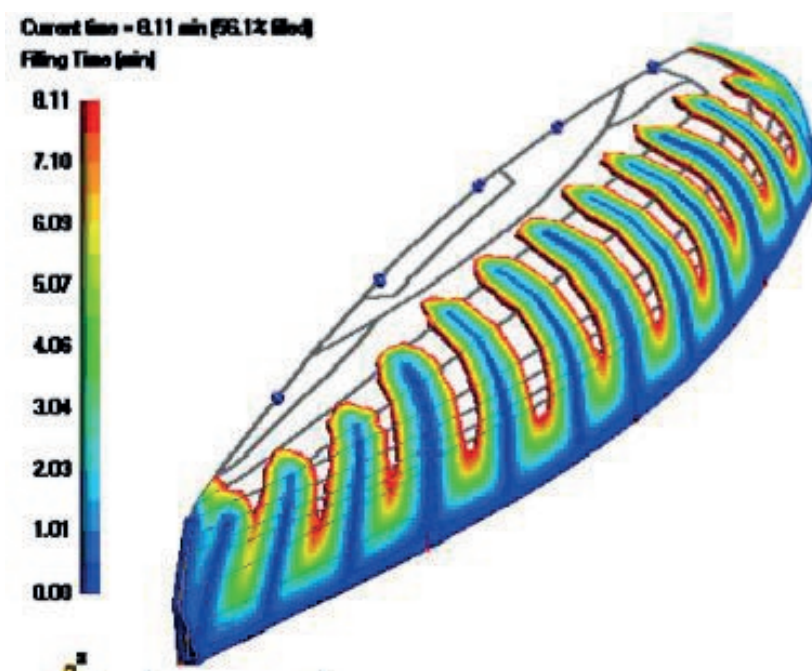
Rondom het product wordt dit aan de mal geplakt met een kneedbaar en zeer plakkerige tape, het 'tacky tape'. Het tacky tape wordt niet op de lossingslaag aangebracht. Het folie wordt niet strak over de mal gespannen, maar met enige plooien erin, om vervormingen tijdens het proces op te kunnen vangen. Zodra de hele opstelling luchtdicht is, wordt op één of meerdere punten vacuüm aangebracht. Hierdoor wordt het pakket door atmosferische druk op de folie geperst en kan later de hars door het product worden gezogen. Om te voorkomen dat overtollige hars aan de vacuümzijde in de drukmeter of vacuüminstallatie loopt, wordt vaak een harsval geplaatst aan de afvoerzijde.

Infusiestrategie

Bij de infusie van 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 een verkeerde infusiestrategie toepast wordt, kunnen de volgende twee meest voorkomende problemen optreden:

- **Onvollledige infusie door te lang infusiepad**
Tijdens de infusie wordt de hars stroperiger en zal het hars steeds minder snel door het product stromen; wanneer er te lange infusiepaden zijn (afstand tussen aanvoer en afvoerpunten) zal de hars niet overal in het product kunnen komen.
- **Onvollledige 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. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer harstoevoerleidingen (runners) te ver in de opstelling doorlopen; dan kan 'racetracking' optreden, waarbij het hars langs de randen stroomt en er droge plekken midden tussen de aanvoerleidingen ontstaan.

Ervaring met vacuüm-injectie gecombineerd met fysisch inzicht zijn onontbeerlijk voor het bepalen van een goede infusie-strategie.



Figuur 4.10 Simulatie van infusieproces

Er bestaat software, die gebaseerd is op een combinatie van de eindige elementenmethode en de wet van Darcy, waarmee de gevolgen van de infusiestrategie wordt beschouwd. Aan de hand van de voorspelde infusietijd kan de productietijd geschat worden en eventueel verbeterd worden. In Figuur 4.10 is een voorbeeld weergegeven van een simulatie van een infusie. (Nijssen, 2013)

4.4.4 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 continue- vezelmatten (Continuous Filament strand Mat - CFM) gebruikt, die door een harsbad worden geleid, vervolgens door de mal. Hierin wordt het profiel uitgehard bij hogere temperaturen (ca 150°C) en meestal op een bepaalde standaardlengte afgezaagd. In principe is het mogelijk oneindig lange profielen te maken, maar in de praktijk worden de profielen in lengtes van bijvoorbeeld 6 meter of korter afgezaagd worden.

4.5 Bevestigingsmethoden

Voor het bevestigingen van een sandwichconstructie onder een stalen dek kan onderscheid worden gemaakt tussen verschillende soorten bevestigingsmethoden: handmatig lijmen, infusie van lijm en mechanische bevestiging. De mechanische bevestiging wordt niet toegelicht in deze paragraaf omdat dit niet van toepassing is op het ontwerp.

4.5.1 Infusie

Infusie van lijm werkt op dezelfde manier als beschreven in § 4.4.3 vacuüminjectie. De verschillende onderdelen die aan elkaar bevestigd moeten worden, worden middels vacuüminjectie met elkaar verbonden. In de toepassing van het aanbrengen van de sandwichconstructie onder het dek zal er boven het hoofd worden geïnfuseerd, dit is doorgaans niet gebruikelijk.

4.5.2 Lijmen

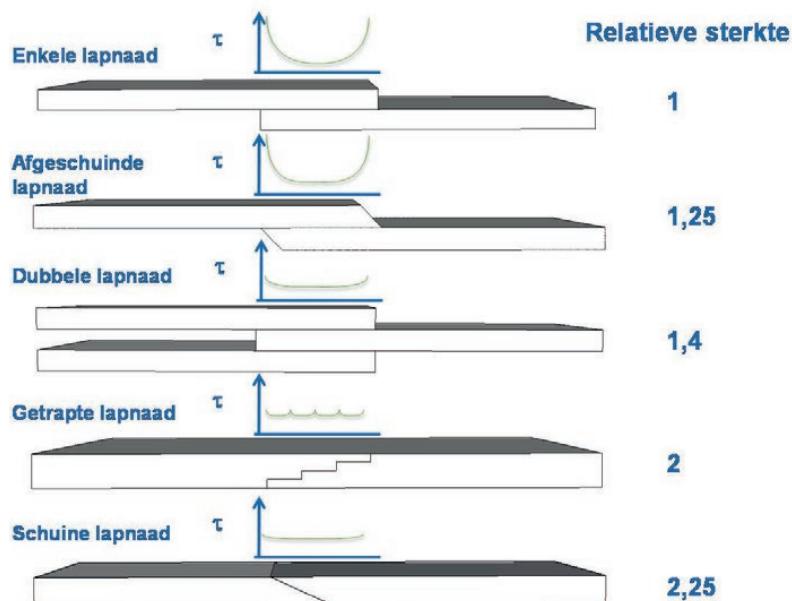
Een lijmverbinding bestaat uit het verlijmen van panelen of componenten en is een veel gebruikte manier van verbinden voor composieten. Er zijn verschillende voordelen voor het verlijmen van componenten ten opzichte van mechanische verbindingen. Enkele voordelen zijn:

- De lijm verbindt niet alleen, maar dicht ook af
- Geen last van corrosie
- Weegt minder dan mechanische verbinding
- Geen extra machinale bewerking
- Distribueert belasting over groot gebied
- Kan tijdens productie proces al delen verlijmen (co-curing).

Lijmen heeft echter ook enkele nadelen:

- Oppervlaktes moeten behandeld worden (ontvetten, schuren)
- De verwerkingsprocedure moet strikt worden nageleefd
- Kwaliteit controle achteraf is lastig.

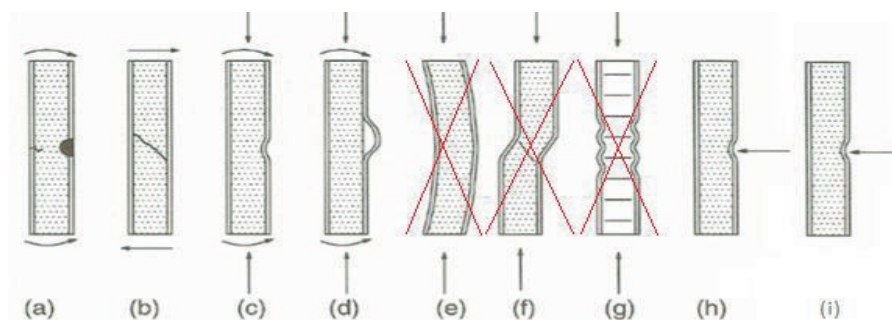
In Figuur 4.11 staan enkele mogelijke lijm verbindingen afgebeeld op volgorde van slechtste verbinding naar de beste. (Nijssen, 2013)



Figuur 4.11 Vergelijking lijm-verbindingen

4.6 Bezwijkmechanismen sandwichconstructie

Bij het ontwerpen van een sandwichconstructie dient de constructie op sterkte, stijfheid en stabiliteit getoetst te worden. Door de jaren heen zijn er voor sandwichconstructies standaard faalmechanismen geconstateerd. Door te kijken naar wat de standaard faalmechanismen en daar rekening mee te houden tijdens de berekening en toetsing kan er voorkomen worden dat de constructie bezwijkt (Figuur 4.12).



Figuur 4.12: Standaard bezwijkmechanismen van een sandwichconstructie

Faalmechanisme a: Het op trek (scheuren) of druk (verbrijzelen) falen van de flenzen

De bovenste flens (staal) wordt op druk belast en moet de maximale spanningen van het moment kunnen weerstaan. De onderste flens (glasvezel) wordt op trek belast en moet de maximale spanningen die optreden door het moment kunnen weerstaan.

De momenten die ontstaan treden op door een puntlast, in dit geval een wiellast van een vrachtwagen die doorbuiging veroorzaakt.

Faalmechanisme b: Afschuiving van de kern

Het kernmateriaal moet de dwarskrachten kunnen weerstaan die optreden door een wiellast.

Faalmechanisme c: Flens indeuking

Door de momenten die optreden in de sandwich, veroorzaakt door een wiellast, kan er indeuking van de flenzen veroorzaakt worden.

Faalmechanisme d: ·Flens uitknikken

Door de momenten die optreden in de sandwich, veroorzaakt door een wiellast, kan er uitknikken van de flenzen veroorzaakt worden.

Faalmechanismen e: ·Uitknikken, **f:** Afschuiving plooien & **g:** Rimpeling flenzen

Horizontale krachten spelen een ondergeschikte rol ten opzichte van grote verticale wiellasten. Deze faalmechanismen worden daarom buiten beschouwing gelaten.

Faalmechanisme h: ·Lokale doorbuiging door een puntlast

Door de wiellast zal er naast een globale doorbuiging, een lokale doorbuiging plaatsvinden. Deze worden apart berekend en kunnen bij elkaar opgeteld worden om de totale doorbuiging te beoordelen. De lokale doorbuiging zorgt ervoor dat het kernmateriaal bezwijkt en hierdoor de huid niet meer ondersteunt.

Faalmechanisme i: ·Impact

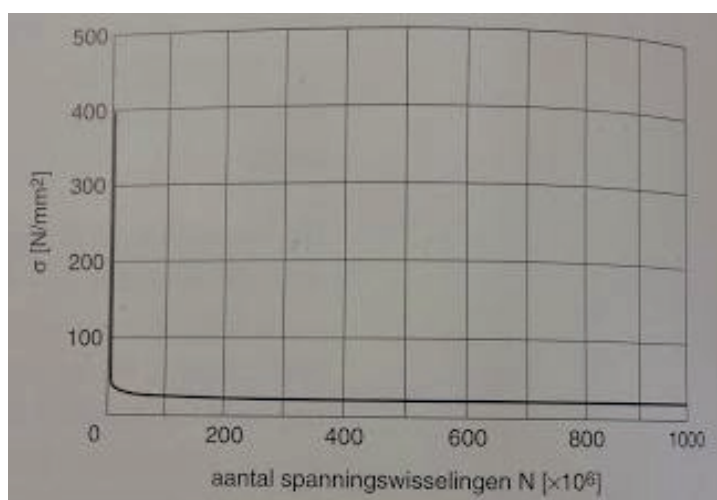
Vrachtwagens kunnen een lading vervoeren die niet goed bevestigd zit. Deze lading kan op het brugdek vallen en voor een impact schade zorgen. Hierdoor ontstaat er ineens een grote spanning op het brugdek die delaminatie kan veroorzaken.

Wat de invoering van sandwichconstructies in de civiele techniek tot nu toe in de weg stond was de zwakte voor impactbelasting in combinatie met vermoeiing door rollende wielen (zie ook hoofdstukken 5 en 6). (VKCN, 2005)

Als een sandwichconstructie plaatselijk beschadigd raakt door een vallende lading, veert de huid weliswaar netjes terug, maar blijft het kernmateriaal daaronder ingedeukt en is niet meer verbonden met de huid. Vrachtwagenwielen die er daarna overheen rijden kunnen gestaag het gebied verspreiden waar huid en kern delamineren.

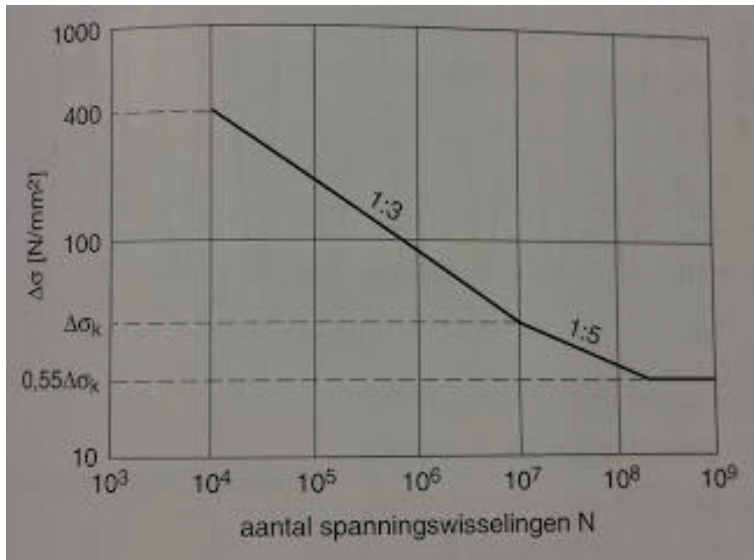
4.7 Vermoeiing staal

In de 19^e eeuw is er door August Wöhler onderzoek gedaan naar de relatie tussen de grootte van wisselende belasting en de levensduur van stalen constructies. Dit heeft geresulteerd tot een grafiek waarin de σ N-curve is uitgezet. Met deze grafiek is het spanningsniveau (σ) uitgezet tegenover het aantal spanningswisselingen (N). Hiermee is te bepalen bij welk spanningsniveau er geen vermoeiing optreedt in de staalconstructie.



Figuur 4.13 Spanningsniveau tegen spanningswisselingen

Voor de bruikbaarheid van de Wöhler-grafiek werden in de loop van de tijd zowel het spanningsniveau als het aantal wisselingen logaritmisches uitgezet. Op grond van deze weergave en overwegingen uit de breukmechanica bleek dat niet het spanningsniveau maar het verschil tussen de maximale spanning ($\sigma_{\max}$) en de minimale spanning ($\sigma_{\min}$) in een spanningswisseling bepalend is. Dit verschil, het spanningsinterval ($\Delta\sigma$), bepaalt de levensduur (Figuur 4.14).



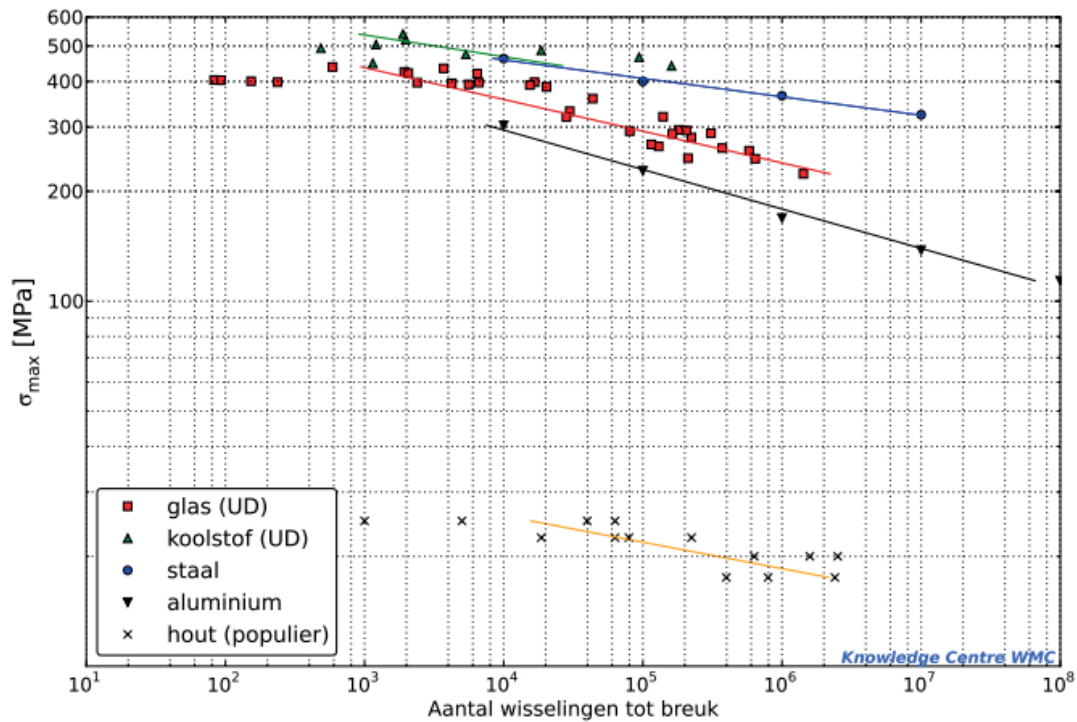
Figuur 4.14 spanningsniveau tegen spanningswisselingen

Als er onder de 55% van $\Delta\sigma_k$ gebleven wordt kan geconcludeerd worden dat er geen aanvullende vermoeiing optreedt en de constructie een oneindige rest levensduur heeft. Er zijn verschillende waarden van $\Delta\sigma_k$ vastgesteld bij verschillende lastypen. (Construeren B, 1996)

4.8 Vermoeiing composiet

Het faalmechanisme van composieten is heel anders dan bij staal. Een belangrijk verschil is het aantal vermoeiingsscheurtjes dat gelijktijdig kan optreden in een laminaat, dit is groter dan in een vergelijkbare staalconstructie. Deze scheurtjes kunnen in verschillende richtingen ontstaan en groeien, en in elkaar vloeien tot grotere scheuren en delaminaties. Dat er scheurtjes optreden tijdens vermoeiing wil niet zeggen dat composieten slechter presteren. Een goed ontwerp kan zware vermoeiingsbelastingen aan. Dit blijkt wel uit de grootschalige inzet van composieten in windmolen-rotoren en in constructie-onderdelen in vliegtuigen.

De gunstige vermoeiingseigenschappen van composieten blijken onder andere uit de helling van de zogenaamde σ -N curve, die de relatie aangeeft tussen spanning (' σ ') en vermoeiingslevensduur (bijv. aantal wisselingen tot breuk, 'N'), zie Figuur 4.15. Deze σ -N curve is bij composieten over het algemeen 'vlakker' dan bij staal. Bij een verlaging van de spanning treedt er een grotere toename in levensduur op, composietmaterialen laten bij lage spanningen zeer hoge vermoeiingslevensduren zien.



Figuur 4.15 σ -N curves voor verschillende materialen

Een ander belangrijk verschil met andere materialen is, dat composietmaterialen onder invloed van vermoeiing een deel van hun stijfheid verliezen. Het stijfheidsverlies wordt groter naarmate er meer vezels niet in belastingrichting liggen.

Het optreden van vermoeiingsschade kan worden verminderd door materialen en vezeloriëntaties aan te passen op de belasting, de constructie zodanig te wijzigen dat de belasting gunstiger wordt, of de spanning in de constructie te verlagen door extra lagen toe te voegen. Bij het beoordelen van de vermoeiingsgevoeligheid moeten met name verbindingen en details kritisch bekeken en vaak getest worden (Nijssen, 2013).

5. Gebruik van sandwichconstructies

5.1 Inleiding

Door de specifieke eigenschappen van sandwichconstructies worden deze in meerdere sectoren toegepast:

- Maritieme sector
- Windenergie sector
- Transport sector
- Luchtvaart sector
- Civiele sector.

In dit lectoraatsrapport is alleen de civiele sector beschreven omdat dit van toepassing is op dit onderzoek. In het afstudeerrapport zijn de andere sectoren in een bijlage beschreven.

5.2 Civiele sector

“VVK heeft een enorm potentieel: het is veel sterker en lichter dan beton en staal, wat veel nieuwe toepassingsmogelijkheden in de GWW-sector biedt” (Erberveld, 2015). Het innovatieprogramma van Rijkswaterstaat ziet in VVK een grote waarde voor de vervangingsopgave van verouderde civiele kunstwerken. Daarnaast wil Rijkswaterstaat een voortrekkersrol vervullen om te zorgen dat de GWW-sector VVK als volstrekt regulier materiaal gaat beschouwen. Zodat in de toekomst het makkelijker wordt om VVK te integreren in nieuwe vraagstukken en ontwerpen. VVK kan om meerdere redenen worden toegepast in de GWW-sector, deze zijn:

- Hoge specifieke sterkte en draagkracht
- Relatief laag soortelijk gewicht
- Ontwerpmogelijkheden
- Weer- en waterbestendig (neemt weinig water op)
- Uv-bestendig
- Beheer en onderhoud
- Corrosievrij materiaal corrodeert bijna niet
- Lange levensduur.

Toepassingen

Sandwichconstructies worden in de civiele techniek in meerdere toepassingen gebruikt. De grootste toepassingen van sandwichconstructies zijn vooral te vinden in brugdekken en in sluizen. Echter is dit pas van de laatste jaren. Wat de invoering van sandwichconstructies in de civiele techniek tot nu toe in de weg stond, was de zwakte voor impactbelasting in combinatie met vermoeiing.

Als een sandwichconstructie plaatselijk beschadigd raakt door bijvoorbeeld een vallende lading, veert de huid weliswaar netjes terug, maar blijft het kernmateriaal daaronder ingedeukt en is de kans groot dat deze niet meer verbonden is met de huid. Vrachtwagenwielen die er daarna overheen rijden verspreiden gestaag het gebied waar de huid en kern zijn onthecht. Het bedrijf Fibercore heeft zich hierin verdiept en heeft een geschikte oplossing bedacht om verkeersbruggen met een belasting tot 60 ton te ontwerpen, ook wel de ‘constructieve sandwichconstructie’. Deze oplossing kent geen kernmateriaal dat constructief meewerkt. Dat wil zeggen: in de nieuwste generatie bruggen zit wel PU-schuim, maar dat heeft geen andere functie dan die van verloren bekisting. Constructief doet het niets.

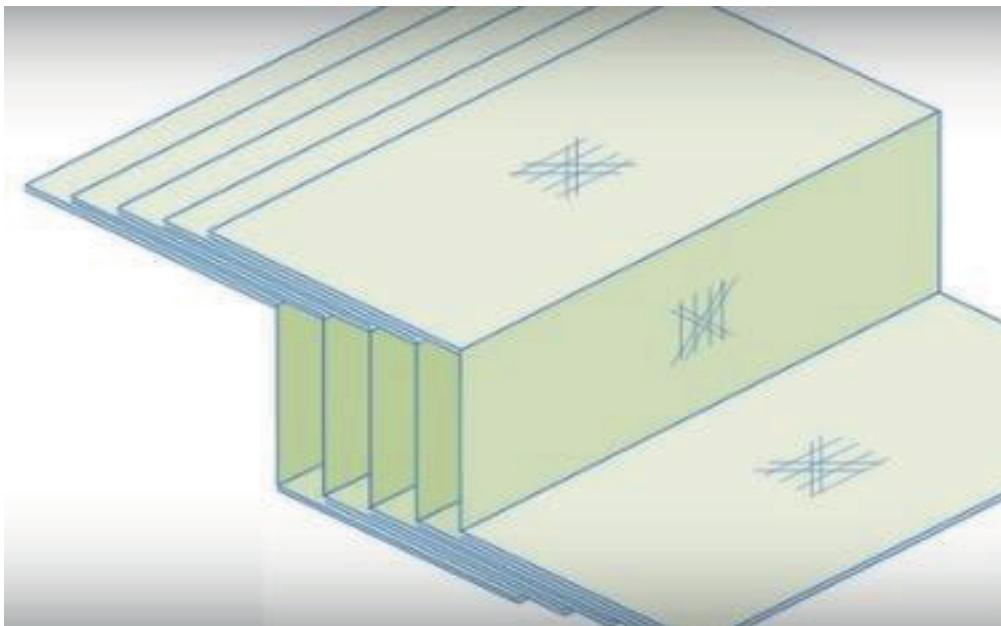
De 'Constructieve sandwichconstructie'

Onthechting van kern en huid is het grootste probleem bij zwaar belaste sandwichconstructies.

Rijkswaterstaat is huiverig geweest voor de toepassing van een sandwichconstructie als brugdek vanwege dit probleem. Het kon voorkomen dat een object van een vrachtwagen viel wat voor een plaatselijke delaminatie kon zorgen en wat uiteindelijk voor het volledig falen van de constructie kan leiden. Voor constructieve toepassingen is het zaak dat de kern onder geen beding los kan komen van de huid. Fibercove Europe heeft hier als oplossing voor bedacht om de wapeningsvezel zo te rangschikken, dat die van de huid vloeiend overgaan in de verstijvingsschotten van de kern (InfraCoreInside-technologie), zie figuur 5.1. Er is nergens een potentieel scheidingsvlak waar onthechting kan beginnen. Om te testen of dit daadwerkelijk voldeed, hebben ze de constructie getest in een drukbank. Op een proefstuk is een druk van 4.000 kN/m² uitgeoefend. Dit is ruim vier keer zoveel als de eis voor een 60 tons verkeersbrug. Het proefstuk gaf geen krimp. Door de oplossing van het slim vervlechten van de vezels van de huid en de verstijvingsschotten is het mogelijk geworden om zwaar belaste sandwichconstructies te gebruiken in de civiele sector.

Enkele recente voorbeelden hiervan zijn:

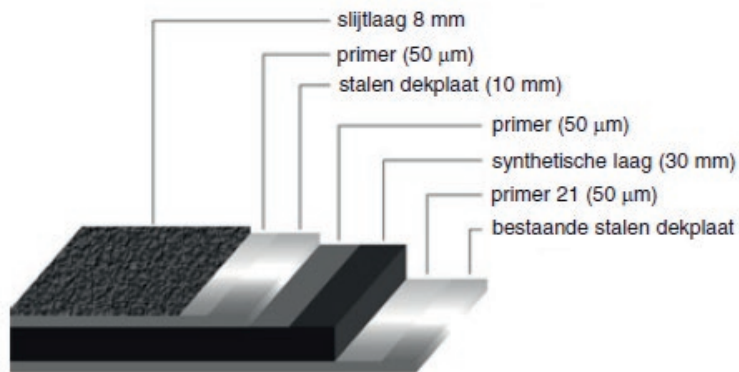
- Sluisdeuren voor de Wilhelminasluis in Tilburg ('s werelds grootste composiet sluisdeuren). Waarbij er gebruik is gemaakt van een sandwichconstructie bestaande uit 30 mm dik glasvezelversterkt polyester en een schuim als kernmateriaal. De InfraCoreInside-technologie heeft het mogelijk gemaakt zeer zwaar te belasten composiet constructies te bouwen
- Vernieuwde verkeersviaduct over A27 bij Lunetten. In het vernieuwde verkeersviaduct over de A27 is er gebruik gemaakt van een mooie combinatie tussen staal en composiet. De combinatie van composiet dek en stalen vakwerk maakt de brug licht van gewicht en tegelijkertijd berekend op zware belastingen voor het wegverkeer.



Figuur 5.1 InfraCoreInside-technologie waarbij huidtextiel steeds overgaat in de verstijvingsschotten

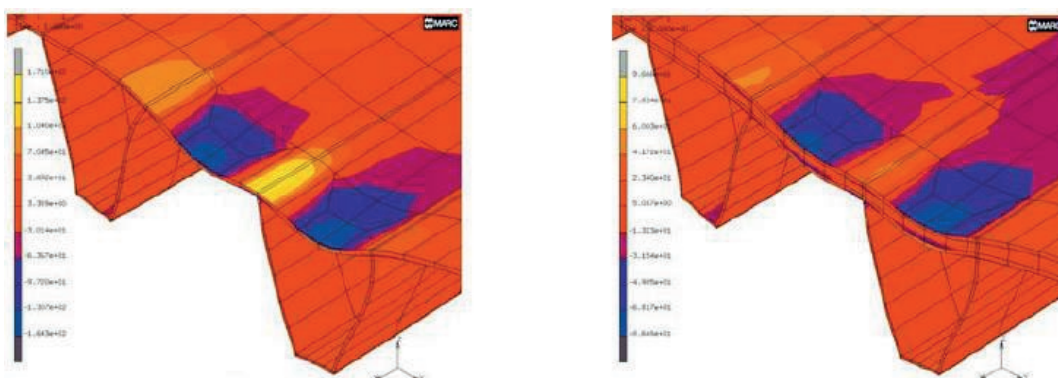
Sandwich als oplossing voor het vermoeiingsprobleem in stalen brugdekken

In het afstudeeronderzoek van Overduin is het overlagen van stalen brugdekken met een Edilon sandwich onderzocht als oplossing voor vermoeiingsprobleem in stalen brugdekken. Zie Figuur 5.2 voor de opbouw: er wordt een tweede stalen dekplaat toegepast met daar tussen een kunststoflaag van 30 mm dik,. Door het toepassen van de sandwichconstructie worden wiellasten verspreid over een groter oppervlak, wat tot spanningsreductie leidt.



Figuur 5.2 Het Edilon deklaagsysteem

Het deklaagsysteem is middels een EEM doorgerekend om de spanningen in de oude en nieuwe situatie te bepalen (Figuur 5.3). Uit het model blijkt dat bij de toepassing met het deklaagsysteem een spanningsreductie van 25% wordt bereikt waarmee vermoeiing in het staal minder snel zal optreden. (Overduin, 1999)



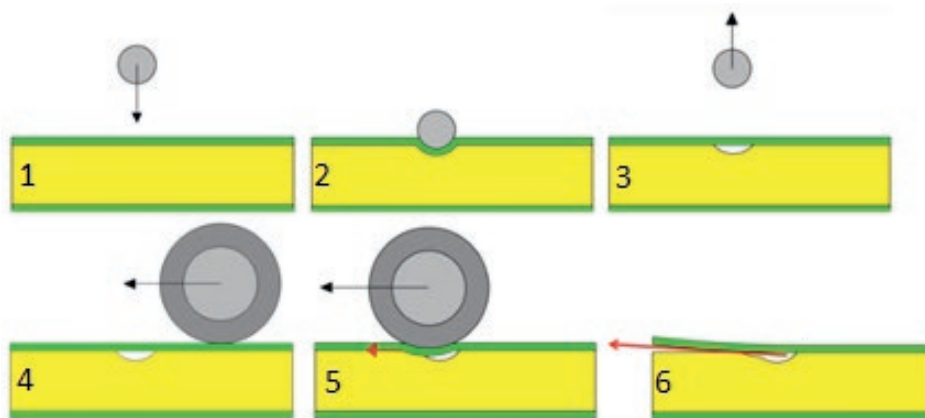
Figuur 5.3 Spanningen in de orthotrope rijvloer. Links zonder deklaagsysteem

6. Gedrag stalen dekplaat-VVK sandwich onder impactbelasting

6.1 Inleiding

Rijkswaterstaat is tot nog toe huiverig met het toepassen van composieten in civiele werken door de slechte weerstand tegen impact van vallende lading (InfraCoreInside, 2016). Voor nieuwe VVK sandwich brugdekken is er een oplossing ontwikkeld, echter nog niet voor een renovatie variant. Daarom is het relevant om na te gaan hoe het ontwerp de mogelijkheid heeft om impactbelastingen te kunnen weerstaan.

Bij een traditionele VVK sandwichconstructie kan delaminatie ontstaan na een impactschade. Door de dekplaat dik genoeg te maken kan delaminatie in de VVK dekplaat worden voorkomen. Ook kan er delaminatie in de interface tussen dekplaat en kern ontstaan zodra de druksterkte van de kern wordt overschreden. Als er vervolgens (vracht)verkeer over het dek heen rijdt, kan deze delaminatie zich uitbreiden. Dit is stapsgewijs geschematiseerd in Figuur 6.1. Door glasvezelversterking slim van dek via lijven te laten lopen wordt eventuele delaminatie gecompartmenteerd. (InfraCoreInside, 2016)

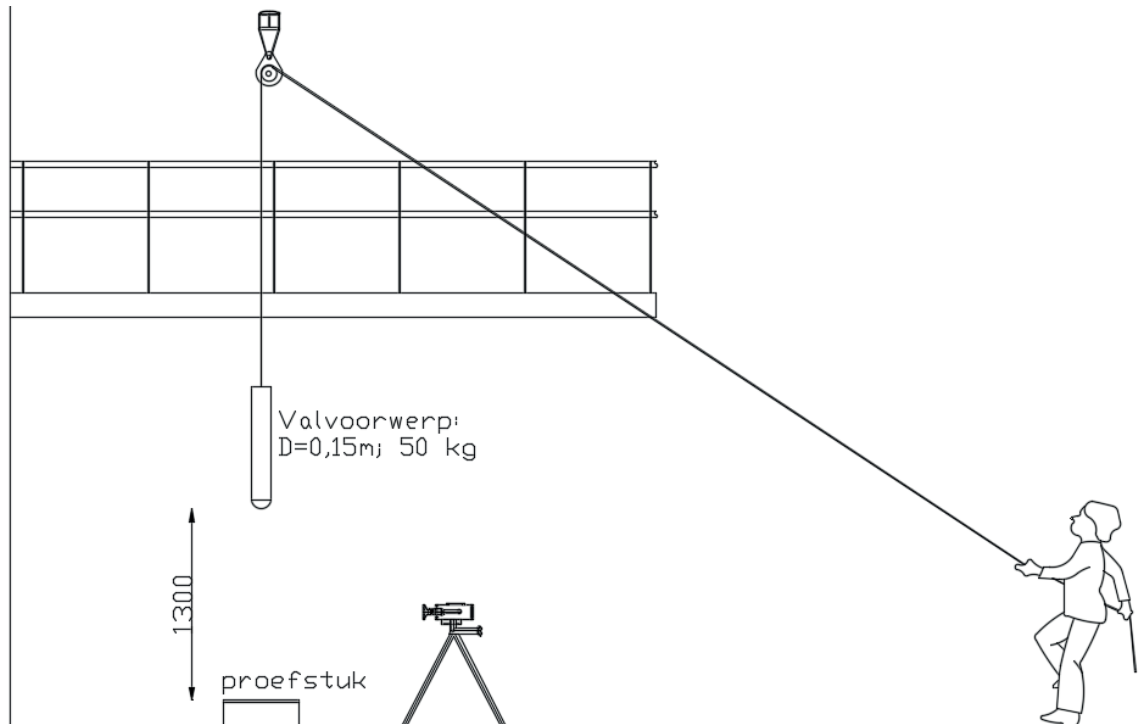


Figuur 6.1 Problemen door impact bij een sandwichconstructie

6.2 Impact proef

Bestaande stalen brugdekken hebben een dekplaat van minimaal 12 mm. Hieronder is in dit onderzoek een VVK sandwichconstructie voorzien. De stalen dekplaat vangt de krachten van een impact op en spreidt deze. Een stalen dekplaat kan niet delamineren maar kan wel vloeien en dan een deuk vertonen. Verder kan de kern verbrijzelen onder druk en / of er kan delaminatie ontstaan in de interface tussen stalen dekplaat en de kern. Tot de gedefinieerde impact mag geen schade ontstaan, dit wordt dan ook getest. Als er bij een zwaardere impact eerder een deuk in de dekplaat ontstaat dan verbrijzelingschade van de kern of delaminatie onder de dekplaat, dan waarschuwt de constructie door zichtbare deuk aan de buitenkant. Bij deuken kan de beheerder dan maatregelen nemen: bijvoorbeeld monitoring of reparatie.

