

UITZETTINGSVRIJ COMPOSIET BRUGDEK

Onderzoek naar onderhoudsvrije voegen



Januari 2014

LKT-COMH-104727-1401

COLOFON

Titel: Uitzettingsvrij composiet brugdek, onderzoek naar onderhoudsvrije voegen

Publicatienummer: LKT-COMH-104727-1401

Datum: Januari 2014

Auteurs: B. eng Pieter Schreuder, B. eng Willem Grisnich, Ir. Peter Bosman

Subsidieverstrekker: Tech For Future

Met medewerking van:

Hogeschool Saxion (penvoerder), Enschede

Christelijke Hogeschool Windesheim, Zwolle

DSM Resins, Zwolle

Teijin fibres, Arnhem

Witteveen+Bos, Deventer

Met dank aan:

TBI Infra Apeldoorn

Spanbeton, Koudekerk aan de Rijn

CROW, Assen

Vilton, Lelystad

Fotografie: Windesheim Zwolle

Dit is een uitgave van Christelijke Hogeschool Windesheim.

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



Samenvatting

In huidige brugconstructies worden veel onderdelen toegepast die een levensduur hebben van minder dan de hoofdconstructie. Dit kan gedeeltelijk worden voorkomen door het toepassen van vezelversterkte kunststoffen ofwel composieten. Om onderdelen als oplegging en voegen te vereenvoudigen en op sommige punten te verbeteren, kan voor het brugdek gebruik worden gemaakt van een uitzettingsvrij composiet.

Een composiet, samengesteld uit vezels en hars, heeft normaal gesproken een positieve uitzettingscoëfficiënt. Dit kan worden opgelost door een vezel te gebruiken met een negatieve uitzettingscoëfficiënt. Daarnaast zal een hars moeten worden gebruikt die duurzaam, sterk en tegelijk betaalbaar is.

Om dit te vinden is in dit onderzoek begonnen met een literatuuronderzoek. Ook is onderzoek gedaan naar de theoretische samenstelling van een uitzettingsvrij composiet. Vervolgens zijn van deze harsen en vezels proefstukken gemaakt door middel van vacuüm-infusie, een techniek waarbij met behulp van onderdruk hars door vezels wordt getrokken, wat na uitharden een composiet oplevert.

De gemaakte proefstukken zijn vervolgens in een klimaatkast in cycli opgewarmd en afgekoeld. Hierbij is met behulp van rekstrookjes de uitzetting gemeten. Deze uitzettingen zijn vervolgens gecombineerd met het temperatuursverloop en vergeleken met referentiemateriaal om tot een uitzettingscoëfficiënt daarvan te komen.

Ook zijn op de proefstukken trek- en druktests uitgevoerd om mechanische eigenschappen als trek- en druksterkte, trek- en drukmodulus en trek- en drukrek te bepalen. Daarnaast is voor eventueel vervolgonderzoek het vochtgehalte bepaald.

Uit de literatuurstudie is gebleken dat er verschillende vezels zijn die voldoen aan de gestelde eisen. De mogelijkheden die uiteindelijk overbleven zijn koolstof- (in verschillende soorten) en aramidevezel (Twaron, Kevlar). In dit onderzoek is alleen Twaron gebruikt, dat gecombineerd is met drie verschillende harssoorten. Uit de resultaten blijkt dat veel proefstukken een lage uitzettingscoëfficiënt hebben, die grofweg in dezelfde range liggen: ongeveer één tiende van die van staal. De treksterkte is ongeveer 4 maal hoger dan van staal, de druksterkte is vergelijkbaar.

In het ontwerp is het gevolg van het toepassen van een uitzettingsvrij brugdek dat de oplegblokken en voegovergangen anders kunnen worden uitgevoerd, wat voordelen heeft voor de aanlegkosten, onderhoudskosten en de overlast voor mensen in en buiten de voertuigen. In vergelijking met beton is het een uitzettingsvrij brugdek duur. Bij grotere brugdek lengtes wordt de onderhoudsbesparing relatief kleiner.

In aanvulling op dit onderzoek zou nog onderzoek gedaan kunnen worden naar de invloed van licht en vochtigheid op de gebruikte vezel, verbetering van de drukcapaciteit van aramidevezelversterkte kunststoffen (onder meer door toepassen van een combinatie met andere soorten vezels in het composiet) en gebruik van aramideweefsels voor een meer exacte lay-out van de proefstukken. Mochten de vezels met de juiste eigenschappen in de toekomst goedkoper, zou dit concept tegen die tijd zeker nog eens bekeken moeten worden.



Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport voor ons onderzoek naar uitzettingsvrije composiet brugdekken, in opdracht van het Lectoraat Kunststoftechnologie van de Christelijke Hogeschool Windesheim. In dit onderzoek hebben wij gezocht naar een composiet dat onder invloed van temperatuur niet uitzet.

Wij hebben beiden het VWO afgerond met uitstroomprofiel Natuur en Techniek. Tijdens de studie Civiele Techniek hebben wij de minors Constructief Ontwerpen en Verkeerstechniek gevolgd.

Allebei hebben wij ervaring opgedaan in de uitvoering van civiele projecten tijdens een half jaar stage. Daarnaast heeft Willem een half jaar stage gelopen in de werkvoorbereiding van de Johan Frisosluis in Stavoren. Pieter heeft een half jaar stage gelopen bij een constructiebureau en heeft zich verdiept in de berekeningsmethodes van betonconstructies volgens de Eurocode. Ook hebben wij beiden nog een half jaar gewerkt, Willem bij een klein bedrijf in vezelversterkte kunststoffen en Pieter bij hetzelfde bureau als waar hij stage heeft gelopen.

Tijdens het doorbladeren van een lesboek over voorgespannen beton viel het oog van dhr. Bosman, docent op het Windesheim en onderzoeker bij het Lectoraat Kunststoftechnologie, op iets merkwaardigs. Het ging over kunststof voorspanmateriaal van vezels met een negatieve uitzettingscoëfficiënt¹. Dat zou vast een fout zijn, maar bij nader inzien bleek dat het toch juist was. Vezels met een negatief thermische uitzettingscoëfficiënt: vezels worden dus korter worden bij een verhoging van de temperatuur. Aan de hand hiervan zijn bij dhr. Bosman wat vragen en ideeën gerezen.

Dit zou mogelijkheden kunnen bieden voor een materiaal, in dit geval een composiet, wat bij temperatuursveranderingen niet of nauwelijks uitzet. Een combinatie van vezels die negatief uitzetten bij verhoging van de temperatuur en een matrix die uitzet bij een verhoging van de temperatuur zou samen moeten kunnen resulteren in een uitzettingsvrij composiet.

Tijdens onze voorbereiding op het afstuderen werden wij door Peter Bosman gewezen op dit onderwerp, wat tevens deel is van een groter onderzoek van Peter zelf naar composieten binnen Built Environment. Het leek ons een interessant en uitdagend onderwerp en voor Willem had dit een interessant raakvlak met zijn werk. Wij hoopten dat wij met ons onderzoek een zinvolle bijdrage kunnen leveren aan het onderzoek van Peter binnen het Lectoraat Kunststoftechnologie. Inmiddels kunnen we wel stellen dat dit ook gebleken is.

Dit onderzoek was niet mogelijk geweest zonder de medewerking van (materiaal- en materieel-) sponsors. Allereerst willen we, in de persoon van Ron Verleg, DSM Composite Resins te Zwolle bedanken voor het ter beschikking stellen van de gebruikte harsen, het gebruikte materieel, de tijd die zij in ons project gestoken

¹ Constructieleer Voorgespannen Beton, pag. 243, tabel 7.2



hebben en de onvermoeibare stroom kennis en kunde die ons zeer geholpen heeft.

Daarnaast willen we ook Teijin Aramid BV te Arnhem, en met name Edwin Dommershuijzen, bedanken voor het ter beschikking stellen van de benodigde vezels en weefsels, en ook weer alle kennis, kunde en tijd die ons gegeven is.

Ten slotte willen we Witteveen+Bos bedanken voor hun tijd en ideeën tijdens het ontwerpproces.

Zwolle, 24 januari 2014

Willem Grisnich
Pieter Schreuder



Inhoud

1. Achtergrond	pagina	8
2. Probleembeschrijving.....	pagina	10
2.1. Bestaande oplossingsrichting		10
2.2. Te onderzoeken oplossingsrichting		10
3. Vraagstelling en subvragen	pagina	11
4. Onderzoeksmethode.....	pagina	12
4.1. Literatuurstudie		12
4.2. Proefstukken maken		12
4.2.1. Castings		13
4.2.2. VA-RTM.....		13
4.2.3. Benattingsproef		15
4.2.4. Reactiviteitstest		16
4.2.5. Waterstraalsnijden		16
4.3. Thermische uitzetting meten		17
4.3.1. Proefopstelling klimaatkast		18
4.3.2. Referentiemateriaal.....		20
4.3.3. Data-acquisitie		21
4.3.4. Gegevens		22
4.4. Treksterkte bepalen		24
4.5. Druksterkte bepalen.....		24
4.6. Vochtgehaltetests		26
4.7. Vezelpercentage.....		26
4.8. Kostenanalyse		27
5. Resultaten	pagina	30
5.1. Vezel en hars		30
5.1.1. Polymeer-matrix composieten		30
5.1.2. Uitzettingsvrij composiet.....		32
5.1.3. Vezel		32
5.1.3.1. Productie		32
5.1.3.2. Vezelsoorten.....		34
5.1.3.3. Selectie		36
5.1.4. Harsen.....		38
5.1.4.1. Thermoplasten		38
5.1.4.2. Thermoharders.....		39
5.1.4.3. Vergelijking UP, VE en EP		41
5.1.5. Aanhechting.....		43
5.1.6. Berekeningen aan composieten		44
5.1.6.1. Klassieke Laminaten Theorie		45
5.1.6.2. Uitzettingscoëfficiënten lamellen.....		45
5.1.7. Verlenging anders dan door temperatuur		46
5.1.7.1. Krimp en kruip		46
5.1.7.2. Krachtwerking.....		48
5.2. Thermische uitzetting.....		49



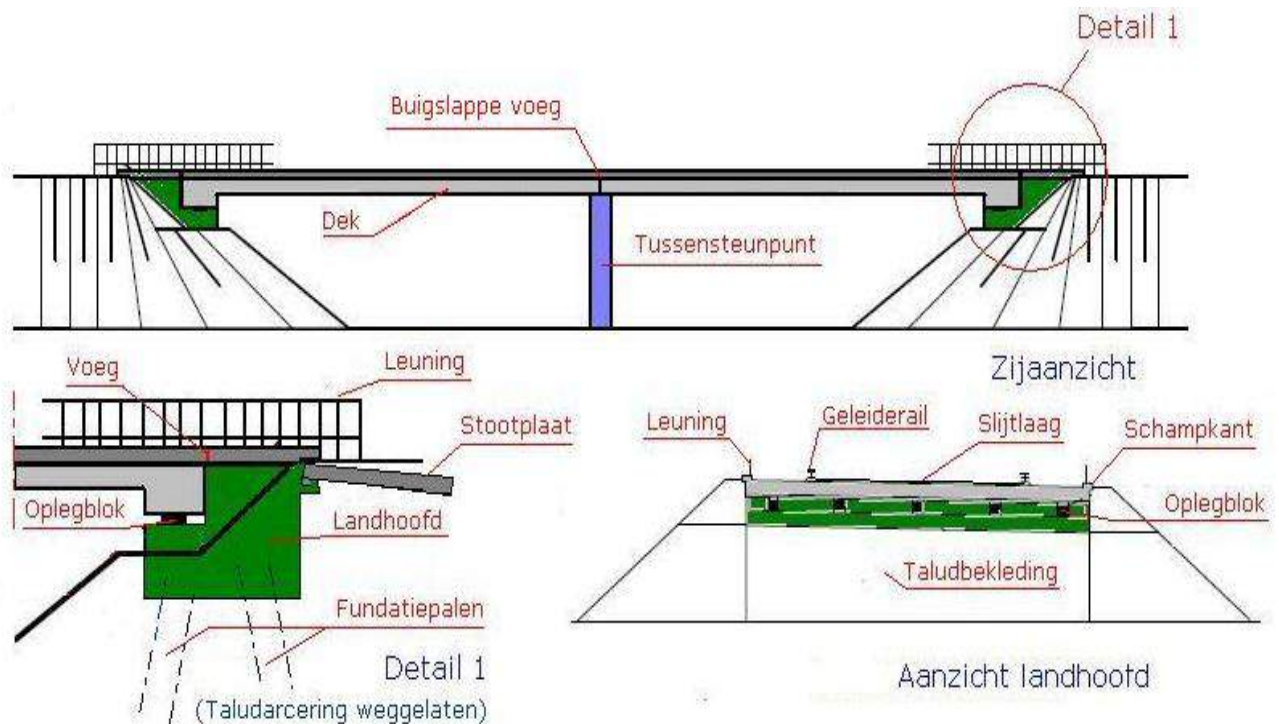
5.2.1. Rekstrookjes	49
5.2.2. Controlemeting staal	49
5.2.3. Gemeten uitzettingscoëfficiënten	50
5.2.4. DMA	52
5.3. Treksterkte	54
5.4. Druksterkte	57
5.5. Vochtgehalte	60
5.6. Vezelpercentage.....	61
5.7. Ontwerp	62
5.7.1. Opbouw	62
5.7.2. Oplegging	63
5.7.3. Voegen	64
5.7.4. Geluid bij voegen	65
5.7.5. Concept-ontwerp	68
5.8. Kostenanalyse	68
6. Conclusie	pagina 70
7. Discussie	pagina 72
8. Aanbevelingen.....	pagina 74
8.1. Vezel.....	74
8.2. Proefstukken	74
8.3. Eigenschappen	75
8.4. Kosten en alternatieven	75
9. Literatuurlijst	pagina 77
Bijlagen.....	pagina 79
I Maken van proefstukken	
II Fotocollage VA-RTM	
III Vaststellen harsopname door vezel met en zonder additieven	
IV Reactiviteitstest Atlac 430	
V Vezeleigenschappen	
VI Resultaten trektesten	
VII Resultaten druktesten	
VIII Bepaling vezelpercentages	
IX Referentiemateriaal Invar 36	
X Layout waterstraalsnijden	
XI Resultaten testen uitzettingscoëfficiënt	
XII Uitzettingsvrij composiet met Twaron en UHM Carbon mbv KLT	
XIII Dimensionering uitzettingsvrije brugdekken	
XIV Kostenraming uitzettingsvrije brugdekken	



1. Achtergrond

Bruggen en viaducten hebben veelal een levensduur in de orde van 100 jaar. Bij bestaande vaste betonnen bruggen bestaat een aanzienlijk deel van het onderhoud uit het inspecteren, onderhouden en vervangen van onderdelen met een kortere levensduur dan de gehele brug. Dek, steunpunten, fundering en overgangsplaten naar de aarden baan worden regulier niet vervangen binnen de levensduur van de brug. Wel te vervangen onderdelen zijn onder meer leuning, geleiderail, slijtlaag, voeg, oplegging, hemelwaterafvoer en schampkant.