Composietspecialist Ir. L. Tromp van Royal Haskoning DHV heeft een rapport beschikbaar gesteld, waarbij impact is getest bij een VVK constructie. Deze is in opdracht van Rijkswaterstaat uitgevoerd om vertrouwd te worden met VVK te worden (Souren & Tromp, 2013). De valimpact is hieruit overgenomen. Naast de informatie uit dit document is L. Tromp geraadpleegd voor het verschaffen van extra informatie over de proefopstelling. Aan de hand van deze gegevens is, met de opstelling uit Figuur 8.2 getest (valmassa 50 kg, valhoogte 1,3 m en diameter $D = 0,15$ m; $m \cdot g \cdot h = 638$ Nm valenergie).



Figuur 6.2 Opstelling Impactproef

Bij de proefstukken was de stalen plaat los gehouden van de kunststof kern. De stalen plaat was aan de onderzijde voorzien van een uitgeharde interface harslaag. Daarmee konden deze vlakken na beproeven worden bekeken en beoordeeld. Tijdens de uitvoering zijn er foto's en video's gemaakt om te registreren hoe het proefstuk reageert tijdens de impacttest. De uitwerkingen hiervan zijn beschreven in Bijlage B.

In Tabel 6.1 is de variatie in opbouw per proefstukserie beschreven. De stalen plaat betreft steeds dikte $t=12$ mm en staalsoort S235. In Tabel 6.2 zijn de mechanische eigenschappen van de gebruikte schuimkernen weergegeven.

Beschrijving	Hars	Vezels	Kern
Proefstukken 1	Atlac430	Glasvezel Bi-ax	0,2m Styrodur 2800C
Proefstukken 2	RIMR135	Glasvezel Bi-ax	0,2m Styrodur 2800C
Proefstukken 3	Atlac430	CSM	0,2m Styrodur 2800C/AirexC70.90
Proefstukken 4	Atlac430	Geen	0,2m Styrodur 2800C/AirexC70.90

Tabel 6.1 Beschrijving proefstukken

Eigenschap	Styrodur 2800C (PS schuim)	AirexC70.90 (PVC schuim)
Dichtheid	gem. 30 kg/m ³	gem. 100 kg/m ³ (min. 90)
Druksterkte	gem. 0,3 N/mm ²	gem. 2,0 N/mm ² (min. 1,7)
Drukmodulus E	gem. 15 N/mm ²	gem. 130 N/mm ² (min. 110)
Schuifsterkte	gem. 0,3 N/mm ²	gem. 1,7 N/mm ² (min. 1,4)
Schuifmodulus G	N/mm ²	gem. 40 N/mm ² (min. 34)
Schuif breukrek	%	gem. 23% (min. 12)

Tabel 6.2 Eigenschappen schuim

6.3 Resultaten

De resultaten en duiding zijn per proefstukserie beschreven.

6.3.1 Proefstukserie 1

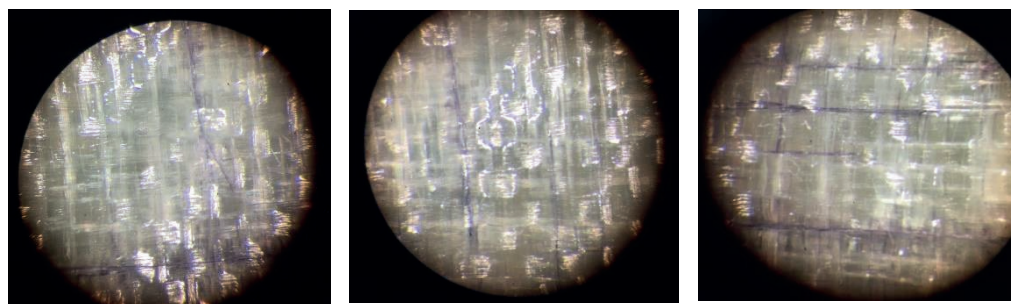
Bij de eerste proefstukserie is gebruik gemaakt van vinylester Atlac430. Deze is uitgevoerd om gevoel te krijgen met de werkwijze van de uitvoering en om de resultaten te vergelijken met het referentieverslag (Souren & Tromp, 2013). De staalplaat is aan de onderzijde voorzien van een gelijmde laag van GVK. Daarom zijn, bij deze eerste drie impact simulaties, de hoogtes van het voorwerp gelijk gesteld op 1,3m. De resultaten staan in Tabel 6.3.

Atlac430 (Bi-ax)	Hoogte	Dekplaat	Interface	Kern
Impact 1	1,3 m	Geen deuk	Witte cirkel (d=5cm)	Niet verbrijzeld
Impact 2	1,3 m	Geen deuk	Witte cirkel (d=3cm)	Niet verbrijzeld
Impact 3	1,3 m	Geen deuk	Witte cirkel (d=3cm)	Niet verbrijzeld

Tabel 6.3 Impact resultaten proefstukserie 1

Uit de resultaten blijkt dat bij gewenste impactenergie (50 kg en 1,3 m) de interface met een taaie vinyl ester hars 'versterkt' met bi-ax niet on-gescheurd blijft. Alle drie de testen leiden tot witte cirkels in de interface, wat duidt op scheurvorming en wat voortschrijdende delaminatie kan inluiden.

Om beter zichtbaar te maken hoe het hars gereageerd heeft, is er met een marker over de plekken getekend. Vervolgens is dit verwijderd door met een doek met aceton door over de plek heen te wrijven. Hierdoor blijft de zwarte inkt in de scheurtjes achter, zoals te zien is in Figuur 6.3. Haarscheurtjes worden zichtbaar die vooral evenwijdig aan de vezels .



Figuur 6.3 Microscopische beelden van de resultaten

Dat scheuren in VVK het eerst evenwijdig aan vezels optreden kan ook worden afgeleid uit Tabel 6.4 waarin (karakteristieke) rekgrenzen zijn overgenomen uit Tabel 3.7, 3.8, 3.9 & 3.2 van (CUR96, CUR-Aanbeveling 096, pp. 25-33), uit (EN1993-1-1, p. 30) en van de harsleverancier. Duidelijk is te zien dat UD-versterkte lagen een zeer lage rekgrens hebben bij trek dwars op de vezels (0,34 %). Dit geeft snel aanleiding tot scheuren. Ook de weefselversterking bestaat uit kruislings georiënteerde UD-gebiedjes waar dit scheuren kan optreden bij een te grote rek.

GVK UD-lamel			
$\varepsilon_{1tR} = 2,2\%$	$\varepsilon_{1cR} = 1,44\%$	$\varepsilon_{2tR} = 0,34\%$	$\varepsilon_{2cR} = 1,24\%$
GVK Bi-ax lamel (legsel/weefsel), gebalanceerd			
$\varepsilon_{1tR} = 1,44\%$	$\varepsilon_{1cR} = 1,44\%$	$\varepsilon_{2tR} = 1,44\%$	$\varepsilon_{2cR} = 1,44\%$
GVK Mat			
$\varepsilon_{1tR} = 1,24\%$	$\varepsilon_{1cR} = 1,24\%$	$\varepsilon_{2tR} = 1,24\%$	$\varepsilon_{2cR} = 1,24\%$
Vinyl ester		Atlac430	
$\varepsilon > 2,2\%$ (isotroop)		$\varepsilon = 6,1\%$ (isotroop)	
Epoxy		Epoxy RIMR135	
$\varepsilon > 2,5\%$ (isotroop)		$\varepsilon = 8 - 12\%$ (isotroop)	
Staal (S235)			
$\varepsilon_y = 0,11\%$ (vloei; isotroop)		$\varepsilon_u \geq 1,7\%$ (breuk)	
Schuim (AirexC70.90)			
		$\varepsilon_{\text{schuif}} \geq 12\%$ (breuk)	

Tabel 6.4 Rekgrenzen materialen hybride sandwich

Waarin:

- ε_{1tR} is de trekrekgrens evenwijdig aan de hoofdrichting
- ε_{1cR} is de drukrekgrens evenwijdig aan de hoofdrichting
- ε_{2tR} is de trekrekgrens loodrecht op de hoofdrichting
- ε_{2cR} is de drukrekgrens loodrecht op de hoofdrichting.

Uit Tabel 6.4 kan geconcludeerd worden dat eerste scheuren in VVK optreden bij 0,34%. In legfels, weefsels en matten zullen breukscheuren optreden bij 1,44% en bij matten bij 1,24%.

Verklaring voor het optreden van de eerste scheuren haaks op de vezelrichting betreffen spanningsconcentraties in de matrix door verschillen van stijfheden tussen de twee materialen ($E_f = 72$ vs. $E_m = 3,5$ GPa) en restspanningen in de matrix als gevolg van krimp bij de verharding.

6.3.2 Proefstukserie 2

Bij deze proefstukserie is er gebruik gemaakt van taaiere Epoxy hars RIMR135, met dezelfde GVK vezelversterking als bij proefstukserie 1. De resultaten staan in Tabel 6.5.

RIMR135 (Bi-ax)	Hoogte	Dekplaat	Interface	Kern
Impact 1	1,3m	Geen deuk	Witte cirkel (d=2 cm)	Niet verbrijzeld
Impact 2	1,3m	Geen deuk	Witte cirkel (d=2 cm)	Niet verbrijzeld
Impact 3	1,0m	Geen deuk	Geen verkleuring	Niet verbrijzeld
Impact 4	1,0m	Geen deuk	Geen verkleuring	Niet verbrijzeld
Impact 5	1,0m	Geen deuk	Geen verkleuring	Niet verbrijzeld

Tabel 6.5 Impact resultaten proefstukserie 2

Uit de resultaten blijkt dat bij gewenste impactenergie (50 kg en 1,3 m) de interface met een taaie epoxy hars 'versterkt' met bi-ax niet ongescheurd blijft. Wel zijn met de taaiere epoxy hars minder grote witte vlekken ontstaan dan bij Atlac430 bij dezelfde valhoogte. Bij een hoogte van 1,0 meter is er geen zichtbare harsschade meer waarneembaar.

6.3.3 Proefstukserie 3

Bij deze proefstukserie is er gebruik gemaakt van Atlac430 hars, en van een continu glasvezel mat (CFM). Er zijn verschillende kernen gebruikt (S = Styrodur 2800 C; A = Airex C70.90). Er zijn 14 experimenten uitgevoerd. De resultaten staan in Tabel 6.6.

Atlac430 (Mat)	Hoogte	Dekplaat	Interface	Kern
Impact 1	1,3m	Geen deuk	Witte cirkel (d=4cm)	S: niet verbrijzeld
Impact 2	1,0m	Geen deuk	Witte cirkel (d=3,5cm)	S: niet verbrijzeld
Impact 3	0,8m	Geen deuk	Onbetrouwbaar	S: niet verbrijzeld
Impact 4	0,9m	Geen deuk	Onbetrouwbaar	S: niet verbrijzeld
Impact 5	1,0m	Geen deuk	Onbetrouwbaar	S: niet verbrijzeld
Impact 6	1,0m	Geen deuk	Witte cirkel (d=2cm)	S: niet verbrijzeld
Impact 7	0,9m	Geen deuk	Witte cirkel (d=2cm)	S: niet verbrijzeld
Impact 8	0,8m	Geen deuk	Geen	S: niet verbrijzeld
Impact 9	0,8m	Geen deuk	Witte cirkel (d=4cm)	A: niet verbrijzeld
Impact 10	1,3m	Geen deuk	Witte cirkel (d=5cm)	A: niet verbrijzeld
Impact 11 *	1,3m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 12 **	1,3m	Geen deuk	Witte cirkel (d=5cm)	A: niet verbrijzeld
Impact 13 **	0,8m	Geen deuk	Witte cirkel (d=2cm)	S: niet verbrijzeld
Impact 14 **	0,8m	Geen deuk	Witte cirkel (d=2cm)	A: niet verbrijzeld

Tabel 6.6 Impact resultaten proefstukserie 3

- * Inclusief lijklemmen
- ** Inclusief lijklemmen en stijve randondersteuning

Schuimkernmateriaal Airex C70.90 is stijver dan de Styrodur 2800C. Bij de stijvere kern blijkt eerder schade op te treden. De lijklemmen bij dit proefstuk zorgen ervoor dat alle onderdelen van de constructie als één geheel functioneren. Dit is toegepast vanaf impact 11 tot impact 14. De situatie met de lijklemmen is weergegeven in Figuur 6.4.

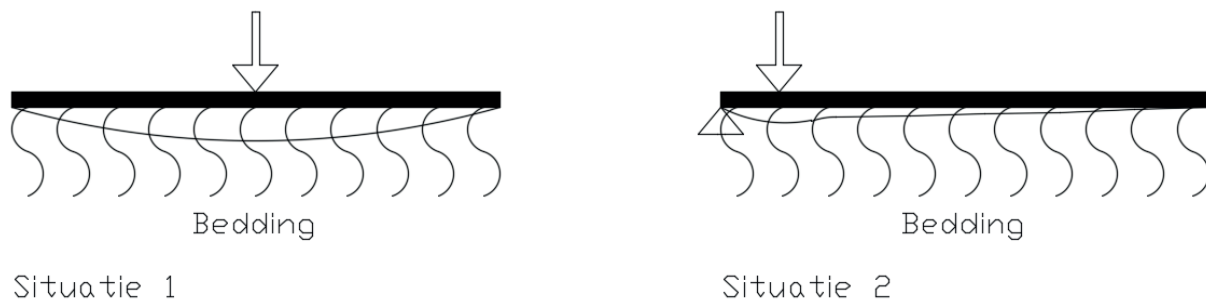


Figuur 6.4 Opstelling met lijklemmen



Figuur 6.5 Opstelling met lijklemmen en randoplegging

Door een stijve randondersteuning toe te voegen aan de constructie, wordt een lijf van een dwarsdrager of hoofdlijger gesimuleerd. Dit is uitgevoerd in combinatie met de klemmen. Deze situatie is weergegeven in Figuur 6.5. Dat bij een randoplegging de mechanische werking verandert is gevisualiseerd in Figuur 6.6.



Figuur 6.6 Indrukkingsverschillen zonder en met stijve rand

Uit de resultaten blijkt dat gewenste impactenergie (50 kg en 1,3 m) niet opgenomen kan worden door een interface met taaie vinyl ester hars 'versterkt' met CFM.

Voorts blijkt dat een randoplegging ongunstig werkt.

Voor het opnemen van een impactenergie (F·u) werken op kunnen nemen van grote kracht met grote verplaatsing gunstig. Bij een randoplegging en bij een stijvere kern treedt onder een zelfde kracht een kleinere indrukking op en treedt er bij een zelfde energie een grotere kromming van de dekplaat op. Daarmee is te verklaren dat in de situatie met randopleggingen of een stijvere kern een grotere schade is te zien.

6.3.4 Proefstukserie 4

Bij deze proefstukserie is enkel gebruik gemaakt van een niet versterkte harslaag (zonder vezels) te weten Atlac430. De waarnemingen hiervan zijn weergegeven in Tabel 6.7.

Atlac430	Hoogte	Dekplaat	Interface	Kern
Impact 1	1,3m	Geen deuk	Geen	S: niet verbrijzeld
Impact 2	1,3m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 3 **	1,3m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 4 **	1,3m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 5	1,4m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 6	1,5m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 7	1,6m	Kleine deuk	Scheuren (d=13cm)	A: niet verbrijzeld
Impact 8 **	1,4m	Geen deuk	Geen	A: niet verbrijzeld
Impact 9 **	1,5m	Kleine deuk	Scheuren (d=20cm)	A: niet verbrijzeld

Tabel 6.7 Impact resultaten proefstukserie 4

** Inclusief lijmklemmen en stijve randondersteuning

Uit deze resultaten is op te maken dat hars, in combinatie met het staal, een impact kan opnemen tot aan een valhoogte van 1,6 m zonder randoplegging en tot 1,5 m met randoplegging. Er treden scheuren op in de hars boven deze valhoogtes. Naast scheuren, zijn ook deuken in het staal ontstaan. De deuken in het staal waren klein maar wel goed op te merken. Deuken in het staal kunnen dus waarschuwen voor scheuren in de hars. Of deze deuken in de dekplaat onder een kunststof slijtlaag ook goed op te merken zijn, is onbekend.

Met dit proefstuk is bevestigd dat glasvezels de oorzaak zijn van vroegtijdige haarscheurtjes in de hars, die bij proefstukseries 1, 2 en 3 aan het licht kwamen. Ook is bevestigd dat bij stijve opleggingen impactbelastingen eerder tot delaminatie leiden.

6.4 Conclusie

De resultaten uit proefstukken 1 t/m 3 geven aan dat de hars 'versterkt' met glasvezels niet de gewenste eigenschappen hebben om impactbelasting te weerstaan.

Met alleen hars (proefstukken 4) zijn de gewenste eigenschappen wel te bereiken. De constructie beschadigt niet onder een impact van 50 kg met een valhoogte van 1,3 m, zowel niet in een middenveld met alleen schuimondersteuning als niet in een veld met schuimondersteuning en een stijve oplegrand.

Onder een grotere impact 'waarschuwt' de constructie met een deuk in het staal dat er eventueel ook scheuren in de hars zijn opgetreden. De schuimkern onder de staalplaat bleef in alle gemeten gevallen in het elastische gebied: er werd geen lokale verbrijzeling gevonden.

Voor de uitvoeringsvariant lijm betekent dit dat een impact van 50 kg met een valhoogte van 1,3 m te accommoderen is, als er wordt gezorgd voor goede benatting. Voor de uitvoeringsvariant infusie van lijm vormt dat een uitdaging.

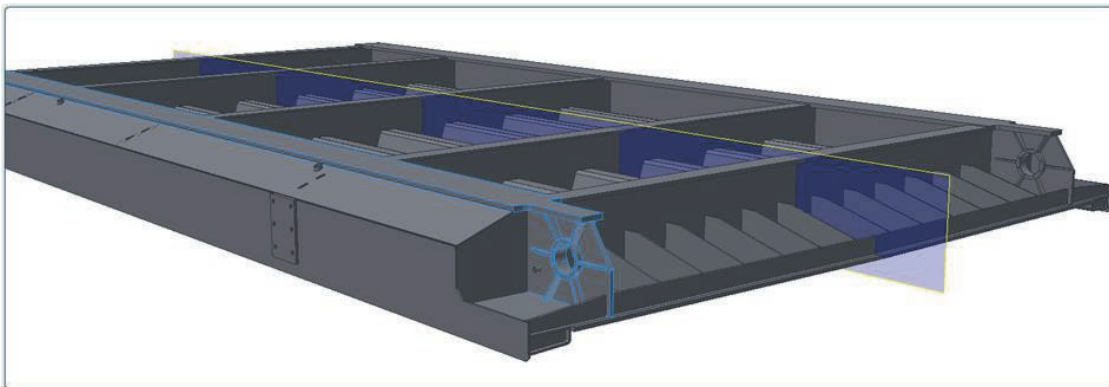
7. Het ontwerp

Orthotrope stalen brugdekken hebben, zoals de naam al zegt, orthotrope eigenschappen. Dit betekent dat de mechanische eigenschappen van het dek verschillen in de op elkaar orthogonaal liggende hoofdrichtingen (langs- en dwarsrichting).

Het dek (zie Figuur 6.1) bestaat veelal uit een dekplaat aan de onderzijde versterkt met aangelaste, trogvormige langsverstijvers. De dekplaat draagt belasting af naar de lijven van de troggen, de troggen dragen de belasting af naar dwarsdragers, de dwarsdrager naar de hoofdliggers en de hoofdliggers naar de opleggingen. De dekplaat maakt als flens ook deel uit van trog, dwarsdrager en hoofdliggers. De trogvormige langsverstijvers doorlopen de hele overspanning (Dilsiz, 2013).

In dit onderzoeksrapport zijn de trogvormige langsverstijvers te vervangen door een vezel versterkte kunststof sandwichconstructie. Als (prefab) VVK-productiemethode wordt uitgegaan van vacuüm infusie, waarin opgenomen E-glasvezels met een vezelvolumen van 50%. Voor de kern van de sandwich wordt uitgegaan van een PVC schuimkern.

Glasvezels kennen een stijfheid van 72 GPa. Vezels worden slechts in hoofdrichting 0° en dwarsrichting 90° toegepast. Vezels in $+45^\circ$ & -45° worden niet nodig geacht, omdat de VVK onderflens afgeschermd is voor impact. Bij het dimensioneren van VVK zijn belastingfactoren (γ_f), materiaalfactoren (γ_m) en conversiefactoren (γ_c) meegenomen (EN1991-2, 2011) (CUR96achtergrond, 2018).

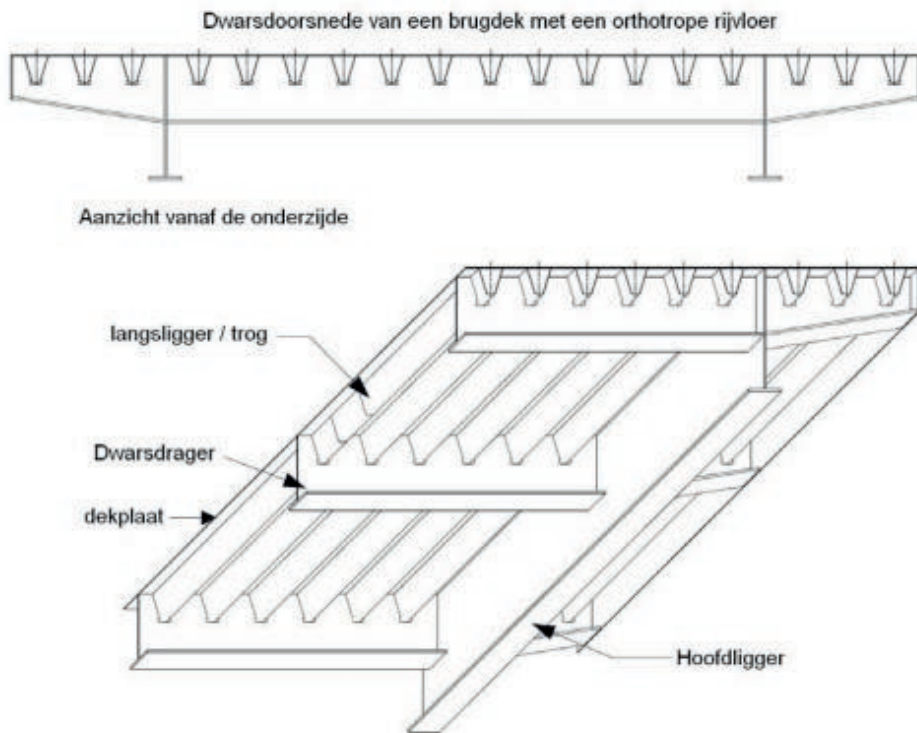


Figuur 7.1 Voorbeeld orthotrope stalen brugdek op zijn kop

De eerste en laatste dwarsdrager van een beweegbare stalen brug worden veelal de harren genoemd. Het overstek van de dekplaat wordt hier veelal uitgevoerd met een diagonale stalen plaat die aan de onderzijde aansluit tegen het lijf van de har ter hoogte van de onderflens van de troggen (zie Figuur 7.3). Bij vervanging van de troggen moet de VVK onderflens weer worden aangesloten op deze hoogte van veelal ruwweg 300 mm. Dit om de druk uit de diagonale plaat op te nemen die ontstaat bij wielbelastingen op het overstek.

7.1 Casus

Om een realistisch ontwerp te maken is uitgegaan van een casus van een orthotrope stalen standaard brug (figuur 7.2). Deze brug bestaat uit twee hoofdliggers h.o.h. 12,0 m, vijf dwarsdragers h.o.h. 3,0 m, troggen h.o.h. 0,6 m en een dekplaat van 12 mm.



Figuur 7.2 Standaard orthotrope stalen brug

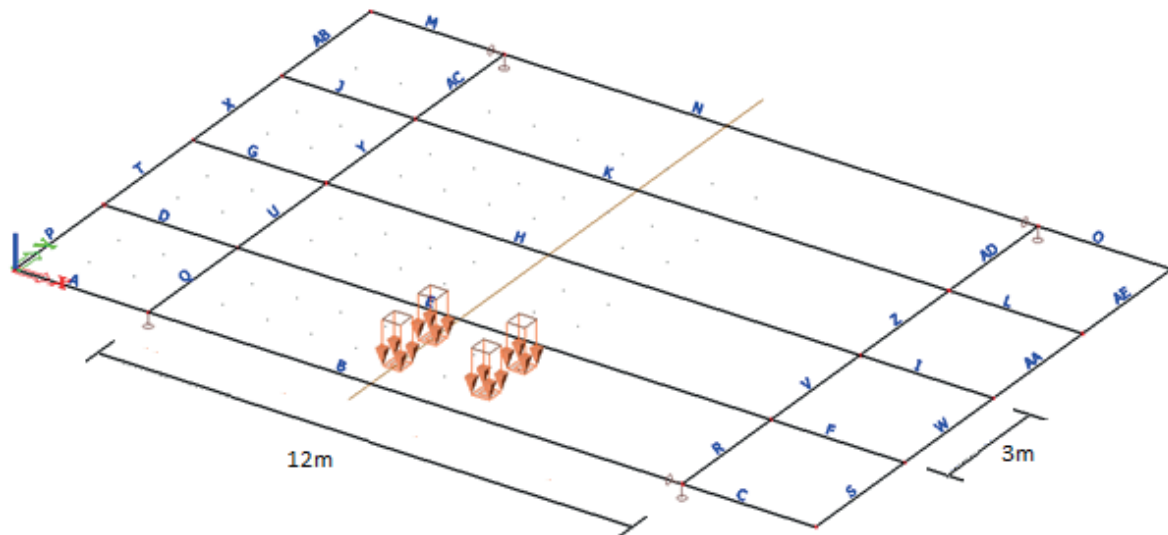
Als uitgangspunt voor de berekening is er gekozen voor een opbouw van de sandwichconstructie zoals weergegeven in Figuur 7.3. De lijm-laag tussen het staal en het schuim is variabel omdat zowel dekplaat als kern niet geheel vlak zijn; uitgegaan is van 2 mm.



Figuur 7.3 Opbouw sandwichconstructie

7.2 Krachtsverdeling EEM

Om de krachtswerking van een sandwichconstructie in beeld te krijgen, is het programma Scia Engineer gebruikt. Scia Engineer is een eindige elementen methode (EEM) waarmee de krachtsverdeling is bepaald (momenten, dwarskrachten, etc.) van het model in Figuur 7.4.



Figuur 7.4: Opbouw Scia Engineer model

De aangehouden plaatstijfheden van de sandwich bedragen (afleiding zie Bijlage H):

$$\begin{aligned} D_{11} = D_{22} &= 11,3 \text{ MNm}(\cdot\text{m/m}) \text{ (buigstijfheid in x- en y-richting)} \\ D_{12} = 0,3 \cdot D_{11} &= 3,38 \text{ MNm}(\cdot\text{m/m}) \text{ (dwarscontractie in beide richtingen)} \\ D_{33} &= 7,53 \text{ MNm}(\cdot\text{m/m}) \text{ (wringstijfheid)} \\ D_{44} = D_{55} &= 11,7 \text{ MN/m}(\cdot\text{m/m}) \text{ (afschuifstijfheid in x- en y-richting)} \end{aligned}$$

Ter informatie 1:

Om te komen tot een dimensie-loze verhouding tussen buigstijfheid en afschuifstijfheid wordt de overspanning l betrokken. Met $l = 3000 \text{ mm}$ geldt voor de sandwich:

$$\Phi = \frac{12 EI}{GA \cdot l^2} = 1,3$$

Vergeleken met een constructie zonder afschuifvervorming zakt het steunpuntmoment van $0,125ql^2$ naar $0,095ql^2$ voor een 2-veld-overspanning met gelijkmatig verdeelde belasting q . Dan treedt er bij het midden-steunpunt een knik op vanwege de dwarskrachtensprong.

Ter informatie 2:

Bij het bepalen van de wringstijfheid is de formule van Bredt gebruikt voor gesloten kokers met dunne wand. De koker heeft afmetingen van $h \times b = 0,3 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$. De schuifstijfheid van de onder-wand is die van VVK, die van de overige 3 wanden die van staal.

7.3 Vermoeiing stalen dekplaat

Er wordt geen extra vermoeiingsschade aan het staal aangebracht als de toekomstige wisselspanning onder $\Delta\sigma_L$ blijft. $\Delta\sigma_L$ wordt in twee stappen afgeleid van detailcategorie $\Delta\sigma_C$, 74% om tot vermoeiingsgrens bij constante amplitude te komen en 55% om tot vermoeiingsgrens bij variabele amplitudes te komen: $\Delta\sigma_L = 74\% \cdot 55\% \cdot \Delta\sigma_C = 40\% \cdot \Delta\sigma_C$.

In de Eurocode is af te lezen welke detailcategorie bij welke type lasverbinding hoort. Bij de dekplaat in het veld wordt uitgegaan van detailcategorie 90 voor volledige stuiklassen met beperkte overdikte (100 voor laswarmte-invloed van de weggebrande troggen is niet maatgevend). Daarmee moet de wisselspanning onder $40\% \times 90 = 36 \text{ N/mm}^2$ blijven. Als materiaalfactor wordt 1,25 aangehouden, zodat 29 N/mm^2 toelaatbaar is. $\gamma_m = 1,00$ zou zelfs verdedigbaar zijn omdat het een drukscheur betreft (scheur heeft gering gevolg) en de schuimkern blijft de gescheurde dekplaat ondersteunen (schadetolerant) (EN1993-1-9, 2012). (EN1993-1-9, 2012) (EN1993-2, 2011)

9.3 Partiële factoren voor vermoeiingstoetsingen

(1)P De partiële factor voor de vermoeiingsbelastingen moet zijn gelijkgesteld aan γ_{F1} .

OPMERKING De nationale bijlage kan de waarde van γ_{F1} geven. Het gebruik van $\gamma_{F1} = 1,0$ is aanbevolen.

(2)P De partiële factor voor de vermoeiingsweerstand moet zijn gelijkgesteld aan γ_{M1} .

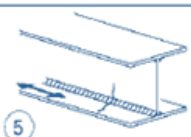
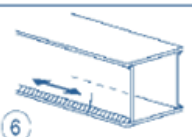
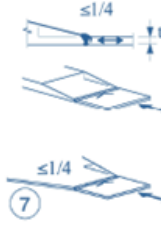
OPMERKING De nationale bijlage kan waarden geven voor γ_{M1} . De in tabel 3.1 van EN 1993-1-9 gegeven waarden zijn aanbevolen.

3 Beoordelingsmethoden

- (2) Bij toepassing van de partiële factoren voor de vermoeiingssterkte γ_{M1} behorend bij beoordelingsmethode 'gebaseerd op het concept van schadetolerant' moet een inspectieprogramma zijn opgesteld.
- (7) De waarden van de partiële factoren voor de vermoeiingssterkte γ_{M1} als functie van de beoordelingsmethode en de gevolgen van het bezwijken, moeten zijn ontleend aan tabel NB.1.

Tabel NB.1 — Aanbevolen waarden voor de partiële factoren voor de vermoeiingssterkte

Detail-categorie	Constructiedetail	Gevolg van het bezwijken	
		Gering gevolg	Groot gevolg
	Gebaseerd op het concept van schadetolerant	1,00	1,15
	Gebaseerd op het concept van veilige levensduur	1,15	1,35

Detail-categorie	Constructiedetail	Beschrijving	Eisen
100	 	5) Handmatig gelaste hoeklassen of stompe lassen. 6) Handmatig of automatisch of volledig gemechaniseerd gelaste stompe lassen, uitgevoerd aan slechts één kant, in het bijzonder bij kokerprofielen.	5), 6) Tussen flens en lijfplaten is een zeer goede passing vereist. De rand van het lijf is voldoende af te schuiven voor het behoorlijk uitvoeren van een regelmatige penetratie ter plaatse van de laswortel, zonder uitvloeien.
90	Invloed van de afmetingen voor $t > 25 \text{ mm}$: $k_1 = (25/t)^{0.2}$   	5) Stuklassen in dwarsrichting in platen of strippen. 6) Stompe lassen van volledige doorsneden van gewalste profielen zonder uitsparingen. 7) Stuklassen in dwarsrichting in platen of strippen, die zijn afgeschuind over de breedte of de dikte, met een helling $\leq 1/4$. De overgangen van de lassen behoren machinaal kerfrij te zijn bewerkt.	- De hoogte van de overdikte van de las mag niet groter zijn dan 10 % van de lasbreedte, met een vloeiende overgang naar de plaatoppervlakken. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de plaatranden zijn vervolgens geslepen in de spanningsrichting. - Gelast aan beide zijden; gecontroleerd door NDO. <u>Details 5 en 7:</u> Lassen uitgevoerd onder de hand.

Figuur 7.5: Vermoeiing bij staal volgens eurocodes

7.4 Belastingen

7.4.1 Belasting-factoren

De belastingfactoren zijn bepaald voor de zwaarste gevolgklasse CC3 conform EN1990/NB en EN1993-1-9/NB. In Tabel 7.1 zijn de belasting factoren samengevat.

Belasting	UGT	Vermoeiing	BGT
	γ	γ	γ
Eigen gewicht	1,40 / 0,90	1,00	1,00
Verkeer	1,50 / 0,00	1,00 / 0,00	1,00 / 0,00

Tabel 7.1 Belasting-factoren

7.4.2 Statische belasting

De effecten van de statische verkeersbelasting zijn in rekening gebracht met belastingsmodel 1 (BM1) uit de Eurocode (EN1991-2, 2011):

- een dubbele aslast Q_{ik} = 300 kN elk met twee wielprenten van 0,40 m x 0,40 m;
- een gelijkmatig verdeelde belasting q_{ik} = 9 kN/m² voor alle rijstroken.

Er is uitgegaan van een dubbele aslast van Q_{ik} = 300 kN elk met 2 wielprenten van 0,45 m x 0,45 m vanwege spreiding in slijtlaag en dekplaat en van een gelijkmatig verdeelde belasting van q_{ik} = 9 kN/m² voor eenvoudigheidshalve alle rijstroken.

7.4.3 Vermoeiingsbelasting

Voor de vermoeiingsbelasting is ook BM 1 gebruikt, echter met reductiefactoren van $0,7 \cdot Q_{ik}$ en $0,3 \cdot q_{ik}$. Het aantal belasting wisselingen bedraagt op een rijstrook met intensief vrachtverkeer 100 jaar x 2×10^6 vrachtwagens/jaar = $2,0 \times 10^8$. En op een rijstrook met gemiddeld vrachtverkeer 100 jaar x $0,5 \times 10^6$ vrachtwagens/jaar = $0,5 \times 10^8$ (EN1991-2, 2011).

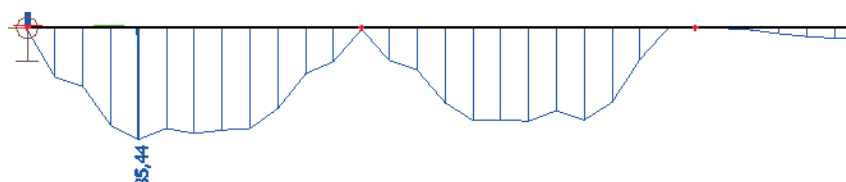
7.5 Resultaten

Met het programma Scia Engineer is de krachtsverdeling bepaald met de dubbele aslast op verschillende posities gecombineerd met de gelijkmatige belastingen.

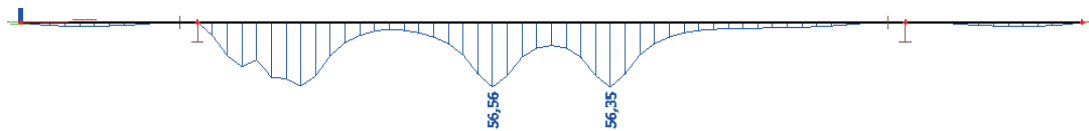
7.5.1 Statische momenten

In Figuur 7.6 is de omhullende momentenlijn opgenomen van het positieve hoofdmoment. Hier is uit op te maken dat het extreme veldmoment moment +85,5 kNm/m bedraagt. Het extreme steunpuntmoment bedraagt -30,6 kNm/m.

In Figuur 7.7 is de omhullende momentenlijn opgenomen van het positieve dwarsmoment. Hier is uit op te maken dat het extreme veldmoment moment +56,6 kNm/m bedraagt. Het extreme steunpuntmoment bedraagt -36,2 kNm/m.



Figuur 7.6 hoofdmomentenlijn veld 1 & 2 in de y-richting (figuur niet in verhouding)



Figuur 7.7 Dwarsmomentenlijn in de x-richting (figuur niet in verhouding)

7.5.2 Vermoeiingsmomenten

Het grootste verschil tussen de extreme hoofdmomenten bedraagt: $37,0 + 2,1 = 39,1$ kNm/m.

Het grootste verschil tussen de extreme dwarsmomenten bedraagt: $25,3 + 0 = 25,3$ kNm/m.

7.5.3 Statische dwarskracht

De maximale dwarskracht in hoofdrichting bedraagt 375 kN/m. De dwarskracht in dwarsrichting is niet maatgevend.

7.5.4 Vermoeiingsdwarskracht

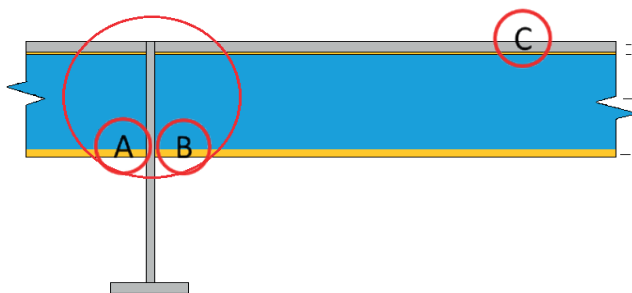
De maximale vermoeiingsdwarskracht in hoofdrichting bedraagt 169 kN/m. De verhouding tussen minimale en maximale dwarskracht bedraagt ruwweg 0,1.

7.5.5 Afschuifvervorming

Door afschuifvervorming treedt knik in de rotatie op. De rotatieknik is evenredig met de maximale dwarskracht sprong: $\phi = V / (\gamma \cdot GA) = 375 \text{ kN} / (1,5 \cdot 11.700 \text{ kN}) = 0,021 \text{ rad}$.

7.6 Lijmverbinding VVK-onderflens tegen dwarsdrager

Bij de drukaansluiting van de VVK onderflens tegen de stalen dwarsdrager (A in Figuur 7.8) wordt de speling overbrugd met een VVK vulling dat loodrecht op de vezelrichting wordt belast: de interlaminaire druksterkte. Gecontroleerd wordt of de druk kan worden opgenomen. Het extreme steunpuntmoment is $= -36,2$ kNm. Dit moment resulteert in een ontwerpdrukspanning van $18,4 \text{ N/mm}^2$ in de onderflens ter plaatse van de hoofdligger.



Figuur 7.8 Detail aansluiting dwarsdrager

De interlaminaire druksterkte van composiet blijkt gelijk te zijn aan de druksterkte van de hars (Soden P.D., 1998) (Kaddour A.S., 2012).

Een haalbare druksterkte voor polyester is 55 N/mm^2 , de materiaalfactor bedraagt $\gamma_M = \gamma_{M1} \cdot \gamma_{M2} = 1,15 \cdot 1,7 = 1,95$ voor niet post-cured hars & hand lay productie methode en de conversiefactor bedraagt $\gamma_c = \gamma_{ct} \cdot \gamma_{cv} = 1,1 \cdot 1,1 = 1,2$ voor temperatuur & vochtigheid effecten (CUR96, 2018, pp. §2.4.4.3, §2.4.5 & Table 3.2). Daarmee is $23,5 \text{ N/mm}^2$ op te nemen, hetgeen volstaat.

Het maximale steunpunt wisselmoment is $15,4 \text{ kNm}$. Dit moment resulteert in een drukwisselspanning van $7,8 \text{ N/mm}^2$ in de onderflens ter plaatse van het hoofdligger. Bij vermoeiing geldt een extra factor van $\gamma_{Mf} = 1,1$.

De formule voor vermoeiingssterkte voor $R = 0,1$ bedraagt $\log(N) = -7 \cdot \log(\sigma/C)$ voor 'UD glass-*polyester*, waarbij Constante $C = 185$ volgt indien voor $N = 5.000$ de statische sterkte $\sigma = 55 \text{ N/mm}^2$ wordt aangehouden. Bij 1^e 8 wisselingen is $5,2 \text{ N/mm}^2$ toelaatbaar, omdat $\log(1^e 8) = -7 \cdot \log(1,1 \cdot 1,95 \cdot 1,2 \cdot 5,2/185)$. De formule voor vermoeiingssterkte voor $R = 0,1$ bedraagt $\log(N) = -10 \cdot \log(\sigma/C)$ voor 'UD glas-*epoxy*, waarbij Constante $C = 411$ volgt indien voor $N = 5.000$ de statische sterkte $\sigma = 75 \text{ N/mm}^2$ wordt aangehouden. Bij 1^e 8 wisselingen is $25,3 \text{ N/mm}^2$ toelaatbaar, want $\log(1^e 8) = -10 \cdot \log(1,1 \cdot 1,95 \cdot 1,2 \cdot 25,3/411)$. (CUR96, 2018, p. §6.5.2)

Naar verwachting voldoet ook een *vinylester* hars lijm.

7.7 Plooiconrole sandwich flenzen

In Bijlage D zijn plooien van VVK onderflens bij het steunpuntmoment (B in Figuur 7.8) en plooien van stalen dekplaat bij het veldmoment (C in Figuur 7.8) gecontroleerd aan de hand van de Hoff's plooispanning-formule:

$$\sigma_f = 0,5(G_c E_c E_f)^{\frac{1}{3}}$$

Beiden voldoen zeer ruim.

De G en E-modulus van de PVC-kern (core c) zijn ontleend aan datasheets (Bijlage I).

De E-modulus van de GVK flens (flange f) is bepaald met als uitgangspunten:

- 50% vezelvolumen gehalte (praktijkwaarde vacuüm infusie)
- evenveel vezels in hoofd- als dwarsrichting (momenten in deze richtingen bijna even groot)
- conversiefactor voor I) herhaalde belasting, II) warmte- en III) vochtinvloeden.

De E-modulus van de stalen flens is 210.000 N/mm^2 .

7.8 Buigspanningen

Aan de hand van het statische en wisselmoment zijn de buigspanningen in de flenzen bepaald met de formule:

$$\sigma = \frac{M \times z}{EI} \times E_{\text{eigen}}$$

waarin:

- σ = spanning
- M = moment
- z = afstand tot de neutrale lijn
- EI = buigstijfheid samengestelde doorsnede
- E_{eigen} = elasticiteitsmodulus van het materiaal waarin de spanning berekend wordt

Buigspanning in hoofdrichting

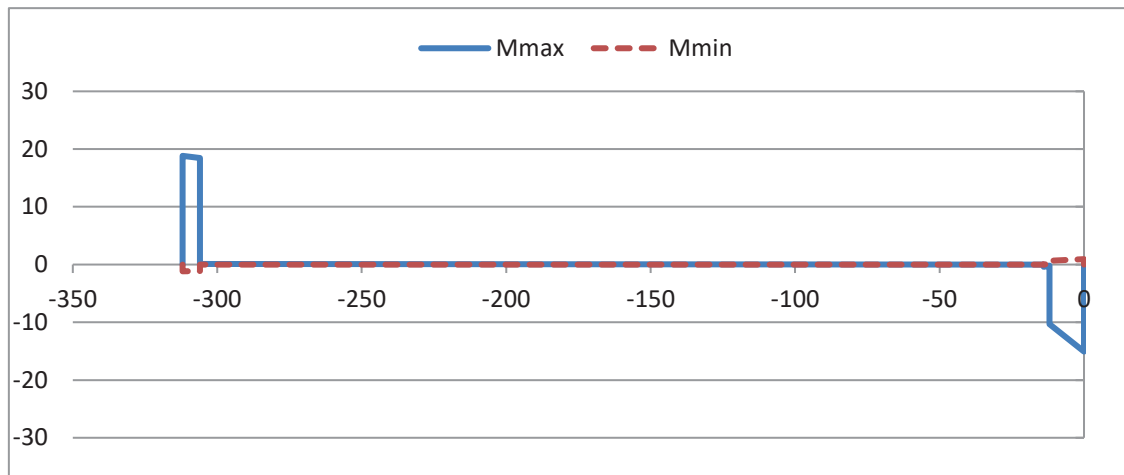
Met een moment $+85,5 \text{ kNm}$ wordt in het staal een drukspanning $34,8 \text{ N/mm}^2$ verkregen. En onderin in het composiet een spanning van $43,5 \text{ N/mm}^2$. Beiden zijn makkelijk opneembaar.

Buigspanning in dwarsrichting

Met een moment $+56,6 \text{ kNm}$ wordt in het staal een drukspanning $23,1 \text{ N/mm}^2$ verkregen. En onderin in het composiet een spanning van $28,8 \text{ N/mm}^2$. Beiden zijn makkelijk opneembaar.

Wisselbuigspanningen

Met een wissel-moment $39,1 \text{ kNm}$ in hoofdrichting wordt in het staal een wissel-spanning $16,0 \text{ N/mm}^2$ verkregen. En in het composiet een wisselspanning van $20,0 \text{ N/mm}^2$.



Figuur 7.9 Spanningsdiagram tgv positief resp. negatief moment in hoofdrichting (6 mm composiet links, 12 mm staal rechts)

Met een wissel-moment 25,3 kNm in dwarsrichting wordt in het staal een wisselspanning 10,3 N/mm² verkregen. En onderin in het composiet een wisselspanning van 12,9 N/mm².

Doordat de wisselbuigspanningen in het staal ruim onder de 29,1 N/mm² blijven, treedt er geen verdere vermoeiing op in de stalen dekplaat. Ook de wisselspanning in de composiet onderflens is dusdanig laag, dat hiervoor een vermoeiingscheck niet noodzakelijk is.

7.9 Lokale wisselspanningen in dekplaat door wielen

Het lokale moment in de stalen dekplaat ($E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ & $I = 144 \text{ mm}^4/\text{mm}'$) is bepaald met een plaat op een bedding belast door een wielbelasting.

Gehanteerd is 60 kN (vermoeiingmodel 3) gespreid over 444 x 444 mm (EN1991-2, 2011).

De beddingconstante k is de E-modulus van kern (100 N/mm²) gedeeld door de dikte van de kern (292 mm).

De stijfheidsverhouding ($\frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}$) bedraagt 137 mm. De meewerkende breedte voor het opnemen van het moment bedraagt $444 + 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 137 = 659 \text{ mm}$. Het buigend moment is analytisch berekend als 195 Nmm/mm met (SKH90-01, 2009).

Dit geeft lokaal een extra spanningsrimpel voor vermoeiing van 8,3 N/mm². De totale wisselspanning wordt daarmee $16,0 + 8,3 = 24,3 \text{ N/mm}^2$ hetgeen nog steeds kleiner is dan 29,1 N/mm².

7.10 Schuifspanningen

Aan de hand van het statische en wisseldwarskracht is de afschuifspanning in de kern bepaald met de formule:

$$\tau = \frac{V}{b \times h_e}$$

waarin:

- τ = afschuifspanning
- V = dwarskracht
- b = breedte
- h_e = effectieve hoogte

Statisch

$$\tau = \frac{375 \cdot 10^3}{1000 \times 300} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

De schuifsterkte van verharde hars bedraagt ruwweg 50 à 80 N/mm². De interlaminaire schuifsterkte (ILSS) van een composiet tussenlaag bedraagt ruwweg 20 à 30 N/mm². De schuifsterkte van cross linked PVC-kern bedraagt slechts 0,7 à 1,0 N/mm² bij een dichtheid van 80 kg/m³ (CUR96, CUR-Aanbeveling 096, 2018).

De aanhechtschuifsterkte van VE hars (Atlac 430) aan een stalen plaat is onderzocht met en zonder primer, met en zonder post curing, na 0, 1 en 2 maanden in droge en natte omstandigheden waarbij watermilieus zoet (binnenwater), zout (buitengaats) en zuur (regen) zijn meegenomen. De laagste gemiddelde sterkte bedraagt daarbij 27 N/mm² en de laagste karakteristieke waarde 23 N/mm² (Achterberg & van Gorkum, 2014).

De schuifspanningssterkte in de kern is dus maatgevend.

Een C70-90 schuimkern (van Airex) met een dichtheid van 90 à 115 kg/m³ (gem. 100) heeft een minimale schuifsterkte van 1,4 N/mm² (gem. 1,7). NYcell PVC schuimkern (van Ydra Marine) met een dichtheid van 100 kg/m³ heeft een schuifsterkte van 1,64 N/mm² (zie bijlage I voor datasheets).

Als materiaalfactor voor schuimkern wordt 1,25 gebruikt (SKH90-01, 2009, p. 42). De toelaatbare spanning bedraagt dan $1,64/1,25 = 1,30$ N/mm² en $1,25 \cdot 1,30$. De statische dwarskracht kan dus net met een PVC kerndichtheid van 100 kg/m³ worden opgenomen.

Vermoeiing

$$\Delta\tau = \frac{169 \cdot 10^3}{1000 \times 300} = 0,56 \text{ N/mm}^2$$

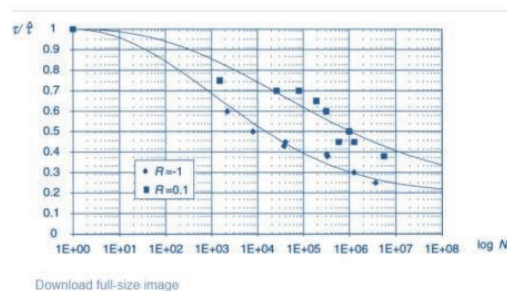
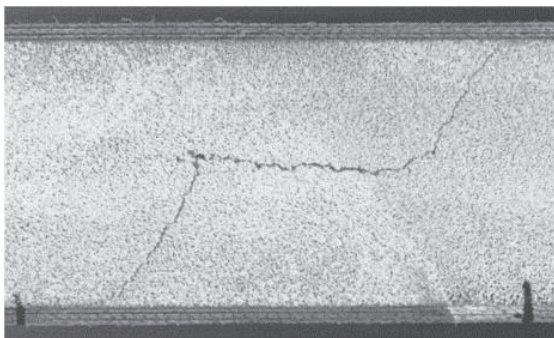


Fig. 4. S/N diagram for H100 beams. Lines are curve fits according to Eq. (4)

Figuur 7.10 Vermoeingsbreuk en vermoeiingsgrafiek van PVC schuimkern (100 kg/m³) (Burman M., 1997)

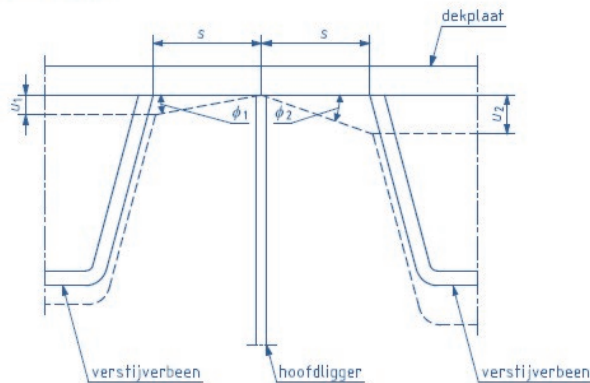
De wisselschuifsterkte van cross linked PVC kern met een dichtheid van 100 kg/m³ bedraagt voor $n = 1 \times 10^8$ & $R = 0,1$ circa 33% (zie Figuur 7.10) van de statische sterkte ofwel $0,33 \times 1,64/1,25 = 0,37$ N/mm². Er is een sterker schuim nodig, bijv. 130 kg/m³ waarmee volgt $0,33 \times 2,29/1,25 = 0,61$ N/mm², en $0,56 > 0,61$. Afhankelijk van de zwaar-verkeersdrukke is dus een sterker schuim nodig.

7.11 Vervormingen

De maximale rotatieknik bedraagt 0,021 rad, deze is wat groter dan de toelaatbare knik van $2/120 = 0,017$ rad bij een asfalt / mastieken / betonnen slijtlaag van 50 mm of dikker (zie Figuur 7.11). Voor een epoxy slijtlaag van circa 8 mm -die doorgaans bij beweegbare bruggen wordt toegepast- gelden er echter geen vervormingsgrenzen voor rotatieknik.

- (5) Daar waar de dekplaat het lijf van een dwarsdrager passeert en de slijtlaag is 50 mm of dikker, wordt aanbevolen dat ter voorkoming van scheuren in de slijtlaag de rotatiehoek ϕ_1 resp. ϕ_2 zoals getoond in figuur NB.4 is beperkt tot $1/120$ rad. Aanvullend wordt aanbevolen dat is voldaan aan de voorwaarden zoals gedefinieerd in figuur NB.4.

ϕ_1 resp. $\phi_2 < 1/120$ rad



Figuur NB.4 — Vervormingen nabij de hoofdligger

OPMERKING Figuur NB.4 is ontleend aan figuur 29 van NEN 6788.

Figuur 7.11 Vervormingsgrens bij dikke slijtlaag (EN1993-2, 2011, p. 21/NB)

7.12 Eigenfrequentie sandwich

De eigenfrequentie is afhankelijk van de verhouding tussen massa en veerstijfheid. De doorbuiging onder eigen gewicht is hiervoor een maat. De doorbuiging (door buigvervorming en dwarskrachtvervorming) $\delta_{e.g.}$ tussen de dwarsdragers door alternerend eigen gewicht bedraagt 0,3 mm (0,0003 m). De eigenfrequentie van de sandwich kan worden afgeschat met:

$$f_e = \sqrt{\frac{0,31}{\delta_{e.g.}}}$$

tot 32 Hz. Deze frequentie valt buiten de belastingfrequenties door verkeer en voetgangers.

7.13 Conclusie

Voor de 300 mm hoge sandwich (zie Figuur 7.3) geldt dat de PVC-schuimkern een dichtheid van minimaal 100 kg/m³ moet hebben en goede vermoeiingseigenschappen moet bezitten. Bij zwaardere verkeersdrukte kan een zwaarder schuim noodzakelijk zijn van bijv. 130 kg /m³. De gelijmde aanhechting van schuim aan dekplaat is niet maatgevend.

Voor de composieten onderflens kan gebruik gemaakt worden van een vezel-versterkt kunststof met relatief goedkope E-glasvezels. De composieten onderflens kan 6 mm dik worden. De glasvezel opbouw bestaat uit gestikt 0/90 UD-legsel, omdat de optredende spanningen in hoofd- en dwarsrichting nagenoeg gelijk zijn.

Met een polyesterhars is het twijfelachtig of de druksterkte op vermoeiing van de lijmverbinding van de VVK onderflens op de stalen dwarsdrager volstaat. Een vinylester hars zal naar verwachting echter ruim volstaan. Een lokale verdikking van de VVK onderflens bij de verbinding is hiervoor een prima alternatief.

8. Uitvoering

8.1 Inleiding

Aan de hand van het ontwerp van de VVK sandwichconstructie is er een uitvoeringsplan opgesteld voor de renovatie van een orthotroop stalen brugdek in 3 stappen:

- Het bepalen van de **uitvoeringsmethode**: MCA afweging tussen prefabriceren en ter plaatse maken (in situ).
- Het bepalen van de **bevestigingsmethode**: MCA afweging tussen handmatig lijmen en infuseren van lijm.
- Het beschrijven van een beknopt **uitvoeringsplan** voor de geselecteerde methoden.

8.2 Uitvoeringsmethoden

Eerst is nagegaan hoe de uitvoering van de renovatie van bestaande stalen dekken verloopt. Uit een interview met Royal Haskoning DHV kwam naar voren dat het wegbranden en vervangen van de stalen troggen onder het brugdek problemen met zich mee kan brengen. Niels Willemsen, projectleider bij de renovatie van de stalen Waalbrug te Ewijk, gaf als voorbeeld dat het vervangen van de passtukken in de troggen veel tijd en moeite met zich meebrengt.

Naar aanleiding van dit gesprek is er contact gezocht met Jansen Venneboer, ontwerper en bouwer van civiele staalconstructies. Ferdinand Beltman bracht daarbij naar voren:

- Het verwijderen van diverse troggen naast elkaar heeft tot gevolg dat grote krimpspanningen (ingebracht tijdens laswerkzaamheden bij het samenstellen van het brugdek) vrijkomen. Het brugdek vervormt hierdoor in grote mate en is niet meer naar de 'oude' vorm terug te brengen
- De troggen maken samen met de dekplaat deel uit van de effectieve breedte van de bovenflens van de hoofdliggers, die op druk wordt belast. De aan te brengen VVK sandwichconstructie dient na het weghalen van een trog, de rol hiervan over te nemen (de VVK onderflens kan prima druk overbrengen).

Als uitgangspunt is daarom gehanteerd om niet meer dan één trog naast elkaar tegelijk te vervangen, maar om:

- trogdelen in elkaars verlengde (troglijnen) tegelijk te vervangen
- troglijnen, om en om, te vervangen.

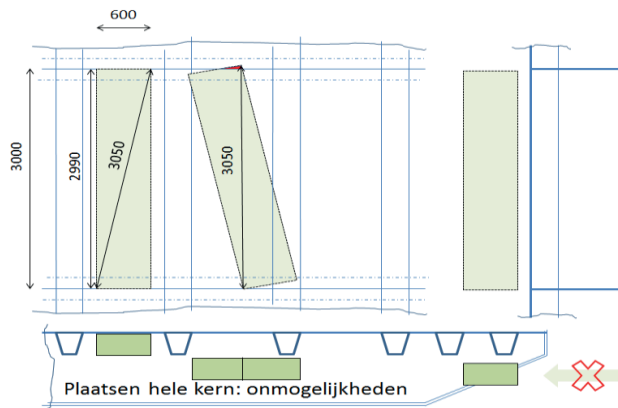
De uitgangspunten voor de uitvoeringsmethoden zijn:

- Werken onder een stalendek van een beweegbare, orthotrope, stalen brug
- Dwarsdragers met lijf en onderflens, hoogte: ca. 1,0 m, h.o.h. 3,0 m
- Troggen $h = 0,3$ m h.o.h. 0,6 m, even troglijnen vervangen, waarna oneven troglijnen
- Alleen 6 troggen zwaarst belaste rijstrook vervangen ($b = 3,6$ m)
- Geen verkeer op aan te passen rijstrook, verdere uitvoeringshinder minimaliseren
- Maatafwijkingen en uitvoeringstoleranties VVK sandwich delen opvangen met hars
- Reeds aangebrachte VVK sandwich delen mogen niet heet worden tijdens wegbranden van naastgelegen troggen en/of dichtlassen van dwarsdrager-sparingen.

Varianten

Aan de hand van deze uitgangspunten zijn twee uitvoeringsvarianten opgesteld:

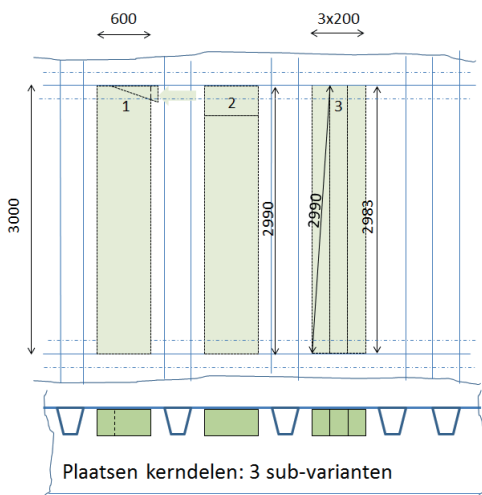
- In situ variant
- Prefab variant.



Figuur 8.1 Kerndelen zijn niet in zijn geheel te plaatsen

Voor beide varianten geldt dat de kerndelen van 600 x 300 x 3000 mm (b x h x l) niet in zijn geheel geplaatst kunnen worden, zie figuur 8.1.

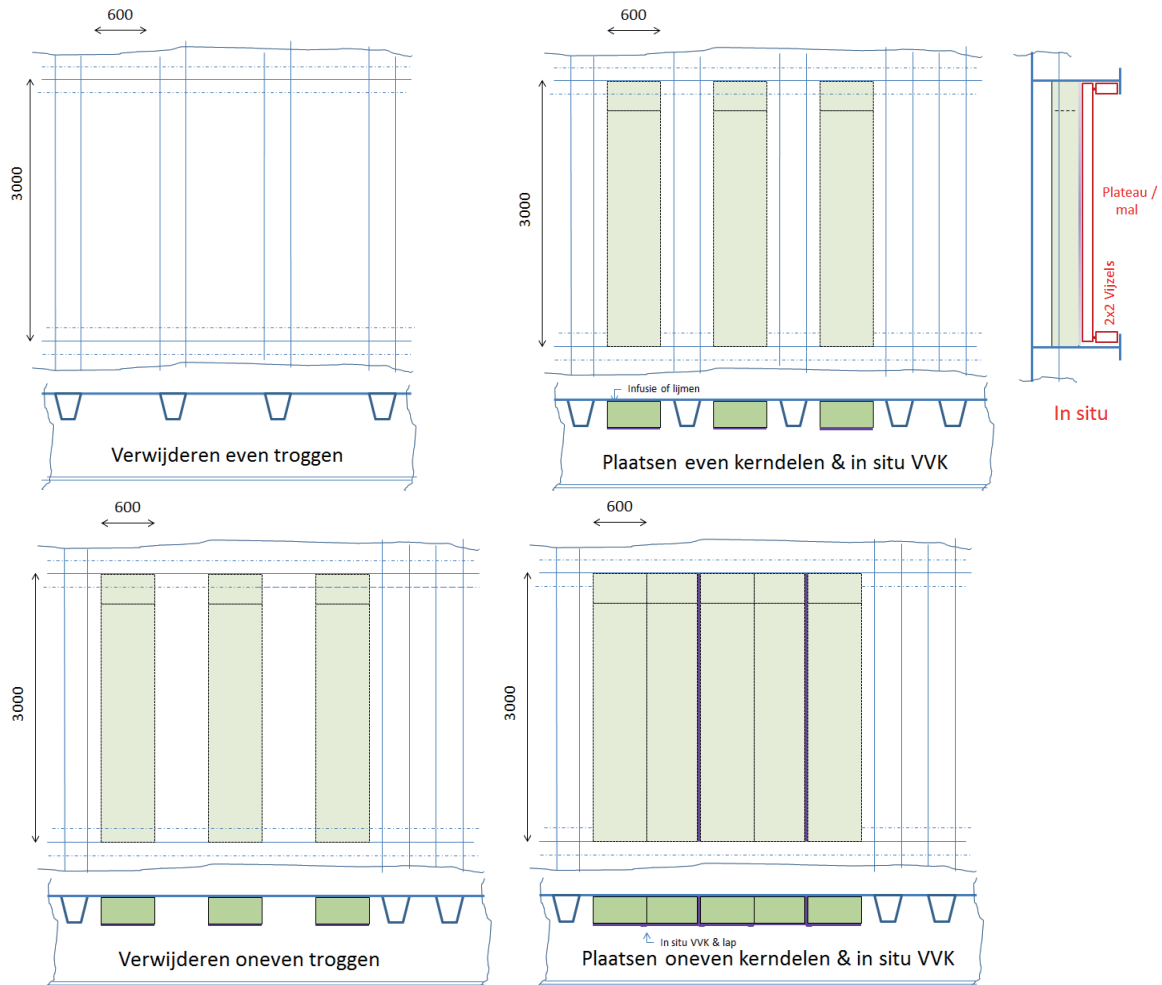
Hiervoor zijn 3 sub-varianten ontwikkeld: in '1' deel met een losse hoek, in 2 ongelijke deellengtes of in 3 gelijke deelbreedtes, zie figuur 8.2.



Figuur 8.2 Mogelijkheden plaatsen kerndelen

Bij de 'In-situ' en de 'Prefab' varianten wordt de meest geëigende sub-variant voor het plaatsen van de kerndelen meegenomen. Om de 'In-situ' en de 'Prefab' varianten met elkaar te kunnen vergelijken, is er per variant een omschrijving gemaakt van de te verrichten werkzaamheden en de voor- en nadelen. Optie 3 is voornamelijk meegenomen omdat deze kerndelen door 2 werklieden met de hand getild zouden kunnen worden (ca. 20 kg schuim ca. 25 kg incl. VVK), dit is echter voor bovenhands alsnog als te zwaar beoordeeld. Voor elke deling geldt dat gelijmd moet worden.

8.2.1 In situ variant



Figuur 8.3 In situ variant

Deze variant (Figuur 8.3) bestaat uit het op locatie samenvoegen van alle componenten van de VVK sandwichconstructie. Het gaat hierbij om een kunststof schuimkern, onderliggende glasvezel legfels en de hars. De glasvezel legfels kunnen vooraf aan elkaar worden gestikt en op beperkte overmaat worden geknipt. Voor het plaatsen van de kerndelen is gekozen voor 2 ongelijke deellengtes met één sluitstuk. Dit vergt minder inbrengbehandelingen en kent weinig lassen. De verbinding staal-kerndelen, kerndelen onderling en de glasvezels worden in één keer geïnfuseerd.

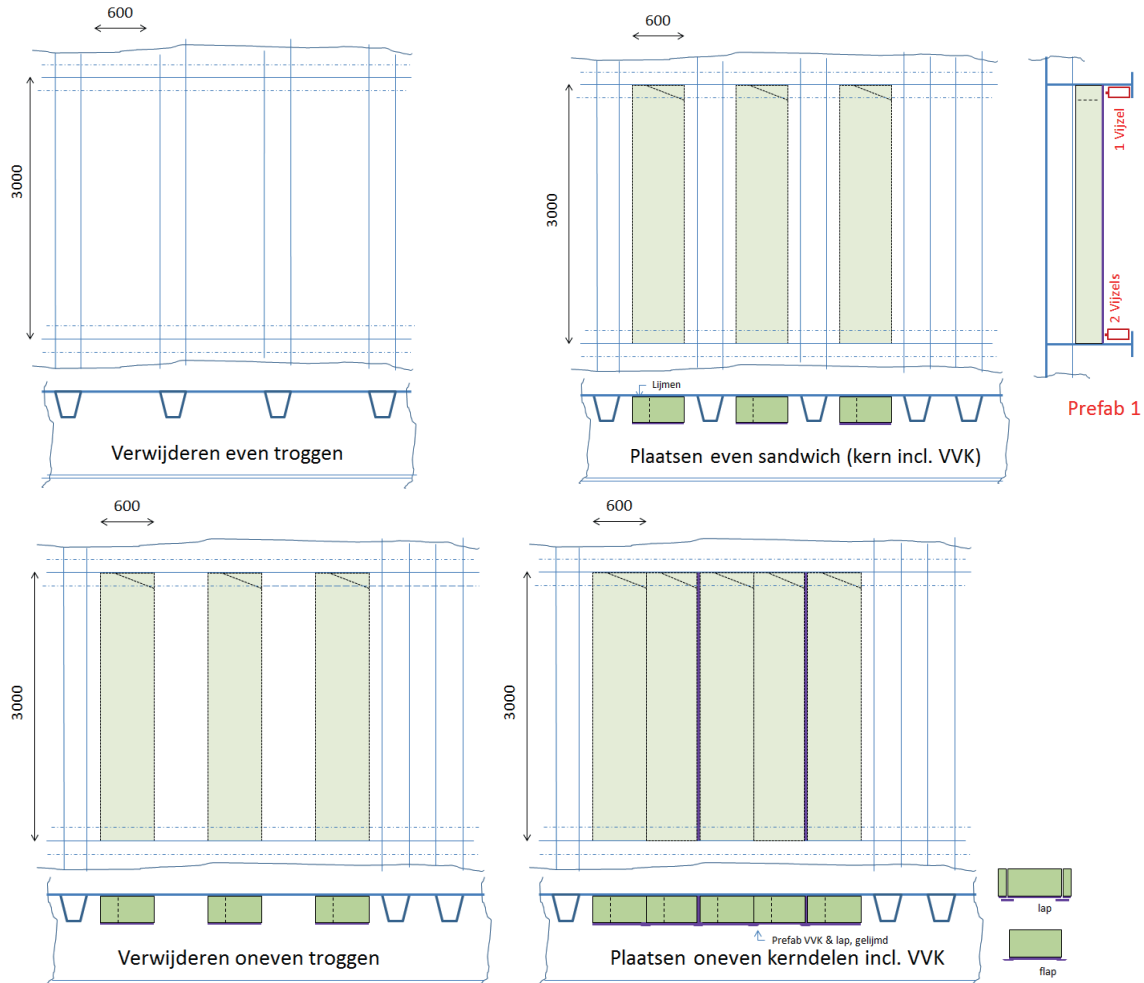
Voordelen:

- De constructiedelen kunnen ter plaatse op maat gemaakt worden
- Vacuüm infuseren trekt de flexibele mal vanzelf omhoog.

Nadelen:

- Vrijelbaar plateau / mal nodig, werken in een kleine omgeving
- Veel materiaaldelen en hulpmiddelen in situ (pomp, slangen, folie, tacky tape),
- Arbeidsintensief, lange uitvoeringsduur
- Voor een taaie interface staal-kern is (vooral nog?) flowmedium-loze werkmethode nodig.

8.2.2 Prefab variant



Figuur 8.4 Prefab variant

Deze variant (Figuur 8.4) bestaat uit het aanbrengen van zo groot mogelijk prefab sandwich-element: kern met vooraf aangebrachte VVK onderflens. Voor het plaatsen van de kerndelen is derhalve gekozen voor '1' deel met losse hoek.

Voordelen:

- Weinig handelingen ter plaatse, snelle uitvoering mogelijk
- Geen plateau / stijve mal nodig
- Met schegvormig sluitstuk flexibel voor lengtetolerantie
- Kan gelijmd worden: taaie interface staal-kern t.a.v. impactschade mogelijk.

Nadelen:

- Separaat aanbrengen sluitstukje met VVK onderflens
- Separaat aanbrengen VVK overlap stroken: bij overgangen naar sluitstukken en buurpanelen, dan wel sluitstukken en oneven panelen uitvoeren met overlap. Flappen zijn echter gevoelig voor transport en montageschade
- Bij lijmen bestaat on-vlakheden stalen dekplaat het risico op onvolledige benatting
- Bij infuseren van lijm is voor een taaie interface staal-kern (vooral nog) een flowmedium-loze werkmethode nodig.

8.2.3 Meest geschikte uitvoeringsvariant

Tussen de twee uitvoeringsvarianten is een weloverwogen keuze gemaakt aan de hand van een MCA zie Tabel 8.1. Achtergrondinformatie is opgenomen in Bijlage E.

Multi Criteria Analyse (MCA)		Variant 1	In situ	Variant 2	Prefab
Criterium	Weegfactor	Punten	Score	Punten	Score
Uitvoeringshandelingen	25%	4	1,00	6	1,50
Verwerkingsmogelijkheden	15%	5	0,75	8	1,20
Toleranties	10%	8	0,80	6	0,60
Uitvoeringsduur	40%	4	1,60	6	2,40
Benodigde materieel	10%	4	0,4	6	0,6
Totale score	100%		4,55		6,3

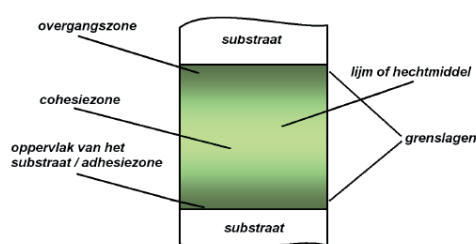
Tabel 8.1 MCA uitvoeringsmethode

De uitvoeringsduur is het zwaarst wegende aspect waarop is geselecteerd in de afweging. Omdat de VVK sandwichconstructie onder een stalen dek bevestigd dient te worden, is het gewenst om de uitvoeringsduur en de uit te voeren handeling, zo kort en eenvoudig mogelijk te houden. De in situ variant brengt veel handelingen onder het brugdek met zich mee, daardoor is deze variant afgefallen.

8.3 Bevestigingsmethode

De bevestigingsmethode moet aansluiten bij de geselecteerde prefab uitvoeringsmethode van de sandwich. De af te wegen bevestigingsmethodes bestaan uit **handmatig lijmen** en **infuseren van lijm**. De bevestiging bestaat in beide gevallen uit een verbinding met een hechtmiddel.

Een hechtmiddel kan in het algemeen gedefinieerd worden als een materiaal dat aangebracht kan worden op oppervlaktes van twee materiaal / substraten, zodat deze materialen verbonden worden en samen gaan en blijven werken. Een verbinding met hechtmiddel is weergegeven in Figuur 8.5 (Kerkhofs, 2009).