Door toepassing van vezelversterkte kunststof in plaats van stalen leuning kan vervanging tijdens de 100 jaar worden voorkomen. Dit soort ontwerpwijzigingen vragen veelal een grotere initiële investering in de bouwphase, maar kunnen zich ruim terug verdienen tijdens de exploitatiefase. Dit zelfde geldt ook voor kunststof (i.p.v. betonnen) brugdekken, echter in mindere mate omdat deze binnen de 100 jaar normaliter niet vervangen hoeven te worden².



Afbeelding 1.1, schematische voorstelling brug

Een vezelversterkte kunststof is een samenstelling (composiet) van vezels die trek op kunnen nemen in een matrix van hars. De verharde hars houdt de vezels op vaste afstand van elkaar, waarmee het composiet ook druk op kan nemen. In monoliet composiet brugdekken worden veelal doorgaande vezels in twee richtingen toegepast.

Veel synthetische vezels kennen een negatieve thermische uitzettingscoëfficiënt. Dat wil zeggen dat ze korter worden in de lengterichting bij hogere temperaturen. Door dit soort materialen toe te passen in een hars met

² Handleiding Werken met Instandhoudingsplannen



een positieve thermische uitzettingscoëfficiënt, kan in theorie een Expansion Free Composite (EFC) worden samengesteld. Over bestaande toepassingen van uitzettingsvrij composiet is niet veel bekend. Er zijn wel bekende toepassingen van uitzettingsarm composiet. De façade van het Stedelijk Museum in Amsterdam is hier een mooi voorbeeld van³. Een gevel van 100m zonder voegen. Een uitzettingsvrij composiet zou bij uitstek geschikt zijn voor brugdekken. De voorzieningen die er voor zorgen dat huidige betonnen brugdekken kunnen uitzetten, voegovergangen en oplegblokken, vergen veel onderhoud. Bij een uitzettingsvrij composiet brugdek zou dit onderhoud niet nodig zijn, wat een aanzienlijke besparing op zou kunnen leveren.

Als voordelen voor vaste bruggen met EFC brugdekken worden gezien dat er geen dure en luidruchtige voegen nodig zijn, ook niet bij grote brugdek lengtes, een levensduur van 100 jaar zonder groot onderhoud en dat beide landhoofden via het dek tegen elkaar kunnen worden afgestempeld, voorzien van minder palen die bovendien te lood i.p.v. schoor kunnen staan. Een bijkomend voordeel is dat er meer ontwerpvrijheid is door gebruik te maken van composieten.

³ Stedelijk Museum Amsterdam: uitgekiende mix van vezels en harsen houdt 'badkuip' strak



2. Probleembeschrijving

Bij voegen van bruggen en viaducten leidt lekkage van hemelwater (met dooizouten) tussen dek en landhoofden regelmatig tot aantasting van slecht bereikbare beton(wapenings)delen en daarmee tot kosten voor preventie, inspectie en onderhoud; bovendien zijn voegen een extra bron van geluidsoverlast. Voegen bestaan veelal uit een rubber profiel in een stalen klauw. Het rubber profiel moet om de 5-10 jaar vervangen worden en de stalen klauw, ingestort in het landhoofd en dek, om de 25-30 jaar.

2.1 Bestaande oplossingsrichting

Betonnen brugdekken tot een lengte van 60 meter worden steeds vaker uitgevoerd als zogenaamde integraalbruggen^{4,5,6}. Hierbij worden voegen en opleggingen voorkomen door het dek monoliet aan de landhoofden te verbinden.

Bij uitzetten van het dek in de zomer worden de landhoofden tegen de grond in gedrukt. Door achter de landhoofden een aangepaste overgangsconstructie naar de aarden baan te maken, die deze vervormingen kan opnemen, zijn voegen in het asfalt niet meer nodig. Een aangepaste overgangsconstructie is nodig vanaf een betonnen deklengte van 15 meter en heeft een verwachte levensduur van 50 jaar. Met oplopende aanpassingen aan de overgangsconstructie en oplopende horizontale grondbelasting tegen de landhoofden, is een integraalbrug haalbaar tot een deklengte van maximaal 80 meter.

2.2 Te onderzoeken oplossingsrichting

Bij toepassing van uitzettingsvrij composiet in brugdekken kan de speciale overgangsconstructie achterwege blijven. Samengestelde materialen met verschillende uitzettingseigenschappen brengen echter interne aanhechtingsperikelen met zich mee. Voorts moet blijken of er überhaupt financieel haalbare, uitzettingsarme composieten zijn samen te stellen, die geschikt zijn om grote belastingen te dragen.

Daarnaast kan bij de toepassing van een uitzettingsvrij composiet in beweegbare brugdekken de afmeting van de bijbehorende open voegspleet worden beperkt. De verkeersveiligheid en het verkeerscomfort zouden hierbij gebaat zijn.

⁴ Integraal kunstwerk met verassingingen

⁵ Voegloze overgangen van asfaltbeton voor integraalbruggen

⁶ Rijkswaterstaat Standaarddetails voor betonnen bruggen



3. Vraagstelling en subvragen

Voorgaande hoofdstukken brengen ons tot de volgende vraagstelling en subvragen:

1. Welke combinatie van vezel en hars is nodig om een uitzettingsvrij composiet samen te stellen dat technisch gezien geschikt is om toe te passen in een brugdek?
 - a. Welke vezels met negatieve thermische uitzettingscoëfficiënt in lengterichting zijn op dit moment beschikbaar op de markt?
 - b. Welke harsen zijn op dit moment beschikbaar in de markt?
 - c. Aan welke eisen moet een composiet voldoen als het wordt toegepast in een brugdek?

2. Hoe verhoudt een ontwerp van een uitzettingsvrij composieten brugdek zich tot veel voorkomende hedendaagse brugconstructies?
 - a. Hoe zien de brugdekontwerpen van een hedendaagse brugconstructie eruit?
 - b. Hoe ziet een brugdekontwerp van een vergelijkbare brug uitgevoerd in EFC eruit?

3. Wat zijn de kosten van een uitzettingsvrij brugdek in vergelijking met een betonnen brugdek met dezelfde afmetingen?



4. Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk staat beschreven welke stappen genomen zijn in dit onderzoek. In paragraaf 4.1 wordt de literatuurstudie beschreven. In deze studie is gezocht naar achtergrond en informatie over het onderwerp. In paragraaf 4.2 is beschreven hoe de benodigde proefstukken zijn gemaakt met behulp van Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VA-RTM). In de paragrafen 4.3 tot 4.7 staat beschreven hoe de proefstukken zijn getest in zowel langs- als dwarsrichting op de thermische uitzetting, trek- en drukcapaciteit. In hoofdstuk 4.8 staat de case beschreven voor de kostenanalyse.

4.1 Literatuurstudie

Als basis voor deze literatuurstudie is uitgegaan van de Gurit Guide to Composites. Dit was hoofdzakelijk om basiskennis te verzamelen over harsen, vezels en de samenwerking daartussen. Ook stond hier algemene kennis in over eigenschappen van composieten en de bepaling daarvan. Aan de hand van dit document zijn verschillende aanknopingspunten gevonden voor nader onderzoek. Voor algemene kennis over harsen en vezels is onder andere verder gezocht in productbrochures, vergelijkingen van leveranciers en dictaten van universiteiten en hogescholen. Waar mogelijk zijn ook fysieke bronnen gebruikt.

Voor de eigenschappen van vezelversterkte composieten en de bepaling daarvan is hoofdzakelijk gezocht in wetenschappelijke artikelen van het Journal of Material Science, een verzameling van kwalitatief hoogwaardige artikelen die online doorzoekbaar zijn (op abstracts), en vervolgens te bestellen zijn, wat ook veelvuldig gedaan is. Daarnaast zijn natuurlijk ook andere relevante bronnen meegenomen.

Algemeen punt van aandacht bij de uitvoering van het literatuuronderzoek was dat een enkele bron te weinig zekerheid biedt om een definitieve bewering te kunnen doen. Zeker in een nog jong onderzoeksgebied als dit worden veel verschillende beweringen gedaan die op het eerste gezicht allemaal een kern van waarheid bevatten, maar nog niet altijd geverifieerd zijn door andere bronnen. Veel product specifieke informatie was niet via literatuur of internet te vinden. Hiervoor is contact opgenomen met betrokken bedrijven.

4.2 Proefstukken maken

Alle proefstukken zijn gemaakt met behulp van Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VA-RTM). Zowel de proefstukken met vezels in één richting als met vezels in twee richtingen. Er is gekozen om vier variaties in vezelopbouw toe te passen en die elk te maken met drie verschillende soorten hars: één polyester-, één vinylester- en één epoxyhars.

Een proefstuk is gemaakt met vezels in één richting (0_2), en drie proefstukken met vezels in twee richtingen met een verhouding tussen vezels in langs- en dwarsrichting van 1:2 ($0_2/90$), 1:3 ($0_6/90_2$) en 1:4 ($0_4/90$). Dit omdat in de beoogde toepassing als brugdek ook vezels in meerdere richtingen toegepast zullen moeten worden.

De soorten hars zijn gekozen in overleg met DSM Composite Resins. Voor de polyester is gekozen voor de Synolite 0175-N-7. Deze hars heeft goede benatting en goede mechanische eigenschappen. Voor de



vinylesterhars is gekozen voor een Atlac 430. Dit is een typische hars die DSM zou adviseren voor het gebruik in de beoogde toepassing als brugdek. Voor de epoxyhars is gekozen voor de Hexion MGS RIMR 235. Deze hars was voorradig bij DSM. DSM maakt zelf geen epoxyharsen dus is gekozen voor een epoxy die daar voorradig was.

Van elk proefstuk zijn platen gemaakt van 400x400 mm, waaruit de benodigde testsamples zijn gehaald. In bijlage I staan de verschillende proefstukken nader uitgewerkt. In bijlage X staat een tekening hoe de testsamples uit de platen gehaald zijn. Vervolgens zijn deze testsamples getest op thermische uitzetting, trek- en drukcapaciteit.

4.2.1 Castings

Van de gekozen drie soorten hars is een harsplaat (zonder vezels) gemaakt. Hiervoor worden twee glasplaten (400x300 mm), met aan drie zijden een afdichtingsrubber op elkaar geklemd met lijmtangen. Vooraf zijn de glasplaten in de was gezet om het lossen na uitharden te vergemakkelijken. Door het rubber ontstaat er een ruimte van 4 mm tussen de twee glasplaten en zo ontstaat een mal van 380x280x4 mm. Aan een lange zijde blijft er een opening waardoor de hars tussen de twee glasplaten gegoten kan worden. Na het mengen van de hars en het uithardingssysteem wordt de hars in de mal gegoten. Daarna is de hars op kamertemperatuur uitgehard en in een oven *ge-postcured*. Uithardingssystemen en de daarbij behorende mengverhoudingen en cure-tijden en -temperaturen staan vermeld in bijlage I.

4.2.2 VA-RTM

Voordat met VA-RTM begonnen kon worden om de composiet proefstukken te maken, moest dit eerst aangeleerd worden. Bij de oefening zijn twee proefstukken gemaakt van ongeveer 400x400mm. Als eerst is de tafel grondig schoongemaakt. Vervolgens is de tafel beschermd met een plastic vacuümzeil, vastgeplakt met *tacky tape*, en vacuüm getrokken. Om de vacuüm ook in de verre hoeken van de tafel te waarborgen is een doek onder het zeil gelegd. Dit is de ondergrond waarop de uiteindelijke infusie gaat plaatsvinden.

De vezelmatten zijn op maat gebracht, in de gewenste volgorde gestapeld en op de tafel gelegd. Hiertussen is een spiraalslang gelegd om de hars aan te voeren. Dit kan vanuit het midden omdat vacuüm in principe alzijdig is. Hier overheen is een *peel ply* gelegd. Dit is een heel fijnmazig doek met een Teflon coating, waardoor het uiteindelijke product makkelijk loskomt van de overige onderdelen van de infusie. Op deze *peel ply* zijn aan de uiteinden spiraalslangen voor de afvoer van de lucht en hars geplaatst. Alle afvoerslangen zijn gecombineerd en verbonden met de vacuümpomp.

Dit geheel is afgedekt met een grofmazig doek of *flow mesh*, waarmee een goede doorstroming van de hars naar alle zijden van het product wordt gewaarborgd. Deze *flow mesh* is niet helemaal tot de uiteinden van het product gelegd, omdat dan de kans groot is dat de hars langs het product meteen afgevoerd gaat worden. Dit geheel is afgedekt met nog een vacuümzeil vastgemaakt met *tacky tape*, en vacuüm getrokken.

Nadat het vacuümzeil gecontroleerd is op lekken, is de hars gemengd, waarna het blik met hars is aangesloten op de aanvoerslang. Na opendraaien van de toevoerkraan loopt de hars door middel van onderdruk het proefstuk in. Als dit proefstuk helemaal gevuld is, is de afvoerkraan gesloten en kunnen de proefstukken uitharden. Na uitharden zijn alle folies verwijderd, waarbij de *peel ply* ervoor zorgt dat dit makkelijk gaat.