Figuur 8.5 Doorsnede van een lijmvverbinding

De hechting van VVK op stalen platen is reeds onderzocht in rapport 'Renovatie stalen bruggen door middel van vezel versterkt kunststof'. Voor een goede hechting moeten de oppervlakken van de substraten voorbehandeld worden. (Achterberg & van Gorkum, 2014).

Een eenvoudige methode van lijmen is het handmatig lijmen met een roller, kwast of lijmkam (bij pasteuze lijmen). Daarnaast kan het infuseren van lijm worden toegepast, waarvoor een vacuümpomp en luchtdicht afsluiten nodig zijn. Beide methodes hebben hun voor- en nadelen. Om de meest geschikt uitvoeringsmethode te kiezen, is een multi-criteria analyse gebruikt, zie Tabel 8.2.

Achtergrondinformatie is opgenomen in bijlage F.

MultiCriteria - Analyse (MCA)		Variant 1	Handmatig lijmen	Variant 2	Infuseren
Criterium	Weegfactor	Punten	Score	Punten	Score
Kosten	25,00%	8	2	6	1,5
Verwerking	15,00%	6	0,9	7	1,05
Performance	25,00%	6	1,5	8	2
Ervaringen	10,00%	6	0,6	7	0,7
Kwaliteit	25,00%	6	1,5	7	1,75
Totale score	100,00%	32	6,5	35	7

Tabel 8.2 MCA bevestigingsmethode

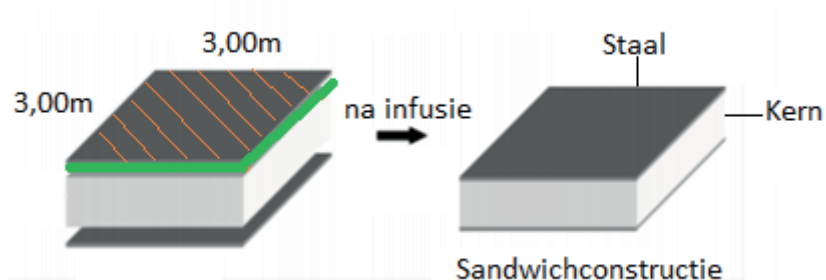
Met behulp van de MCA is bevestigingsmethode infuseren van lijm als meest geschikte geselecteerd voor het realiseren van de prefab VVK sandwichconstructie. Vooral performance en kwaliteit geven hierbij de doorslag. Bij handmatig lijmen is het risico, dat de constructie faalt door slechte performance en daarmee slechte kwaliteit te groot.

Bij infuseren boven én tussen de kerndelen is op het hele oppervlakte benatting nodig. Dit kan eenvoudig met een flowmedium. Boven de kerndelen zal een willekeurig flowmedium echter werken als scheurinleider bij vallende lading (zie valproeven hoofdstuk 6). Om dit te voorkomen worden twee opties gezien:

- een flowmedium toepassen met dezelfde mechanische eigenschappen (E, G, sterkte en hechting) als de als hars, dit om spanningsconcentraties rondom vezels te voorkomen. Voorts moet de hars na de gelfase verwaarloosbaar krimpen om restspanningen door verharding rondom het flowmedium te minimaliseren. Dit vergt aanvullend onderzoek.
- een voldoende fijnmazig netwerk van sleufjes (runners) in het kernmedium, waarbij volledige benatting wordt bereikt zonder flowmedium. Hiervoor is aanvullend onderzoek nodig. Een eerste aanzet is in de volgend paragraaf gedaan.

8.4 Benattingsproef infuseren van lijm

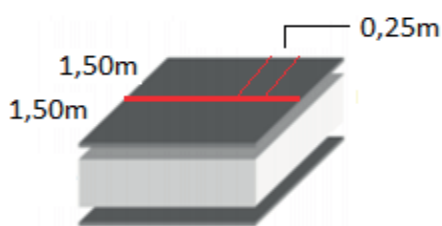
In § 8.3 is de bevestigingsmethode infuseren geselecteerd. Om te controleren of infusie van lijm succesvol kan verlopen, is er een benatting-experiment uitgevoerd. Het gaat er hierbij om of de harsinterface tussen de kern en de stalen plaat volledig wordt benat. Door middel van de benattingsproef (zie bijlage C) is bekeken of het haalbaar is om de gehele overspanning van 3,00 m te benatten. In Figuur 8.6 is met oranje de oppervlakte gemarkeerd die benat moet worden, en met groen de tussenlaag gemarkeerd waar de hars moet spreiden.



Figuur 8.6 Schematisatie benatten

Het is met een stalen plaat echter niet mogelijk om te controleren of de hars daadwerkelijk overal spreidt. In de benattingsproef is het staal daartoe vervangen door een glasplaat. Door de glasplaat is visueel gecontroleerd of het gehele oppervlak tussen de lagen wordt benat.

De inlaat van de infusie is in het midden van de overspanning bevestigd. Hierdoor bedraagt de te overbruggen lengte van de hars tot aan de oplegging 1,50 m, zoals weergegeven in figuur 8.7. Voor de proefstroken is een breedte van 0,25 m gebruikt.



Figuur 8.7 Schematisatie spreidafstand

Het doel van deze proef is om te bepalen of het mogelijk is, alle hars uit te spreiden tussen de beschreven lagen over de totale oppervlakte van de VVK sandwichconstructie. In de proeven zijn verschillende tussenlagen gebruikt en verschillende schuimtexturen die het spreiden van de hars beïnvloeden, zie Tabel 8.3.

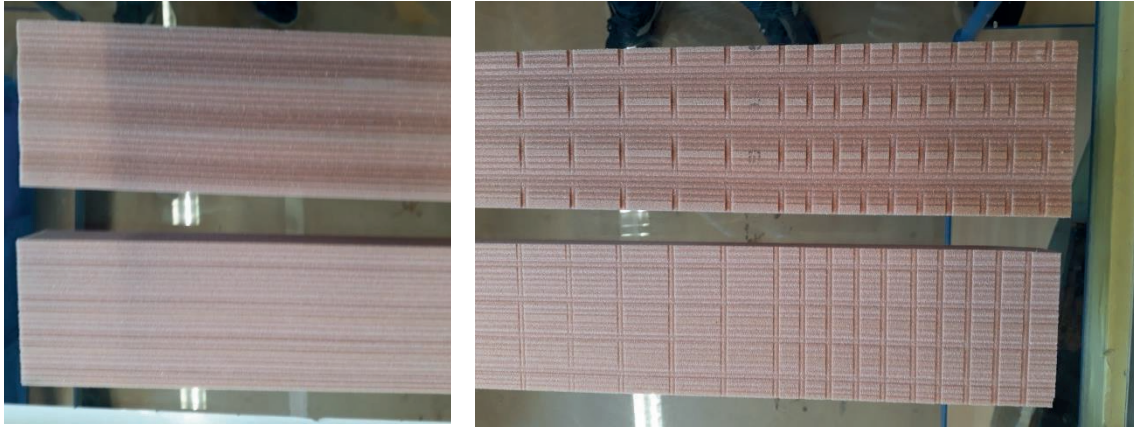
Flowmedium ↓: Kernvorm →:	Glad	Groefjes h.o.h. 20 mm	Groefjes h.o.h. 21 / 28 mm
Geen	-	-	#5 (n = 2)
CFM (M123)	#1 (n = 1)	#3 (n = 2)	-
Glasvlies (Viledon T177)	#2 (n = 1)	#4 (n = 2)	-

Tabel 8.3 Benattingsproeven

Verder is gebruik gemaakt van een gebruikelijke hars voor vacuüminfusie.

Proeven met rechthoekige groefjes een flowmedium in de vorm van CFM (#3) of glasvlies (#4) kenden groefjes in de schuimkern van $b \times d = 1 \times 1$ mm in een orthogonaal patroon. De groefjes fungeren als runners tijdens het infuseren.

Voor de aanvullende proeven (#5) zijn de golven in de kern verspaand met een cirkelzaag ($b = 3,5$ mm), daarom zijn slechts $b = 4 \times 21$ mm met golfdiepte van 1 mm en $b = 3 \times 28$ mm met golfdiepte van 2 mm in de kern geprofileerd ($b = 84 + 3,5$ mm). De lengte is ingekort tot 0,90 m, de laatste 0,45 m voorzien van dwarsgroefjes $b = 3,5$ mm. Zie Figuur 8.8.



Figuur 8.8 Gegolfd groeven patroon, rechter zijde met dwarsgroefjes

8.4.1 Resultaten

Proeven met een gladde schuimkern en een flowmedium in de vorm van CFM (#1) of glasvlies (#2) gaven geen volledige benatting.

Proeven met rechthoekige groefjes (runners) in de schuimkern ($b \times d = 1 \times 3 \text{ mm}$) en een flowmedium in de vorm van CFM (#3) of glasvlies (#4) gaven wel volledige benatting.

Met CFM was na ca. 3,5 minuten de overzijde (1,5 m) bereikt en met glasvlies na ca. 4,5 minuten.

De aanvullende proeven met golvende groefjes (#5) zonder flowmedium gaven ook volledige benatting. Met een golfhoogte van 1 mm was na ca. 5 minuten de overzijde (0,9 m) bereikt, en met een golfhoogte van 2 mm al na ca. 1 minuut. Dwarsgroefjes helpen het harsfront haaks op de stroomrichting te houden.

8.4.2 Conclusie

Uit de resultaten van de benattingsproeven is te concluderen dat ook zonder een flowmedium volledige benatting is te verkrijgen bij infuseren van de lijm.

Groevenpatroon, hars en omstandigheden moeten per opgave op elkaar afgestemd.

8.5 Uitvoeringsplan prefab variant

8.5.1 Onderdelen

Bij het opstellen van het uitvoeringsplan is de geselecteerde uitvoeringsmethode prefab uit §8.2 gecombineerd met de geselecteerde bevestigingsmethode infuseren van lijm uit §8.3.

Verder gehanteerde uitgangspunten zijn:

- Dekplaat vertoont geen vermoeiingsscheuren
- Troglijnen om en om vervangen
- Zwaar belaste rijbaan wordt gerenoveerd met de sandwichconstructie
- Tijdens de montage is er een gedeeltelijke afzetting van de brug noodzakelijk
- Onderflens sandwichconstructie ter hoogte van onderflens trog
- Werken vanaf ponton met hoogwerker.

Dekplaat vertoont geen scheuren

In het uitvoeringsplan wordt er vanuit gegaan dat er in de dekplaat geen scheuren aanwezig zijn. Als dit wel het geval is, dient dit te worden hersteld volgens geëigende methoden (zie §3.2) bijvoorbeeld door stukken stalen dekplaat te vervangen onder tijdelijke gebruikmaking van krammen.

Troglijnen om en om vervangen

Als er meerdere troggen naast elkaar worden weggebrand dan is het risico te groot dat er te grote vervormingen in de dekplaat ontstaan, dit vanwege temperatuurspanningen door lassen en branden (zie §8.2). Het is wel mogelijk om eerst de even troggen te vervangen door VVK sandwich en daarna tussenliggende oneven troggen. De afmetingen van de dwarsdoorsnede van de sandwichconstructie komt daardoor op 600 mm x 300 mm.

Zwaar belaste rijbaan wordt gerenoveerd

Alleen de troggen onder de zwaarste belaste rijbanen te vervangen, zijnde de rijstroken waar vrachtwagens frequent gebruik van maken. Dit omdat deze rijbanen de grootste spanningswisselingen te verduren krijgen. Een rijbaan op een autosnelweg is doorgaans 3,50 m breed (NOA, 2007), zodat 6 troggen moeten worden vervangen ($b = 3,6$ m).

Afzetting van de brug

Tijdens de werkzaamheden aan de brug is het noodzakelijk om de zwaar belaste strook van de brug af te sluiten. Dit omdat tijdens het wegbranden van de troggen tot en met verharden van de lijm er geen verkeer mogelijk is op de zwaar belaste strook van de brug.

Onderflens sandwichconstructie ter hoogte van onderflens trog

Doordat de sandwichconstructie de constructieve rol van de trog moet overnemen aan de uiteinden van het brugdek, moet de onderflens van de sandwich komen op de hoogte van de bestaande onderflens van de trog (zie inleiding hoofdstuk 7 en Figuur 7.3). Bestaande troggen zijn veelal circa 300 mm hoog.

Werken vanaf ponton met hoogwerker

Omdat het een beweegbare brug betreft zal er vanaf het water gewerkt moeten worden. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van een hoogwerker op een ponton (Figuur 8.9).



Figuur 8.9: Voorbeeld van een ponton met hoogwerker

8.5.2 Werkvolgorde

De uitvoeringsmethode bestaat uit het aanbrengen van 6 sandwichelementen van ieder 600 mm breed en 300 mm hoog per veld. Deze elementen zijn opgedeeld in 2 delen om tussen de dwarsdragers te passen.

De werkzaamheden bestaan uit het inrichten van het bouwterrein en het aanvoeren van de materialen. Vervolgens dient er onder de brug een ponton aangebracht te worden waarmee onder de brug gewerkt kan worden met behulp van hoogwerkers. Vervolgens wordt minimaal de zwaar verkeersstrook plus randen van circa $1,8\text{ m} + 3,6\text{ m} + 1,8\text{ m} = 7,2\text{ m}$ voor verkeer afgesloten.

Vervolgens worden de troggen om en om verwijderd en vervangen door een sandwich. Het verwijderen van de troggen wordt gedaan door middel van wegbranden en gladslijpen. Eventuele sparingen in de dwarsdragers moeten dan worden dichtgelast (zie §2.2).

De aansluiting tussen het staal en de sandwichconstructie wordt daarna voorbereid. Dit wordt gedaan door middel van zandstralen. De gezandstraalde oppervlakken worden voorzien van een hechtingsprimer. Nadat de primer voldoende is uitgehard worden de eerste sandwichelementen onder de brug geplaatst. Op het sandwichelement moet de hars bij het infuseren van lijm zodanig kunnen uitvloeien dat het hele oppervlakte bij infusie wordt benat. Op de onder-flenzen van de dwarsdragers worden vijzels aangebracht waarmee het sandwichelement tegen de stalen dekplaat wordt geduwd. Vervolgens wordt het schegvormige sandwich sluitelementen geplaatst waarmee de eerste elementen klem worden gezet. Vervolgens kan er gestart worden met de voorbereidingen van de infusie, waarbij tevens het na lamineren van de verbinding tussen beide sandwichdelen wordt meegenomen. Rondom de randen sandwichconstructie wordt tacky tape aangebracht waarop het infusiefolie luchtdicht wordt bevestigd om een vacuüm te creëren. Om de hars tussen het staal en de sandwichconstructie te krijgen wordt er in- en uitlaatslangen geplaatst.

Bij infuseren en uitharden (ca. 24 h) wordt het verkeer op de hele brug afgesloten. Door zoveel mogelijk sandwiches achter elkaar te infuseren kan dit in enkele weekenden voor de even troggen en later in enkele weekenden voor de oneven troggen.

Bij het infuseren van lijm wordt de inlaatslang aangesloten op de hars, en de uitlaatslang op de vacuümpomp die de hars door de opening tussen het staal en de sandwichconstructie heen zuigt. Na verharden ontstaat er een constructieve verbinding tussen de onderdelen.

De genoemde werkvolgorde is hieronder stapsgewijs nader uitgewerkt.

1. Prefabriceren sandwich elementen

Vooraf worden de sandwich elementen gemaakt in een fabriek. Voor het prefabriceren van de sandwichconstructies dient er een mal gemaakt te worden. De afmeting van de mal is brug afhankelijk vanwege verschillende afstanden tussen de dwarsdragers. Tijdens het fabriceren wordt de sandwichconstructie op enige overmaat gemaakt.

De opbouw ziet er als volgt uit bij een renovatie variant:

- 300 mm schuim (PVC-schuim 100 kg/m³) met flow groeven a/d bovenzijde
- 6 mm 0/90 glasvezelversterkt kunststof.

2. Inrichten bouwterrein

Op het bouwterrein dienen de volgende zaken aanwezig te zijn:

- Ketenpark
- Parkeergelegenheid voor de werknemers
- Elektriciteit
- Pontons met toereikende hoogwerkers
- Opslag voor kuubvaten met hars (volgens PGS-15)
- Meng-hok met peroxide-opslag, weegschaal, roerder, voorraad emmers e.d.
- Droge opslag sandwichpanelen.

3. Inmeten troggen en dekplaat

Voordat de troggen verwijderd worden, wordt de onderkant van het brugdek ingemeten met een 3D laser.

4. Verwijderen even troggen

Het verwijderen van de troggen wordt gedaan door middel van afbranden en gladslijpen.

5. Voorbehandelen staal

De dekplaat wordt gezandstraald om een goede hechting te vormen met de hechtingsprimer. Vervolgens wordt de stalen dekplaat ontdaan van stof en vet en wordt de primer aangebracht. Deze primer dient voldoende uitgehard te zijn voordat de prefab sandwichelementen aangebracht kunnen worden. Het aan mogen brengen van primer kan afhankelijk zijn van weersomstandigheden: temperatuur en dauw. Onder een dek komt in elk geval niet direct regen.

6. Aanbrengen prefab sandwich elementen

In situ worden de elementen pas gezaagd rekening houden met voldoende tolerantie. Eén kant van het element wordt vervolgens taps afgezaagd waarbij een schegvormig sluitstuk ontstaat.

Voordat het prefab sandwichelement bevestigd kan worden, worden er op de onderflens van de dwarsdragers vijzels klaargezet. Met de vijzels worden de prefab sandwichelementen tegen de dekplaat gedrukt. Met schegvormige sluitstukken worden sandwichpanelen vast geklemd. Daarna kunnen de vijzels naar verwachting worden weggehaald mits de sandwich elementen blijven hangen.

De sluitstukken worden voorzien van in over(f)lap. Om hars te besparen kunnen overmaten worden voorzien van vezelvulling.

7. Voorbereiden infusie

Na het aanbrengen van de elementen dienen de volgende stappen gevolgd te worden:

- aanbrengen in- en uitlaatslangen
- aanbrengen tacky tape
- aanbrengen vacuüfolie
- aansluiten inlaat op harsvat met slangkraan
- aansluiten uitlaat op vacuümpomp met harsval daartussen.

8. Infusie

Voor de injectie worden de volgende stappen uitgevoerd:

- Aanzetten van de vacuümpomp zodat er een vacuüm ontstaat en vervolgens dient het vacuüm gecontroleerd te worden op lekkages. Bij het vacuüm wordt het sandwich paneel tegen de dekplaat aangezogen.
- Open zetten van de harskraan
- Hars vloeit en bedekt volledig de opening tussen het staal en de sandwichconstructie
- Nadat de hars volledig is uitgehard kunnen de slangen verwijderd worden.

Het aan mogen brengen van hars kan afhankelijk zijn van weersomstandigheden: temperatuur en dauw. Onder een dek komt in elk geval niet direct regen.

9. Verwijderen oneven troggen, aanbrengen sandwich elementen

Nadat de even troggen zijn vervangen door de sandwichconstructies, kunnen de oneven troggen op dezelfde wijze verwijderd worden. Bij het verwijderen van de oneven troggen mag de sandwich van de reeds vervangen even troggen niet te warm worden. Vervolgens kunnen de tussenliggende sandwich elementen worden aangebracht. Deze worden voorzien van over(f)lap naar even sandwich panelen.

Risico's en beheersmaatregelen

Voorafgaande aan de werkzaamheden wordt een veiligheidsinstructie gegeven. De volgende risico's en beheersmaatregelen worden voorzien:

- | | |
|--------------------------------|--|
| - Werken met chemische stoffen | → De daarvoor benodigde PBM's dragen |
| - Werken op een hoogwerker | → Bevoegd personeel hiermee laten werken |
| - Werken boven water | → Dragen van zwemvest |
| - Verkeer op trogloos dek | → Tijdelijke barriers vastzetten. |

9. Economische haalbaarheid

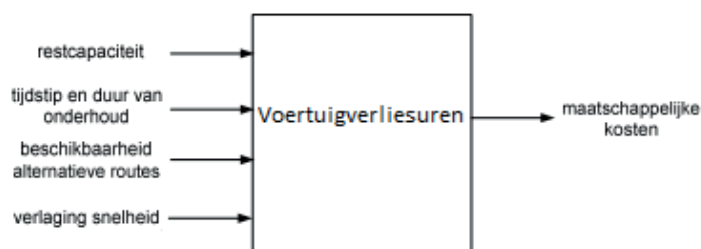
9.1 Inleiding

Steeds vaker wordt bij projectkeuzes naast directe kosten ook naar indirecte kosten gekeken. Directe kosten zijn kosten die kunnen worden toegerekend aan een product of dienst op grond van een directe technische of organisatorische verhouding. Indirecte kosten missen deze directe relatie (De Ridder, Suddle, & Soons, 2009). Indirecte kosten kunnen worden gezien als maatschappelijke kosten. In dit hoofdstuk zijn de twee varianten HSB overlagen en VVK sandwich vergeleken op basis van indirecte en direct kosten.

9.2 Indirecte kosten

Tijdens renovatie aan stalen bruggen kunnen aanzienlijke maatschappelijke kosten ontstaan door bijvoorbeeld filevorming en verkeershinder. Voor de analyse van de indirecte kosten zijn meerdere rekentools ontwikkeld om hier inzicht in te creëren. In de rekentools worden de maatschappelijke kosten van bereikbaarheid en betrouwbaarheid uitgedrukt in het totale reistijdverlies van alle weggebruikers samen. Deze voertuigverliesuren worden omgerekend naar kosten door een vermenigvuldiging met een vastgesteld bedrag dat een verliesuur van een persoon gemiddeld kost, de reistijdwaardering (value-of-time) (Muller, Duijnsveld, & Leegwater, 2010).

Om een goed beeld te vormen van de indirecte kosten worden de afweegcriteria mee genomen zoals getoond in figuur 9.1.



Figuur 9.1 Overzicht aspecten voertuigverliesuren

De **restcapaciteit** van de weg wordt bepaald door de wegbreedte die open blijft en de **verkeerssnelheid** die toegestaan blijven tijdens de renovatie. Wanneer deze klein resp. laag zijn, kan dit met name in de verkeersspitsen leiden tot filevorming, juist dan zijn een **korte uitvoeringsduur** en zo veel mogelijk op **tijdstippen buiten de spits** gunstig. De aspecten zijn erg project- en wegafhankelijk.

Zo is ook de **beschikbaarheid van alternatieve routes** erg project- en wegafhankelijk, deze is dan ook niet meegenomen bij de vergelijking tussen beide varianten.

Omdat de indirecte kosten zeer projectafhankelijk zijn, is er per aspect een kwalitatieve vergelijking gemaakt middels een multi-criteria analyse die is opgenomen in tabel 9.1.

Bij de variant HSB overlaging wordt het gehele brugdek overlaagd. Tijdens het verharderen van de beton mag het brugdek niet worden bereden vanwege trillingen. Bij brede snelwegen zijn linker en rechter weghelft vaak gescheiden, zodat al het verkeer over één zijde geleid kan worden. Bij smallere (snel)wegen zijn de weghelften niet altijd gescheiden. Dan moet in een tijdelijke stremming al dan niet met omleiding worden voorzien.

Bij de variant VVK sandwich worden alleen de troggen van de vrachtwagenstroken vervangen, eerste van de ene vrachtwagenstrook daarna van de andere. Naast deze rijstrook wordt veiligheidshalve 2 meter aan weerszijden extra afgesloten. Er resteert dan veelal meer dan één rijbaan. Omdat alleen vrachtwagenstroken worden aangepakt, is de te verwachten uitvoeringsduur eveneens korter. Tijdens het infuseren en verharderen van de lijm mag de brug niet bereden worden vanwege trillingen. Dit kan plaatsvinden in weekenden. Bij deze variant wordt alleen gewerkt onder de brug, daarom hoeft de verkeerssnelheid slechts beperkt te worden teruggebracht.

Multi Criteria Analyse (MCA)		Referentie variant	HSB overlaging	Variant	VVK sandwich
Criterium	Weegfactor	Punten	Score	Punten	Score
Restbreedte weg	33%	4	1,33	6	2,00
Tijdstip en tijdsduur	33%	4	1,33	6	2,00
Alternatieve routes	0%		0,00		0,00
Verlaging snelheid	33%	4	1,33	6	2,00
Totale score	100%		4,00		6,00

Tabel 9.1 MCA Indirecte kosten HSB-overlaging vs. VVK sandwich

In Tabel 9.1 komt naar voren dat de variant VVK sandwich duidelijk de economisch meest voordelige renovatiemethode is op basis van de indirecte kosten.

9.3 Directe kosten

In het onderzoeksrapport van J. van Gorkum en R. Achterberg zijn de directe kosten van een VVK sandwichconstructie verkend. Vanwege het ontbreken van een begroting van de HSB-overlaging is er aan de hand van de volgende categorieën een kwalitatieve vergelijking gemaakt: materialen, mankracht, materieel, verkeersafzetting, engineering en aanpassen balanceren en risico's. (Achterberg & van Gorkum, 2014).

Voor beide varianten zijn directe kosten voor materialen en mankracht geraamd voor een realistische case van een beweegbare brug in een snelwegsituatie met 2x2 rijstroken en aan beide zijden een vluchtstrook. De raming is opgenomen in Bijlage G.

Bij HSB overlaging moet het hele dek worden overlaagd plus de ballastkist worden verzwaaard, bij VVK sandwich wordt boven het hoofd gewerkt echter alleen bij de vrachtwagenstroken. Bij HSB overlaging is een veel meer contragewicht nodig, terwijl bij VVK sandwich alleen de regelballast aangepast hoeft te worden.

De materiaalkosten bij HSB overlaging voor beton en met name staal (verzwaren van ballast in een klein volume) zijn veel groter dan die voor kern en VVK bij de sandwich variant.

De uren voor in situ dek-werkzaamheden zijn ongeveer gelijk voor beide varianten. De uren voor prefabriceren van VVK panelen zijn echter meer dan de uren voor balanceren bij HSB.

Ten aanzien van materieel is bij de variant HSB overlaging een tent nodig en hijsequipment voor de balancerings, en bij de variant VVK sandwich een ponton, hoogwerker en hydrauliek. In kosten loopt dat niet ver uiteen.

Bij beide varianten zijn wegaafzettingen nodig, bij VVK sandwich iets meer voor enkele weekenden. De engineeringkosten van minder bekend materiaal VVK zijn iets hoger dan van HSB, maar engineering van balancerings vereffent dat.

Ten slotte geldt dat beide methoden risico's kennen, ingeschat is dat deze dezelfde orde van grootte kennen: bij HSB overlagen het mogelijk moeten verzwaren van bewegingswerk en fundering, en bij VVK sandwich de risico van inpassen van een nieuwe techniek. In Tabel 9.2 komt naar voren dat qua directe kosten de variant VVK sandwich iets gunstiger uitpakt bij een beweegbare brug.

Multi Criteria Analyse (MCA)		Referentie variant	HSB overlaging	Variant	VVK sandwich
Criterium	Weegfactor	Punten	Score	Punten	Score
Materialen, incl. balans	30.0%	5	1.50	9	2.70
Mankracht, incl. balans	30.0%	7	2.10	5	1.50
Materieel, incl. balans	10.0%	6	0.60	6	0.60
Verkeersafzetting	10.0%	6	0.60	5	0.50
Engineering, incl. balans	10.0%	6	0.60	6	0.60
Risico's bewegingswerk & fundatie	10.0%	6	0.60	6	0.60
Risico's nieuwe techniek					
Totale score	100%		6.00		6.50

Tabel 9.2 MCA directe kosten HSB-overlaging vs. VVK sandwich

9.4 Conclusie

Zowel bij directe kosten als indirecte kosten lijkt de variant VVK sandwich gunstiger bij een kwalitatieve vergelijking. Benadrukt wordt dat de verzwarende van de balancerings daarbij dominant is bij de directe kosten omdat deze in relatief duur staal zijn voorzien om ballast volume te besparen in een bestaande situatie.

Aanbeveling

Aanbevolen wordt aan de hand van een begroting van een gerealiseerd HSB overlaging project, aan de hand van case voor een beweegbare brug een kwantitatieve vergelijking te maken van de totale kosten.

10. Conclusie

10.1 Terugkoppeling deelvragen

Per deelvraag wordt kort aangegeven wat de resultaten van het onderzoek zijn.

1. Wat zijn de problemen bij orthotrope brugdekken, hoe ziet de huidige oplossing eruit en wat zijn hiervan de keerzijdes?

De problemen worden veroorzaakt door vermoeiing in het stalen brugdek. Hierdoor ontstaan 4 verschillende scheurtypes die de brug dermate aantasten, dat de levensduur wordt verminderd. HSB overlaging biedt hiervoor gedeeltelijk een oplossing. De spanning in de brug wordt verminderd en elimineert 2 van de scheurtypes, maar lost de overige 2 scheurtypes maar deels op.

2. Wat is er bekend over het gebruik van sandwich draagconstructies?

Er wordt al breed gebruik gemaakt van sandwich draagconstructies in verschillende sectoren. In de civiele sector is met name voorkomen van delaminatie door impactbelasting een belangrijk aspect is waar rekening mee gehouden moet worden. Uit ervaringen blijkt dat Rijkswaterstaat huiverig staat tegenover sandwichconstructies en dat er eerst bewezen dient te worden dat deze constructies impactbelastingen kunnen weerstaan.

3. Wat zijn mechanische eigenschappen waaraan de VVK sandwichconstructie moet voldoen en hoe komt aan de hand daarvan het ontwerp eruit te zien?

Met behulp van het programma Scia Engineer is de krachtverdeling voor een realistische case met een VVK sandwichconstructie bepaald. De constructiehoogte bij renovatie moet gelijk zijn aan bestaande hoogte van de trogvormige stalen langsverstijvers veelal circa 0,3 m. Met de buigend momenten volgt dat VVK onderflens dan 6 mm moet worden. De glasvezel opbouw bestaat uit een 0/90 UD-legsels, omdat er zowel spanningen in de x- als in de y-richting optreden die nagenoeg gelijk zijn. Met de dwarskracht volgt een schuifspanning van statisch $1,25 \text{ N/mm}^2$ en dynamisch $0,55 \text{ N/mm}^2$ voor de schuimkern. Hiervoor lijken PVC schuimen met een dichtheid van 100 à 130 kg/m^3 geschikt. De stalen dekplaat wordt daarbij voldoende ontzien.

4. Welke uitvoeringsmethode is het meest geschikt om de VVK sandwichconstructie te bevestigen onder het stalen dek?

Met behulp van een MCA voor de uitvoeringsmethode en voor de bevestigingsmethode, zijn de varianten gekozen die het gunstigst zijn. Dit is een variant waarbij per te vervangen trog gebruik gemaakt wordt van twee prefab sandwichelementen die bevestigd worden tussen de dwarsdragers door middel van infuseren van lijm. Uit de benattingsproef is gebleken, dat er groefjes in de schuimkern kunnen worden voorzien die werken als runners voor de hars en dat een flowmedium daarbij niet nodig is voor een volledige benatting. De uitvoeringsmethode en de hierbij behorende bevestigingsmethode, is uitgewerkt tot een beknopt uitvoeringsplan.

5. Hoe gedraagt de VVK sandwichconstructie zich onder een orthotrope stalen brugdek?

Door impactbelasting te simuleren op verschillende proefstukken met verschillende omstandigheden, is het impact gedrag van de VVK sandwichconstructie bepaald. Uit de resultaten is gebleken, dat door het toepassen van vezelvrije vinylester-lijm laag direct onder de stalen dekplaat, de impactbelasting scheurvrij opgenomen kan worden. Dit kan met infusie van lijm zonder een flowmedium aangebracht worden met een geschikt patroon aan groefjes in de kern.

6. Is een VVK sandwichconstructie economisch aantrekkelijk ten opzichte van HSB-overlaging?

De totale economische kosten zijn afhankelijk van de directe en de indirecte kosten. Bij een realistische case van een beweegbare brug blijken zowel de directe als de indirecte kosten gunstiger te zijn bij VVK sandwich dan bij HSB overlaging. Bij indirecte kosten is het verschil aanzienlijk omdat de VVK sandwich veel minder verkeershinder met zich meebrengt. Bij de directe kosten is het verschil beperkt. Op zich is HSB overlagen per vierkante meter veel goedkoper dan VVK sandwich onderlagen. Maar dat VVK toch iets gunstiger is komt doordat bij VVK sandwich alleen de vrachtwagenstroken worden gerenoveerd, en met name doordat bij HSB overlaging de her-balancering van de beweegbare brug erg duur is.

10.2 Conclusie

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

Op welke wijze kunnen de vermoeiingsproblemen bij orthotrope stalen brugdekken opgelost worden door het vervangen van de stalen troggen door een vezel versterkt kunststof sandwichconstructie?

Doordat de stalen dekplaat niet alleen meer door troglijven wordt ondersteund maar gelijkmatig op het hele oppervlakte, kunnen lokale piekspanningen dusdanig klein blijven dat geen extra vermoeiingsschade in de dekplaat meer optreedt.

Experimenteel onderzoek heeft aangetoond dat geen scheurvorming in de vezelvrije lijmlaag onder een 12 mm dikke staalplaat optreedt bij een impactbelasting van 638 Nm. Bij grotere valenergie ontstond eerst een deuk in de stalen plaat voordat de lijmlaag scheurde of onderliggende kunststof schuimkern blijvend werd ingedeukt. Daarmee wordt een waarschuwende constructie verkregen: onder deuken kan zich een begin van lokaal bezwijken voordoen dat onder vermoeiingsbelasting verder scheurt.

Het is (vooralsnog) niet mogelijk meerdere troggen naast elkaar tegelijkertijd te vervangen door de VVK sandwichconstructie. Anders gaat de dekplaat wellicht te veel bol staan. Wel kunnen eerst de even en daarna de oneven troggen worden vervangen elk met $B = 0,6$ m. Als gunstigste uitvoeringsmethode voor VVK sandwichconstructie onder een bestaande brug is geselecteerd om prefab elementen (schuimkern met VVK onderflens) $B = \text{trogbreedte} \approx 0,6 \text{ m} \times H = \text{troghoogte} \approx 0,3 \text{ m} \times L = \text{troglengte} \approx 3,0 \text{ m}$ te gebruiken. De prefab sandwich elementen bestaan daarbij uit een wendbaar hoofddeel met een sluitstuk. Als gunstigste bevestigingsmethodiek is geselecteerd om infuseren van lijm te gebruiken. Experimenteel is aangetoond dat infusen met volledige benatting kan met groefjes in de kern maar zonder flowmedium. Het brugdek wordt dan niet zwaarder.

10.3 Discussie en aanbevelingen

Tijdens het onderzoek zijn valproeven gedaan met een stalen plaat waarop verharde hars was aangebracht, die los op kunststof schuimkern lag. Daarmee waren interface en kern bereikbaar voor beoordeling. Om zeker te weten dat de conclusies ook gelden wanneer de verharde hars verlijmd is aan de kunststof schuimkern, worden aanvullende proeven aanbevolen waarbij een en ander aan elkaar verbonden is. Het zou kunnen zijn dat het schuim ook werkt als spanningsconcentratie / scheurinleider voor de lijmlaag. Na de val-test kan het samen-gelijmde proefstuk hierop -al dan niet destructief- onderzocht worden.

Om te bepalen hoe de VVK sandwichconstructie zich werkelijk onder een orthotrope stalen brugdek gedraagt, wordt aanbevolen om eerst een test uit te voeren van een stuk orthotroop dek op ware grootte. Dit voordat eventueel met een pilot project wordt begonnen. Dat wil zeggen wegbranden van troggen en aanbrengen van VVK sandwich. Hiermee kunnen dan tevens vermoeiingstesten worden uitgevoerd.

Tijdens het onderzoek is er naar voren gekomen dat het niet mogelijk is om meerdere troggen tegelijkertijd naast elkaar weg te halen. Echter werd er door deskundigen aangegeven dat dit brug afhankelijk is. Door de krachtswerking van de troggen in beeld te krijgen en te experimenteren en/of simuleren wat er gebeurt wanneer er meerdere troggen verwijderd worden, kan er een optimalisatie gevonden worden in de uitvoeringsduur.

Bij de vergelijking qua directe en indirecte kosten tussen de HSB-overlaging en de VVK sandwichconstructie is er uitgegaan van een fictieve case van een beweegbare brug. Aanbevolen wordt een echte case van een beweegbare brug met vermoeiingsschade te engineeren met een VVK sandwich constructie.

Aanbevolen wordt daarnaast om te onderzoeken wat de kosten zijn voor een nieuwe brugdek van een beweegbare brug met een hybride sandwichconstructie ten opzichte van bestaande concepten volledig stalen dek en volledig VVK dek.

11. Bibliografie

- Achterberg, R., & van Gorkum, J. (2014). *Renovatie stalen bruggen door middel van vezelversterkt kunststof*. Zwolle: Windesheim.
- Burman M., Z. D. (1997). Fatigue of foam core sandwich beams-1: undamaged specimens. *Int. J. fatigue Vol. 19, No 7*, 551-561.
- CUR96. (2003). *Vezel versterkte kunststoffen in civiele constructies*. Gouda: Stichting CUR.
- CUR96. (2018). *Vezelversterkte kunststoffen in civiele en bouwkundige draagconstructies CUR Aanbeveling 096 V3*. Gouda: CUR.
- CUR96achtergrond. (2018). *Aanbevelingen vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies achtergrond rapport*. Gouda: Stichting CUR.
- Datasheet*. (2000, september). Opgeroepen op 21 april, 2016, van <http://www.kemikaal.ee: http://www.kemikaal.ee/failid/Atlac%20430%20vinylester%20PDS.pdf>
- De Ridder, H., Suddle, S., & Soons, F. (2009). *Intergraal Ontwerpen in de Civiele Techniek*. Delft: TU Delft.
- Dijk, T. v. (2015). *Barsten in de brug*. Opgeroepen op 15 februari, 2016, van [delta.tudelft.nl: http://delta.tudelft.nl/artikel/barsten-in-de-brug/29473](http://delta.tudelft.nl/artikel/barsten-in-de-brug/29473)
- Dilsiz, G. (2013). *Levensduurverlenging van vermoeiingsgevoelige orthotrope stalen brugdekken met Engineered Cementitious Composite*. Opgeroepen op 2 februari, 2016, van www.cementonline.nl: http://www.cementonline.nl/Uploads/Publications/Cement/Afstudeerrapport-G.-Dilsiz.pdf
- EN1991-2. (2011). *Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen*. Delft: Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies".
- EN1993-1-1. (2011). *Design of steel structures - Part 1 General rules and rules for buildings*. Delft: NEN.
- EN1993-1-9. (2012). *Eurocode 3 Design of steel structures Part 1-9 Fatigue*. Delft: NEN.
- EN1993-2. (2011). *Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 2: Stalen bruggen*. Delft: NEN.
- EN1995-1-1. (2012). *Hout*. Delft: NEN.
- Erberveld, M. (2015). VVK helpt de vervangingsopgave van Rijkswaterstaat duurzamer, goedkoper en efficiënter te maken.
- Group, D. (2012). *DIAB guide to core and sandwich*. Laholm: DIAB Group.
- Hageman, A. i. (2009). *HSB-betonoverlaging op stalen bruggen*. Opgeroepen op 3 februari, 2016, van www.rijksoverheid.nl: https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2009/12/01/hsb-betonoverlagingen-op-stalen-bruggen
- InfraCoreInside. (2016). *Achilleshiel sandwichconstructies*. Opgeroepen op 24 mei, 2016, van www.infracore.nl: http://www.infracore.nl/nl/waarom-infracore.html?device=desktop
- Infraquest. (2012). *Project Renovatie Bruggen*. Opgeroepen op 2 februari, 2016, van www.infraquest.nl: http://www.infraquest.nl/sites/default/files/bestanden/Sessie1_Nagtegaal.pdf
- Inholland. (2011). Vuistregels ontwerpen met composieten. *Bijlage 1 Vuistregels ontwerpen met composieten* (p. 41). Inholland.

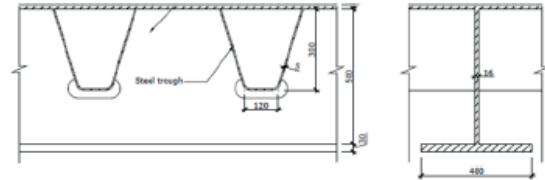
- Jong A.F.N., B. d. (2012). *Reparaties orthotrope rijdekken met trogprofielen*. Rijkswaterstaat - Problematiek Stalen Rijdekken Doc.nr. 3480R-05.
- Kaddour A.S., H. M. (2012). Input data for test cases used in benchmarking triaxial failure theories of composites. *Journal of composite materials* 46 (19-20), (pp. 2295-2312).
- Kerkhofs, S. (2009). *Invloed van de lijmverbinding op het dynamisch gedrag van sandwichconstructies*. Opgeroepen op 26 april, 2016, van <http://doks.khbo.be>: <http://doks.khbo.be/doks/do/files/FiSe8a819982212dece301212f6a433003ad/thesis.pdf;jsessionid=3A36E528CA79A11A74F0E689B9C0D4F8?recordId=SKHB8a819982212dece301212f6a432f03ac>
- Kolstein, D. M. (2000). *De vermoeidheid van stalen bruggen*. Opgeroepen op 3 februari, 2016, van www.stw.nl: <http://www.stw.nl/sites/stw.nl/files/18-De%20vermoeidheid%20van%20stalen%20bruggen-5979-def-fotos.pdf>
- Muller, Duijnsveld, & Leegwater. (2010). *Maatschappelijk kosten-batenanalyse van onderhoudstrategieën bij beheer en onderhoud van snelwegen*. Roermond: TNO.
- Nijssen, R. (2012). *Composieten basiskennis*.
- Nijssen, R. (2013). Hogeschool In Holland.
- NOA. (2007). *Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen*. Rotterdam: Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer.
- Overduin, L. (1999). *Deklaagsystemen voor stalen bruggen*. Haarlem: TU-Delft, Edilon bv.
- Reparatie van stalen brugdekken*. (2009, september). Opgeroepen op 21 april, 2016, van <http://www.infracomposites.com>: <http://www.infracomposites.com/nl/reparatie-van-stalen-brugdekken.html>
- Rijkswaterstaat. (2011). *Stalen bruggen*. Opgeroepen op 2 februari, 2016, van www.rijkswaterstaat.nl: <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/projectenoverzicht/renovatie-bruggen/stalen-bruggen.aspx>
- Rolloos, A., Spil, B., & Eldik, C. v. (1996). *Construeren B*. Stichting Kennisoverdracht SG.
- Scholtens, B. (1998). *Superband gaat het asfalt vernielen*. Opgeroepen op 2 februari, 2016, van www.volkskrant.nl: <http://www.volkskrant.nl/archief/superband-gaat-het-asfalt-vernielen~a415525/>
- SKH90-01. (2009). *SKH Publicatie 90-01 Praktische rekenmethode voor sandwich en sandwich rib elementen 6-10-2009*. SKH.
- Soden P.D., H. M. (1998). Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre - reinforced composite laminates. *Composites Science and Technology* 58, (pp. 1011-1022).
- Souren, W., & Tromp, L. (2013). *Design Verification and Failure Analysis: Tests on a Composite Bridge Structure*. Delft: Centre of Lightweight Structures TUD-TNO.
- TNO. (2010). *Kennisdocument inspecties en reparaties van orthotrope rijdekken*. Delft: TNO.
- VKCN. (2005). *www.vkcn.nl*. Opgeroepen op 04 15, 2016, van VKCN: <http://www.vkcn.nl/berichten-van-leden/composietbrug-primeur-voor-fibercore-europe.htm>

Bijlagen

- **Bijlage A – Gewichtsvergelijking brugdekalternatieven**
- **Bijlage B – Impact proef**
- **Bijlage C – Benattingsproef**
- **Bijlage D – Plooicontrole sandwichflenzen**
- **Bijlage E – MCA uitvoeringsvarianten – achtergrondinformatie**
- **Bijlage F – MCA bevestigingsmethode – achtergrondinformatie**
- **Bijlage G – Raming directe kosten HSB overlaging & VVK sandwich**
- **Bijlage H – Afleiding plaatstijfheden**
- **Bijlage I – Data sheets**

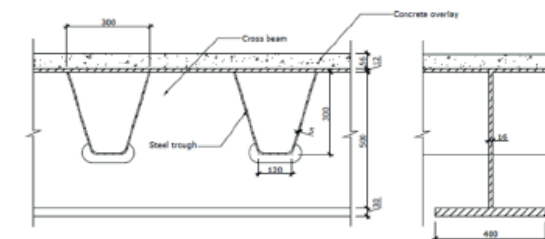
Bijlage A – Gewichtsvergelijking brugdekalternatieven

Steel welded structure (troughs)	t	b	l	density	weight/0,6m
aggregate bonded in wet resin					18,00kg
resin adhesive binding layer	5,0mm	600mm	3000mm	1850kg/m ³	16,65kg
steel deck plate	12,0mm	600mm	3000mm	7850kg/m ³	169,56kg
steel trough	5,0mm	313mm	3000mm	7850kg/m ³	36,88kg
steel trough	5,0mm	120mm	3000mm	7850kg/m ³	14,13kg
steel trough	5,0mm	313mm	3000mm	7850kg/m ³	36,88kg
welds	5,0mm	5mm	3000mm	7850kg/m ³	0,59kg
steel coating	0,35mm	746mm	3000mm	1375kg/m ³	1,08kg
steel coating	0,35mm	300mm	3000mm	1375kg/m ³	0,43kg
					294,20kg



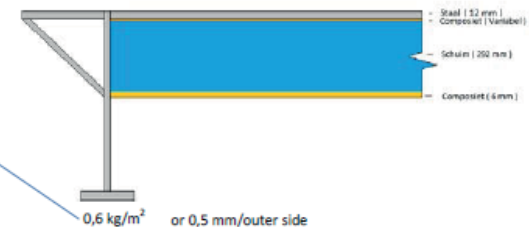
	weight/m ²
Steel deck plate with steel stiffeners	163kg
Grid of main steel beams	150kg
Total	313kg 100%

HSCconcrete overlay	t	b	l	density	weight/0,6m
aggregate bonded in wet resin					18,00kg
resin adhesive binding layer	5,0mm	600mm	3000mm	1850kg/m ³	16,65kg
steel deck plate	12,0mm	600mm	3000mm	7850kg/m ³	169,56kg
high strength concrete overlay	60,0mm	600mm	3000mm	3000kg/m ³	324,00kg
steel trough	5,0mm	313mm	3000mm	7850kg/m ³	36,88kg
steel trough	5,0mm	120mm	3000mm	7850kg/m ³	14,13kg
steel trough	5,0mm	313mm	3000mm	7850kg/m ³	36,88kg
welds	5,0mm	5mm	3000mm	7850kg/m ³	0,59kg
steel coating	0,35mm	746mm	3000mm	1375kg/m ³	1,08kg
steel coating	0,35mm	300mm	3000mm	1375kg/m ³	0,43kg
					618,20kg



	weight/m ²
Steel deck plate with steel stiffeners + HSCconcrete overlay	343kg
Grid of main steel beams	150kg
Total	493kg 157%

GRP sandwich	t	b	l	density	weight/0,6m
aggregate bonded in wet resin					18,00kg
resin adhesive binding layer	5,0mm	600mm	3000mm	1850kg/m ³	16,65kg
steel deck plate	12,0mm	600mm	3000mm	7850kg/m ³	169,56kg
resin bond layer	2,0mm	600mm	3000mm	1200kg/m ³	4,32kg
resin absorbed by core	291,0mm	589mm	2989mm	1200kg/m ³	3,37kg
core (formable)	292,0mm	590mm	2990mm	100kg/m ³	51,51kg
resin bond layer around core	292,0mm	600mm	3000mm	1200kg/m ³	12,58kg
GRP bottom layer	6,0mm	600mm	3000mm	1875kg/m ³	20,25kg
					296,24kg

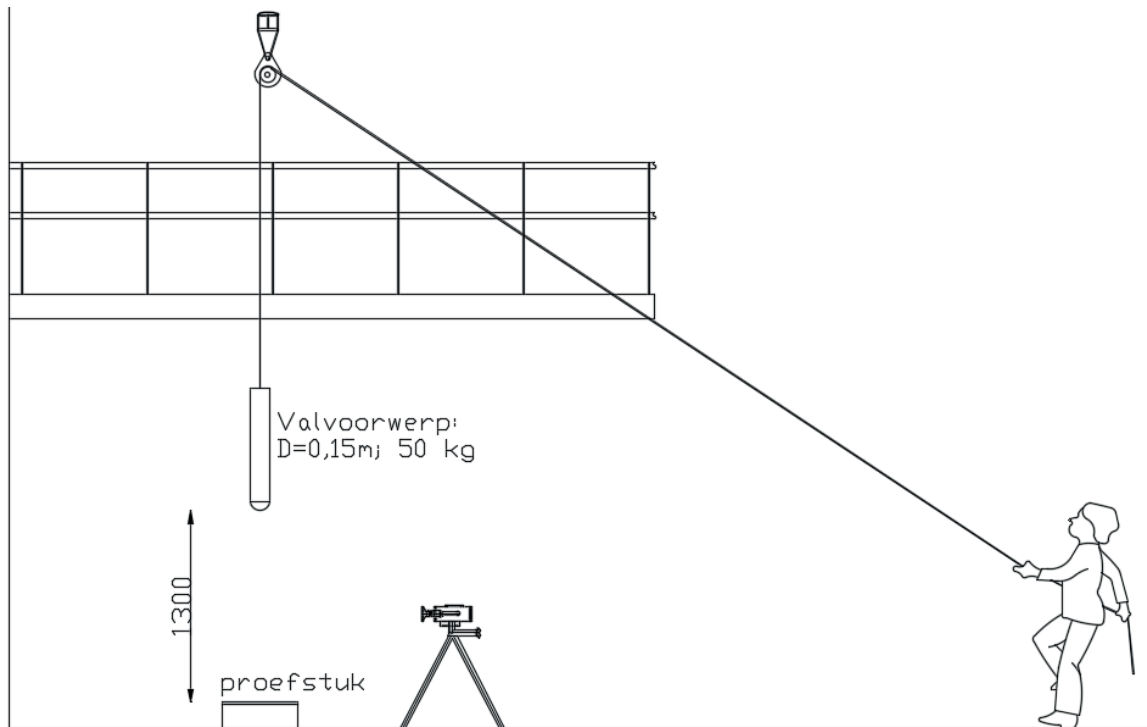


	weight/m ²	vol.	GRP
Steel deckplate with GRP sandwich	165kg	glass 50%	2550kg/m ³ 1275kg/m ³
Grid of main steel beams	150kg	resin 50%	1200kg/m ³ 600kg/m ³
Total	315kg 100%	100%	1875kg/m³

Bijlage B - Impact proef

B.1 Inleiding

Door middel van een opstelling in Figuur B.1 is de impact getest. Er is een valvoorwerp van een bepaalde hoogte met een bepaald gewicht op het proefstuk laten vallen.



Figuur B.1 Schematisatie impactproef

Bij impactproeven voor volledig composiet brugdekken zijn reeds eerder impactproeven uitgevoerd. Deze proeven zijn in opdracht van het ministerie van infrastructuur en milieu uitgevoerd om het gedrag van een impactkracht op een composieten brug te bepalen (Souren & Tromp, 2013).

Bij de proeven die uitgevoerd zijn voor dit onderzoek, is echter hybride VVK sandwichconstructie gebruikt met een bovenflens van staal. Het staal zal de impact anders spreiden en kan bovendien vloeien, waardoor deuken kunnen ontstaan.

De benodigde afmetingen van het proefstuk zijn eerst bepaald. Voor het uitvoeren van de proeven, zijn gewicht (50 kg), valhoogte (1,3 m) en diameter (0,15 m) van valvoorwerp overgenomen. Aan de valenergie is enige duiding gegeven.

B.2 Proefstuk: afmetingen en val-energie

Afmetingen proefstuk

De afmetingen van het proefstuk zijn bepaald aan de hand van de stijfheid-verhoudingslengte $1/\lambda$ van plaat en bedding in dit geval dekplaat op schuimkern.

$$\frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \quad (\text{SKH, 2009})$$

Met:

EI buigstijfheid is van de dekplaat
 k beddingsconstante door de kern

Naast een last geldt bij elke π/λ :

- de momentenlijn draait om van teken
- zijn moment, dwarskracht en doorbuiging

96% kleiner

De stalen ($E = 210.000 \text{ N/mm}^2$) dekplaat in de proeven is 12 mm dik: $I = 144 \text{ mm}^4/\text{mm}$.

De schuim ($E = 130 \text{ N/mm}^2$) kern in de proeven is 200 mm dik: $k = 0,65 \text{ N/mm}^3$.

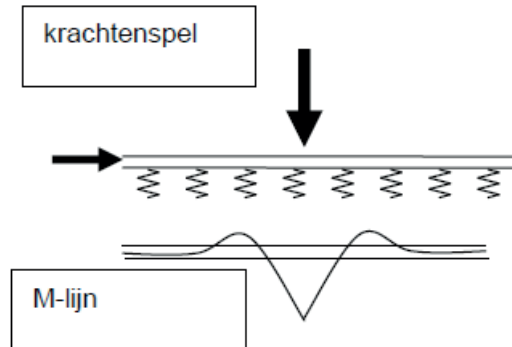
$$\text{Dan volgt } \frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 144}{0,65}} = 117 \text{ mm} = 0,117 \text{ m}$$

Over het algemeen heeft de krachtswerking een verwaarloosbare invloed vanaf π/λ hier ca. 0,35 m. Daarom is gekozen voor gangbare afmetingen van 0,60 m x 0,60 m voor de proefstukken.

Val-energie

De valhoogte is 1,3 m, dit kan gezien worden als de laadhoogte van een vrachtwagen. Het valgewicht bedraagt 50 kg, dit kan gezien worden als een realistisch voorkomend grootte van een vallende lading.

Een gewicht van 50 kg en een valhoogte van 1,3 m komen met $E = m \cdot g \cdot h$ overeen met een impact energie van 638 Nm.



B.3 Staalplaat met lijm-laag

B.3.1 Materialen

Om de staalplaten te prepareren zijn er diverse materialen gebruikt. Deze materialen zijn beschikbaar gesteld door Windesheim, DSM en scheepswerf Geertman. Voor elk staalplaat zijn de materialen die gebruikt zijn in een materiaallijst opgenomen, deze staat in Tabel B.1. Deze genoemde hoeveelheden zijn gebaseerd op één proefstuk.

Materiaal	Hoeveelheid	eenheid
- Stalen plaat S235 (12mm)	600x600	mm ²
- Glasvezel 0°, 90° (2mm=2 matten) *	600x600	mm ²
- Continu glasvezelmat (1mm=1mat) *	600x600	mm ²
- Flow mesh	600x600	mm ²
- Lossingslaag (wax)	600x600	mm ²
- Peel ply	600x600	mm ²
- Tacky tape	2500	mm
- Leiding materiaal	4000	mm
- Verdeel stukjes	3	st
- Verdeel kraantjes	2	st
- Atlac430 **	1000	mL
- Epoxy **	1000	mL
- G4 Primer	20	mL
- Peroxide	30	mL
- Folie	1000x1000	mm ²
- Aceton	10	mL
- Tang	1	st
- Vacuümpomp	1	st
- Zandstraler	1	st
- Camera	1	st

Tabel B.1 Materiaallijst

*Bij proefstuk 1 en 2 zijn de 0°, 90° glasvezelmatten gebruikt. Bij proefstuk 3 is de continu glasvezelmat gebruikt. Bij proefstuk 4 is geen tussenlaag gebruikt.

**Bij proefstuk 1 ,3 en 4 wordt Atlac430 gebruikt. Bij proefstuk 2 wordt Epoxy gebruikt.

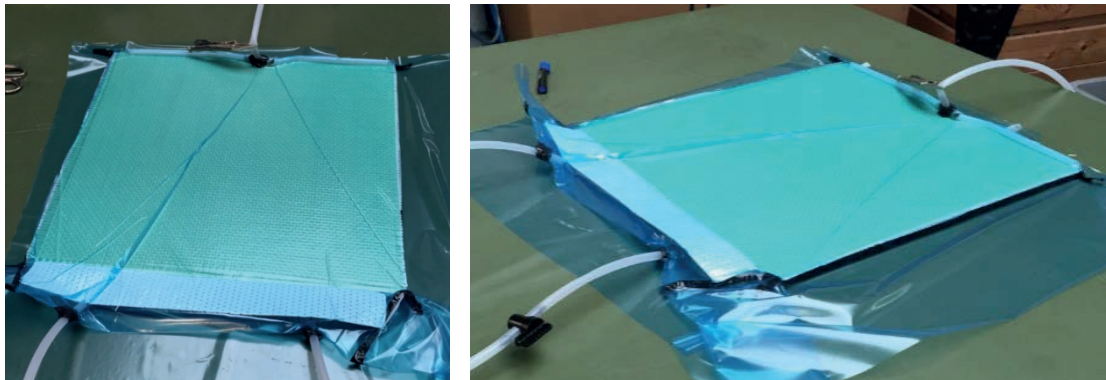
B.3.2 Uitvoering

De staalplaat is gezandstraald om het op te ruwen. Vervolgens is de plaat ontfet met aceton. Daarna is een laag G4 primer aangebracht. De primer zorgt voor een goede hechting tussen het staal en de Atlac430. Na minimaal 4 uur drogen van de primer, zijn de twee glasvezel matten aangebracht, met daarover de flow mesh. Over de flow mesh is peel ply aangebracht om te voorkomen dat het folie aan de materialen vast plakt. Over het geheel is een stromingsmedium (gaas, doek) aangebracht die ervoor zorgt, dat de hars langs het hele staalplaat stroomt en regelmatig verdeelt.

Langs de randen van het staalplaat is tacky tape geplakt voor een luchtdichte afsluiting.

Aan de linker van de staalplaat, langs de hele zijde, is een inlaat van het hars bevestigd door middel van een leiding. Aan de rechterzijde van de staalplaat zijn twee uitlaten bevestigd, die verbonden zijn met de vacuümpomp. Over deze leiding is wederom tacky tape aangebracht om het lucht dicht te houden tijdens het infuseren.

De folie is aangebracht over de staalplaat. Hierin zijn enkele plooien verwerkt om te zorgen dat het folie strak over de proefstukjes aansluit zodra de vacuümpomp aangaat. De inlaat is hierbij in eerste instantie afgesloten met een tang. Na het starten van de vacuümpomp zijn de kraantjes open gezet waardoor het proefstuk onder vacuüm komt te staan. De opstelling is weergegeven in Figuur B.4.



Figuur B.4 Opstelling vacuüminjectie

De inlaat is verbonden met een emmer Atlac430 hars of Epoxy hars, afhankelijk van het proefstuk. De samenstelling van deze harsen zijn weergegeven in Tabel B.2.

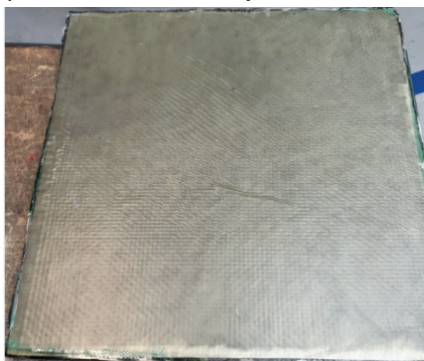
Materiaal	Atlac430	Eenh.
Atlac430	1900	g
Styreen	190	g
AcceleratorNL49P	19	g
Inhibitor NLC-10	9,5	g
Butanox LPT-IR	32,5	g

Materiaal	Epoxy	Eenh.
Epikote RIM 135H	1000	g
Epikote RIM 137H	300	g

Tabel B.2 Samenstelling harsen

De hars is verbonden met de inlaat van het proefstuk. De inlaatbuis is in de emmer gehangen. De tang is vervolgens verwijderd zodat de vacuümpomp nu de hars door het proefstukje trekt en het laat verspreiden over het proefstuk.

Na ongeveer drie kwartier wachten is de hars hard en is de vacuümpomp uitgezet. Na een dag is al het hulpmateriaal om het proefstuk verwijderd. Een voorbeeld van een staalplaat met harslaag is weergegeven in Figuur B.5. Voor elk proefstuk geldt dezelfde uitvoering. De glasvezelmat en/of de hars verschillen per proefstuk. Dit staat bij de resultaten aangegeven.



Figuur B.5 Voorbeeld staalplaat

B.4 Valvoorwerp

B.4.1 Materialen

Voor het valvoorwerp zijn de materialen in de materiaallijst weergegeven in tabel B.3. Om het voorwerp op het juiste gewicht te krijgen, is er beton gemaakt die in het voorwerp gegoten is tot het gewicht van 50kg was bereikt.

Materiaal	hoeveelheid	eenheid
- Stalen Cilinder $\varnothing 14\text{mm}$ ($t=16\text{ mm}$)	600x600	mm^2
- Halve holle stalen bol $\varnothing 15\text{ mm}$ ($t=2\text{mm}$)	600x600	mm^2
- Beton	4	m
- Cement	1	schep
- Zand	2	scheppen
- Grind	3	scheppen
- Water	1	schep
- Camera	1	st
- Weegschaal	1	st
- Schep	1	st
- Maatcilinder	1	st
- Emmer	1	st
- Trilnaald	1	st
- Plastic	1	st

Tabel B.3 Materiaallijst valvoorwerp

*Het maken van het betonmengsel wordt in de uitvoering beschreven.

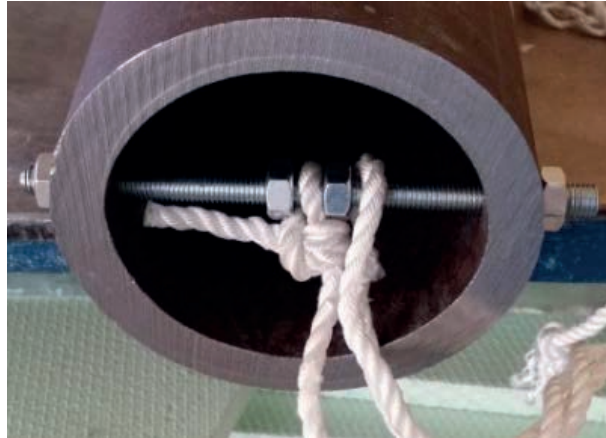
B.4.2 Uitvoering

De eerste stap voor het maken van het valvoorwerp is het aan elkaar lassen van de stalen buis met een halve holle stalen bol, zie Figuur B.6.



Figuur B.6 Vast lassen halve holle bol

Na het lassen aan de valzijde van de buis, zijn aan de ophangzijde andere zijde twee gaten geboord, ten behoeve van de ophanging, zie Figuur B.7.



Figuur B.7 Schroefdraad bevestigen

Als buisvulling is beton aangemaakt conform de materiaallijst uit Tabel B.4. Een emmer is gevuld met 1 schep cement, 2 scheppen zand, 3 scheppen grind en 1 schep water. Dit is gemengd tot een stevig vloeibaar mengsel. Vervolgens is het valvoorwerp op een weegschaal gezet en is de buis gevuld tot 50 kg zie Figuur B.8.



Figuur B.8 Beton mengen en op gewicht brengen voorwerp

Het beton is verdicht met een trilnaald, en tegen uitdroging afgedekt met een folie. Vervolgens is het beton enkele dagen uitgehard.

B.5 Proefopstelling

B.5.1 Materialen

Voor de proefopstelling zijn de materialen in de materiaallijst weergegeven in Tabel B.4. Bij de proefopstelling is gebruik gemaakt van een losse laag schuim onder het proefstuk als bedding, zodat het mogelijk is het proefstuk er af te halen om het gedrag tussen het staal, lijm-laag en schuim waar te nemen. Eigenschappen van gebruikt schuim zijn weergegeven in Table B.5.

Materiaal	hoeveelheid	eenheid
- Proefstuk (Staal + 2 mm lijm laag)	600x600	mm ²
- Schuimkern Airex C70 (200mm) *	600x600	mm ²
- Schuimkern Styrodur 2800C (200mm) *	600x600	mm ²
- Voorwerp	50	kg
- Balk	4	m
- Lijmklem	4	st
- Touw	20	m
- Katrol	1	st
- Camera	1	st
- Hoogtemeter	1	st
- Laser	1	st

Tabel B.4 Materiaallijst

*De schuimkern verschilt per proef.

Eigenschap	Styrodur 2800C (PS schuim)	AirexC70.90 (PVC schuim)
Dichtheid	gem. 30 kg/m ³	gem. 100 kg/m ³ (min. 90)
Druksterkte	gem. 0,3 N/mm ²	gem. 2,0 N/mm ² (min. 1,7)
Drukmodulus E	gem. 15 N/mm ²	gem. 130 N/mm ² (min. 110)
Schuifsterkte	gem. 0,3 N/mm ²	gem. 1,7 N/mm ² (min. 1,4)
Schuifmodulus G	N/mm ²	gem. 40 N/mm ² (min. 34)
Schuif breukrek	%	gem. 23% (min. 12)

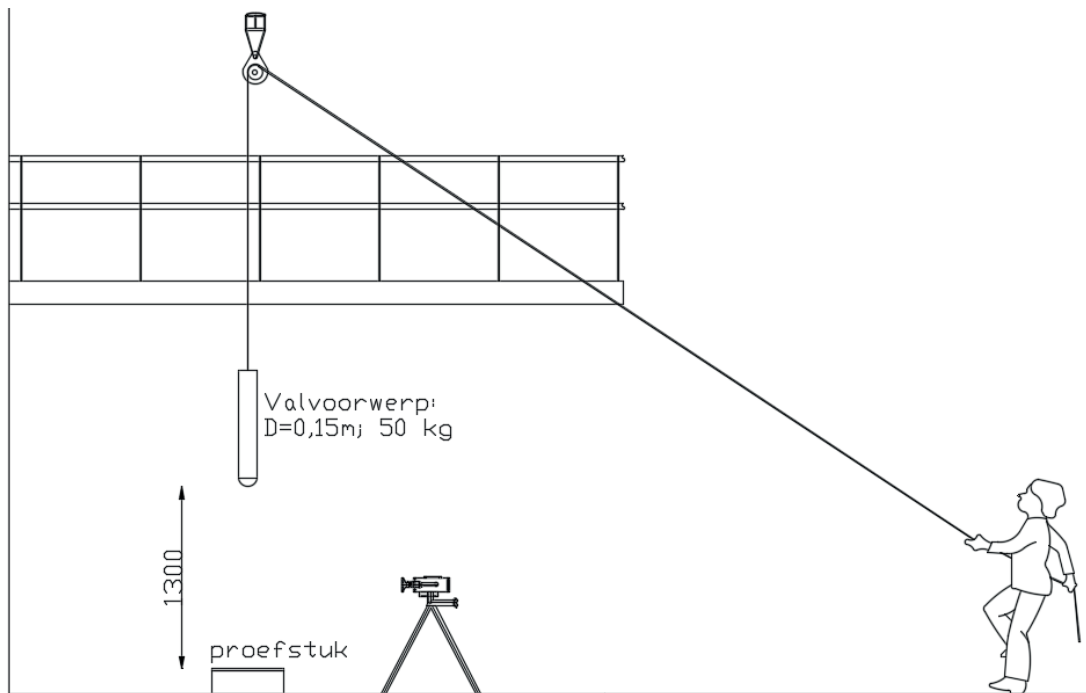
Tabel B.5 Eigenschappen schuim

B.5.2 Uitvoering

Het experiment is uitgevoerd in een hal. Door middel van een katrol die aan een HEA profiel bevestigd is, wordt het touw in de juiste baan geleid. Vervolgens is aan één kant van het touw het voorwerp bevestigd aan het schroefdraad. De andere kant van het touw is vast gezet, zodat het valvoorwerp op een hoogte van 1,3 m vergrendeld is. De 1,3 m is gemeten met een hoogtemeter. Het proefstuk, staalplaat met daar onder de schuimkern, is vervolgens recht onder het voorwerp gelegd, dit is gecontroleerd door een laser recht onder het voorwerp te houden. Om alles te registreren is er een camera opgesteld met een slowmotion functie, hierdoor is het achteraf mogelijk waar te nemen wat er precies gebeurt. De opstelling ziet er uit volgens Figuur B.9.

Doordat de proefopstellingen zo gemaakt is, dat de staalplaat van het schuim afgehaald kan worden, is het mogelijk de onderkant van het proefstuk te zien.

**Figuur
B.9**



Proefopstelling

In Tabel B.6 is de opbouw van de proefstukken beschreven.

Beschrijving	Hars	Vezels	Kern
Proefstuk 1	Atlac430	Glasvezel Bi-ax	Styrodur 2800C
Proefstuk 2	RIMR135	Glasvezel Bi-ax	Styrodur 2800C
Proefstuk 3	Atlac430	CSM	Styrodur 2800C/AirexC70.90
Proefstuk 4	Atlac430	Geen	Styrodur 2800C/AirexC70.90

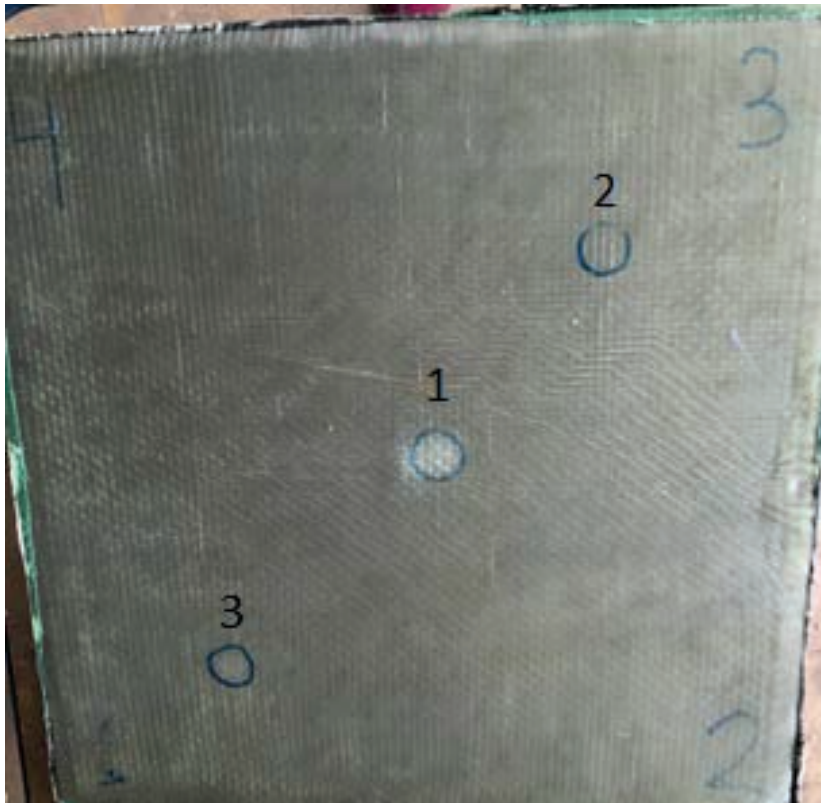
Tabel B.6 Beschrijving proefstukken

B.6 Resultaten

De resultaten zijn per proefstuk beschreven.

B.6.1 Proefstuk 1

Elke hoek van het proefstuk is gemarkeerd met een nummer (blauw) om overzichtelijk te houden waar de impact heeft plaatsgevonden, zoals te zien is in Figuur B.10. De impacttest is 3 keer uitgevoerd. Bij het eerste proefstuk is gebruik gemaakt van een vinylester (Atlac430). Deze is uitgevoerd om gevoel te krijgen met de werkwijze van de uitvoering en om de resultaten te vergelijken met het referentieverslag (Souren & Tromp, 2013). De staalplaat is aan de onderzijde voorzien van een gelijmde laag van GVVK. Daarom zijn, bij deze eerste drie impact simulaties, de hoogtes van het voorwerp gelijk gesteld op 1,3m.



Figuur B.10 Overzicht van de impact locatie

De waarnemingen van de impact resultaten zijn samengevat in Tabel B.7.