Omdat de vier vezelvarianties tegelijk in één infusie gemaakt zijn, zijn deze stukken met behulp van een diamantzaag van elkaar los gezaagd. Daarna zijn de proefstukken *ge-postcured* in de oven.

De vezelmatcombinaties, gebruikte harsen met de gebruikte uithardingssystemen, mengverhoudingen en (post)cure-tijden en temperaturen staan vermeld in bijlage I.

De vacuüm infusies van de Synolite 0175-N-7 en de Epoxy Hexion 235 verliepen in één keer goed. De vezels waren goed benat en de hars was goed uitgehard. Bij de infusie met de Atlac kwamen er wat problemen naar voren. Bij het maken van de eerste vier proefstukken met de Atlac 430 kwam het probleem naar voren dat de vezels niet goed benat waren en dat de hars niet voldoende uitgehard was.

Het eerste proefstuk had als probleem dat de vezels niet goed benat waren. Er waren delen vezel in het proefstuk waar geen hars omheen zat. De vezel was droog, zie afbeelding 4.1. Dit kwam hoogstwaarschijnlijk door een lek bij de hars aanvoer. Hierdoor werd continu lucht aangezogen en door de hars meegenomen.

Bij het tweede proefstuk is zowel aan de onderkant als aan de bovenkant een flow-mesh toegepast om de benatting te verbeteren. Het tweede proefstuk had als probleem dat de vezels niet goed genoeg benat waren en dat de hars niet hard was. De hars was nog plakkerig en het proefstuk rook na het lossen nog sterk naar styreen.



Afbeelding 4.1 / 4.2 / 4.3, droge vezel aan de rand, niet geharde hars, delen droge vezel

Bij het derde proefstuk is voor de infusie een aantal benattingsproefjes gedaan (zie §4.2.3). De toegevoegde additieven en de hoeveelheden zijn vermeldt in bijlage III. Het resultaat na de derde keer, waarbij gekozen is voor een flow-mesh aan de bovenzijde, was weer een niet uitgeharde hars, zie afbeelding 4.2. Oorzaak hiervoor zou de lage piektemperatuur van 56°C kunnen zijn. In dunne lagen zoals in dit geval is het lastig om die piektemperatuur te bereiken.

Bij het vierde proefstuk is voor de infusie een aantal reactiviteitstesten gedaan (zie §4.2.4). Hieruit kwam naar voren dat 10% styreen in plaats van 15% styreen betere resultaten gaf. De geltijd werd korter en de piektemperatuur lag boven de 100°C.

Maar ook deze keer was de hars niet voldoende gehard. Bij het lossen bleek dat de onderste lagen vezel van de $[0_4/90]$ en de $[0_6/90_2]$ wel benat waren, maar de hars niet was uitgehard. Dit zou kunnen liggen aan de lage



temperatuur in de hal. De goede benatting is de verklaren door het feit dat er deze keer langzaam was geïnjecteerd. De eerste drie keren was het flow-mesh na ongeveer 10 minuten vol. De vierde keer duurde het 35 minuten voor het flow-mesh vol zat.

Bij het vijfde proefstuk is het effect van een curen bij 40°C getest. Het proefstuk was 200x400mm met 8 lagen vezel ($O_6/90_2$) met een flow-mesh aan zowel de onderkant als de bovenkant. Nadat het proefstuk volledig gevuld was met hars, is het proefstuk verwarmd tot 40°C. Ook is deze keer langzaam geïnjecteerd. Deze keer was het proefstuk goed gelukt en is deze methode ook gebruikt voor het maken van het zesde proefstuk, waaruit vervolgens de testsamples zijn gehaald.

4.2.3 Benattingsproef

Om te bekijken welk additief zorgde voor een betere benatting zijn er acht verschillende additieven toegevoegd aan de Atlac 430. Welke additieven zijn toegevoegd en in welke hoeveelheden staat vermeld in bijlage III. Deze proef is zelf bedacht om snel en eenvoudig een oplossing te vinden voor de hiervoor beschreven problemen.

Op een stukje Twaron vezelmat (300 gr/m^2) wordt een druppel van 0,5 ml gelegd met behulp van een pipet. De vezelmat is op een glasplaat gelegd, zodat eenvoudig aan de onderkant van de vezelmat gekeken kon worden. Na ongeveer 10 minuten wordt gekeken in welke mate de druppel zich verspreid heeft zowel dóór de mat, als in langs- en dwarsrichting van de vezel. Het beste resultaat werd verkregen door de Atlac 430 + 15% styreen. De druppel werd na verloop van tijd het grootst in zowel langs- als dwarsrichting. Zonder additieven zou de benatting dus beter moeten zijn dan met additieven. Een mogelijke oorzaak voor de slechte benatting zou kunnen zijn dat er te snel geïnjecteerd is. Ook is gekeken naar het effect van een andere peroxide. Bij de peroxide gebruikt bij de tweede infusie bleek uit de reactiviteitstest dat de hars niet uithardde.

4.2.4 Reactiviteitstest

Omdat bij zowel de tweede als de derde test de hars niet voldoende uitgehard was na 18h zijn een aantal reactiviteitstesten gedaan om te kijken welke verandering aan de samenstelling zorgt voor een gelijkblijvende geltijd en een hogere piektemperatuur. De lange geltijd is nodig zodat er genoeg tijd is om de proefstukken te injecteren. De hoge piektemperatuur is nodig om te hars voldoende te laten uitharden. De verschillende gemaakte combinaties van hars en uithardingssysteem en de gebruikte hoeveelheden staan vermeld in bijlage IV. De hierna beschreven methode is een standaard methode toegepast bij DSM, die voor dit onderzoek is overgenomen.

Nadat de hars is afgewogen worden de accelerator en inhibitor toegevoegd. Na het mengen wordt het geheel verwarmd met een föhn tot 25°C. Daarna wordt de peroxide toegevoegd. Na ongeveer één minuut roeren werd de hars in een reageerbuisje gegoten en met een thermokoppel in het waterbad (25°C) geplaatst. De resultaten konden worden afgelezen uit een tijd-temperatuurgrafiek op de computer.

4.2.5 Waterstraalsnijden

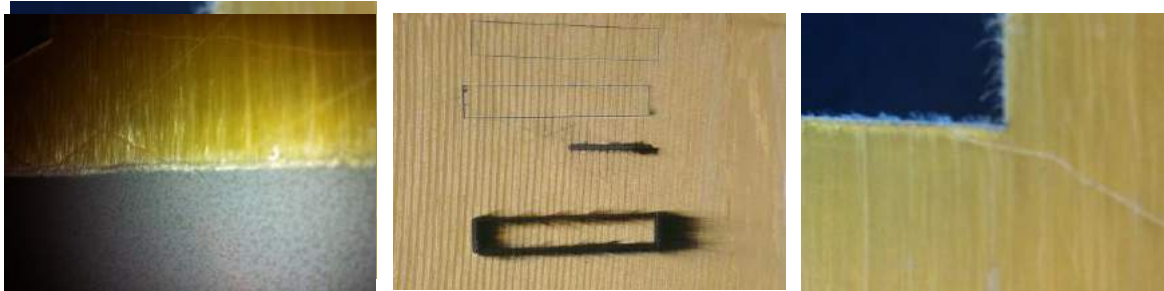
Na het lossen van de proefstukken is met behulp van een cirkelzaag met diamantschijf de spiraalslang voor de harsaanvoer van de platen gezaagd. Wat opviel was dat de hars aan de randen van de zaagsnede versplinterde.



Voor het testmateriaal is dit erg ongunstig omdat er aan de randen al een verstoring in het materiaal zit. Deze verstoring zou een mogelijk inleiding kunnen zijn voor een breuk.

Een andere optie die geschikt leek was lasersnijden. Op Windesheim staan verschillende lasersnijapparaten. Op één apparaat is een poging gedaan om een rechthoek uit een plaat te halen. Zoals op afbeelding 4.2 te zien is, is dat het materiaal verbrandde. Ook kwam de laser niet door het materiaal heen. Alleen de eerste lagen vezel verbranden.

De laatste optie om aramide-versterkt kunststof te kunnen snijden was waterstraalsnijden. Van deze methode is uiteindelijk gebruik gemaakt om de benodigde samples voor thermische uitzetting, trek- en druktesten uit de platen van 400x400 mm te halen. Door water onder extreem hoge druk (3800 bar) door een straalbuis te laten spuiten ontstaat een waterstraal die zo krachtig is dat door vrijwel alle materialen snijdt. Grote voordeel is de vrijwel braamloze snede en dat het materiaal tijdens het snijden niet warm wordt.



Afbeelding 4.4 / 4.5 / 4.6, Zaagsnede cirkelzaag, lasersnijden, waterstraalsnijden

4.3 Thermische uitzetting

Om de thermische uitzetting te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van rekstrookjes. De hiervoor benodigde methode is beschreven door de fabrikant, Vishay Precision Group⁷.

Door een rekstrookje te plakken op een materiaal met een bekende thermische uitzettingscoëfficiënt (zie paragraaf 4.3.2) en een rekstrookje te plakken op een materiaal waarvan de thermische uitzettingscoëfficiënt onbekend is, is de onbekende thermische uitzettingscoëfficiënt te bepalen.

De plaatjes waarop de rekstrookjes geplakt moeten worden zijn uit dezelfde plaat gesneden als de trek- en drukstaafjes. De plaatjes zijn 80x80 mm. Op elk plaatje zijn twee rekstrookjes geplakt waarvan één rekstrookje in langsrichting (met de vezelrichting mee) en één rekstrookje in dwarsrichting (haaks op de vezelrichting).

De gebruikte rekstrookjes in dit onderzoek zijn de Micro-Measurements CEA-06-125UW-350. Alle rekstrookjes hadden hetzelfde *foil lot number* (A83AD844) en *batch number* (CF561593). Voor deze rekstrookjes is gekozen omdat dit type rekstrook ook is gebruikt in ander onderzoek⁸ en uit de advisering van de firma J.J. Bos BV te Gouda kwam dit type ook naar voren als meest geschikt voor dit onderzoek.

De eigenschappen van dit type rekstrook zijn: een weerstand van $350 \Omega \pm 0,3\%$,

⁷ Vishay Precision Group Tech Note TN-513-1

⁸ Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Composites Using Strain Gages



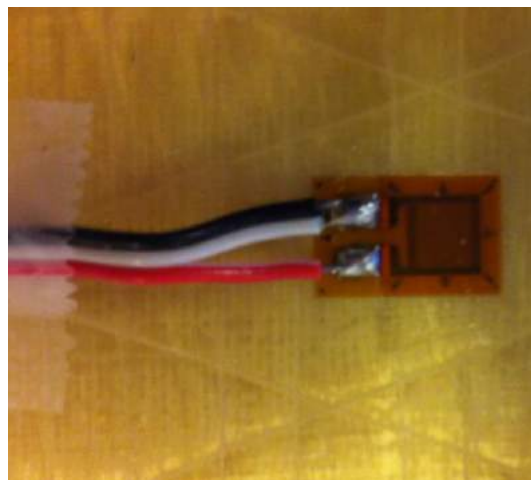
een rekrange van 5%, een temperatuur range -75°C tot 175°C, bij 24°C een gage factor van $2,135 \pm 0,5\%$, een dwarsgevoeligheid van $0,7\% \pm 0,2\%$ en een temperatuurcoëfficiënt van de gage factor van $(1,3 \pm 0,2)\%/100^\circ\text{C}$. Voordat de rekstrookjes op het materiaal geplakt kunnen worden, is het oppervlak eerst ontvet met isopropyl alcohol. Daarna is het oppervlak lichtjes nat opgeschuurd in Conditioner A met 400-grit schuurpapier. Daarna is het oppervlak pH-neutraal gemaakt met Neutralizer. Met een potlood en een geodriehoek is een streepje gezet met de vezelrichting mee en er haaks op. Het rekstrookje is met een plakbandje op de juiste plek gepositioneerd. Het plakbandje is alleen over de soldeertaps geplakt. Door één zijde van het plakband voorzichtig terug te halen komt de onderkant van het rekstrookje naar boven. Zo zijn zowel het rekstrookje als het materiaaloppervlak te lijmen. De gebruikte lijm is de M-Bond 610. Na beide lijmoppervlakken 5-10 minuten te laten drogen is het rekstrookje op de juiste plek terug geplaatst.



Afbeelding 4.7, postcuren in de oven

Over het gelijmde oppervlak en het rekstrookje is een stukje teflon *peel-ply* gelegd en daarop een stukje rubber met een metalen strip. De *peel-ply* is voor een eenvoudige lossing na het harden. Ook aan de onderkant van het materiaal, onder het rekstrookje is een metalen strip gelegd. Het geheel is op elkaar gedrukt met een klem. Het stukje rubber en de metalen strips zijn voor het gelijkmatig overdragen van de druk van de klem. Het geheel is daarna in een oven gelegd, 4 uur op 100°C, voor de curing van de epoxylijm.

Om de rekstrookjes te kunnen uitlezen moet verbinding gemaakt worden met een logger. Dit is gedaan met een driedraads aansluiting. Er is gebruik gemaakt van de 326-DFV 3 conductor kabel van Micro-Measurement met een zwarte, een witte en een rode draad. De draad heeft een specifieke weerstand van $0,141 \Omega/\text{m}$. Eerst werden de draden gestript. Daarna werden de blootgelegde draden van de zwarte en de witte draad in elkaar gedraaid. Deze twee draden samen moesten op één tap worden aangesloten en de rode draad op de andere tap. De kale stukken draad werden eerst vertind en daarna werd op elke tap een druppel tin gelegd. Als laatste werd de druppel op de tab verhit zodat de druppel vloeibaar werd en is het vertinde einde van de draad in de vloeibare druppel gedrukt.



Afbeelding 4.8, gesoldeerd rekstrookje

Met behulp van een microscoop kon gecontroleerd worden of het gewenste resultaat was bereikt.



4.3.1 Proefopstelling klimaatkast

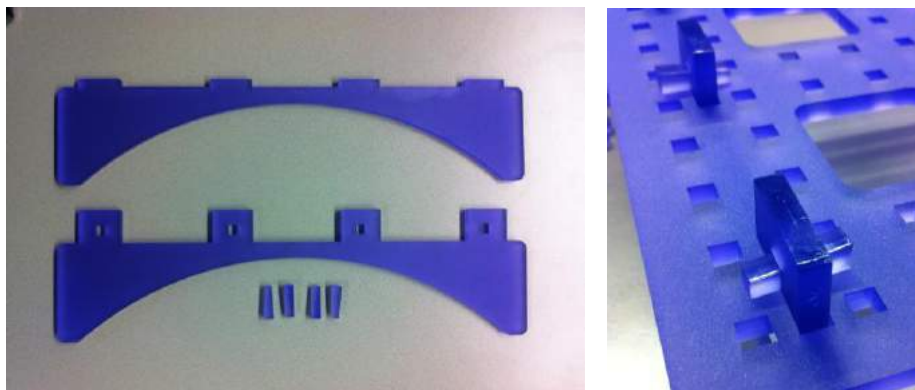
Belangrijk punt van aandacht bij het meten van de thermische uitzetting in de klimaatkast was het plaatsen van de proefstukken in de klimaatkast. Het is belangrijk dat de proefstukken bij het uitzetten zo min mogelijk weerstand ondervinden door wrijving. Dus plat op de bodem van de klimaatkast leggen was geen optie. Een ander punt van aandacht was het feit dat de proefstukken in dikte varieerden. De dikte varieerde tussen 0,8 mm en de 4,1 mm. Ook mochten de proefstukken niet buigen of doorhangen. De proefstukken zouden rechtop moeten staan en vrij naar links of rechts moeten kunnen bewegen.

Daarom is een modulaair systeem gemaakt, bestaande uit een gaatjesbord en proefstukhouders. De proefstukhouders zouden in het gaatjesbord gestoken kunnen worden en de proefstukken zouden in de houders gezet kunnen worden. In de lengte zou het proefstuk vrij kunnen uitzetten en naar links en naar rechts zou het proefstuk ook vrij kunnen bewegen. Omdat de diktes van de proefstukken bekend waren, kon voor elke serie proefstukken aparte houders gesneden worden om de proefstukken zo goed mogelijk neer te kunnen zetten.

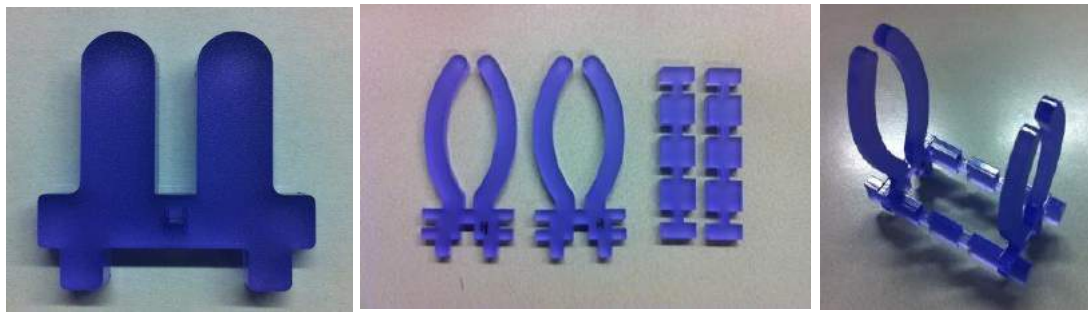
Om het gaatjesbord niet op de bodem van de klimaatkast te zetten is het bord op een aantal poten gezet. Op de poten zaten vier pennen die in de vier daarvoor bestemde sparingen in het gaatjesbord vielen. In AutoCAD is het model uitgetekend en met een lasersnijder is het model uit een plaat perspex (polymethylmethacrylaat, PMMA) gesneden. Voordeel van dit materiaal is dat het bestand is tegen de temperaturen waarbij in dit onderzoek gemeten gaat worden. Ander voordeel was dat het een stevig, compact geheel zou worden, omdat de ruimte in de klimaatkast beperkt is.

Bij het eerste proefmodel bleek de passing van de pen-gatverbinding erg slecht. De proefopstelling stond erg instabiel. Bij het tweede model is er voor gekozen om de pennen langer te maken en in de pennen een gat te maken. Het gat kwam net boven de bovenkant van het gaatjesbord. Door een keg in het gat te duwen werd het een stevig verbinding tussen de poten en het gaatjesbord.

Het verschil tussen de oude en de nieuwe poten en de keg-verbinding zijn weergegeven in afbeelding 4.9 en 4.10.



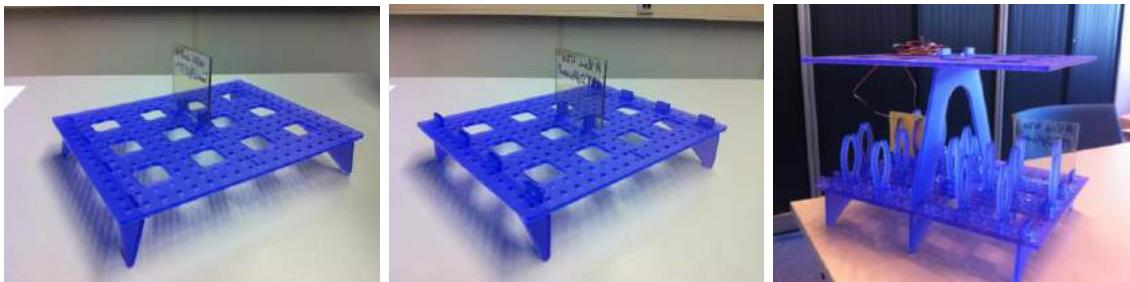
Afbeelding 4.9 / 4.10, Oude en nieuwe (4.9) poten en keg-verbinding nieuwe poten (4.10)



Afbeelding 4.11 / 4.12 / 4.13, oude (4.11) en nieuwe (4.12, 4.13) proefstukhouders

Bij nader inzien bleken de eerste proefstukhouders niet heel geschikt. Alleen de onderste 1,5 cm van de proefstukjes was gesteund. Hierdoor ontstond enige instabiliteit waardoor de proefstukken zouden kunnen gaan buigen tijdens de meting. Deze buiging zou de meting verstoren omdat door buiging ook rek optreedt. Door de proefstukken over een grote lengte te steunen werden de proefstukhouders zelf instabiel en ook de draden van de rekstrookjes naar de logger zaten dan in de weg. In de nieuwe gebogen proefstukhouders vallen de proefstukken aan de onderkant in een op maat gemaakte sparing en aan de bovenzijde worden ze gesteund om buiging te voorkomen. Voordeel hiervan is dat het proefstuk zo min mogelijk hinder ondervindt van de houders en door de open ruimte kunnen de draden van de rekstrookjes naar de logger geleid worden. Aan de zijkant zijn extra beugels gemaakt om de houders zo stabiel mogelijk te maken. Op deze manier kunnen de proefstukken vrij bewegen in de houders.

Boven het gaatjesbord, waar de proefstukken op staan, is het gaatjesbord van de eerste versie bevestigd. Hieraan kunnen de draden van de rekstrookjes en de eventueel te bevestigen thermokoppels (om de temperatuur in de klimaatkast te meten) verbonden worden. In de onderstaande afbeeldingen de verschillende versies van de proefopstelling.



Afbeelding 4.14 / 4.15 / 4.16, 1^e, 2^e en 3^e versie proefopstelling voor in klimaatkast

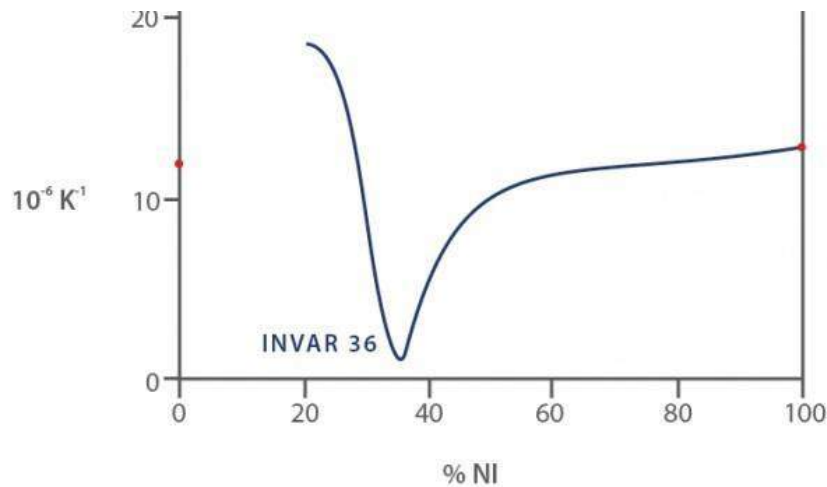
4.3.2 Referentiemateriaal

Het gebruikte referentiemateriaal in dit onderzoek is Invar 36. Invar 36 is een nikkel-ijzerlegering met 36% nikkel en ongeveer 63% ijzer. Verder bevat de legering in kleine hoeveelheden chroom, mangaan, silicium, aluminium, magnesium, zirkoon en titaan.

De thermische uitzetting van Invar is afhankelijk van de hoeveelheid nikkel in de legering. Zie de grafiek in figuur 4.14. Voor de laagste thermische uitzetting is een nikkelpercentage van ongeveer 36% nodig. Binnen de range van 20%-100% nikkel kan door het nikkelpercentage te variëren voor elke specifieke toepassing een



legering worden samengesteld met een specifieke thermische uitzetting.



Grafiek 4.1, thermische uitzetting n.a.v. percentage nikkel

Afhankelijk van het nikkelpercentage wordt Invar toegepast in bijvoorbeeld bimetaal, als een van de strippen van het bimetaal voor maximaal verschil in uitzetting, complexe meetinstrumenten, door temperatuurverschil zonder thermische spanning, en andere toepassingen waarbij een lage thermische uitzettingscoëfficiënt vereist is.

De lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt van Invar 36 voor het temperatuurbereik van -25°C tot 75°C is $1,26 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/K}$. Zie hiervoor bijlage IX.

4.3.3 Data-acquisitie

Nadat de nieuwe logger binnen was gekomen is direct gestart met het testen van de logger. Als eerst is de handleiding voor het opstarten van de logger gevolgd om de benodigde software op de juiste manier te kunnen gebruiken. De logger is de DT80 van Datataker met een daarbij behorende uitbreidingsmodule CEM20 voor 20 extra kanalen.

Om de temperatuur en de uitzetting tegelijkertijd te kunnen meten is voor de temperatuurmeting gebruik gemaakt van thermokoppels (K-type). Deze kunnen tegelijk met de rekstrookjes uitgelezen worden door de logger. Hiervoor moesten deze thermokoppels met behulp van een puntlastang worden gepuntlast. Nadat de thermokoppels geïnstalleerd waren is met het referentiemateriaal een aantal testmetingen uitgevoerd om de instellingen van de logger vast te stellen voor de toekomstige metingen.

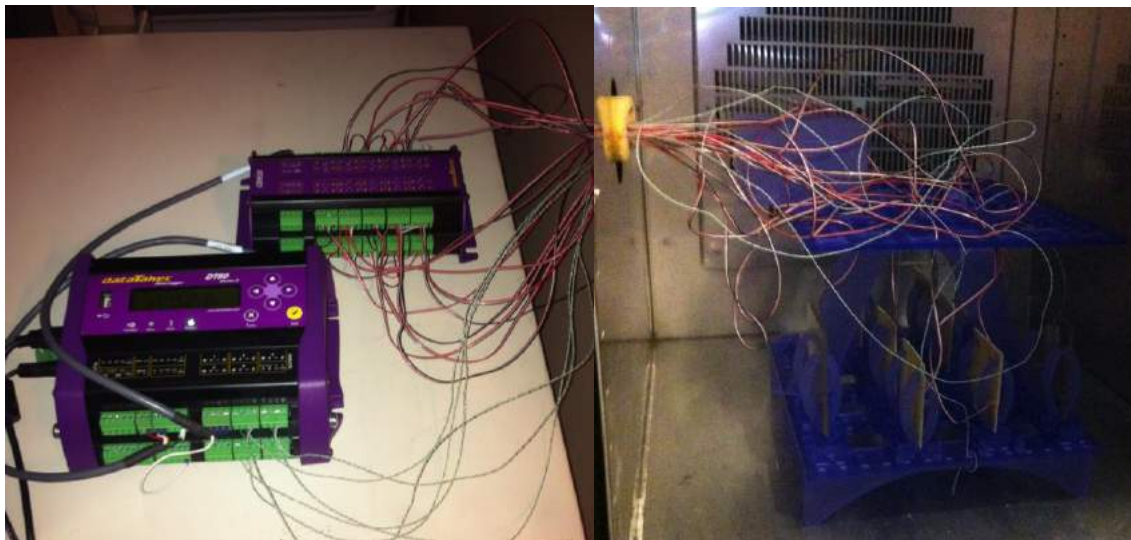
Om de juiste spanning en stroomsterkte te bepalen zijn alle 6 combinaties van een spanning van 30 mV, 300 mV en 3 V tegen een stroomsterkte van 2,5 mA en 200 μA geprobeerd. Voor de rekstrookjes op het referentiemateriaal bleek een spanning van 30 mV en een stroomsterkte van 2,5 mA de meest constante waarde te geven bij een constante temperatuur van 25°C . Bij de overige combinaties waren de fluctuaties tussen twee opeenvolgende metingen groter dan bij de combinatie van 30 mV en 2,5 mA.



Elk kanaal op de logger kan een eigen naam gegeven worden. Tijdens het aansluiten van de samples op de logger is het kanaal waarop het rekstrookje werd aangesloten vernoemd naar het materiaal waarop het rekstrookje was geplakt. Zodoende kon de te verkrijgen data aan het juiste rekstrookje gekoppeld worden en gekoppeld blijven.