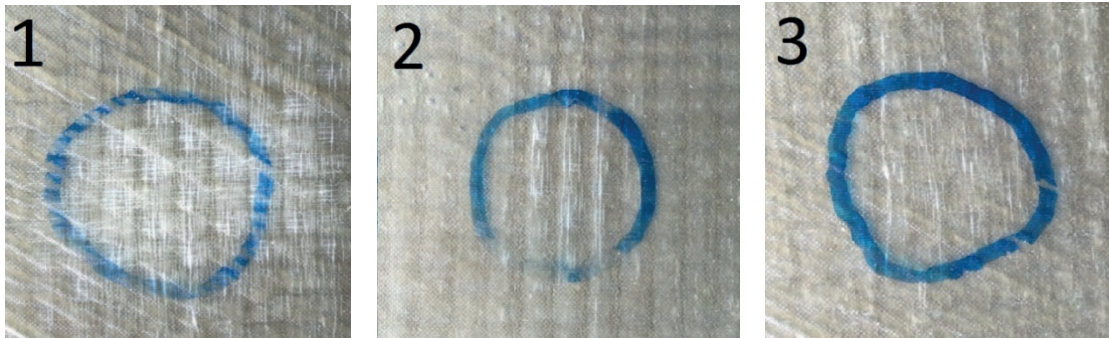
Atlac430 (Bi-ax)	Hoogte	Schuim	Waarnemingen
Impact 1	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=5cm)
Impact 2	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=3cm)
Impact 3	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=3cm)

Tabel B.7 Impact resultaten proefstuk 1

Naast de witte cirkels in het composiet was er bij geen van de impacts een deuk in het staal of enige verbrijzeling van het kernmateriaal te zien.

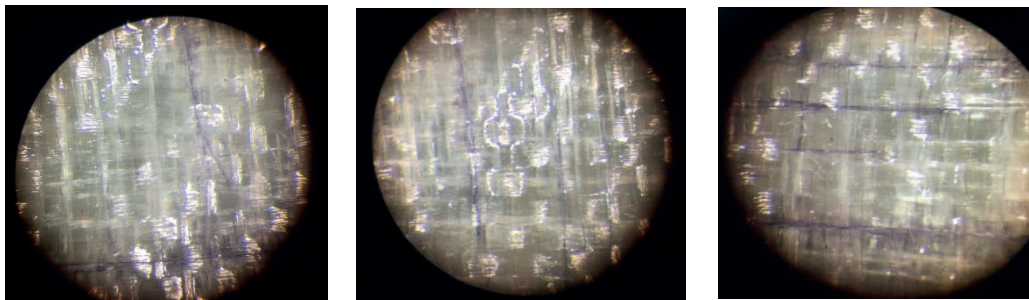
- **Impact 1**, in het midden. Aan de beelden is te zien dat het proefstuk als één geheel ingedrukt wordt.
- **Impact 2**, nabij hoek 3. Tijdens deze proef verloor het proefpakket de samenhang. De stalen plaat schoot aan de andere kant omhoog.
- **Impact 3**, nabij hoek 2. Deze is nagenoeg gelijk aan de tweede impact.

In Figuur B.11. zijn de resultaten vergroot weergegeven. Hieruit is duidelijk op te maken dat de eerste impact de meeste schade heeft aangericht.



Figuur B.11 Uitvergroting van de resultaten

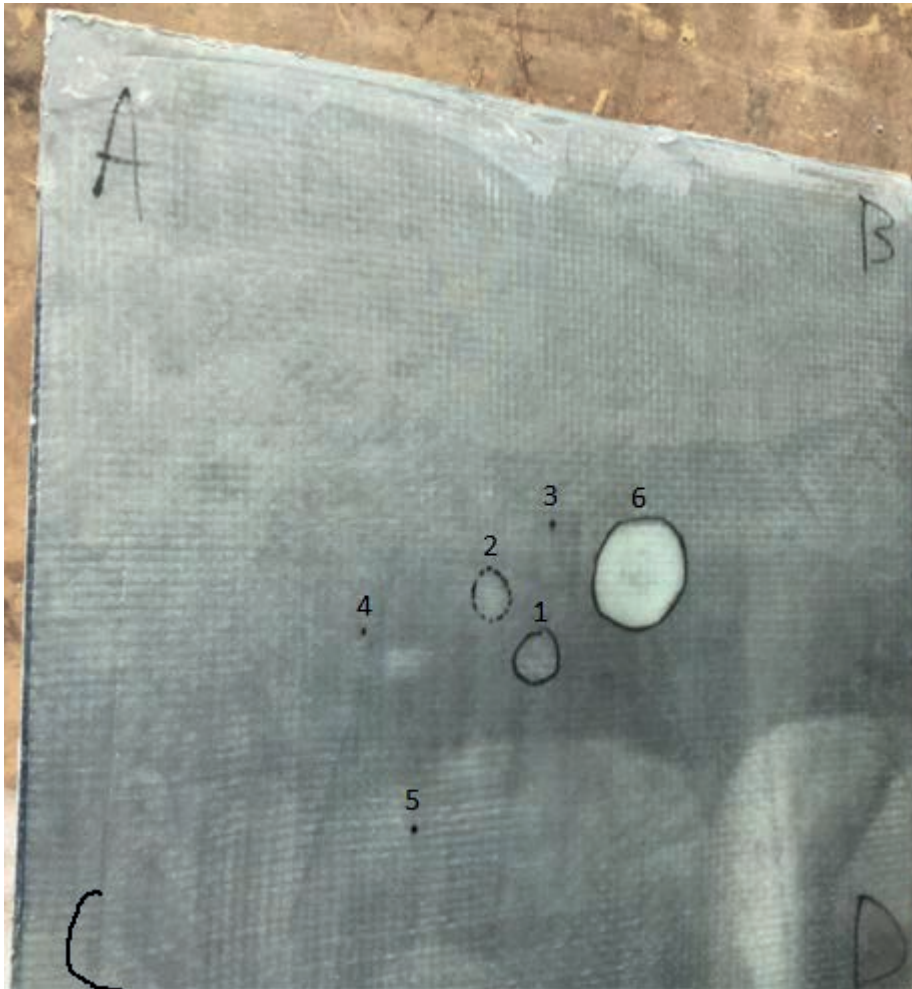
Om beter zichtbaar te maken hoe het hars gereageerd heeft, is er met een marker over de plekken getekend. Vervolgens is dit verwijderd door met een doek met aceton er overheen te wrijven. Hierdoor blijft de zwarte kleur in de groefjes achter, zoals te zien is in Figuur B.12. Uit deze resultaten wordt geconcludeerd dat in het hars scheurtjes zijn ontstaan.



Figuur B.12 Microscopische beelden van de resultaten

B.6.2 Proefstuk 2

Elke hoek van het proefstuk is gemarkeerd met een letter om overzichtelijk op welke locatie de impact heeft plaatsgevonden, zoals te zien is in Figuur B.14. Bij dit proefstuk is er gebruik gemaakt van taaiere Epoxy hars (RIMR135). De verwachtingen hiervan zijn, dat er minder grote, tot geen licht witte cirkels ontstaan. Om een eerlijke vergelijking te krijgen, zijn dezelfde vezelverstevingingen gebruikt als bij proefstuk. Er zijn 6 impactproeven uitgevoerd.



Figuur B.14 Overzicht van de impact locaties

De waarnemingen van de impact resultaten zijn samengevat in Tabel B.8.

RIMR135 (Bi-ax)	Hoogte	Schuim	Waarnemingen
Impact 1	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=2cm)
Impact 2	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=2cm)
Impact 3	1,0m	Styrodur 2800C (200mm)	Geen
Impact 4	1,0m	Styrodur 2800C (200mm)	Geen
Impact 5	1,0m	Styrodur 2800C (200mm)	Geen
Impact 6	1,3m	Geen	Witte cirkel (d=6cm)

Tabel B.8 Impact resultaten proefstuk 2

Naast de witte cirkels in het composiet was er bij geen van de impacts een deuk in het staal of enige verbrijzeling van het kernmateriaal te zien.

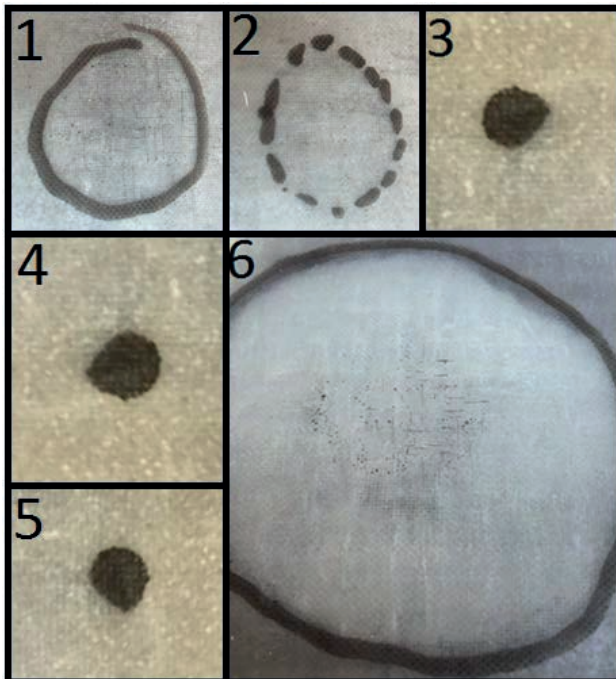
- **Impact 1**, Aan de beelden is te zien dat het proefstuk als één geheel ingedrukt wordt.

.

- **Impact 2**, nabij het midden van de plaat. Deze is nagenoeg gelijk aan de eerste impact.

- **Impact 3**, van een hoogte van 1,0 m nabij het midden van de plaat. Geen schade. Om te controleren of er nooit schade ontstaat bij een valhoogte van 1,0m worden er nog 2 impact testen gedaan met deze valhoogte.
- **Impact 4**, van een hoogte van 1,0 m, links midden van de plaat. Geen zichtbare schade.
- **Impact 5**, van een hoogte van 1,0 m, tussen hoek C en het midden van de plaat, zijn de resultaten hetzelfde als bij impact 3 en 4. Wederom geen zichtbare schade.
- **Impact 6**, van een hoogte van 1,3 m, in het midden van de plaat. De staalplaat is (zonder vering) op de grond gelegd. Er ontstaat veel groter schadebeeld bij een volledige stijve ondersteuning.

In Figuur B.15 zijn de resultaten vergroot weergegeven. Hieruit is duidelijk op te maken wat de verschillende hoogtes dat de eerste impact de meeste schade heeft aangericht.



Figuur B.15 Uitvergroting van de resultaten

De schadebeelden lijken minder omvangrijk te zijn dan bij het gebruik van Atlac430. Echter na het verwijderen van de kunststof laag, werd op het staal zichtbaar dat er onder de plekken die ontstaan zijn bij een hoogte van 1,3 m (impact 1,2 en 6), onthechting is ontstaan (Figuur B.16). Dit was bij proefstuk 1 niet het geval.



Figuur B.16 Onthechting van de lijm van het staal

B.6.3 Proefstuk 3

Elke hoek van het proefstuk is gemarkeerd met een letter om overzichtelijk op welke locatie de impact heeft plaatsgevonden, zoals te zien is in Figuur B.17. Bij dit proefstuk zijn verschillende situaties gebruikt met verschillende omstandigheden. Er is gebruik gemaakt van een Atlac 430 hars. Echter is er bij dit proefstuk gebruik gemaakt van een continu glasvezel mat. Van deze mat is bekend dat het oppervlakte goed benat wordt en dat de hechting beter is dan bij de vorige proefstukken. Er zijn 14 impact simulaties uitgevoerd. De waarnemingen hiervan zijn weergegeven in Tabel B.8.



Figuur B.17 Overzicht van de impact locaties

De waarnemingen van de impact resultaten zijn samengevat in Tabel B.9.

Naast de witte cirkels in het composiet was er bij geen van de impacts een deuk in het staal of enige verbrijzeling van het kernmateriaal te zien.

- **Impact 1**, 1,3 m valhoogte, in het midden. Schade van beperkte omvang.
- **Impact 2**, 1,0 m valhoogte, nabij het midden. Schade nauwelijks kleiner als bij impact 1.

Atlac430 (CSM)	Hoogte	Schuim	Waarnemingen
Impact 1	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=4cm)
Impact 2	1,0m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=3,5cm)
Impact 3	0,8m	Styrodur 2800C (200mm)	Onbetrouwbaar
Impact 4	0,9m	Styrodur 2800C (200mm)	Onbetrouwbaar
Impact 5	1,0m	Styrodur 2800C (200mm)	Onbetrouwbaar
Impact 6	1,0m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=2cm)
Impact 7	0,9m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=2cm)
Impact 8	0,8m	Styrodur 2800C (200mm)	Geen
Impact 9	0,8m	Airex C70.90 (200mm)	Witte cirkel (d=4cm)
Impact 10	1,3m	Airex C70.90 (200mm)	Witte cirkel (d=5cm)
Impact 11 *	1,3m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 12 **	1,3m	Airex C70.90 (200mm)	Witte cirkel (d=5cm)
Impact 13 **	0,8m	Styrodur 2800C (200mm)	Witte cirkel (d=2cm)
Impact 14 **	0,8m	Airex C70.90 (200mm)	Witte cirkel (d=2cm)

Tabel B.9 Impact resultaten proefstuk 3

- * Inclusief lijmklekken
- ** Inclusief lijmklekken en stijve randondersteuning

- **Impact 3, 4 & 5** Geen schade maar de resultaten zijn onbetrouwbaar. Dit komt doordat het touw, dat voorkomt dat het voorwerp omvalt na de impact, om het andere touw gewikkeld was. Hierdoor ving deze gaandeweg de val het gewicht van het valvoorwerp deels op.
- **Impact 6**, 1,0 m valhoogte conform impact 2. Schadebeeld: klein, kleiner dan impact 2.
- **Impact 7**, 0,9 m valhoogte van. Schadebeeld: klein conform impact 6.
- **Impact 8**, 0,8 m valhoogte, geeft geen zichtbare schade.
- **Impact 9**, 0,8 m valhoogte, nu ondersteund met het stijvere Airex C70 schuim. Vergelijking met impact 8 (zelfde valhoogte flexibeler schuim): meer schade bij stijver schuim.
- **Impact 10**, 1,3 m valhoogte. Vergelijking met impact 1 (zelfde valhoogte flexibeler schuim): wederom meer schade bij stijver schuim.
- **Impact 11**, 1,3 m valhoogte, buiten het midden. Samenhang als één geheel afgedwongen met lijmklekken die de verschillende lagen bij elkaar houden tijdens de test, zie Figuur B.18. Op de beelden is te zien dat dit werkt. Geen zichtbare schade. Samenhang lijkt een belangrijk aspect te zijn. Vervolgproeven buiten het midden steeds met lijmklekken verricht.



Figuur B.18 Opstelling met lijklemmen

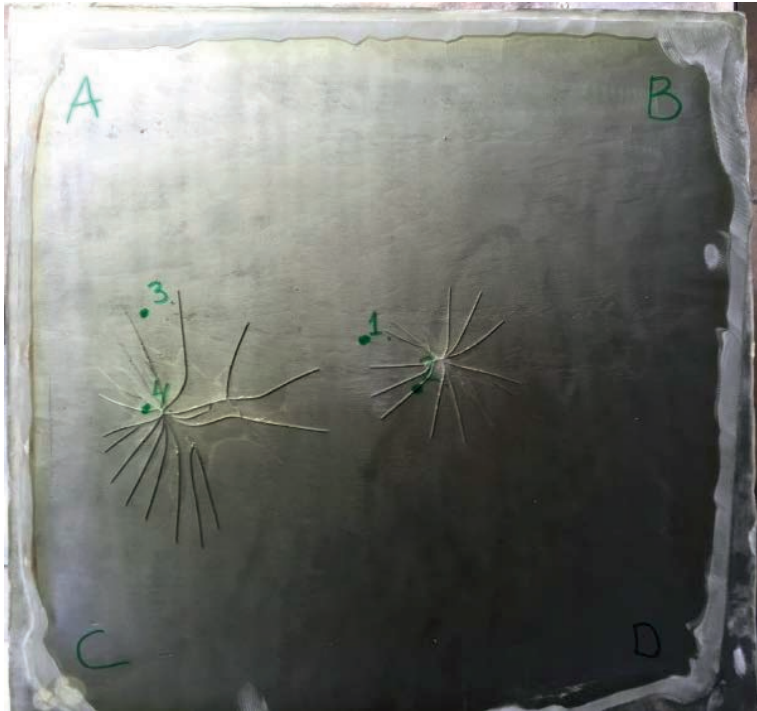


Figuur B.19 Opstelling met lijklemmen en houtoplegging

- **Impact 12**, 1,3 m valhoogte, is uitgevoerd met een houten plank dwars op de stalen plaat om een dwarsdrager te simuleren, zoals weergegeven in Figuur B.19. Het hout is stijf ondersteund door een ondergrond, waardoor geen doorbuiging kan ontstaan. Stijvere ondersteuning t.o.v. impact 11 geeft wederom meer schade.
- **Impact 14**, 0,8 m valhoogte, is op dezelfde manier uitgevoerd als impact 12. Schade beeld : klein.
- **Impact 13**, 0,8 m valhoogte, is op dezelfde manier uitgevoerd als impact 13. Echter met flexibeler schuim Styrodur 2800C. Zelfde schadebeeld als bij impact 14. Stijve randondersteuning lijkt dominant.

B.6.4 Proefstuk 4

Elke hoek van het proefstuk is gemarkeerd met een letter om overzichtelijk op welke locatie de impact heeft plaatsgevonden, zoals te zien is in Figuur B.20. Er is bij dit proefstuk enkel gebruik gemaakt van Atlac430. Echter is geen gebruik gemaakt van glasvezels. Hierdoor is alleen het hars op de staalplaat toegepast.



Figuur B.20 Overzicht van de impact locaties

De waarnemingen van de impactresultaten zijn samengevat in Tabel B.10.

Atlac430	Hoogte	Schuim	Waarnemingen
Impact 1	1,3m	Styrodur 2800C (200mm)	Geen
Impact 2	1,3m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 3 **	1,3m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 4 **	1,3m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 5	1,4m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 6	1,5m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 7	1,6m	Airex C70.90 (200mm)	Scheuren (d=13cm)
Impact 8 **	1,4m	Airex C70.90 (200mm)	Geen
Impact 9 **	1,5m	Airex C70.90 (200mm)	Scheuren (d=20cm)

Tabel B.10 Impact resultaten proefstuk 4

** Inclusief lijmklekken en stijve randondersteuning

Naast de witte cirkels in het composiet was er bij geen van de impacts enige verbrijzeling van het kernmateriaal te zien. Bij impact 7 en 9 trad er ook een deuk in het staal op, echter met een kleinere diameter. Bij de andere impacts trad geen deuk op. De deuken in het staal waren goed op te merken.

- **Impact 1**, 1,3 m valhoogte, nabij het midden van de plaat, geeft geen zichtbare schade. Bij deze impact is Styrodur 2800C schuim gebruikt.

- **Impact 2**, 1,3 m valhoogte, nabij het midden van de plaat, echter bij met stijvere Airex C70.90 schuim. Toch geen zichtbare schade.

- **Impact 3**, 1,3 m valhoogte, nabij de ondersteuning van de plaat. Samenhang gewaarborgd middels lijmklekken. Echter een stijve ondersteuning gebruikt. Toch geen zichtbare schade.

- **Impact 4**, zelfde als impact 3. Met zelfde resultaten.
- **Impact 5**, zelfde als impact 2 echter met 1,4 m valhoogte. Toch geen zichtbare schade.
- **Impact 6**, zelfde als impact 2 en 5 echter met 1,5 m valhoogte. Toch geen zichtbare schade.
- **Impact 7**, zelfde als impact 2, 5 en 6 echter met 1,6 m. Groot hars schadebeeld: beginnende wordt niet snel gestopt doordat versterking ontbreekt. Er trad ook een deuk op in het staal, dit met kleine diameter.
- **Impact 8**, 1 zelfde als impact 3 en 4 echter met 1,4 m valhoogte. Met dezelfde resultaten,
- **Impact 9**, zelfde als impact 3, 4 en 8 echter met 1,5 m valhoogte. Groot hars schadebeeld: beginnende scheur wordt niet snel gestopt doordat versterking ontbreekt. Er trad ook een deuk op in het staal, dit met kleine diameter.

Bijlage C - Benattingsproef

C1 Achtergrondinformatie

C1.1 Het principe van vacuüminjectie

Bij het toepassen van vacuüminjectie wordt er gebruik gemaakt van twee matrijzen of van één matrijs en een luchtdichte folie. De productholte tussen de matrijzen heeft in gesloten toestand de geometrie van het product. Het droge vezelmateriaal wordt in de productholte van de matrijs gebracht, waarna hars geïnjecteerd wordt. De hars stroomt vanuit het injectiepunt door het vezelmateriaal naar het afvoerkanaal. De lucht in het vezelmateriaal wordt vervangen door de vloeibare hars. De hars ondervindt daarbij weerstand van het vezelmateriaal. Om de weerstand te overwinnen dient er een drukverschil aangelegd te worden tussen de harsdruk in het injectiepunt en de luchtdruk in de productruimte.

Een bijkomend voordeel van de gesloten mal methode vacuüminjectie is dat emissie bij het toepassen zeer gering. Dit is gewenst omdat de MAC-waarde¹ voor styreen, waarin de polyester hars is opgelost, steeds verder daalt. Voorts kan bij een gesloten mal het vezelpakket goed op de plaats blijven liggen en is de injectiedruk goed te regelen.

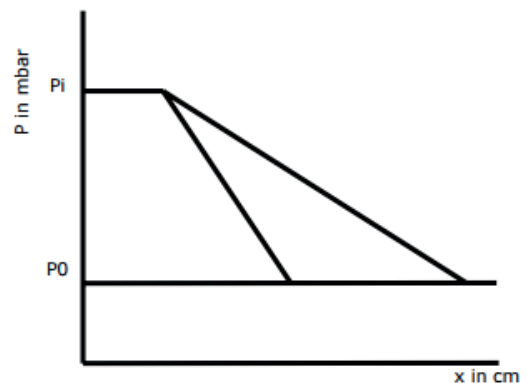
De snelheid waarmee het vezelpakket benat wordt, is van verschillende factoren afhankelijk:

- De aangelegde drijvende kracht
- De permeabiliteit van het pakket
- De viscositeit van de hars.

Dit verband is weergegeven in de wet van Darcy:

$$q = -\frac{k}{\eta} \times \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

Waarin: q = specifiek volumedebiet (m/s)
K = permeabiliteit (m²)
= dynamische viscositeit (Pa*s)
P = druk (Pa)
X = frontafstand (m)



Figuur C.1 Drukverloop bij een vlakke plaat

Het specifiek volumedebiet zal in de loop van de tijd afnemen. Naarmate het harsfront vordert, wordt de afstand tussen het injectiepunt en het font groter, terwijl het drukverschil gelijk blijft. Het drukverschil per lengte-eenheid (p / x) zal dus afnemen, waardoor ook de frontsnelheid zal afnemen (Figuur C.1).

C1.2 De vultijd

De vultijd is de tijd tussen het starten van de harsinjectie en de volledige verdeling van de hars over het product. De vultijd mag niet te groot zijn want dat zou kunnen betekenen dat de hars hard wordt, nog voor het product volledig gevuld is.

Voor een bepaalde harsinjectiestrategie, hangt de vultijd onder meer af van de volgende factoren:

- De lengte waarover de hars zich moet verdelen
- De "doorstroombaarheid" van het vezelmateriaal, ook wel genoemd permeabiliteit
- De "strokerigheid" of "viscositeit" van de hars
- Het drukverschil tussen de inlaat en afzuigpunten.

Permeabiliteit

¹ MAC-waarde: Maximale aanvaarde concentratie van een gas, damp of nevel of van een stof in de lucht op de werkplek, die bij inademing gedurende arbeidsperiode in het algemeen geen nadelige gevolgen heeft op de gezondheid van werknemers en hun nageslacht.

De permeabiliteit kan sterk variëren voor verschillende vezelmaterialen. Ter illustratie staan hieronder verschillende waarden van materialen die in een vezelversterkte kunststof voorkomen: tussen doorstroomweefsel en Saertex is het verschil zelfs een factor 830. Deze factor werkt direct door in de vultijd. (VKCN, 2006)

Naam	Beschrijving	Permeabiliteit
Saertex 935	0/90/random lay-up	0.6
Unifilo 816	450 random mat	5
Rovicore 450/D3/450	Random mat + kern	50
Balsa 1	Kernmateriaal	33
Doorstroom materiaal	0/90 grid	100
Doorstroom materiaal	Weefsel	500

Tabel C.1 Permeabiliteit verschillende materialen

Uit Tabel C.1 blijkt dat vezelmateriaal matig doorstroombaar is voor hars. Met doorstroommateriaal kan de permeabiliteit van het droge product sterk worden verbeterd en dus de vultijd omlaag worden gebracht.

Behalve de doorstroombaarheid van de materialen in de productruimte, dient ook de doorstroombaarheid buiten de productruimte in de gaten gehouden te worden

Viscositeit

De viscositeit van de hars kan worden uitgedrukt in de eenheid mPa*s, milliPascal-seconde. Deze grootheid is terug te vinden op een datasheet van de hars. Bij vacuüminjectie worden harsen gebruikt met een lage viscositeit, ruwweg 200mPa*s. Voor handlamineren is dat veel te dun, dan wordt gewerkt met een verdikkingsmiddel.

Voor polyester- en vinylester harsen kan de viscositeit worden verlaagd door de hars te verdunnen met extra styreen. De harsleverancier kan aangeven in hoeverre de hars nog verdund mag worden.

De viscositeit hangt ook sterkt af van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur, hoe lager de viscositeit. De temperatuur bij de injectie is dus van belang.

Drukverschil

Bij een vacuüminjectie wordt een gedeeltelijk vacuüm gecreëerd, dat wil zeggen; de druk wordt verlaagd van atmosferische druk (1013mbar) tot bijvoorbeeld 113mbar. Het drukverschil wat zo ontstaat is 900 mbar. De druk kan niet verder verlaagd dan 0mbar, en het drukverschil tussen harstoevoer dus nooit groter dan 1013 mbar. Nu is het in de praktijk moeilijk om de druk dichtbij absoluut vacuüm te krijgen, en ook niet wenselijk omdat allerlei vluchtige componenten in de hars bij die druk gaan afkoken. Meestal wordt geïnjecteerd bij drukverschil ruwweg 700 mbar.

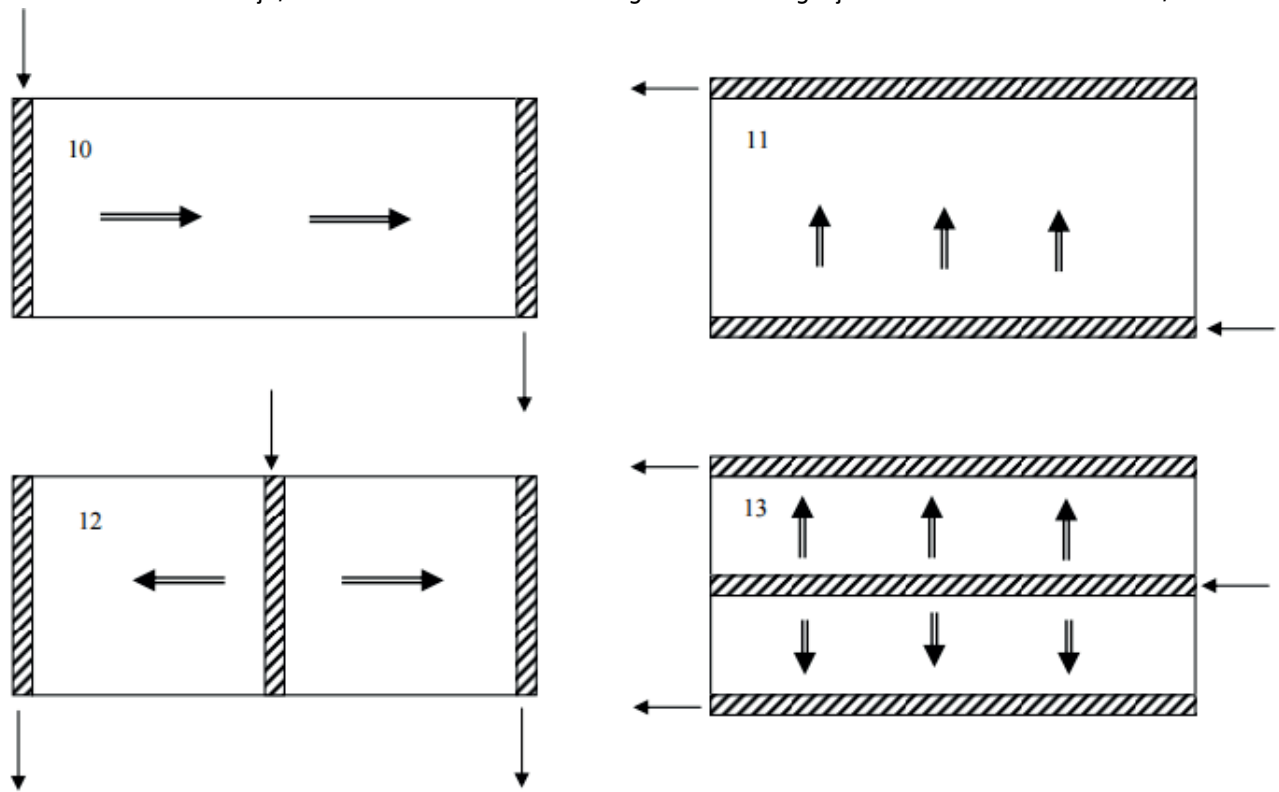
Het vacuüm zuigen zorgt er tevens voor dat het vezelpakket wordt samengedrukt. Bij een afnemende injectiedruk, zal de druk waarmee het vezelpakket wordt gecompriëerd toenemen. Dit heeft twee gevolgen:

- De permeabiliteit van het vezelpakket neemt af
- Het vezelvolumegehalte van het uiteindelijke product zal toenemen.

Het zal duidelijk zijn dat er een direct verband bestaat tussen deze twee gevolgen. In hoeverre de vultijd verandert door enerzijds een groter drukverschil (gunstig) en anderzijds een afnemende permeabiliteit (ongunstig) verschilt per vezelpakket.

C1.3 De harsinjectiestrategie

Met injectiestrategie wordt bedoeld: het aantal en de verdeling van injectiepunten en afzuigpunten over het product. Hiermee bepaal je de afstand die de hars door je product dient te stromen. Deze "stroomlengte" zit kwadratisch in de vultijd, dus het is zaak deze stroomlengte zo klein mogelijk te houden. Voor een vlakke,



rechthoekige plaat lijkt het vrij logisch waar injectiepunten en waar afzuigpunten dienen te worden aangebracht. Maar het blijkt dat ook hier al vele mogelijkheden zijn die onderling grote verschillen in vultijd laten zien (Figuur C.2).

Figuur C.2 Vier verschillende injectiestrategieën voor een rechthoekige plaat.

Vezellegfels

De legfels worden een voor een in de mal gelegd. Dit gebeurt in een voorgeschreven volgorde. Op plaatsen waar de constructie veel sterkte en/of stijfheid nodig heeft komt veel vezelmateriaal, op andere plaatsen minder.

Kernmateriaal

Tussen de lagen van het laminaat wordt een kernmateriaal aangebracht. Een voorbeeld is kunststofschuim. Dit wordt uitgevoerd met gesloten cellenstructuur om te voorkomen dat er te veel hars wordt opgezogen. De platen kernmateriaal moeten goed aan elkaar worden verlijmd.

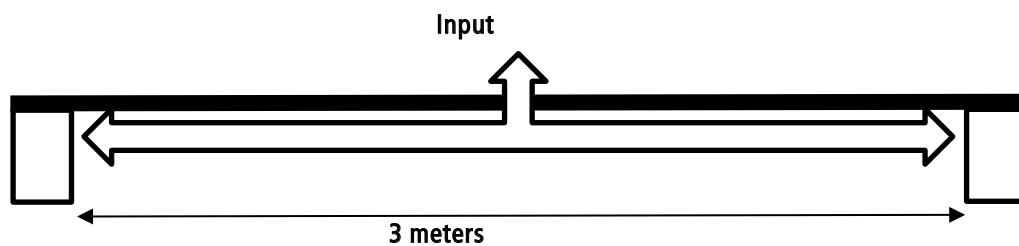
Runners

Runners zijn plaatsen, gewild of ongewild, waar de weerstand van het pakket kleiner is dan in de rest van het pakket. De geïnjecteerde hars zal door de lagere weerstand sneller stromen. (VKCN, 2006)

C2 Benattingsproef

C2.1 Inleiding

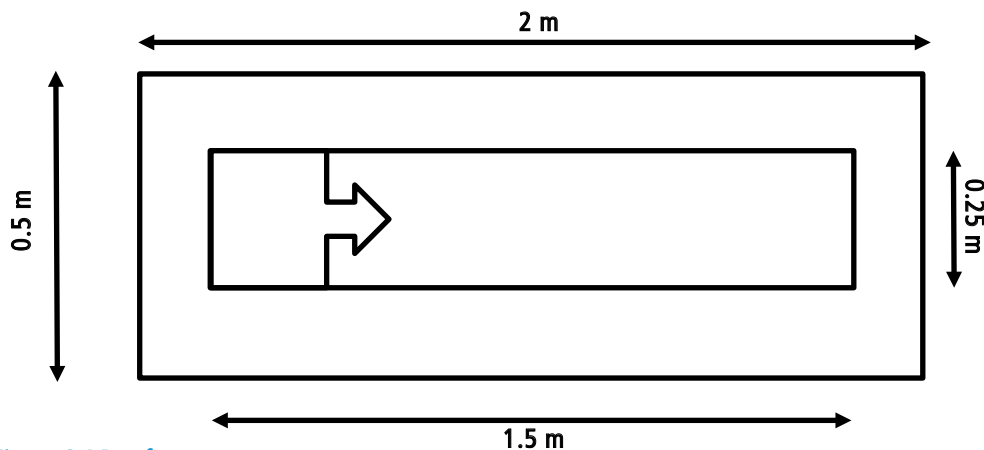
Tijdens het onderzoek naar de bevestigingsmethode voor het bevestigen van de sandwichconstructie, is de vraag gesteld of met 'infuseren' succesvol volledige benatting is te bereiken. Het gaat hierbij om de totale oppervlakte tussen de kern en de stalen plaat. De overspanning bedraagt 3,0 m, door de inlaat in het midden toe te passen bedraagt de door de hars te overbruggen lengte 1,5m (zie Figuur C.3).



Figuur C.3 Schematisatie benatten onder een brug

Het is met een stalen plaat echter niet mogelijk om te controleren of volledige benatting wordt bereikt. Het staal is daarom in de proef vervangen door een glasplaat. Door de doorzichtige glasplaat is het mogelijk om de hars te volgen en te controleren of alles tussen de lagen benat wordt.

De opstelling zoals in de proef is weergegeven in Figuur C.4. Er zijn voor de proeven stroken met een breedte van 0,25 m en een lengte van 1,5 m gebruikt onder een glasplaat met overmaat. De glasplaat is in een frame opgenomen.



Figuur C.4 Proef opzet

C2.2 Doel

Het doel van de benattingsproef is om te bepalen of tijdens de infusie de hars de volledige oppervlakte tussen de dekplaat en de sandwich kan benatten. Hierin staan de volgende vragen centraal:

- Hoelang doet de hars erover om het volledige oppervlak te benatten
- Door welk soort vezels en vezel oriëntatie stroomt de hars het snelst (verschil tussen Glasvlies (viledon T 1777) en CSM (M123 Chopped Strand Mat)
- Wat is het verschil tussen bewerkte schuimen (met groefjes in het oppervlak) en onbewerkte schuimen qua stroom snelheid van de hars.