Postcuren

Omdat de epoxylijm, waarmee de rekstrookjes op het testmateriaal geplakt is, 4h op 100°C gepostcured moest worden, rees de vraag of dit geen nadelige invloed had op het testmateriaal. Ook bleek uit informatie van een leverancier⁹ dat postcuren ook mogelijk zou moeten zijn op kamertemperatuur, maar dat dat langer zou duren, bijvoorbeeld een nacht. Eerst is gekeken of een rekstrookje door op kamertemperatuur te postcuren dezelfde waarde zou meten als een rekstrookje dat gepostcured is op 4h en 100°C. Daarom is op het referentiemateriaal aan de ene zijde een rekstrookje geplakt dat 4h op 100°C gepostcured is. Aan de andere zijde is een rekstrookje geplakt dat 24h bij kamertemperatuur is gepostcured.



Afbeelding 4.17 / 4.18, logger en uitbreidingsmodule en proefopstelling in klimaatkast

Tijdens een proefmeting bleken de gemeten waarden van het rekstrookje dat op kamertemperatuur gepostcured is, in overeenstemming met de gemeten waarden van het rekstrookje dat 4h op 100°C gepostcured is. Omdat op kamertemperatuur of op 100°C postcuren voor het meten geen verschil maakt, is gekeken of het postcuren op 100°C invloed heeft op het materiaal. Om hier achter te komen is op de 2-laags uni-directionele proefstukken in vezelrichting een rekstrookje geplakt die 24h op kamertemperatuur zijn gepostcured. In hoofdstuk 5.2.1 staan de resultaten hiervan vermeldt. Op basis van de resultaten over de eerste tien metingen bleek dat er geen verschil zat in het materiaal tussen postcuren van de lijm van de rekstrookjes 4h op 100°C en 24h op kamertemperatuur postcuren. Daarom is er voor de volgende metingen gekozen om niet te postcuren omdat dit een tijdswinst oplevert van twee dagen.

Correctiefactor temperatuurcompensatie rekstrookjes

⁹ SPI - M-Bond™ 610 Adhesive System



De rekstrookjes die in dit onderzoek (CEA-06-125UW-350) gebruikt zijn, zijn temperatuur gecorrigeerd voor staal met een uitzettingscoëfficiënt van $6,0 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{F}$. Dit staat gelijk aan $10,8 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. De rekstrookjes zijn gekalibreerd bij 24°C . Vervolgens wordt bij toe- of afnemen van de temperatuur de rek gecorrigeerd met $10,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}/\text{mm}/^\circ\text{C}$. Bij wisselende temperaturen wordt de rek door uitzetting ten gevolge van temperatuur door het rekstrookje zelf gecompenseerd.

De gemeten waarden van het Invar worden gelijk gesteld aan $1,3 \cdot 10^{-6}$. De overige gemeten waarden worden hieraan gerefereerd.

4.3.4 Gegevens

Het temperatuurbereik waarover gemeten is, is van -25°C tot 75°C . De meting is gestart bij 24°C als 0-meting, omdat bij die temperatuur de rekstrookjes zijn gekalibreerd. Na tien minuten op 24°C begon de temperatuur op te lopen met $1^\circ\text{C}/\text{min}$ tot 75°C . Na tien minuten op 75°C daalde de temperatuur met $1^\circ\text{C}/\text{min}$ naar 24°C . Na tien minuten op 24°C daalde de temperatuur verder naar -25°C met $1^\circ\text{C}/\text{min}$. Na tien minuten op -25°C liep de temperatuur weer op naar 24°C met $1^\circ\text{C}/\text{min}$. De totale cyclustijd is 4h en de cyclus is 40 keer herhaald.

De output van de logger is weergegeven in de volgende formule:

$B_{out} \text{ (ppm)}$ = Het temperatuurbereik waarover gemeten is, is van -25°C tot 75°C . De meting is gestart bij 24°C als 0-meting, omdat bij die temperatuur de rekstrookjes zijn gekalibreerd. Na tien minuten op 24°C begon de temperatuur op te lopen met $1^\circ\text{C}/\text{min}$ tot 75°C . Na tien minuten op 75°C daalde de temperatuur met $1^\circ\text{C}/\text{min}$ naar 24°C . Na tien minuten op 24°C daalde de temperatuur verder naar -25°C met $1^\circ\text{C}/\text{min}$. Na tien minuten op -25°C liep de temperatuur weer op naar 24°C met $1^\circ\text{C}/\text{min}$. De totale cyclustijd is 4h en de cyclus is 40 keer herhaald.

De output van de logger is weergegeven in de volgende formule:

$$B_{out} \text{ (ppm)} = \frac{V_{out}}{V_{ex}} \cdot 10^6$$

De uitgangsspanning wordt gedeeld door de ingangsspanning en vermenigvuldigd met 10^6 . Om de output om te zetten in rek moet gebruik gemaakt worden van de volgende formule:

$$\text{strain } (\mu\text{Strain}) = \frac{2}{G \cdot N} \cdot B_{out}$$

Hierbij is G de gauge factor (2,135) en N het aantal rekstrookjes in de brug (1).

De software bij de logger kan niet zelf de temperatuur uitzetten tegen de rek. Wel kan de logger de output verrekenen in rek door de gemeten waarde te vermenigvuldigen met $\frac{2}{2,135 \cdot 1}$.

Met behulp van het programma DPlot (HydeSoft Computing, LLC | versie 2.3.2.1) kunnen de gemeten temperatuur en de rek tegen elkaar worden uitgezet in één grafiek, met op de x-as de temperatuur en op de y-as de rek. Van de ontstane lijn wordt een lineaire fit gemaakt. De richtingscoëfficiënt van deze fit is gelijk aan de uitzettingscoëfficiënt. De resultaten staan vermeld in hoofdstuk 5.2.1.



4.4 Treksterkte bepalen

Bij de bepaling van de treksterkte is gewerkt conform ISO 527-4:1997. Om handigheid en ervaring op te doen voor het bepalen van de treksterktes van samples met Twaron is vooraf geoefend met samples met glasvezel. Deze samples zijn gefreesd uit de glasvezelversterkte plaat die als oefening is gemaakt bij de vacuüm infusie.

Nadat de samples uit de platen waterstraal gesneden zijn, zijn ze één voor één getest.

De afstand tussen de klemmen is ingesteld op 120 mm. Nadat de breedte en de dikte van het proefstuk gemeten zijn, is het proefstuk in de klemmen geplaatst. Bij de eerste series zijn de klemmen gesloten met een druk van 50 bar (proefstuk S2/1). Nadat werd vastgesteld dat de samples in de klemmen verschoven is de sluitdruk in stappen opgevoerd: via 100 bar (S2/2, S8/1), 150 bar (S2/3) en 200 bar (S8/2) naar 400 bar (overige proefstukken). De meting werd gestart bij een spanning van 100 N. De snelheid was ingesteld op 3 mm/min. De E-modulus is bepaald met behulp van een raaklijn. Het beginpunt was bij een spanning van 100 N/mm^2 en het eindpunt was bij een spanning van 200 N/mm^2 . De verplaatsing werd gemeten met een extensometer. De resultaten staan in hoofdstuk 5.3.



Afbeelding 4.19, trekbank met extensometer

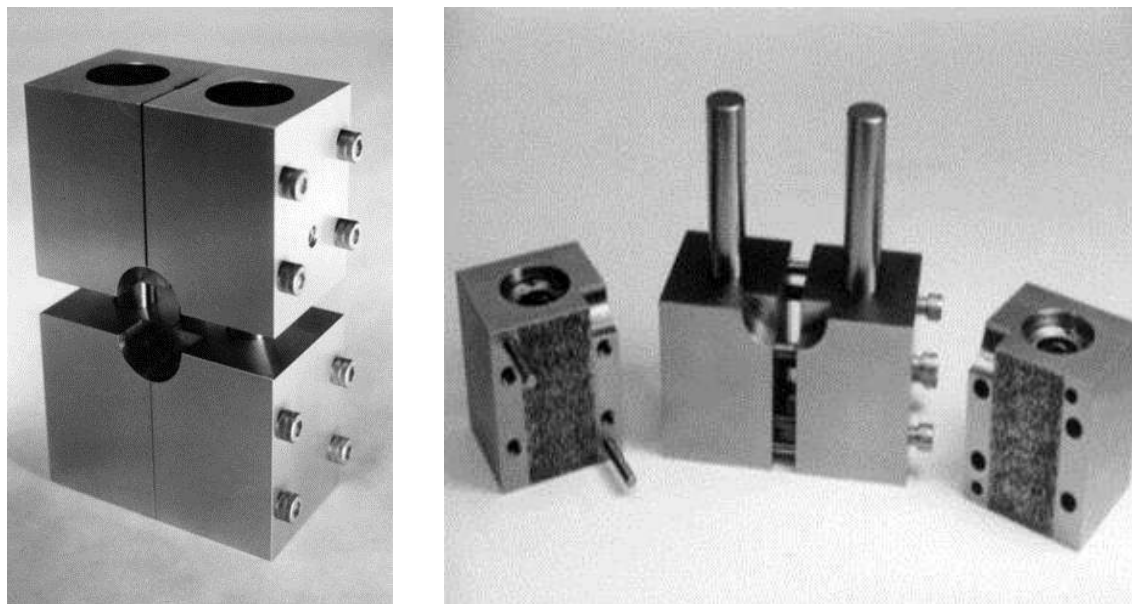


4.5 Druksterkte bepalen

Bij de bepaling van de druksterkte is gewerkt volgens de ASTM D 6641/D. Om handigheid en ervaring op te doen voor het bepalen van de druksterktes van samples met Twaron is vooraf geoefend met samples met glasvezel. Deze samples zijn gefreesd uit de glasvezelversterkte plaat die als oefening is gemaakt bij de vacuüm infusie.

De gebruikte tool om de druksterkte te bepalen is de Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture van de firma Wyoming Test Fixtures Inc.

De tool bestaat uit twee paren stalen blokken, elk paar wordt door middel van vier bouten tegen elkaar geklemd. Zie onderstaande afbeelding.



Afbeelding 4.20 / 4.21, testblok compressie test

Waar het proefstuk tussen de blokken wordt geklemd is het oppervlak opgeruwd met wolfram-carbide deeltjes. De oppervlakteruwheid is vergelijkbaar met schuurpapier korrel 100. Het beschadigt het oppervlak van de proefstukken zo min mogelijk en tevens zijn door deze korrels geen tabs nodig op de proefstukken. Aan het ene paar blokken zitten richtstaven en in het andere paar blokken zitten gelagerde sparingen waar deze richtstaven in vallen. Deze staven zorgen dat tijdens de test het bovenste en onderste paar blokken recht boven elkaar blijven zitten.

De gelagerde sparingen zorgen ervoor dat er geen wrijving ontstaat tussen de sparingen en de richtstaven.

Het proefstuk werd tussen de blokken geklemd, zodanig dat de uiteinden van het proefstuk precies gelijk zijn met de bovenkant/onderkant van het blok. Zo wordt de drukkracht niet alleen via de blokken op het proefstuk overgebracht maar ook direct op het proefstuk zelf. De acht bouten zijn aangedraaid met een momentsleutel, ingesteld op 4Nm. Omdat niet alle proefstukken exact dezelfde lengte hadden, is gekozen om de uiteinden van de proefstukken gelijk te houden met de boven en onderkant van de blokken en de vrije ruimte tussen de blokken op te meten met een schuifmaat. Deze lengte is de werkelijke testlengte. Deze lengte zou 12,7 mm



(0,5 inch) moeten zijn. Door de variërende lengte van de specimens is deze lengte per specimen gemeten. De gegevens staan in bijlage VII.

Nadat de drukbank was gecalibreerd, is begonnen met de druktest. Van elke specimen is vooraf de breedte en de dikte gemeten. Wanneer de drukbank een druk had bereikt van 300 N werd de meting gestart. Dit omdat onder de 300 N geen bruikbare resultaten werden verwacht. De E-modulus werd bepaald met behulp van een raaklijn in de spanning-rek grafiek. Het beginpunt werd genomen bij 0,05% rek en het eindpunt bij 0,25% rek. De meting werd gestopt zodra het proefstuk bezweek. De snelheid was ingesteld op 3 mm/min. De resultaten staan in hoofdstuk 5.4.



4.6 Vochtgehaltetests

Uit verschillende bronnen is gebleken dat het vochtgehalte van de vezel vrij hoog op kan lopen (3,2-5%)¹⁰. Om dit niet van invloed te laten zijn op de mechanische eigenschappen van het laminaat werd aangeraden om de aramidevezels voor gebruik te drogen. Dit is bewust niet gedaan, omdat in de uiteindelijke toepassing als brugdek dit waarschijnlijk ook niet gedaan zal worden (tenzij uit vervolgonderzoek kan worden aangetoond dat dit effect heeft op de eigenschappen van het laminaat).

Om in een later stadium zo nodig nog vast te kunnen stellen waar eventuele afwijkingen in resultaten door veroorzaakt worden, is het vochtgehalte gemeten met een vochtbepalingsbalans. Dit apparaat weegt na plaatsen van de vezel het oorspronkelijke gewicht en verhit deze vervolgens tot 110°C. Na 10 minuten op 110°C is de proef afgelopen. Tijdens deze 10 minuten wordt elke halve minuut het gewicht gemeten, waaruit na afloop kan worden geconcludeerd hoeveel vocht er in de vezel zat. In hoofdstuk 5.5 staan de resultaten van de tests.



Afbeelding 4.22, vochtbepalingsbalans

4.7 Vezelpercentage

Om te kunnen voorspellen wat de uiteindelijke mechanische eigenschappen van het laminaat zullen worden, is het belangrijk om te weten wat het vezelvolumepercentage van de laminaten is. Om dit te verkrijgen zijn de volgende stappen ondernomen: Als eerst zijn de afmetingen en het gewicht van de proefstukken vastgesteld. Daarna is het vezelgewicht bepaald. De gebruikte vezelmat heeft een gewicht van 300 gram per vierkante meter. Vermenigvuldigd met het aantal lagen en de oppervlakte geeft dit het totaalgewicht van de vezel. Uit het totaal gewicht van het proefstuk en het vezelgewicht zijn het gewichtsperscentage vezels het totaalgewicht van de hars af te leiden. Het gewicht van de hars is via de dichtheid om te rekenen naar een volume en aan de hand daarvan is de vezelvolumefractie te berekenen.

De resultaten hiervan staan in hoofdstuk 5.6.