In de proeven zijn zoveel mogelijk variabelen volgens de wet van Darcy constant gehouden:

$$q = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta X}$$

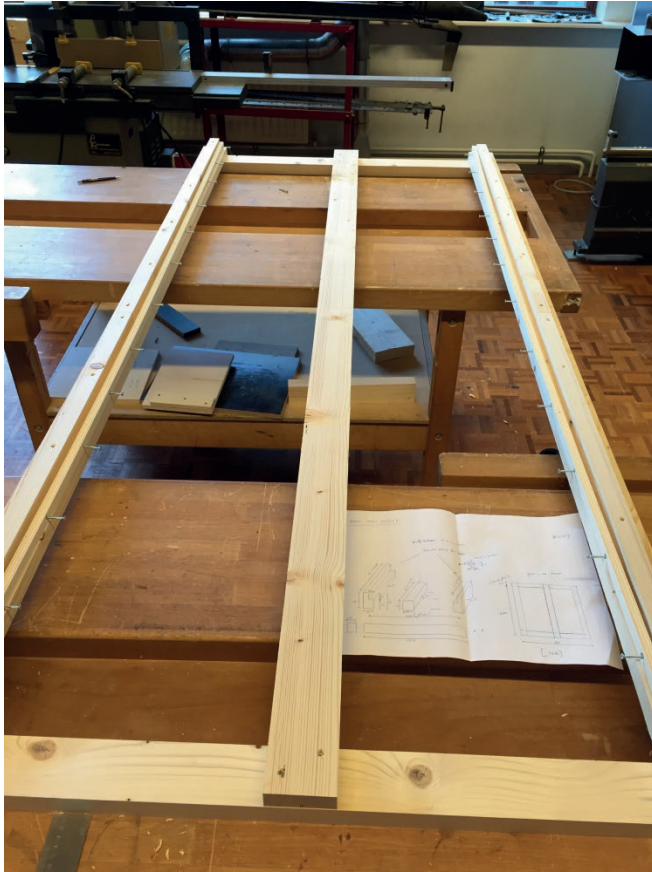
- ΔP de druk is in elke proef gelijk
- η de viscositeit van de hars is steeds gelijk, er is gebruik gemaakt van Atlac430
- ΔX de te overbruggen afstand is steeds 1,5 meter.

C2.3 Uitvoering

De materialen voor de proefopstelling zijn beschikbaar gesteld door Windesheim en DSM. De materiaallijst is weergegeven in Tabel C.2. Voor het houten frame zie Figuur C.5.

Materiaal	Hoeveelheid	Eenheid
- Glasplaat	250x1500	mm ²
- Schuimkern glad opp.	250x1500	mm ²
- Schuimkern runners h.o.h. 2 cm	250x1500	mm ²
- Glasvlies T1777	250x1500	mm ²
- Chopped strand mat	250x1500	mm ²
- Flowmesh	250x1500	mm ²
- lossingslaag (wax)	250x1500	mm ²
- Frame	1	st
- peel ply	250x1500	mm ²
- tacky tape	5	m
- Leiding materiaal	5	m
- verdeel stukjes	2	st
- verdeel kraantjes	2	st
- Atlac 430	10	L
- peroxide	0,40	L
- folie	500x1800	mm ²
- aceton	30	ml
- vacuümpomp	1	st
- camera	1	st

Tabel C.2: Benodigdheden benattingsproef per keer



Figuur C.5 Houten frame

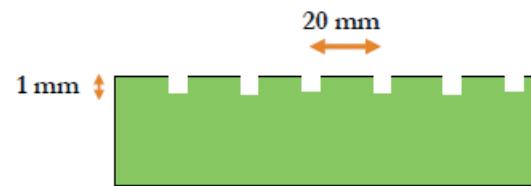
1. Opbouw proefstukken

In het frame zijn steeds 2 proeven tegelijkertijd uitgevoerd. In Tabel C.3 is te zien welke proeven zijn uitgevoerd. Opbouwen van de proefstukken stapsgewijs met foto's toegelicht.

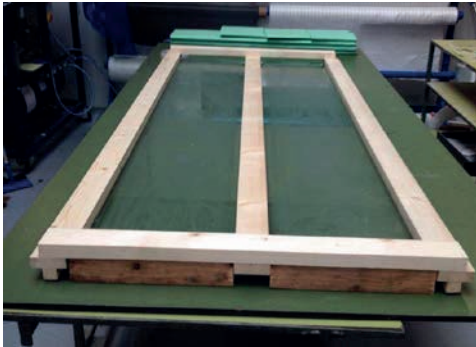
Proefstuk	Bovenflens	Tussenlaag	Kern
1	Glasplaat	Glasvlies	Schuim met glad opp.
2	Glasplaat	Chopped mat	Schuim met glad opp.
3 a	Glasplaat	Glasvlies	Schuim met runners
4 a	Glasplaat	Chopped mat	Schuim met runners
3 b	Glasplaat	Glasvlies	Schuim met runners
4 b	Glasplaat	Chopped mat	Schuim met runners

Tabel C.3 Proefstukken benattingsproef

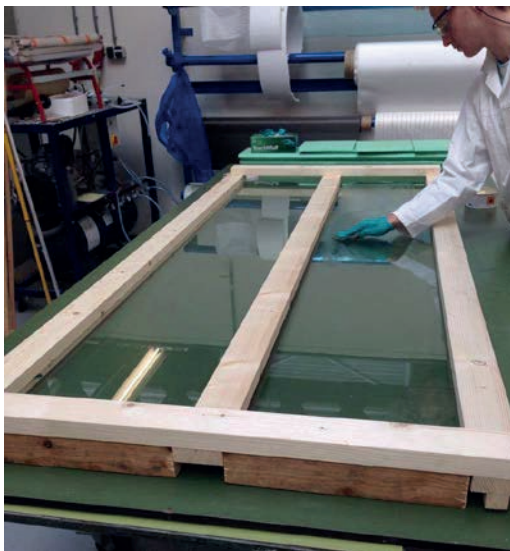
- a. Groefjes structuur proeven 3 & 4.



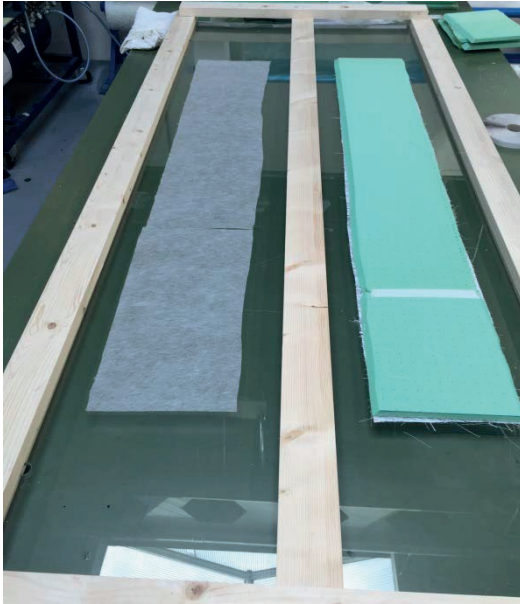
- b. Glasplaat in het houten frame leggen.



- c. Ontvetten van de glasplaat met aceton en aanbrengen wax.



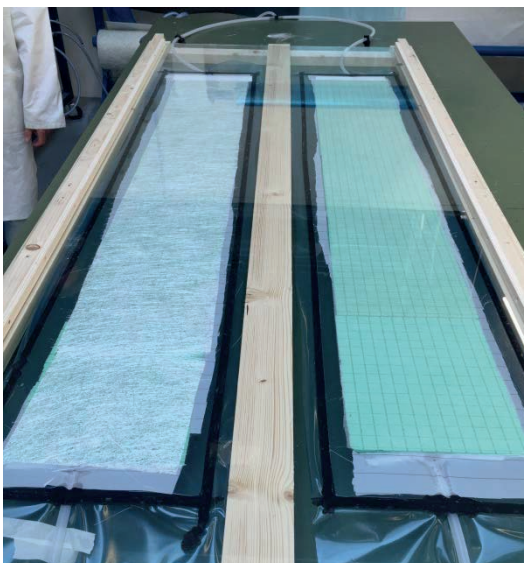
- a. Aanbrengen van de glasvezels en de schuimkernen.



- b. Aanbrengen van vacuümfolie, aansluiten vacuümpomp en omdraaien frame.



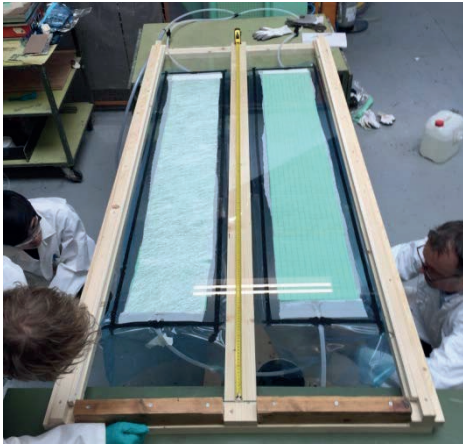
- c. Frame omgedraaid en klaar voor de infusie.



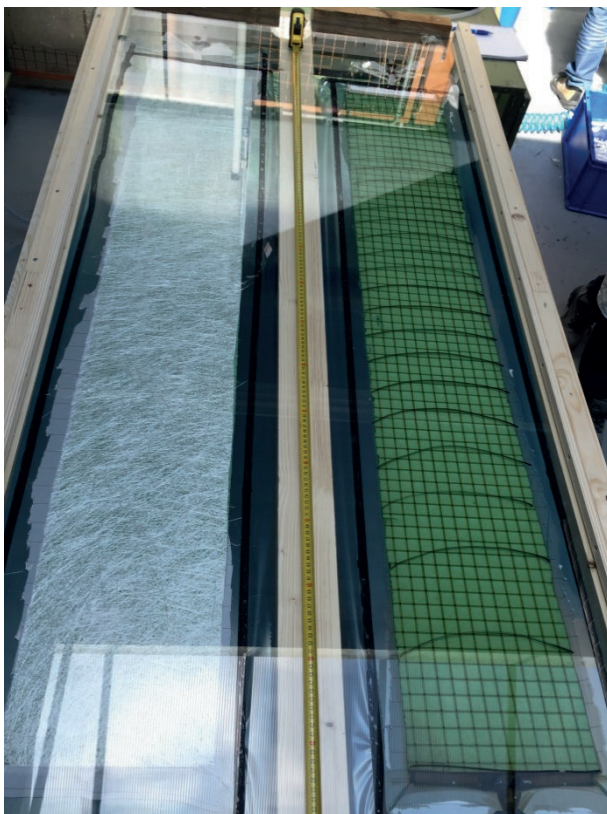
2. Infusie

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de twee verschillende vezels is de tijd bijgehouden van het benatten. Elke 10 seconden is er gemarkeerd waar op dat moment het hars front zich bevindt. Zo kunnen de twee proefstukken met elkaar vergeleken worden.

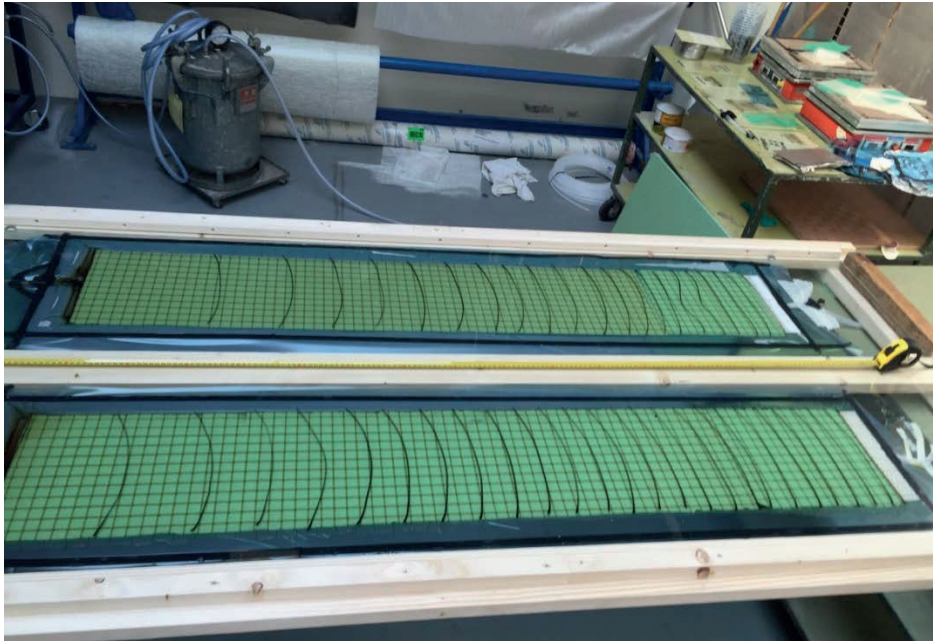
- a. Aansluiten van de hars.



- b. Eerst is de rechterkant geïnfuseerd (Glasvlies).



- c. Vervolgens is de linkerkant geïnfuseerd (CSM).



3. Uit de mal halen van de proefstukken

Nadat de hars volledig is uitgehard, kunnen de proefstukken uit de mal gehaald worden. Hierna is de hars gecheckt of de tussenlaag volledig benat is.

- a. Checken of de tussenlaag volledige benat is.



C2.4 Resultaten (proefstuk 1 & 2)

Datum: 23-05-16

Plaats: Aliancys

Testers: Robbin Lassche, Robin Rook, Itthipat Lumlerdvoravith

Adviseur: Ron Verleg

Temperatuur: 20° C

Constante variabelen

- hars viscositeit (η) = 470 mPa.s (Resins, 2000) = 0,47 Pa.s
- lengte tussen input en output (ΔX) = 150 cm = 1,5 m
- drukverschil (ΔP) = 97 kPa = 970000 Pa

Resultaten:

Uit de proeven blijkt dat het niet mogelijk is om de hars door beide glasvezels heen te trekken. Dit kwam doordat er gebruikt is gemaakt van een schuim met een glad oppervlak. Hierdoor ondervond de hars een te hoge weerstand waardoor het paneel niet geheel werd benat. In de figuur is het verloop van de hars duidelijk te zien (locatie harsfront met stift per 60 seconden een lijn getrokken).



C2.5 Resultaten (proefstuk 3a & 4a)

Datum: 3-05-16

Plaats: Aliancys

Testers: Robbin Lassche, Robin Rook, Itthipat Lumlerdvoravith

Adviseur: Ron Verleg

Temperatuur: 20° C

Constante variabelen

- hars viscositeit (η) = 470 mPa.s (Resins, 2000) = 0,47 Pa.s
- lengte tussen input en output (ΔX) = 150 cm = 1,5 m
- drukverschil (ΔP) = 97 kPa = 970000 Pa

Resultaten:

Test	Tijd (s)
CSM	4 min 40 sec.
Glasvlies	4 min 50 sec.

C2.6 Resultaten (proefstuk 3b & 4b)

Datum: 4-05-16

Plaats: Aliancys

Testers: Robbin Lassche, Robin Rook, Itthipat Lumlerdvoravith

Adviseur: Ron Verleg

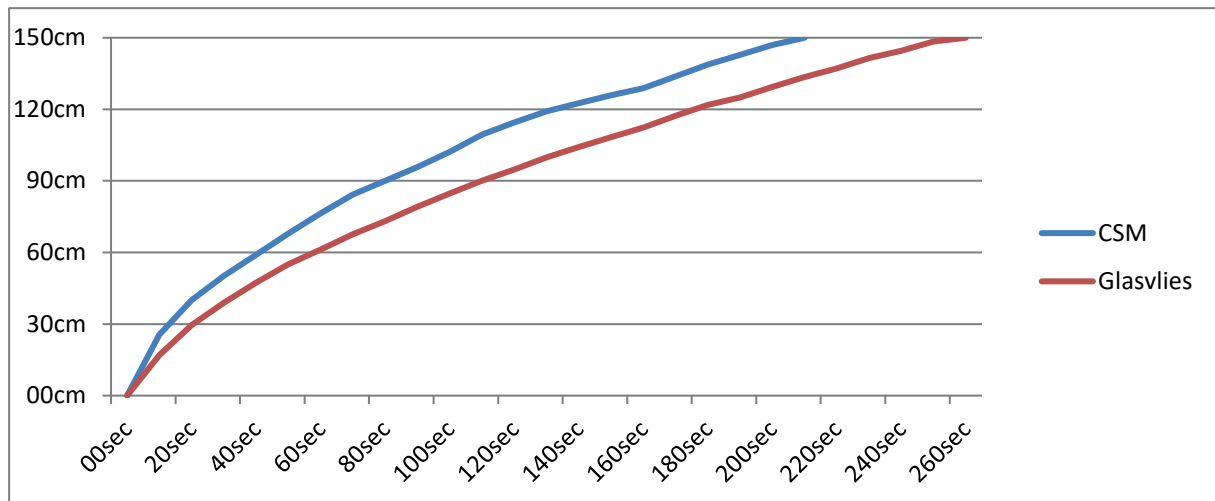
Temperatuur: 20° C

Constance variabelen

- hars viscositeit (η) = 470 mPa.s (Resins, 2000) = 0,47 Pa.s
- lengte tussen input en output (ΔX) = 150 cm = 1,5 m
- drukverschil (ΔP) = 97 kPa = 970000 Pa

Resultaten:

Tijd (sec)	Afstand (cm)	Afstand (cm)
	CSM	Glasvlies
0	0,0cm	0,0cm
10	25,5cm	17,0cm
20	40,0cm	29,5cm
30	50,2cm	39,0cm
40	59,1cm	47,4cm
50	67,9cm	55,1cm
60	76,4cm	61,2cm
70	84,3cm	67,6cm
80	90,0cm	73,2cm
90	95,8cm	79,2cm
100	102,2cm	84,7cm
110	109,4cm	90,0cm
120	114,5cm	94,8cm
130	119,2cm	99,9cm
140	122,5cm	104,2cm
150	125,9cm	108,3cm
160	128,8cm	112,4cm
170	133,8cm	117,3cm
180	138,8cm	121,9cm
190	142,8cm	124,9cm
200	146,9cm	129,4cm
210	150,0cm	133,5cm
220		137,1cm
230		141,4cm
240		144,6cm
250		148,4cm
260		150,0cm



C2.8 Resultaten vergelijking

Test	t
1 Glasvlies/schuim glad	Onvolledige benatting
2 CSM/schuim glad	Onvolledige benatting
3a Glasvlies/schuim runners	280
4a CSM/schuim runners	290
3b Glasvlies/schuim runners	212
4b CSM/schuim runners	260

C3 Interpretatie

C3.1 Conclusie

Met flowmedium maar zonder runners blijkt geen volledige benatting haalbaar.

Zonder flowmedium maar met runners is niet getest.

Uit de resultaten van de benattingsproef is te concluderen dat met zowel CSM als Glasvlies in combinatie met schuim met 'runners', om de 20 mm, de te overbruggen 1,5 m gehaald kan worden. Tijdens het experiment is er gecontroleerd of er geen lucht insluitingen aanwezig waren, dit was niet het geval.

C3.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt aanvullende proeven te doen zonder flowmedium maar met runners. Deze aanbeveling is opgepakt door het lectoraat. De aanvullende proeven zijn beschreven in C4.

In de resultaten is naar voren gekomen dat het niet mogelijk is om zonder 'runners' in het schuim de volledige 1,5 meter volledig te benatten. Echter ging de infusie met runners om de 20 mm, dermate snel dat hier een optimalisatie in gezocht kan worden. Kleinere runners of grotere hart op hart afstanden lijken haalbaar.

C4 Aanvullende benattingsproeven

In C4 zijn alleen afwijkende en aanvullende informatie opgenomen ten opzichte van C1 t/m C3.

C4.1 Doel

Het doel van de aanvullende benattingsproeven is om te bepalen of tijdens de infusie de hars de volledige oppervlakte tussen de dekplaat en de sandwich kan benatten door een groevenpatroon zonder gebruik te maken van een flow medium.

C4.2 Afmetingen

Lengte van de proefstukken is gekozen op basis van beschikbaar schuim: te weten 0,9 m. De groeven in de kern Airex C70.90 zijn aangebracht met een cirkelzaag met een bladbreedte van 3,5 mm.

Langs groefjes

Diverse zaagsneden vormen trapsgewijs samen een golf. De zaagsneden zijn met sprongen van 0,5 mm dieper gemaakt. Beide proefstukken kennen een breedte van 87,5 mm waarvan beide zijkanten 3,5 mm niet ingezaagd.

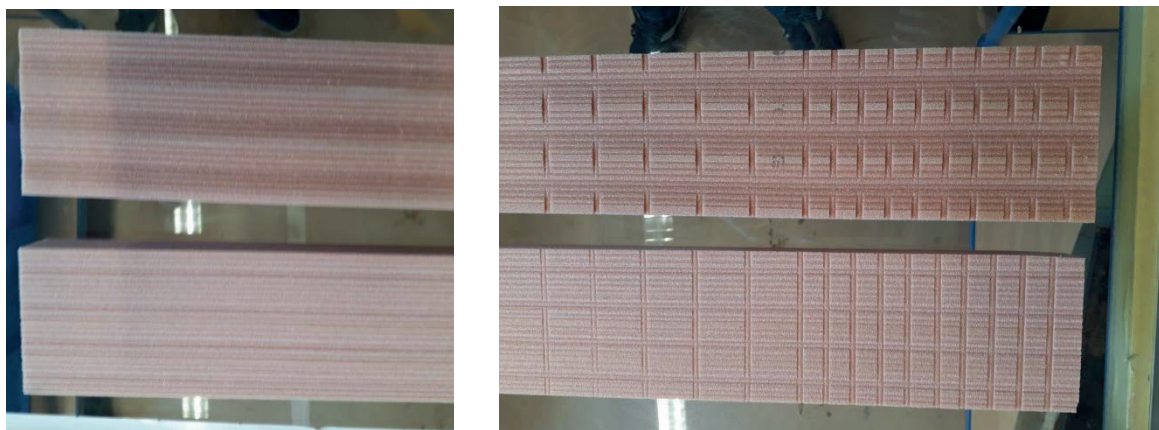
Proefstuk 5a heeft een patroon van $b = 4 \times 21$ mm met golfdiepte van 1,0 mm.

Proefstuk 5b heeft een patroon van $b = 3 \times 28$ mm met golfdiepte van 2,0 mm.



Dwarsgroefjes

De eerste 0,45 m is niet voorzien van dwarsgroefjes, de laatste 0,45 m voorzien van dwarsgroefjes $b = 3,5$ mm, waarbij de hart op hart afstand afnam van enkele malen 60 mm via diverse malen 30 mm en vele malen 15 mm. Zie Figuur C.6.



Figuur C.6 Gegolfd groeven patroon, rechter zijde met dwarsgroefjes

De diepte van de groefjes was 1,0 mm bij proefstuk 5a en 1,5 mm bij proefstuk 5b.

C4.3 Resultaten (proefstuk 5a & 5b)

Datum: 18-04-18

Plaats: Windesheim, composiet laboratorium

Testers: Melvin Haan, Peter Bosman

Adviseur: Pieter Schreuder

Temperatuur: 20° C

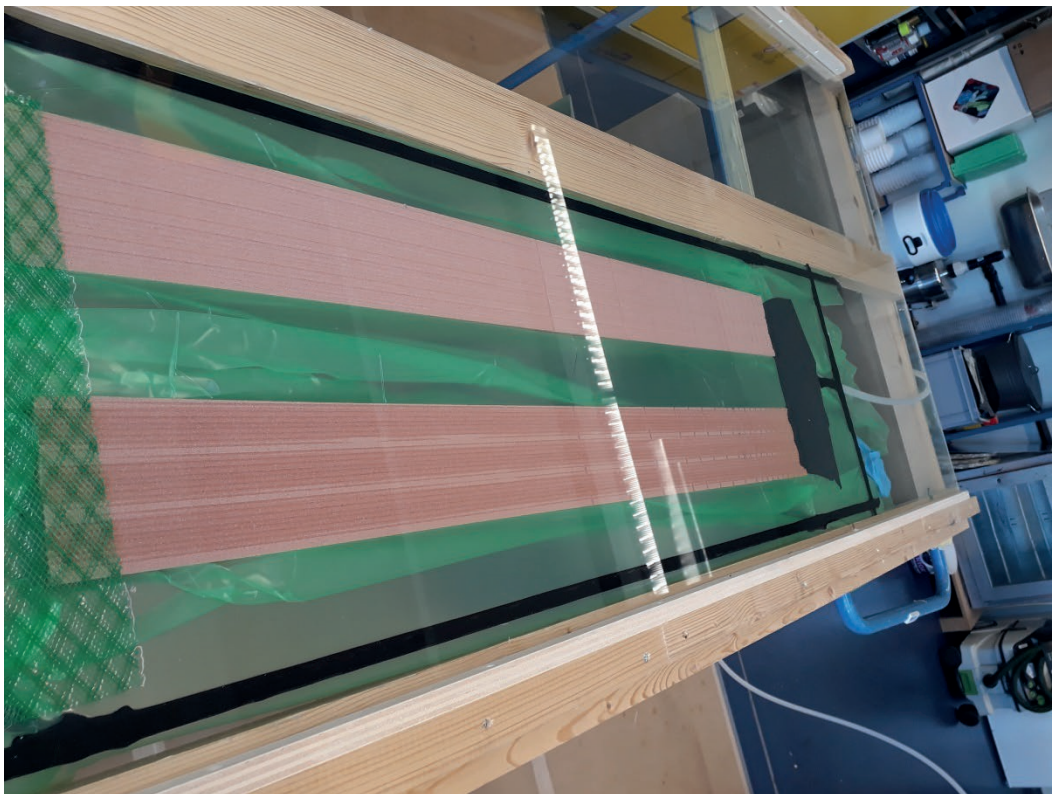
Constance variabelen

- lengte tussen input en output (ΔX) = 90 cm = 0,9 m
- drukverschil (ΔP) = 60 kPa = 600000 Pa

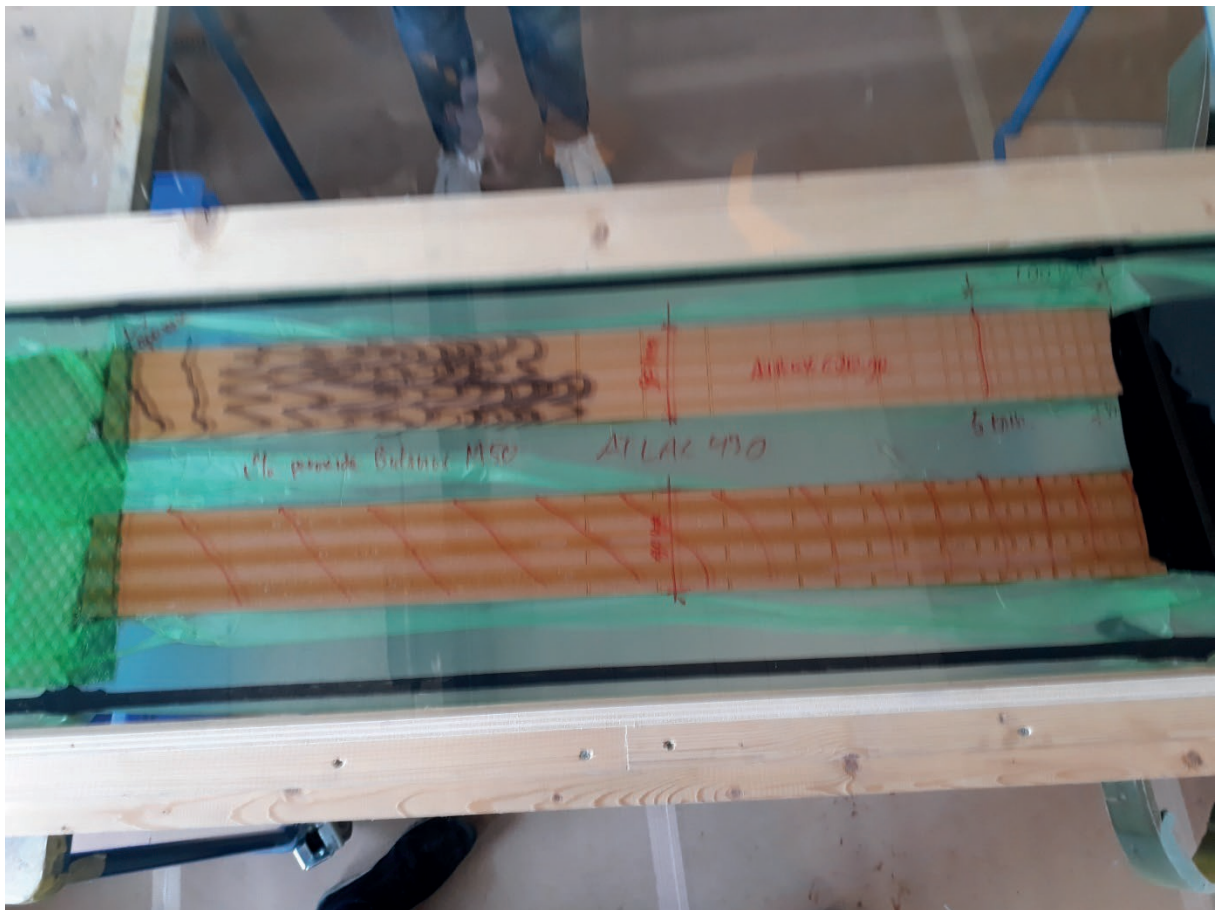
De aanvullende proeven met golvende groefjes (#5) zonder flowmedium gaven volledige benatting. Er is een filmpje van gemaakt.

Bij proefstuk 5a met een golfhoogte van 1 mm was na ca. 7 minuten de overzijde (0,9 m) bereikt. Bij proefstuk 5b met een golfhoogte van 2 mm na ca. 70 seconden. Van beide vorderingen is het harsfront om de 5 seconden vastgelegd, zie Figuur C.8.

Dwarsgroefjes in de 2^e helft van de 0,9m helpen het harsfront haaks op de stroomrichting te krijgen en houden, zie Figuur C.8.



Figuur C.7 Proefstukken 5a en 5b vacuüm gezogen tegen onderzijde glasplaat



Figuur C.8 Proefstukken 5a en 5b geïnfuseerd

Bijlage D – Plooiconrole sandwichflenzen

Plooien GVK onderflens (B)		Steunpunt	
$\sigma_f \leq 0.5(G_c E_c E_f)^{\frac{1}{3}}$			
σ_f	=	Occurred stress	
G_c	=	Shear modulus of core	
E_c	=	Young's Modulus of core	
E_f	=	Young's Modulus of facing sheet	
Material properties		Wrinkling capacity	
	G [N/mm²]		E [N/mm²]
Core	35		100
Bottom facing - GRP plate			17.878
$\gamma_c \gamma_M$	$\gamma_{M1} \gamma_{M2}$	sterkte	$\sigma_{f,d}$
2,5	1,35 1,2		
min. 2,5	CUR96 §9.2.1	stabiliteit	$\sigma_{f,d}$
			198,5 N/mm ²
			12,3 N/mm ²
			1,50
			18,4 N/mm ²
			1,67
			30,7 N/mm ²
Plooien stalen bovenflens (C)		Veldmidden	
$\sigma_f \leq 0.5(G_c E_c E_f)^{\frac{1}{3}}$			
σ_f	=	Occurred stress	
G_c	=	Shear modulus of core	
E_c	=	Young's Modulus of core	
E_f	=	Young's Modulus of facing sheet	
Material properties		Wrinkling capacity	
	G [N/mm²]		E [N/mm²]
Core	35		100
Top facing - steel deck plate			210.000
$\gamma_c \gamma_M$	γ_M	sterkte	$\sigma_{f,d}$
2,5	1,0		
min. 2,5		stabiliteit	$\sigma_{f,d}$
			451,2 N/mm ²
			23,2 N/mm ²
			1,50
			34,8 N/mm ²
			1,67
			58,0 N/mm ²
Core stijfheden		G	E
Airex C70.90 min.	34	110	PVC
Airex C70.90 gem.	40	130	PVC
NY-cell 100	31	80	PVC
LYSTcell 100	38	100	PVC

Table 3.3 - Indicative values for the average values of foam core material properties

	Density [kg/m ³]	Compression strength [N/mm ²]	Shear strength [N/mm ²]	Elasticity modulus [N/mm ²]	In-plane shear modulus [N/mm ²]
PUR	50	0.3 - 0.5	approx. 0.2	6 - 10	4 - 5
	100	0.6 - 1.0	0.3 - 0.5	approx. 30	approx. 10
PVC cross linked	40	0.5 - 0.8	0.3 - 0.4	20 - 30	approx. 10
	80	1.2 - 2.0	0.7 - 1.0	60 - 90	20 - 30
	80	approx. 0.9	0.5 - 1.0	approx. 50	20
PMI linear	30	approx. 0.5	approx. 0.3	approx. 30	approx. 15
	70	approx. 1.5	approx. 1.0	approx. 90	approx. 30

GVK stijfheid	3.400 N/mm ²	E-hars	37.700 E _{UD//}
	72.000 N/mm ²	E-glasvezels	6.493 E _{UD⊥}
E-composiet	50% vezel volume	50% vezels dwarsrichting	
	50% vezel langsrichting	50% vezels dwarsrichting	
E-composiet	23.796 N/mm ²	23.796 N/mm ²	
	1,33 conversiefactor	1,33 γ_c	n° belasting; vocht; temperatuur
E-composiet	17.878 N/mm ²	17.878 N/mm ²	op t=∞, vochtig & T=20°C

Bijlage E MCA Uitvoeringsvarianten: achtergrondinformatie

E.1 Afwegingscriteria en weegfactoren

De gehanteerde afwegingscriteria en weegfactoren zijn:

- Uitvoeringshandelingen	→	25%
- Bevestigingsmogelijkheden	→	15%
- Toleranties	→	10%
- Uitvoeringsduur	→	40%
- Benodigd materieel	→	10%

De relevantie van de criteria en factoren zijn tot stand gekomen na onafhankelijke consultatie met deskundigen uit de composiet/brugbranche te weten 'R. Verleg, J. Bouwmeester en P. Bosman'. Deze leiden tot nagenoeg dezelfde inzichten die hieronder kort zijn toegelicht.

Uitvoeringshandelingen bepalen hoeveel tijd de voorbereidingen innemen en hoe lang het duurt voordat een element bevestigd is onder het dek. Dit staat direct in verbinding met de kosten. Hoe langer dit duurt, hoe hoger de kosten uitvallen. Omdat de handelingen zich onder een brugdek bevinden en dat een groot nadeel is tijdens de uitvoering, is een percentage van **25%** aangehouden.

De **bevestigingsmogelijkheden** bepalen met welke methode het mogelijk is om het element onder het brugdek te bevestigen. In dit geval betreft dat handmatig lijmen of infusie van lijm. Als het mogelijk is om tussen een methode te kunnen kiezen zal dit een voordeel opleveren. Omdat het wel mogelijk is om beide methoden te gebruiken is een percentage van **15%** aangehouden.

Tijdens de uitvoering zijn **toleranties** nodig om maatafwijkingen op te kunnen vangen. Dit houdt in dat er in het werk het één en ander aangepast kan worden of dat er in het ontwerp toleranties mee genomen kunnen worden. Omdat de hars in dit geval veel toleranties op neemt is een relatief laag percentage van **10%** aangehouden.

De **uitvoeringsduur** staat in relatie tot uitvoeringshandelingen, omdat door een langere uitvoeringsduur de kosten omhoog gaan en er onder een brugdek gewerkt wordt. Het boven je hoofd werken brengt een factor 2 qua uitvoeringsduur met zich mee, wat de kosten snel omhoog laat stijgen. Omdat de uitvoeringsduur ook in relatie staat met verkeershinder en indirecte kosten is hier een hoog percentage mee genomen van **40%**.

Het **benodigd materieel** brengt kosten met zich mee. Hiervoor is een percentage van **10%** aangehouden.

Het maximaal aantal punten dat per criterium kan worden toegekend bedraagt 10 punten. Per criterium is informatie onderzocht om te komen tot de score die tussen haakjes staat (), in de volgende twee paragrafen. De scores zijn eveneens vastgesteld na onafhankelijke consultatie van deskundigen.

E.2 In situ variant – score onderbouwing

Uitvoeringshandelingen (4 punten)

Er zijn veel handelingen die verricht moeten worden in een kleine ruimte, werkend al boven het hoofd. Werken met benodigde materieel, op maat maken van materialen en dergelijke.

Bevestigingsmogelijkheden (5 punten)

Alles tegelijk infuseren is het uitgangspunt bij deze methode, tegelijk van verbinding stalen dekplaat – kern, kerndelen onderling als benatten van glasvezel textiel in de onderflens. Voor een taaie verbinding tussen dekplaat en kern is nader onderzoek nodig: ofwel met alleen een fijnmazig systeem van groeven in de kerndelen, dan wel naar flowmedium met zelfde mechanische eigenschappen als verharde hars.

Eerst lijmen van kerndelen is in theorie mogelijk, maar maakt de uitvoering nog bewerkelijker.

Toleranties (8 punten)

Alle textiel en kerndelen kunnen ter plaatse op maat gemaakt of uitgevuld worden.

Uitvoeringsduur (4 punten)

Overeenkomstig uitvoeringshandelingen.