¹⁰ Twaron – a versatile high-performance fiber



4.8 Kostenanalyse

Als onderzoeksmethode is gekozen voor Life Cycle Costing (LCC). Dit omdat bij deze vergelijkende methode ook de toekomstige (lagere) exploitatie kosten worden meegenomen in de beschouwing. De toekomstige kosten worden echter slechts gewogen meegenomen middels de Netto Contante Waarde methode.

De LCC's zijn bepaald voor twee case studies met verschillende varianten. Voor de LCC zijn achtereenvolgens beschreven de:

- uitgangspunten;
- casussen;
- varianten;
- kostenposten.

Uitgangspunten kostenraming en verrekening toekomstige kosten

Prijspeil:	2013	
Rente:	4,0%/jaar	
Inflatie:	2,0%/jaar	
Tijd-factor:	$(100\% - \text{rente}\% + \text{inflatie}\%)^{\text{jaren}}$	NCW
Levensduur,	brug:	100 jaar
	rubberen oplegstrook:	100 jaar
	staalplaat gewapende rubber oplegblokken:	50 jaar
	voegovergangen:	25 jaar (druk bereden)
Onderhoudskosten (excl. vervanging):	betonnen bruggen jaarlijks 0,4% v/d stichtingskosten [5]	
	G-VVK bruggen jaarlijks 0,2% v/d stichtingskosten ($\approx 0,4\%$ van beton)	
	A/C-VVK bruggen jaarlijks 0,1% v/d stichtingskosten ($\approx 0,4\%$ van beton)	

Casussen

De geraamde kosten zijn bepaald voor twee fictieve brugprojecten voor zwaar verkeer met schampranten van 0,75m breed met meubilair (leuning en bermbeveiliging). Brug A heeft een totale breedte van 7,0 m, kent 2 rijstroken en heeft een lengte van 13m.

Brug B heeft een totale breedte van 5,0m, kent 1 rijstrook en heeft een lengte van 27m.

Dit betreffen de maximale afmetingen voor bruggen die FiberCore in 2013 op de markt aanbiedt voor bruggen van glasvezelcomposiet.

Varianten dekken

De levenscyclus kosten zijn geraamd voor de volgende brugdek varianten:

- Voorgespannen beton (VB) [in situ gestort is aangehouden];
- Glas vezel versterkt kunststof (G-VVK);
- Aramide vezel versterkt kunststof (A-VVK);
- Carbon vezel versterkt kunststof (C-VVK), waarbij het duurdere High Modulus (HM) materiaal nodig is vanwege benodigde negatieve uitzettingscoëfficiënt.



De nul-variant betreft de variant die gewoonlijk wordt toegepast. Variant 1 betreft de mogelijkheid die steeds regelmatig als alternatief wordt overwogen, maar nog niet zo vaak voor zwaar verkeersbruggen wordt toegepast. Varianten 2 & 3 betreffen de uitzettingsvrije varianten. Deze varianten onderscheiden zich van varianten 0 & 1 door:

- eenvoudiger voegovergangen: pompvoegen i.p.v. rubber voegen;
- eenvoudiger opleggingen: ongewapend oplegstroken i.p.v. gewapende oplegblokken;
- het vervallen van tussentijdse vervanging van voegovergangen en opleggingen;
- het afstempelen van beide landhoofden tegen elkaar via het dek; en daarmee
- minder (zware) betonpalen onder beide landhoofden; en bovendien te lood i.p.v. schoor geheid.

Kostenposten

Bij de kostenraming zijn diverse kostenposten onderscheiden.

De volgende initiële zijn onderscheiden voor alle varianten:

- brugdek leveren en aanbrengen;
- voegen leveren en aanbrengen;
- opleggingen leveren en aanbrengen;
- paalfunderingen leveren en heien.

Bij de kosten van de kunststof brugdekken is onderscheid gemaakt tussen materiaalkosten en kosten van mensuren. Voor de mensuren van de aramide- en de koolstofvezelvariant zijn de zelfde kosten aangehouden als bij de glasvezelvariant.

Om de hoeveelheden materiaal te kunnen inschatten zijn globale dimensioneringsberekeningen uitgevoerd met dezelfde overspanningen (13m en 27m voor brug A resp. B). De dimensioneringsberekeningen zijn opgenomen in bijlage XIII. Als verkeersbelasting is aangehouden het ongereduceerde belastingsmodel 1 van Eurocode NEN-EN 1991-2. Voor beide brugcasussen is 5,0m aangehouden als medewerkende dragende breedte voor de zwaarste wagen (van 3m breed). Als toelaatbare doorbuiging is aangehouden (voor alle varianten!): L/300 zoals de RWS voorschrijft in de ROK als aanvulling (voor betonnen bruggen) op NEN-EN 1992-1-1 Art. 7.4.1 [8]. Voor toetsing van glas vezel versterkte kunststof is gebruik gemaakt van CUR 96 [9], voor aramide en koolstof is in het zelfde stramien verder gewerkt met aangepaste materiaalparameters.

De onderhoudskosten (excl. vervanging) voor het brugdek is onderscheiden voor alle varianten.

Onderhoud van een betonnen brugdek van 0,4%/jaar bedraagt gedurende 100 jaar 40,0%, met een netto contante waarde van 117,0% van de stichtingskosten. Onderhoud van een uitzettingsvrij composiet brugdek van 0,1%/jaar bedraagt gedurende 100 jaar 10,0%, met een netto contante waarde van 104,25% van de stichtingskosten. In absolute waarde levert overigens ongeveer dezelfde onderhoudskosten (excl. vervanging) voor de verschillende materialen. Hiermee worden bijvoorbeeld het weghalen van graffiti en inspecties bedoeld die voor alle varianten inderdaad ongeveer hetzelfde kosten.

Voor de varianten 0 & 1 zijn voorts de volgende onderhoudskosten rondom het dek na 25, 50 en 75 jaar onderscheiden:

- voegen leveren en vervangen;
- opleggingen leveren en vervangen;
- brugdek tijdelijk opvijzelen;
- wegmeubilair tijdelijk losmaken t.p.v. voegen;



- werkvoorbereiding en opstellen uitvoeringsplan;
- tijdelijke verkeersmaatregelen.

De geraamde kosten voor vijzelen en vervangen van opleggingen zijn ontleend aan een project van Spanbeton in 2013 te weten “de Haek” om Leeuwarden, waarbij van een dek wat nog niet in gebruik was de onjuiste oplegblokken moesten worden vervangen.

Eventuele maatschappelijke kosten voor verkeershinder en -vertraging zijn niet meegenomen. Kosten voor slijtlagen (leveren, aanbrengen en vervangen) zijn buiten beschouwing gelaten.

De kosten van de meegenomen kostenposten zijn zo goed mogelijk achterhaald bij leveranciers en verwerkers van bovenstaande producten en bewerkingen. Voor de kostenraming wordt verwezen naar bijlage XIV.



5. Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van dit onderzoek besproken. Het eerste deel, paragraaf 5.1, beschrijft de literatuurstudie, waarin de antwoorden op de eerste hoofd- en deelvragen verwerkt zijn. In de paragrafen 5.2 tot en met 5.6 zijn de resultaten verwerkt van de thermische uitzetting, trek- en drukproeven. In hoofdstuk 5.7 wordt het ontwerp beschreven en toegelicht. In hoofdstuk 5.8 staan de uitkomsten van de kostenanalyse.

5.1 Vezel en hars

In de meest eenvoudige vorm is een composiet een samengesteld materiaal dat bestaat uit twee materialen die samenwerken. Hiermee worden materiaaleigenschappen bereikt die verschillen van de materiaaleigenschappen van de onderdelen van het composiet. In de praktijk bestaat het grootste gedeelte van de composieten uit een bulkmateriaal (ook wel matrix genoemd, in veel gevallen uitgeharde hars), gecombineerd met een versterking, die wordt toegevoegd om grotere sterkte en stijfheid te geven aan de matrix. Deze versterking is vaak in de vorm van vezels. Composieten worden veelal ingedeeld in de volgende categorieën:

Polymeer-matrix composieten

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

Metaal-matrix composieten

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

Keramische-matrix composieten

Keramische-matrix composieten (KMC) worden gebruikt bij toepassingen waar een hoge temperatuurbestendigheid vereist is. Deze composieten hebben een keramisch materiaal als matrix, die ook weer wordt versterkt met korte vezels of pluïsvormige vezels.

PMC composieten zullen in dit onderzoek naar brugdekken alleen betrokken worden.

5.1.1 Polymeer-matrix composieten

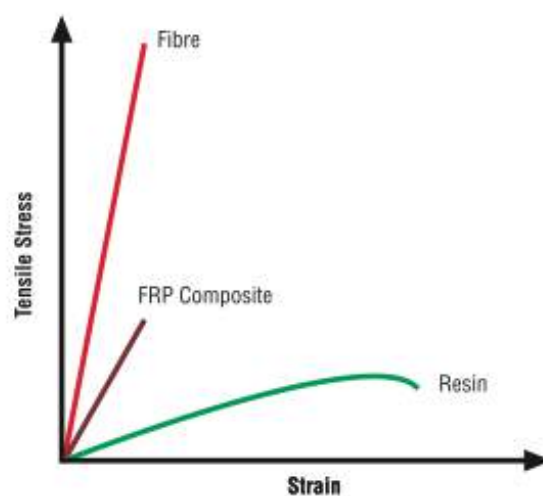
Polymeer harssystemen die gebruikt worden, zoals epoxy's, vinylesters en polyesters hebben elk weinig nut om zonder versterking te gebruiken bij brugdekken. De meeste metalen overtreffen deze harsen ruimschoots in sterkte- en stijfheidseigenschappen. Harsen hebben wel grote voordelen dat ze taai kunnen zijn, eenvoudig



kunnen gebruikt worden in ingewikkelde vormen en uitgevoerd kunnen worden in onderhoudsvrije, niet corrosieve vorm.

Materialen zoals glas, aramide en carbon hebben zeer hoge trek- en druksterktes, maar in 'normale' vorm hebben ze weinig nut in constructies, omdat bij te lokale hoge spanning willekeurig gevormde barsten ontstaan die het hele materiaal bros doen bezwijken. Om dit probleem te verhelpen wordt het materiaal in vezels geproduceerd. Dit geeft nog steeds willekeurig gevormde barsten, maar slechts lokaal. De rest van de vezels (het grootste gedeelte) blijft zijn functie dan echter behouden. Vezels kunnen hoofdzakelijk spanningen opnemen in de lengterichting, net als bijvoorbeeld de vezels in een touw.

Wanneer de hars wordt versterkt met vezels als glas, carbon of aramide, worden gunstige eigenschappen gecombineerd. De taaie harsmatrix verspreidt de lokale krachten die op het composiet komen te staan tussen de verschillende vezels en beschermt de vezels tegen beschadigingen door afbrokkeling of impact van buitenaf. Hoge sterkte en stijfheid, eenvoudig maken van complexe vormen, goed bestand tegen invloeden van buitenaf, lage dichtheden: het resulterende composiet is op aspecten superieur ten opzichte van veel metalen.



Grafiek 5.1, spanning-rekdiagram composiet

Omdat composieten samengesteld zijn uit hars en vezels, worden de eigenschappen van het composiet deels bepaald door de hars en deels door de vezel. Zie bijvoorbeeld het trek-rek diagram in figuur 5.1.

Samenvattend worden de eigenschappen van een composiet bepaald door de volgende vier aspecten:

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

Alle vijf aspecten worden in dit onderzoek naar uitzettingsvrij composiet betrokken, waarbij alleen de eerste vier aspect in proeven zullen worden onderzocht.

5.1.2 Uitzettingsvrij composiet

Vezels en harsen kunnen op vele verschillende manieren worden samengevoegd en een geheel vormen. De afzonderlijke eigenschappen kunnen elkaar versterken, maar ook verzwakken. Voor het maken van een



uitzettingsvrij composiet is de plaatsing en oriëntatie van de vezels in combinatie met de verhouding tussen vezel en hars van belang, ook omdat vezels van eigenschappen kunnen verschillen in langs- en dwarsrichting.

Het doel van dit onderzoek is het samenstellen van een composiet dat onder invloed van temperatuurwijzigingen niet langer of korter wordt in de overspanningsrichting. Hiervoor zijn twee componenten nodig: een hars die uitzet bij hogere temperatuur, en een vezel die juist korter wordt bij hogere temperatuur. Daarnaast zijn natuurlijk ook andere mechanische eisen van belang, zoals de aanhechting binnen het composiet, treksterkte, druksterkte, stijfheid en toepasbaarheid in de buitenlucht.

Het proces om te komen tot een geschikt uitzettingsvrij composiet is opgedeeld in verschillende stappen. Eerst zal verder ingegaan worden op de verschillende soorten vezels en harsen, waarna deze gecombineerd zullen worden tot een uitzettingsvrij composiet. Vervolgens wordt bekeken welke van deze composieten geschikt is/zijn voor de beoogde toepassing als brugdek.

5.1.3 Vezel

Op constructief gebied worden meestal 'supervezels' gebruikt. Deze zijn veelal synthetisch van aard en niet direct in de natuur te vinden. Natuurlijke vezels zijn gevoelig voor vochtopname en rotting en kennen een vrij kleine lengte.

Reeds langer zijn glas-, koolstof- en aramidevezels beschikbaar ter versterking van een hars. Sinds kort zijn ook basaltvezels beschikbaar. Van deze vezels is glasvezel het goedkoopst. Composieten van glasvezel worden daarom ook het meest gebruikt voor constructieve doeleinden, terwijl de koolstof- en aramidevezel composieten gebruikt worden voor meer exotische toepassingen. CUR aanbeveling 96 (Vezelversterkte kunststoffen in Civiele draagconstructies) richt zich alleen nog maar op Glasvezel Versterkte Kunststoffen (GVK).

In het algemeen, zonder specifiek rekening te houden met de verschillende soorten glas-, koolstof- en aramidevezel, kan gezegd worden dat glasvezel de goedkoopste vezel is, vervolgens aramidevezel, en koolstofvezel is van deze drie de duurste. De verhouding hiertussen is ongeveer 1:5:12 (per kg)¹¹.

5.1.3.1 Productie

Voor glasvezels wordt siliciumoxide (SiO_2 , uit zand) samen met verscheidene toevoegingen verhit tot boven het smeltpunt. De smelt wordt vervolgens naar kanaaltjes geleid, waar aan de onderkant kleine gaten zitten (diameter circa 2 mm), waar de smelt doorheen zakt. De stroperige smelt wordt op een spoel gewonden. Dit gaat met hoge snelheid (tientallen meters per seconde). Hierdoor worden de smeltdraden aanzienlijk gestrekt en daarmee veel dunner, tot ca. 20 micrometer diameter. Vlak na het verlaten van de extrusiebusen (die gemaakt zijn van een platina-rhodium-legering die bestand is tegen hoge temperaturen), worden de vezels besproeid met water zodat ze met hoge snelheid stollen. In het water zit een toevoeging die ervoor zorgt dat de verdere verwerking van de vezels vergemakkelijkt wordt¹². Hierna kunnen ze gebruikt worden voor

¹¹ Gurit Guide to Composites, pag. 27, figuur 26 en 27

¹² Composieten – basiskennis, pag. 17



constructieve doeleinden, óf gehakt tot kleinere vezels, die gebruikt kunnen worden als isolatie. Van de spoelen kunnen bij een weverij weer matten worden geweven.

Koolstofvezels worden op een heel andere manier vervaardigd. Ook hier kunnen verschillende grondstoffen gebruikt worden, voorwaarde is wel dat de grondstof een hoog gehalte aan koolstofatomen in de chemische verbinding heeft. Over het algemeen worden PAN (polyacrylnitril), pek (*pitch*) of (cellulose) PAN halffabrikaat, de eigenschappen binnen nauwe marges vallen; pek is een 'natuurproduct'. Voor een consistente kwaliteit heeft PAN de voorkeur, terwijl pek goedkoper is. Uit de PAN of pek worden draden getrokken, die vervolgens 3 stappen doorlopen: oxidatie bij ca. 200°C (hierbij krijgen de vezels hun karakteristieke zwarte kleur); carbonisatie, bij 800-1600°C (in een inerte atmosfeer worden verscheidene componenten, stikstofatomen, verwijderd; en ten slotte grafitisering (de vezel krijgt z'n definitieve samenstelling). Tijdens het proces worden de vezels gestrekt, zodat de oriëntatie van de koolstofketens in het materiaal zoveel mogelijk evenwijdig aan de vezelrichting loopt en er een anisotrope vezel ontstaat¹³.

Basaltvezels lijken het meest op glasvezels voor wat betreft fabricagemethode. Basalt (vulkanisch gesteente) wordt, net als glas, in een oven verhit, waarna er draden van worden getrokken. Hierbij is het niet nodig bestanddelen te mengen; het basalt is 'kant en klaar'. Daarbij moet wel worden gezegd dat de samenstelling van basalt afhangt van de vindplaats, waardoor er uiteindelijk een beperkt aanbod is. Verder is basalt moeilijker te smelten dan glas en is het abrasiever, waardoor de extrusiebussen vaker vervangen moeten worden. Hiermee is basalt duurder dan E-glas, maar nog altijd goedkoper dan de duurdere soorten glas en koolstof¹⁴.

Aramidevezels (gemaakt van aromatische poly-amiden) worden na het spinproces, waarbij de polymeren door kleine openingen worden geperst (5-12 micrometer) en vervolgens verstrekt, samengevoegd tot strengen, en vervolgens gewassen. Dit is nodig om het zuur, waarin de amiden waren opgelost om deze verwerkbaar te maken, eruit te spoelen. Dit spoelen gebeurt over aanzienlijke lengtes, tot wel honderden meters. Vervolgens worden de strengen na drogen afgewerkt met een sizing, waarna ook deze worden opgerold op spoelen of verhakseld tot isolatievezel of asbestvervanger. Van de spoelen kunnen bij een weverij matten worden geweven.

5.1.3.2. Vezelsoorten

Van de verschillende soorten vezels is hieronder een korte opsomming opgenomen om een overzicht te hebben van de mogelijkheden. De bijbehorende materiaaleigenschappen (voor zover bekend) zijn opgenomen in bijlage V.

Glasvezel

Zoals al eerder vermeld wordt glasvezel hoofdzakelijk gebruikt voor constructieve doeleinden. Hierbij kan onder andere worden gedacht aan constructieprofielen, brugdekplanken en roosters, maar ook aan

¹³ Composieten – basiskennis, pag. 19

¹⁴ Composieten – basiskennis, pag. 20



scheepsrompen, carrosseriepanelen en andere complexe vormen die toch een bepaalde sterkte of gewicht moeten hebben. Grote voordelen van glasvezel zijn de lage prijs, makkelijke verwerkbaarheid en het lage gewicht. Nadelen zijn dat het een matig sterke vezel is en maar matig bestand tegen chemicaliën. Glasvezels zijn beperkt gevoelig voor kruip. Glasvezels zijn verkrijgbaar in vele types, bijvoorbeeld E-glas, C-glas, S-glas en Alkali Resistent glas. Geen van allen kennen zij echter een negatieve temperatuur uitzettingscoëfficiënt.

Basaltvezel

Basaltvezel kan gebruikt worden voor veel verschillende toepassingen. Basalt *chopped fiber* kan worden gebruikt voor vezelversterkt beton, doorlopende vezels in wapening voor beton en constructieprofielen. Ook is het verkrijgbaar in de vorm van matten: in deze vorm kunnen ze (in een composiet) gebruikt worden voor hitte- en geluidsisolatie en voor vuurbestendigheid. Daarnaast zijn er onder andere nog toepassingen in geotextiel, tape, de auto-industrie (CNG-tanks), wind- en offshore-industrie en voor toepassingen in hoog-corrosieve milieus¹⁵.

Koolstofvezel

Koolstofvezel wordt veel gebruikt in de auto-industrie en voor veel verschillende sporttoepassingen. Hierbij kan worden gedacht aan autosport, zeilsport en atletiek. De trek- en druksterkte en met name ook stijfheid, gecombineerd met het lage gewicht, zijn de grootste voordelen van koolstofvezel. Het grootste nadeel is dat het relatief duur is, dus alleen voor kleine oplages bruikbaar. De meeste koolstofvezels zijn beperkt gevoelig voor kruip. koolstofvezels zijn verkrijgbaar in vele types, bijvoorbeeld SM, HT & HM. Alleen het HM (High Modulus) type kent een significant negatieve temperatuur uitzettingscoëfficiënt. HM is relatief bros ten opzichte van de anderen.

Dyneema

Dyneema is een UHMW-PE (Ultra High Molecular Weight Poly Ethylene) vezel. Het is hoofdzakelijk bedoeld om supersterk te zijn en wordt ook wel beschouwd als de sterkste vezel ter wereld (15x sterker dan staal bij hetzelfde gewicht). Daarnaast heeft het een goede bestandheid tegen water, geuren en chemicaliën. Veelgebruikte toepassingen zijn lijnen en touwen, stroppen, netten, bepantsering, kogelwerende kleding, handschoenen, zeilen en tuigage.

Vectran

Vectran is een LCP (Liquid Crystalline Polymer) vezel met een hoge sterkte en stijfheid. Het vertoont geen tot zeer weinig kruip, heeft een smelttemperatuur van ongeveer 330°C en is vrij gevoelig voor UV-straling. Toepassingen zijn hoofdzakelijk in de lucht-en ruimtevaart, scheepvaart en medisch (in verband met onzichtbaarheid voor MRI-systemen).

Zylon

Zylon is een PBO (PolyBenzobisOxazole) vezel, gemaakt door Toyobo in Japan. Deze vezel heeft een hoge treksterkte en E-modulus, en vertoont weinig kruip of rek. Daarnaast heeft het een zeer hoog smeltpunt.

¹⁵ Basfiber® Market and Applications



Nadelen zijn de gevoeligheid voor vocht en UV-straling, waardoor de levensduur beperkt is. Voornaamste toepassingen zijn touw, hoezen, helmen en snijbestendige handschoenen.

Aramidevezels

Aramidevezels zijn er in twee hoofdgroepen: para- en meta-aramiden. Het verschil tussen para- en meta-aramiden is dat para-aramiden een rechte keten vormen, terwijl meta-aramiden geknikte ketens vormen. De meest voorkomende zijn de para-aramiden, omdat deze een hogere sterkte hebben. Aramide vezels zijn afhankelijk van ontwerp, toepassing en belasting kruipgevoelig (zie hoofdstuk 5.1.7.1.). Aramide vezels kennen een negatieve thermische uitzettingscoëfficiënt, zijn moeilijk verwerkbaar en kennen een matige druksterkte in composietvorm.

Para-aramiden

Kevlar, ontwikkeld door DuPont in 1972, en **Twaron**, ontwikkeld door Teijin Aramid in de jaren '70, hebben goede mechanische eigenschappen (vele malen hoger dan staal) en een hoge taatheid. Het is bruikbaar voor vele verschillende toepassingen, waaronder auto-industrie, bouw, banden, kogelvrije vesten, beschermende kleding, optische vezelkabel en asbestvervanging. Deze beide vezels hebben vergelijkbare eigenschappen. In het verdere verloop van dit onderzoek wordt Twaron gebruikt, vanwege de benaderbaarheid (Twaron (Teijin, voorheen AKZO) is Nederlands, Kevlar (DuPont) is Frans).

Technora, een andere para-aramidevezel ontwikkeld door Teijin Aramid in 1987, heeft een klein voordeel op Twaron: het is iets sterker, veel buigzamer (lagere stijfheid en grotere rekcapaciteit) en waterbestendig. Het is echter wel iets duurder dan Twaron.

Meta-aramide

Nomex is een meta-aramide vezel ontwikkeld door duPont in 1967. Nadelen als de lagere sterkte worden goedge maakt door een betere hittebestendigheid dan Kevlar. Daarnaast is het beter waterbestendig dan Kevlar. Nomex wordt hoofdzakelijk gebruikt in brandwerende kleding.

5.1.3.3 Selectie

Voor dit onderzoek is het in de eerste plaats belangrijk dat de vezel die gebruikt gaat worden in het samen te stellen composiet een negatieve thermische uitzettingscoëfficiënt heeft. Daarnaast is de bruikbaarheid en verwerkbaarheid in de eindtoepassing ook van belang. Verder zijn andere mechanische eigenschappen zoals stijfheid en druksterkte in het composiet van belang.



Thermische uitzettingscoëfficiënt α_c

In de hiernaast staande tabel zijn de thermische uitzettingscoëfficiënten in langs- en dwarsrichting van de vezel opgenomen (voor zover bekend). Deze zijn natuurlijk van belang voor het maken van een uitzettingsvrij composiet. Voor een uitgebreide tabel en bronvermeldingen zie bijlage V.

De waarde voor de thermische uitzettingscoëfficiënt in lengterichting waarnaar gezocht moet worden is vanzelfsprekend negatief. Hierdoor vallen glasvezel, basaltvezel en Nomex af. De thermische uitzettingscoëfficiënt in dwarsrichting is minder relevant, omdat de elasticiteitsmodulus van de verschillende vezels in dwarsrichting (relatief) minimaal is. Hierdoor zal dit weinig invloed hebben op het composiet.

Vezelsoort	α_c (LR) $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	α_c (DR) $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Glasvezel (E-glas)	5	5
Basaltvezel	90-120	90-120
Koolstofvezel	-0,1	10
Koolstofvezel HM	-0,5	
Dyneema	-12	
Vectran	-4,8	
Zylon	-6	
Twaron	-3,5	60
Technora	-6	
Nomex	1,8	
Kevlar	-4,8	

Tabel 5.1, thermische uitzettingscoëfficiënten

Om vast te stellen wat de vezelpercentages zijn die benodigd zijn voor een lamel met vezels in één richting (Unidirectioneel of UD-lamel) is met behulp van de formule van Schapery (zie 5.6.2.) tabel 5.2 opgesteld. Uit deze tabel blijkt dat HM koolstofvezelversterkt composiet een onhaalbaar vezelpercentage heeft. Daarnaast zijn de vezelpercentages van Dyneema en Zylon te laag om de benodigde mechanische eigenschappen te behalen.

Qua mechanische eigenschappen zijn de E-modulus en de trekrek van groot belang. Ook speelt de drukrek een rol in het ontwerpen van het brugdek. Helaas zijn gegevens over druk beperkt beschikbaar. In het algemeen is wel te zeggen dat de druksterkte van (glas- en) koolstofvezel enkele malen hoger ligt dan de druksterkte van aramidevezel¹⁶.

¹⁶ An introduction to composite materials, pag. 126, tabel 7.1



			Polyester	Vinylester	Epoxy	
	α_c	$\times 10^{-6} K^{-1}$	120	22	55	
	E-modulus	N/mm^2	3500	3400	3600	
Vezelsoort	α_c LR	E-modulus				Gemiddeld
	$\times 10^{-6} K^{-1}$	N/mm^2				
Koolstofvezel	-0,1	235000	0,95	0,77	0,89	0,89
HM-Koolstof	-0,5	390000	0,68	0,28	0,50	0,50
Dyneema	-12	132000	0,21	0,05	0,11	0,11
Vectran	-4,8	75000	0,54	0,18	0,35	0,35
Zylon	-6	270000	0,21	0,05	0,11	0,11
Twaron	-3,5	120000	0,50	0,15	0,32	0,32
Technora	-6	71000	0,50	0,15	0,32	0,32

Tabel 5.2, benodigde vezelpercentages UD met formule van Schapery

Vezelsoort	Treksterkte	E-modulus	Trekrek	Drukrek*	Drukcapaciteit*
	N/mm^2	N/mm^2	%	%	N/mm^2
E-glas	± 2400	70.000	+1,2	-1,2	500
Koolstof HM	± 3500	390.000	+0,6	-0,5	1500
Vectran	± 3200	75.000	+4,3		
Twaron (aramide)	± 3100	120.000	+2,6	-0,5	270
Technora (aramide)	± 3400	71.000	+4,8		

Tabel 5.3, relevante mechanische eigenschappen. *in een VVK¹⁷

De E-modulus van HM-koolstof is significant groter dan van de andere vezels, de rekapaciteit daarentegen weer kleiner. Beide effecten compenseren elkaar bijna voor wat betreft trekspanning. Voor de overige vezels geldt dat de treksterkte in orde van grootte gelijk zijn aan elkaar (rond de $3200 N/mm^2$). De E-moduli van Vectran en Technora blijven echter wel achter op de E-modulus van Twaron, die op zijn beurt weer lager is dan de E-modulus van HM-koolstof.