Benodigd materieel (4 punten)

Het benodigde materieel dat ter plaatse in zeer beperkte ruimteomstandigheden moet worden gebruikt zijn onder meer harsaanvoer- en vacuümslangen, een pomp, luchtdichte folie en tacky tape. Dit moet op / rondom het plateau / mal aanwezig zijn. Daarnaast moet mal gevijzeld worden, en een werkponton aanwezig zijn.

E.3 Prefab variant – score onderbouwing

Uitvoeringshandelingen (6 punten)

Er zijn veel uitvoeringshandelingen die al een fabriekshal kunnen gebeuren. Het in situ onder het brugdek en boven het hoofd werken met de laatste handelingen blijven vervelend.

Bevestigingsmogelijkheden (8 punten)

De verbinding stalen dekplaat – kern kan zowel handmatig gelijmd of door infusie van lijm worden gedaan.

Toleranties (6 punten)

Prefabdelen moeten ter plaatse uitgevuld worden, dan wel vooraf nauwkeurig worden ingemeten en geproduceerd.

Uitvoeringsduur (6 punten)

Overeenkomstig uitvoeringshandelingen, gunstiger dan in situ variant. Omdat het in 2 fasen moet geschieden (eerste even trogdelen, daarna oneven) geen hoge score.

Benodigd materieel (6 punten)

Het benodigde materieel dat ter plaatse in zeer beperkte ruimteomstandigheden moet worden gebruikt is minder dan bij de in situ variant, zo is er geen mal nodig. Wel zijn er bijvoorbeeld nog steeds een vijzels en een werkponton nodig.

Bijlage F MCA Bevestigingsmethode: achtergrondinformatie

F.1 Afwegingscriteria en weegfactoren

De gehanteerde afwegingscriteria en weegfactoren zijn:

- Kosten	→	25%
- Verwerking	→	15%
- Performance	→	25%
- Ervaringen	→	10%
- Kwaliteit	→	25%.

De relevantie van de criteria en factoren zijn tot stand gekomen na onafhankelijke consultatie met enkele deskundigen uit de composiet/brugbranche te weten 'R. Verleg, J. Bouwmeester en P. Bosman'. Deze leiden tot nagenoeg dezelfde inzichten die hieronder kort zijn toegelicht.

De kosten van de bevestigingsmethode is sterk bepalend voor de totale kosten van de renovatie van een stalen brug. Deze kosten lopen snel op, met betrekking op de maatschappelijke kosten, als de verwerkingstijd van de methode langzaam is. Dit aspect weegt daarom relatief zwaar mee met een percentage van **25%**.

De verwerking bepaalt hoeveel tijd de voorbereidingen innemen en hoe lang het duurt voordat een element bevestigd is onder het dek. Dit staat direct in verband met de kosten. Hoe langer dit duurt, hoe hoger de kosten uitvallen. Omdat het gedeeltelijk al betrokken is met de kosten is hier enkel een percentage van **15%** aangehouden.

De performance van de bevestigingsmethode is een belangrijk aspect voor de zekerheid en kwaliteit van de verbinding met het staal. De sterkte van de verbinding dient zo optimaal mogelijk te zijn. Als deze faalt, heeft dit grote consequenties voor de tijd van het renoveren. Hiervoor is een percentage van **25%** aangehouden.

Ervaringen geven een indicatie hoe de methode al eens is toegepast. Hierdoor is duidelijk geworden wat de voor- en nadelen waren tijdens het uitvoeren van de bevestigingsmethode. Dit criterium is niet sterk bepalend voor de uiteindelijke uitvoering en wordt gezien als hulpmiddel. Daarom heeft het een percentage van **10%**.

De kwaliteit is een belangrijk aspect voor de zekerheid van de verbinding met het staal. Door slechte kwaliteit kan de verbinding direct of eerder falen, ten koste van de levensduur. Kwaliteit heeft daarom een percentage van **25%**.

Het maximaal aantal punten dat per criterium kan worden toegekend bedraagt 10 punten. Per criterium is informatie onderzocht om te komen tot de score die tussen haakjes staat (), in de volgende twee paragrafen. De scores zijn eveneens vastgesteld na onafhankelijke consultatie van deskundigen.

F.2 Infuseren van lijm – score onderbouwing

Kosten (6 Punten)

- Materiaal / Manuren

De directe kosten zijn geraamd in Tabel F.1. Er is uitgegaan van een rijstrook van 3,6 m (6 troglijnen) en 5 velden van 3,0 m overspanning. Bij de raming van de materiaalkosten en de hoeveelheid manuren is gebruik gemaakt van het onderzoeksrapport (Achterberg & van Gorkum, 2014). De eenheidsprijzen en het aantal manuren per eenheid zijn in blauw weergegeven.

Omschrijving	Hoeveelheid	Kosten	Kosten per eenheid	Mu/eenh	Mu/tot
Afbranden troggen	2 x 3 x 5 = 30st	€ 3.000	€100,0/st	2,0	60
Zandstralen dekplaat	2 x 3x12 = 72m	€ 2.160	€30,0/m	0,5	36
Aanbrengen primer	2 x 3x12 = 72m	€ 2.340	€32,5/m	0,5	36
Afschermen stralen & coaten	6 x 15m	€ 4.500	€50,0/m		
Leveren plateau/mal	5st, 15m	€ 7.500	€500,0/m		
Aanbrengen plateau/mal (↑↓)	6 x 5st	€ 3.000	€75,0/st	2,0	60
Lamineren sandwich, in situ	2 x 15 = 30st	€37.500	€1.250,0/st	16,0	480
Vijzelen plateau/mal (↑↓)	2 x 3 x 5st	€ 7.500	€250,0/st	4,0	120
Hoogwerkers op ponton	2x(1+3x2)wk	€14.000	€1.000,0/wk		
Totaal		€81.500			

Tabel F.1 Kostenraming infuseren van lijm

- Verkeershinder

Het belangrijkste aspect van de kosten is de tijd dat de rijstrook gestremd is voor verkeer. Dit geeft voor de omgeving hinder met economische gevolgen (de indirecte kosten). Het verkeer kan zich niet meer van A naar B verplaatsen of loopt vertraging op door wegversperringen en/of verkeershinder. De duur van in situ infuseren van lijm is langer dan het handmatig lijmen van prefab sandwich elementen.

Verwerking (7 Punten)

- Behandeling ondergrond

Uit het voorgaande onderzoek is na verschillende tests naar voren gekomen, dat het voorbehandelen van het staal een wezenlijk effect heeft op de aanhechting van de hars op het staal. Het oppervlak van de brug dient gezandstraald en schoongemaakt te worden. Na deze behandeling dient er G4 primer te worden aangebracht. Deze combinatie van voorbehandeling zorgt voor een optimale hechting. (Achterberg & van Gorkum, 2014)

- Conditie ondergrond

Uit het rapport van adviesbureau Hageman blijkt dat de stalen plaat niet geheel recht verloopt (Hageman, 2009). Met infuseren wordt de hars door de gehele oppervlakte getrokken en worden alle holtes opgevuld die door de fluctuaties ontstaan zijn. Door het vacuüm wordt voorkomen dat er lucht in de holtes gaat zitten.

- Temperatuur condities

In de product informatie folder van Atlac430 (Bijlage J) staat beschreven, dat de hars door zijn thermische weerstand en rek toegepast kan worden bij fluctuerende temperaturen. Er hoeven geen extra maatregelen getroffen te worden om met deze harssoort te werken.

Performance (8 Punten)

De sterkte eigenschappen van de lijmlaag tussen het composiet en het staal zijn mede afhankelijk van de dikte en gelijkmatigheid van deze lijmlaag. Met infusie wordt de lijm evenredig tussen de twee lagen door getrokken. Holtes worden hierdoor gevuld, wat voorkomt dat er lucht achterblijft. Luchtbellen verminderen de prestaties van de lijmlaag. De materiaaleigenschappen worden maximaal benut nadat er geïnfuseerd is.

Wat betreft het statische en dynamische gedrag van de lijm, is verondersteld dat deze gelijk zijn aan de methode van het handmatig lijmen. Hetzelfde product is toegepast bij beide bevestiging methodes.

Ervaringen (7 Punten)

In de composietindustrie is er al met vacuïminjectie gewerkt om droge glas- of koolstofvezels met een vloeibare hars te impregneren. Bij een juiste beheersing van het proces is het mogelijk om een impregnatie van de vezels te realiseren, zonder dat er lucht wordt ingesloten. Door het bedrijf Lightweight Structures B.V. zijn de eerste proeven gedaan om te onderzoeken of het mogelijk is om met een vergelijkbaar injectieproces staalplaten te verlijmen. De resultaten waren steeds veelbelovend. Bij een oud stuk brugdek van de Van Brienenoordbrug, met afmetingen van 10 meter bij 3,5 meter, is een versterkingsplaat op het stalen dek gelijmd. Deze is in zijn geheel in één procesgang verlijmd zonder noemenswaardige problemen. Deze methode is daarna als pilot toegepast bij de Scharsterrijnbrug. (Reparatie van stalen brugdekken, 2009)

Kwaliteit (7 Punten)

- Benatting

Uit ervaringen is voortgekomen, dat het mogelijk is om een plaat van 10 meter bij 3,5 meter te infuseren in één procesgang, zonder noemenswaardige problemen. Het concept van de VVK sandwichconstructie heeft afmetingen van 3 meter bij 3 meter. Dit levert daarom geen problemen bij deze afmetingen. (Reparatie van stalen brugdekken, 2009)

- Controleerbaarheid

Het controleren of de hars goed gehecht is met het staal dient door middel van een C-scan gedaan te worden. Deze methode heet 'shearography' en komt uit de luchtvaart sector. Deze methode werkt door middel van het scannen van het oppervlak, wat onder een vacuüm zit. Als in dit vacuüm luchtinsluitingen zijn, worden deze gedetecteerd (Reparatie van stalen brugdekken, 2009). Een andere mogelijkheid is door middel van het verwarmen van de constructie. Door het verwarmen zetten eventuele luchtballen uit, deze veranderingen zijn te meten.

F.3 Handmatig lijmen - score onderbouwing

Kosten (8 Punten)

- Materiaal / Manuren

De directe kosten (de materiaalkosten en de hoeveelheid manuren) zijn bepaald aan de hand van het voorgaande rapport van R. Achterberg en J. Van Gorkum. In dit rapport is er van een case uitgegaan. Er zijn hierbij bepaalde afmetingen van het brugdek aangenomen waarop de kosten gebaseerd zijn. Deze kosten zijn terug gerekend naar de eenheden per stuk. Hierdoor is het vergemakkelijkt om een vergelijking te maken. Daarnaast zijn de manuren bij dit soort werkzaamheden een grote kostenpost. In Tabel F.2 zijn de eenheidsprijzen en het aantal manuren per eenheid in het blauw weergegeven. (Achterberg & van Gorkum, 2014)

Omschrijving	Hoeveelheid	Kosten	Kosten per eenheid	Mu/eenh	Mu/tot
Afbranden troggen	2 x 3 x 5 = 30st	€ 3.000	€100,0/st	2,0	60
Zandstralen dekplaat	2 x 3x12 = 72m	€ 2.160	€30,0/m	0,5	36
Aanbrengen primer	2 x 3x12 = 72m	€ 2.340	€32,5/m	0,5	36
Afschermen stralen & coaten	6 x 15m	€ 4.500	€50,0/m		
Aanbrengen sandwich, prefab	2 x 3 x 5st	€27.000	€900,0/st	8,0+2,0	300
Vijzelen sandwichpl. (op/neer)	2 x 3 x 5st	€ 7.500	€250,0/st	4,0	120
Handmatig lijmen	30st	€13.500	€450,0/st	8,0	240
Hoogwerkers op ponton	2x(1+3)wk	€ 8.000	€1.000,0/wk		
Totaal		€68.000			

Tabel F.2 Kostenraming handmatig lijmen

- Verkeershinder

Het belangrijkste aspect van de indirecte kosten, is de tijd dat de rijstrook is gestremd. De duur van handmatig lijmen van prefab elementen is korter dan bij in situ infuseren van lijm.

Verwerking (6 Punten)

- Behandeling ondergrond

Uit het voorgaande onderzoek is na verschillende tests naar voren gekomen, dat het voorbehandelen van het staal een wezenlijk effect heeft op de aanhechting van de hars op het staal. Het oppervlak van de brug dient gezandstraald en schoongemaakt te worden. Na deze behandeling dient er G4 primer te worden aangebracht. Deze combinatie van voorbehandeling zorgt voor een optimale hechting. (Achterberg & van Gorkum, 2014)

- Conditie ondergrond

Uit het rapport van adviesbureau Hageman is duidelijk geworden dat de stalen plaat niet geheel recht verloopt (Hageman, 2009). Met handmatig lijmen bestaat de kans dat deze oneffenheden niet volledig verdicht worden. Door het geheel onder vacuüm te brengen, is het mogelijk dit probleem op te lossen, maar hierbij is geen zekerheid.

- Temperatuur condities

In de product informatie folder van Atlac430 (Bijlage J) staat beschreven dat de hars door zijn thermische weerstand en rek toegepast kan worden bij fluctuerende temperaturen. Er hoeven geen extra maatregelen getroffen te worden om met deze harssoort te werken.

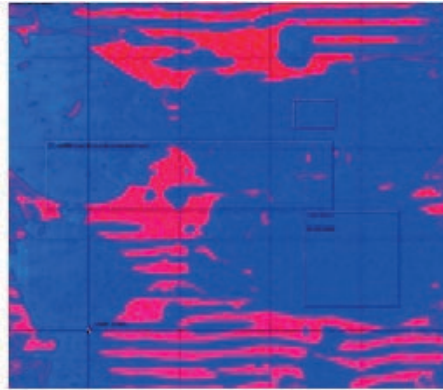
Performance (6 Punten)

De sterkte eigenschappen van de lijmlaag tussen het composiet en het staal zijn mede afhankelijk van de dikte en gelijkmatigheid van deze lijmlaag. Met handmatig lijmen is de lijm mogelijk niet regelmatig tussen de twee materiaal oppervlaktes verdeeld en kunnen er luchtinsluitingen ontstaan. Luchtinsluitingen verminderen de prestaties van de lijmlaag. De materiaaleigenschappen zullen alleen na volledige hechting maximaal benut worden. Wat betreft het statische en dynamische gedrag van de lijm, is verondersteld dat deze gelijk zijn aan de methode van het infuseren.

Er is één en hetzelfde product toegepast bij beide bevestiging methodes. (Reparatie van stalen brugdekken, 2009)



Figuur F.1 Aanbrengen lijm met een lijmkam



Figuur F.2 C-scan met luchtinsluitingen

Ervaringen (6 Punten)

De techniek, van het verlijmen van stalen versterkingsplaten op stalen bruggen, is 10 jaar geleden al op laboratoriumschaal toegepast door het Hechtingsinstituut van de Technische Universiteit Delft. Het grootste probleem was, dat het vrijwel onmogelijk bleek om op conventionele wijze grote oppervlakken te verlijmen, zonder lucht insluitingen in de lijmlaag te voorkomen (Figuur F.1). Dit had tot gevolg dat de weerstand tegen vermoeiing onvoldoende was. (Reparatie van stalen brugdekken, 2009)

Kwaliteit (6 Punten)

- Benatting

Doordat de lijm handmatig aangebracht wordt, kan met het blote oog gezien worden of overal op de constructie lijm bevindt. Echter na het bevestigen dient dit gecontroleerd worden of dit ook voor de andere kant geldt.

- Controleerbaarheid

Door middel van C-scans dient er nagegaan te worden of er lucht achter is gebleven na bevestiging (Figuur F.2). Deze methode heet 'shearography' en komt uit de luchtvaart sector. Deze methode werkt door middel van het scannen van het oppervlak wat onder vacuüm gebracht is. Als er in het vacuüm luchtinsluitingen zijn, worden deze gedetecteerd (Reparatie van stalen brugdekken, 2009). Mocht hieruit blijken dat er daadwerkelijk luchtballen tussen de lagen zitten, dan dient dit verholpen te worden door bijvoorbeeld het geheel onder vacuüm te brengen met behulp van een vacuümpomp.

Bijlage G – Raming directe kosten HSB overlaging & VVK sandwich

Brugdekcase voor raming directe kosten

Trog		n		Afschuining		n											
H	0.30 m			H	0.30 m												
L	3.00 m	4	12.00 m	B	0.30 m	2	0.60 m							12.60 m			
				hoofdliggers				randliggers									
B	0.60 m	44	26.40 m	B	0.30 m	3	0.90 m	B	0.15 m	2	0.30 m			27.60 m			
overstek		hoofdlijger		overspanning		hoofdlijger		overspanning		hoofdlijge		overstek		brugbreedte			
2.70 m				11.10 m				11.10 m				2.70 m		27.60 m			
zijberm	1.775 m	vluchtstrook	rijstrook	rijstrook	middenberm	rijstrook	rijstrook	0.2	3.425 m	0.8	3.425 m	0.2	3.425 m	0.2	3.700 m	1.775 m	brugbreedte
		3.700 m	0.2	3.425 m	0.2	3.425 m	0.8	3.425 m	0.2	3.425 m	0.2	3.425 m	0.2	3.700 m	1.775 m	27.60 m	
		lijn	lijn	lijn	lijn+	lijn+	lijn+	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	wegbreedtes:	24.05 m	
zijberm	1.775 m	vluchtstrook	rijstrook	marge				barrier				afzetting					
		3.700 m	0.2	3.425 m	0.2	1.250 m	0.55							11.10 m			
		lijn	lijn														
		rijstrook	rijstrook	rijstrook	middenberm	rijstrook	rijstrook	0.24	3.200 m	0.20	3.200 m	0.24	0.55 m	0.24	3.200 m	0.20	3.200 m
		lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn	lijn
		zijberm	zijberm														
		restbreedte	restbreedte														
		16.50 m	16.50 m														
		27.60 m	27.60 m														



Raming directe kosten HSB overlaging hele brugdek

Ontwerp, dek							€	20,000	
Materiaal, dek									
beton	C90/105	L 12.60 m	D 0.085 m	B 24.05 m	V 25.8 m³	59,242 kg	€	250	€ 6,439
staalvezels					75 kg/m³	1,932 kg	€	2.50	€ 4,830
wapening									
		L 12.60 m		B 24.05 m	A 303 m²	m 27 kg/m²	m 8,250 kg	€	1.00 € 8,250
hechtlaag									
			D 2.5 mm	EP	A 303 m²	m 30 kg/m²	m 9,091 kg	€	3.00 € 27,273
			5.0 mm	bauxiet	303 m²	90 kg/m²	27,273 kg	€	2.00 € 54,545
slijtlaag									
				EP	A 303 m²	m 30 kg/m²	m 9,091 kg	€	3.00 € 27,273
				bauxiet	303 m²	90 kg/m²	27,273 kg	€	2.00 € 54,545
overig									
afdekfolie					303 m²		€	1.00	€ 303
stalen opsluitstroken HSB			0.085 m	0.010 m	73.30 m	0.06 m³	486 kg	€	1.00 € 486
									€ 183,945
Materieel, dek									
tent		weken 11.5				€ 10,000	€	500	€ 15,750
straal apparatuur		9.0					€	500	€ 4,500
werkverlichting		11.5					€	100	€ 1,150
freess HSB		2.0					€	500	€ 1,000
									€ 22,400
Bouwplaatskosten, totaal									
keet		14.0				€ 1,000	€	200	€ 3,800
nuts		14.0				€ 8,000	€	1,500	€ 29,000
energie		14.0				€ 500	€	225	€ 3,650
afzetting						€ 4,500			€ 4,500
vervoer		14.0					€	350	€ 4,900
inr. park						€ 3,000			€ 3,000
									€ 48,850
Uren dek									
bouwplaatsbezetting		11.5		A 0.5	fte		€	1,000	€ 11,500 230 h
stralen bestaande slijtlaag				303 m²			€	60.00	€ 18,182 364 h
lassen stalen opsluitstroken HSB				73.30 m			€	20.00	€ 1,466 29 h
hechtlaag aanbrengen				303 m²			€	20.00	€ 6,061 121 h
vlechten				8,250 kg			€	0.50	€ 4,125 83 h
schoonmaken kist				303 m²			€	3.00	€ 909 18 h
storten				303 m²			€	15.00	€ 4,545 91 h
afdekken				303 m²			€	2.00	€ 606 12 h
afhalen				303 m²			€	1.00	€ 303 6 h
frezen HSB				303 m²			€	10.00	€ 3,030 61 h
slijtlaag aanbrengen				303 m²			€	20.00	€ 6,061 121 h
									€ 56,788 906 h
Balancering									
ontwerp balancering				50.0 h			€	100	€ 5,000
bouwplaatsbezetting		2.5		0.5	fte		€	1,000	€ 2,500
uitvoeren balancering				200.0 h			€	50	€ 10,000
materieel aanpassen balancering									€ 10,000
stalen balancering, 60% toevoegen			69 ton	139 ton			€	1,250	€ 173,561
			val	ballast					€ 201,061
wegafzetting	1/2 brug tegelijk								€ 25,000
herstel dekplaat schade									p.m.
herstel troggen schade									p.m.
Subtotaal									€ 558,044
AKWR	20% incl. afkoop prijsstijgingen, verzekeringen, eigen risico								€ 111,609
TOTAAL									€ 669,653

Raming directe kosten VVK sandwich vrachtwagenstroken

Ontwerp, dek

€ 25,000

Materiaal

	ΔL	n	L	D	ΔB	n	n	n	B	V	ρ	m	€/	€
schuim (vooraf gefreesd)	3.00 m	4	12.00 m	0.30 m	0.60 m	2	2	3	7.20 m	25.92 m³	100 kg/m³	2,592 kg	€ 5.00	€ 12,960
		velden				zijden	on/even	tegelijk						
VVK			L	T	ΔB				B	V		m	€/	€
			12.00 m	0.06 m	0.60 m				7.20 m	5.18 m³				
									glasvezel	50%	2.59 m³	2,550 kg/m³	6,610 kg	€ 3.00 € 19,829
									UP hars	50%	2.59 m³	1,200 kg/m³	3,110 kg	€ 3.00 € 9,331
												12,312 kg		
infusie boven			L	T					B	V				
			12.00 m	0.06 m					7.20 m	5.18 m³				
kops	ΔH	n	H	T					B	V				
	0.30 m	8	2.40 m	0.06 m					7.20 m	1.04 m³				
langs			L	T	ΔH	n			H	V				
			12.00 m	0.06 m	0.30 m	12			3.60 m	2.59 m³				
deling	ΔH	n	H	T					B	V				
	0.30 m	4	1.20 m	0.06 m					7.20 m	0.52 m³				
									EP hars		9.33 m³	1,200 kg/m³	11,197 kg	€ 5.00 € 55,987

overig

slangen												€/	€	250
vacuümfolie								86 m²				€ 2.00	€	173
tacky tape								346 m				€ 1.00	€	346
primer								86 m²				€ 2.00	€	173
													€	99,048

Materieel

		weken												
zaag, sandwich		12.0											€	500
ponton		2 stuks	12.0							€ 1,500	€ 550	€	16,200	
hoogwerkers		2 stuks	12.0								€ 250	€	6,000	
vijzels			12.0								€ 50	€	600	
vacuümpomp, overloopvat c.a.			12.0								€ 150	€	1,800	
afscherming stralen en coaten			12.0								€ 100	€	1,200	
brand, slijp gereedschap			12.0								€ 150	€	1,800	
werkverlichting			12.0								€ 100	€	1,200	
straal apparatuur			12.0								€ 100	€	1,200	
													€	30,500

Bouwplaatskosten

		weken									vast	var.	€	
keet		12.0									€ 1,000	€ 200	€	3,400
nuts		12.0									€ 8,000	€ 1,500	€	26,000
energie		12.0									€ 500	€ 225	€	3,200
afzetting											€ 4,500		€	4,500
vervoer		12.0										€ 350	€	4,200
inr. park											€ 3,000		€	3,000
													€	44,300

Uren dek, incl. prefab

prefab						0.2 h/kg	€ 50.0 /h		12,312 kg		€ 10.00	€	123,120	
bouwplaatsbezetting		12.0				0.5	fte				€ 1,000	€	12,000	
tijd. ondersteunen, wegbranden troggen, vlakslijpen, afvoeren					8.4 m/tr	10.0 h	0.84 m/h		48		€ 500	€	24,000	
afscherming plaatsen						4.0 h			48		€ 200	€	9,600	
stralen onderzijde dekplaat					1.8 m²/tr	0.8 h	€ 22.2 /m²		48		€ 40	€	1,920	
aanbrengen primer					1.8 m²/tr	0.6 h	€ 16.7 /m²		48		€ 30	€	1,440	
afscherming wegnemen						0.5 h			48		€ 25.0	€	1,200	
zagen blokken						0.5 h			48		€ 25	€	1,200	
heffen						0.25 h			48		€ 12.5	€	600	
vijzelen						0.25 h			48		€ 12.5	€	600	
afplakken						2.0 h			48		€ 100	€	4,800	
infuseren						1.0 h		weekend	48		€ 75	€	3,600	
uitpakken						0.25 h			48		€ 13	€	600	
						20 h							€	184,680
									2 man					
									tegelijk					

Balanceren

uren balanceren met bestaande regelballast						16 h						€	800	
												€	800	

wegafzetting 1/4 brug tegelijk

€ 25,000

weekendstremmin 1/4 brug tegelijk

€ 6,250

€ 31,250

herstel dekplaat schade

p.m.

inlassen sparigen doorgestoken troggen

p.m.

Subtotaal

€ 415,578

AKWR 20% incl. afkoop prijsstijgingen, verzekeringen, eigen risico

€ 83,116

TOTAAL

€ 498,694

Bijlage H – Afleiding plaatstijfheden

Material	t	b	A	E	EA	α	EAs	$z - z_{na}$	EI_z	$EAs(z - z_{na})^2$	
Staal	12 mm	1.000 mm	12.000 mm ²	210.000 N/mm ²	2.520.000 N	6,0 mm	15.120.000 Nmm	-13,9 mm	30.340.000.000 Nmm ²	487.604.387.868 Nmm ³	-3.861e+08 Nmm ³ W
Composite	2 mm	1.000 mm	2.000 mm ²	3.400 N/mm ²	6.800 N	13,0 mm	88.400.000 Nmm	-6,9 mm	2.346.467 Nmm ²	324.706.351 Nmm ³	
Core	292 mm	1.000 mm	292.000 mm ²	100 N/mm ²	29.200 N	160,0 mm	4.672.000.000 Nmm	140,1 mm	207.475.753.333 Nmm ²	573.054.396.903 Nmm ³	
Composite	6 mm	1.000 mm	6.000 mm ²	17.878 N/mm ²	107.268 N	309,0 mm	33.145.812.000 Nmm	289,1 mm	321.804.000 Nmm ²	8.964.698.860.597 Nmm ³	2.181e+08 Nmm ³ W
Composite	312 mm		312.000 mm ²		2.463.248.000 N	3.468 13,9 mm	53.026.212.000 Nmm		238.059.804.000 Nmm ²	30.025.682.353.719 Nmm ³	
									EI_z	$EAs(z - z_{na})^2$	
				gem.	40 N/mm ² Alene				145 mm ² 0,14 mm	48.874.867 mm ⁴ 83,7 mm	
				min.	34 N/mm ² Alene				80.769 N/mm ²	210.000 N/mm ²	

Part	Material	I_z	I_y	I_{yz}	$W_{elast,z}$	$W_{elast,y}$	$I_z(I_{yz})$
deck plate	Staal	12 mm	3.000 mm	21.816.000 mm ⁴	7.272.000 mm ³	80.769 N/mm ²	0.00310 mm ³ /N
wells	Staal	20 mm	303 mm	34.360.000 mm ⁴	80.769 N/mm ²	0.00019 mm ³ /N	
	Staal	20 mm	303 mm	34.360.000 mm ⁴	80.769 N/mm ²	0.00019 mm ³ /N	
under flange	Composite	6 mm	3.000 mm	10.908.000 mm ⁴	3.636.000 mm ³	3.500 N/mm ²	0.04268 mm ³ /N + 0.34633 mm ³ /N

h	b	A _{steel}
303 mm	3000 mm	909.000 mm ²

G_{steel}	$G_{composite}$
2.298e+13 Nmm ²	7.538e+12 Nmm ²

G_{steel} 80.769 N/mm²

$G_{composite}$ 93.216,874 mm² 65,4 mm

Formules van Bredt

R. Bredt heeft in 1896 twee handige formules afgeleid voor dunwandige ééncellige gesloten kokers [6] (figuur 14).



$$GI_{tw} = \frac{4A^2}{\sum \frac{L_i}{G_i t_i}} \quad (\text{tweede formule van Bredt})$$

$$\tau_f = \frac{M_{tw}}{2A t_f} \quad (\text{eerste formule van Bredt})$$

$$\Sigma GA_i = \frac{(\sum k_i)^2 t_i}{\sum t_i / (G_i b_i)}$$

Material	t	b	A	G	t^3	$q(tb)$
Staal	12 mm	1.000 mm	12.000 mm ²	80.769 N/mm ²	144 mm ³	0.00000 mm ³ /N
Composite	2 mm	1.000 mm	2.000 mm ²	3.400 N/mm ²	4 mm ³	0.00000 mm ³ /N
Core	292 mm	1.000 mm	292.000 mm ²	40 N/mm ²	85.264 mm ³	0.00730 mm ³ /N
Composite	6 mm	1.000 mm	6.000 mm ²	3.500 N/mm ²	36 mm ³	0.00000 mm ³ /N
					85.448 mm ³	0.00730 mm ³ /N

$GA = 11.699.930 N$

	Nmm ² /mm	Nmm ² /mm	Nmm ² /mm
D11	1.13E+10 Nmm	1.13E+07 Nmm	1.13E+01 Mln
D22	1.13E+10 Nmm	1.13E+07 Nmm	1.13E+01 Mln
D12 = D21 = vD11 = vD22			
D33	7.53E+09 Nmm	7.53E+06 Nmm	7.53E+00 Mln
D44	1.17E+04 N/mm	1.17E+07 N/mm	1.17E+01 MN/m
D55	1.17E+04 N/mm	1.17E+07 N/mm	1.17E+01 MN/m

Bijlage I – Data sheets

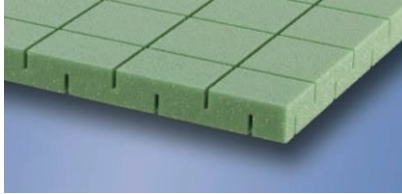
AIREX® C70

GM--TDS-106

Universal Structural Foam

DATA SHEET 07.2011 - Replaces 08.2010

DESCRIPTION



AIREX® C70 is a closed cell, cross-linked polymer foam that combines excellent stiffness and strength to weight ratios with superior toughness.

It is non-friable, contains no CFC's, has negligible water absorption, and provides an excellent resistance to chemicals. The fine cell structure offers an excellent bonding surface.

Compatible with most resins and manufacturing processes **AIREX® C70** is ideally suited as a core material for a wide variety of sandwich structures subjected to both static and dynamic loads. Thanks to its unique lightness (properties vs. density) C70 is the material of choice for applications where lightweight is a priority.

CHARACTERISTICS

- Outstanding strength and stiffness to weight ratios
- Good impact strength
- Low resin absorption
- High fatigue resistance
- Good fire performance (self-extinguishing)
- High sound and thermal insulation
- Good styrene resistance

APPLICATIONS

- **Marine:** Hulls, decks, bulkheads, superstructures, interiors
- **Road and Rail:** Roof panels, interiors, floors, doors, partition walls, side skirts, front-ends
- **Wind energy:** Rotor blades, nacelles, turbine generator housings
- **Aircraft and Aerospace:** Interiors, radomes, galley carts, general aviation (fuselage and wing)
- **Recreation:** Skis, snowboards, surfboards, wakeboards, canoes, kayaks
- **Industrial:** Tooling, tanks, ductwork, containers, covers

PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin injection (RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Thermoforming

www.airexbaltekbanova.com

Europe | Middle East | India | Africa
Airex AG
5643 Sins, Switzerland
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 60
corematerials@3AComposites.com

North America | South America
Baltek Inc.
High Point, NC 27261, USA
T +1 336 398 1900 | F +1 336 398 1901
corematerials.americas@3AComposites.com

Asia | Australia | New Zealand
3A Composites (China) Ltd.
201201 Shanghai, China
T +86 21 585 86 006 | F +86 21 338 27 298
corematerials.asia@3AComposites.com

MECHANICAL PROPERTIES											
Typical properties for AIREX® C70		Unit (metric)	Value ¹⁾	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200	C70.250
Density	ISO 845	kg/m³	Average Typ. range	40	48 43 - 55	60 54 - 69	80 72 - 92	100 90 - 115	130 120 - 150	200 180 - 250	250 225 - 288
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm²	Average Minimum	0.45	0.60 0.50	0.90 0.75	1.45 1.10	2.0 1.7	3.0 2.6	5.2 4.5	6.6 5.3
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm²	Average Minimum	41	48 35	69 55	104 80	130 110	170 145	280 240	350 280
Tensile strength in the plane	ISO 527 1-2	N/mm²	Average Minimum	0.70	0.95 0.8	1.3 1.0	2.0 1.6	2.7 2.2	4.0 3.0	6.0 4.8	7.5 5.5
Tensile modulus in the plane	ISO 527 1-2	N/mm²	Average Minimum	28	35 28	45 35	66 50	84 65	115 95	175 140	230 160
Shear strength	ISO 1922	N/mm²	Average Minimum	0.45	0.55 0.50	0.85 0.70	1.2 1.0	1.7 1.4	2.4 2.1	3.5 3.2	4.7 3.8
Shear modulus	ASTM C393	N/mm²	Average Minimum	13	16 14	22 18	30 24	40 34	54 45	75 68	95 78
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average Minimum	8	10 8	16 10	18 10	23 12	30 20	30 20	30 20
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.031	0.031	0.031	0.033	0.035	0.039	0.048	0.056
Standard sheet	Width	mm ± 5		1330	1270	1150	1020	950	850	750	700
	Length	mm ± 5		2850 ²⁾	2730 ²⁾	2450 ²⁾	2180	2050	1900	1600	1500
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 80	5 to 70	5 to 70	3 to 68	3 to 60	5 to 50	5 to 40	5 to 40
Color				light green	violet	yellow	green	red	blue	brown	green

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except tensile properties (10 mm) and compressive modulus (40 mm)

²⁾ Half size plane sheets for thickness ≤ 8 mm

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate.

The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

GM--TDS-106

CLOSED-CELL CROSSLINK PVC FOAM

NYcell: STRUCTURAL CORE FOAM **Technical data sheet**

			NYcell 040	NYcell 048	NYcell 060	NYcell 080	NYcell 100	NYcell 130	NYcell 200
Density	ISO 845	Kg/m ³	40	48	60	80	100	130	200
Compressive strength	ISO 844	MPa	0,46	0,61	1,00	1,44	2,00	2,79	5,19
Compressive modulus	ISO 844	MPa	36	32	50	80	82	160	275
Tensile strength	ISO 527-2	MPa	0,71	1,10	1,60	2,02	2,71	3,79	5,95
Tensile modulus	ISO 527-2	MPa	27	43	65	65	83	109	1,73
Shear strength	ISO 1922	MPa	0,46	0,48	0,73	1,21	1,64	2,29	3,48
Shear modulus	ASTM C393	MPa	12	13,6	18	31	39	53	74
Shear elongation at break	ISO 1922	MPa	9	9	15	22	26	29	29
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/mK	0,031	0,031	0,031	0,033	0,035	0,039	0,048
Water absorption		%	1	1	1	1	1	1	1
Standard block dimensions		mm	1330 2850 84	1270 2730 80	1150 2450 78	1020 2180 72	950 2050 68	850 1900 58	750 1600 48
Colour			Azure	Lilac	Yellow	Green	Red	Blue	Hazel brown

Reaction to fire classes RF2/75/A RF3/77 DM 26.06.1984 II

The reported data, derived from laboratory test, shall not be taken as minimum guaranteed values. They refer to the nominal density . They are believed to be correct. No warranty is made on the basis of these data. Customers have to verify the data needed for the specific application, performing the necessary tests on the product. No warranty is released for any particular application. NY srl may update the data of this report. Check the last version.

Lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Deze publicatie belicht een reeks onderzoeken welke zich verdiepen in de mogelijkheden voor de renovatie van stalen brugdekken met een VVK sandwichconstructie.

aliancys

F_{IBER}NEERING

ISBN: 978-90-77901-95-3