De aanbevolen maximaal toelaatbare trek- en drukrek volgens de CUR-Aanbeveling 96 is $\pm 1,2\%$ voor glasvezelversterkte kunststoffen (breukrek volgens literatuur $+2,3\%$ & $-1,4\%$). Voor aramide vezels lijken $-0,5\%$ en $+2,5\%$ goede toelaatbare waarden, voor HM-koolstof $\pm 0,5\%$, en voor combinaties van aramide en HM-koolstof eveneens $\pm 0,5\%$.

¹⁷ Afgeleid uit: Vezelversterkte Kunststoffen – mechanica en ontwerp, pag. 21 en 24, tabellen 1.2 en 1.4



Hierbij kan wel de opmerking worden gemaakt dat, als de trekrek van de vezel groter is dan die van de hars (ca. 4%), komt de vezel bloot te liggen omdat de hars al bezwaken (gescheurd) is. Dit is (onder andere) het geval bij Vectran en Technora, en kan een nadelige invloed op de levensduur van de brug hebben. Ook kan in overweging genomen worden dat Vectran niet of nauwelijks toegepast wordt in composiet, maar een ander toepassingsgebied hebben, bijvoorbeeld kabels, lijnen en netten. Bij Technora is dit (grotendeels) ook van toepassing^{18,19}.

Op basis van bovenstaande selectiecriteria (thermische uitzettingscoëfficiënt in lengterichting, benodigd vezelpercentage, treksterkte, E-modulus, trek- en drukrek en huidig gebruik) kan worden gesteld dat HM-koolstof en Twaron (of Kevlar) de enige overgebleven 'kandidaten' zijn om te gebruiken voor een uitzettingsvrij composiet brugdek.

Het empirisch onderzoek is alleen gericht op composieten met Twaron vezels.

Opmerking: Bovenstaande conclusie geldt alleen voor een composiet samengesteld uit 1 soort vezel. In de praktijk kan gekozen worden om meerdere soorten vezels te gebruiken in een laminaat, of om voor verschillende functies (bijv. trek en druk) verschillende vezels te gebruiken binnen een constructie.

5.1.4 Harsen

De harsen die worden toegepast in vezelversterkte composieten worden vaak aangeduid als 'polymeren'. Alle polymeren hebben een belangrijke overeenkomst, namelijk dat ze zijn opgebouwd uit lange ketens bestaand uit veel eenvoudige herhalende eenheden. Hars in een composiet heeft een aantal belangrijke taken te vervullen: het zorgt voor de binding tussen de vezels, brengt de krachten over tussen de vezels en beschermt de vezels tegen mechanische en chemische belasting.

Polymeren zijn onder te verdelen in twee groepen: thermoplasten en thermoharders. Het verschil tussen deze twee groepen is het effect van warmte op de materiaaleigenschappen.

5.1.4.1 Thermoplasten

Thermoplasten worden onder verhitting zacht of smelten zelfs en harden weer uit bij koeling. Dit proces kan net zo lang herhaald worden als gewenst is zonder noemenswaardige invloed te hebben op de materiaaleigenschappen. Typische thermoplasten zijn nylon, polypropyleen en polycarbonaat.

Thermoplasten kunnen lastig worden verstevigd met vezels, dit lukt over het algemeen alleen met hoge temperatuur en hoge druk²⁰. Thermoplasten zijn mede daarom voor grote toepassingen als brugdekken niet geschikt. In geval van (bewuste) brand zou het voorts tot ernstige schade aan het brugdek kunnen leiden met name waar het composiet op druk wordt belast.

Thermoplasten hebben als voordeel dat zij gerecycled kunnen worden, thermoharders kunnen tot dusver alleen gedowncycled worden.

¹⁸ Vectran® LCP Fiber: an unique combination of properties for demanding applications

¹⁹ Teijin Aramid BV - Application of Aramid Fibres in Composites

²⁰ Composieten – basiskennis, pag. 26



5.1.4.2 Thermoharder

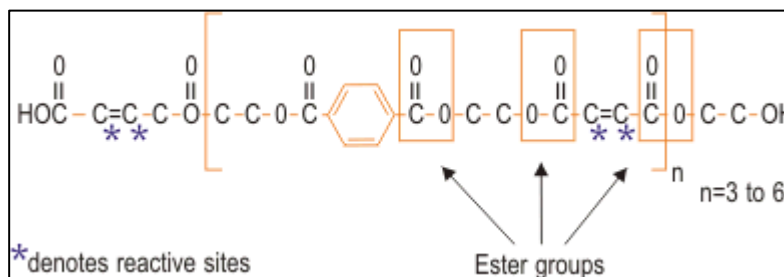
Thermoharders worden gevormd door een chemische reactie waarbij het hars en de harder of katalysator worden gemengd en een onomkeerbare reactie ondergaan. Eenmaal uitgehard, worden thermoharders niet meer vloeibaar bij verhitting. Boven een bepaalde temperatuur, de glastransitietemperatuur (T_g), worden de mechanische eigenschappen significant anders.

Boven de glastransitietemperatuur verandert de kristallijne structuur van de hars in een meer flexibele amorfe structuur, het wordt rubberachtig. Boven de glastransitietemperatuur nemen de stijfheid, druksterkte en afschuifsterkte af. Wordt de temperatuur weer onder de glastransitietemperatuur gebracht dan krijgt het weer de kristallijne structuur met de daarbij behorende eigenschappen. Dit proces, van glastoestand naar rubbertoestand, is wél een omkeerbaar proces.

Er bestaan veel verschillende thermohardende harsen die veel worden toegepast in composieten. Deze zijn grofweg in te delen in drie hoofdgroepen: polyesters, vinylesters en epoxy's, waarvan hierna de eigenschappen worden behandeld.

Polyester

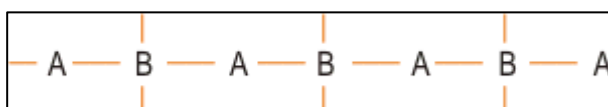
Een onverzadigde polyester (unsaturated polyester / UP) wordt gevormd uit de reactie van een di-zuur en een di-alcohol. Als bijproduct ontstaat er water. Polyester wordt veel gebruikt in de bouw van boten. Het gaat hier om een onverzadigd polyester. Het verschil tussen een verzadigd en een onverzadigd polyester is de manier waarop het polyester uithard.



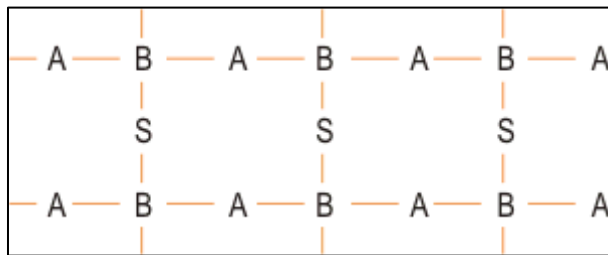
Afbeelding 5.1, structuurformule van een isoftaal polyester

In de structuurformule is te zien dat een polyester veel estergroepen bevat, waardoor een polyester minder water- en chemisch resistent is dan een vinylester.

De meeste polyesterharsen bestaan uit een oplossing van polyester in een monomeer. Het meest gebruikte monomeer is styreen. Met de toevoeging van styreen en in de aanwezigheid van een katalysator (een peroxide) verknopen de polymeerketens bij de reactieve plaatsen tot een zeer complex driedimensionaal netwerk. In de onderstaande afbeeldingen zijn een ongehard polyester en een uitgehard polyester weergegeven. De 'B' staat voor de reactieve plaatsen van het polyester en de 'S' staat voor het styreen.



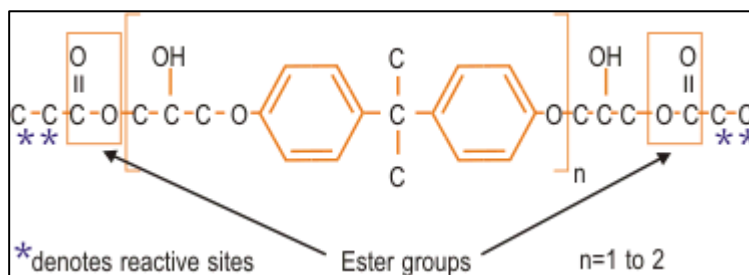
Afbeelding 5.2, Schematische voorstelling van polyester hars, ongehard



Afbeelding 5.3, Schematische voorstelling van polyester hars, uitgehard

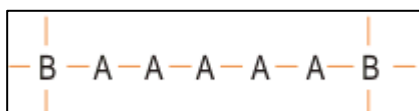
Vinylester

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

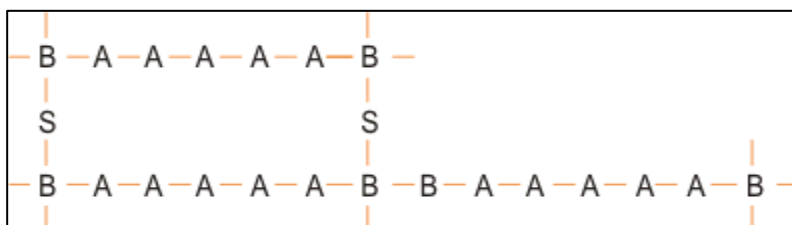


Afbeelding 5.4, structuurformule van een typische op epoxy gebaseerde vinylester.

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



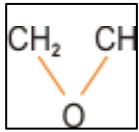
Afbeelding 5.5, schematische weergave van een vinylester, ongehard.



Afbeelding 5.6, schematische weergave van een vinylester, uitgehard.

Epoxy

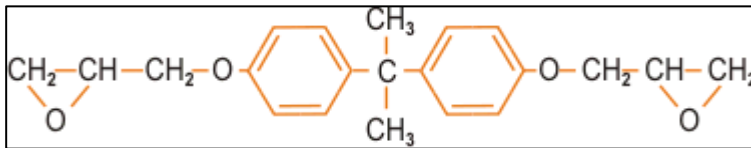
Epoxyhars (EP) wordt gevormd als een lange molecuulketen, vergelijkbaar met een vinylester met de twee reactieve groepen aan het einde van de molecuulketen. De naam epoxy refereert aan chemische groep bestaand uit een O-atoom gebonden aan twee C-atomen die onderling al gebonden zijn. Onderstaande afbeelding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



Afbeelding 5.7, structuurformule van een eenvoudige epoxy.

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

Belangrijk voordeel van een epoxy is de lage uithardingskrimp.



Afbeelding 5.8, structuurformule van een epoxy .

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

5.1.4.3 Vergelijking UP, VE en EP

Bij vergelijking van de drie meest gebruikte harsen in algemene zin vallen de volgende zaken op²¹:

- Polyesters zijn goedkoper om te maken dan vinylesters en vinylester weer goedkoper dan epoxy's;
- Epoxy kent een lagere uithardingskrimp dan polyesters en vinylesters;
- Polyesters (behalve iso-polyester) zijn gevoeliger voor schade door osmose water dat in de kunststof wordt opgenomen en blaasjes kan veroorzaken;
- Polyester en vinylester hebben een katalysator (en accelerator) nodig om uit te harden; voor epoxy moet je 2 componenten mengen;
- Voor alle systemen geldt, dat een exotherme reactie plaatsvindt.

In de tabel 5.4 staan onder andere de thermische uitzettingscoëfficiënten weergegeven van de drie hierboven beschreven harsen.^{22,23,24,25}

²¹ Composieten – basiskennis, pag. 26

²² The Engineering Toolbox - Coefficients of Linear Thermal Expansion

²³ American Elements - Thermal Expansion Coefficient of Metals & Materials

²⁴ Azom.com - Resin properties for Composite Materials – comparison of resin properties

²⁵ Vezelversterkte Kunststoffen – mechanica en ontwerp, pag. 23, tabel 1.3



Hars	α_{hars} (1/K)	E-modulus (MPa)	Trek- sterkte (MPa)	Druk- sterkte (MPa)	Trekrek bij breuk (%)	Uithardings- krimp (%)
Polyester	$120 \cdot 10^{-6}$	3600	50-80	140-150	2-4	6-8
Vinylester	$22 \cdot 10^{-6}$	3400	70-95	-	3-8	5-7
Epoxy	$55 \cdot 10^{-6}$	3500	60-90	90-130	3-6	<2

Tabel 5.4, eigenschappen hars

In de CUR Aanbeveling 96 4.2.4 staat dat de uitzettingscoëfficiënt α_{hars} (polyester, vinylester en epoxyharsen) varieert tussen de 50 en $120 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Zowel bij op internet als in de CUR Aanbeveling staat niet hoe aan deze waarde gekomen is. De waarde in de bovenstaande tabel kan in twijfel worden getrokken door een mindere betrouwbaarheid van informatie via internet.

Harsen zijn in vele verschillende soorten beschikbaar. Voor elke toepassing kan een hars zodanig worden aangepast dat het voor die toepassing de beste eigenschappen heeft. De waarden in de bovenstaande tabel zijn richtwaarden en kunnen dus voor een individuele hars verschillen. Algemeen kan worden geconcludeerd voor polyesters en vinylesters dat een vinylester betere eigenschappen heeft dan een polyester: a) lagere uitzetting, b) hogere treksterkte en c) een grotere verlenging/rek bij bezwijken en d) minder uithardingskrimp. Een epoxyhars heeft in het algemeen weer betere eigenschappen dan een vinylester.

De totale verlenging bij bezwijken van het hars moet groter zijn dan de totale verlenging bij bezwijken van de vezel. Zo blijft de vezel tot het laatste moment de krachten opnemen en zal de vezel tot het moment van bezwijken beschermd blijven tegen mechanische en chemische invloeden van buitenaf. Dit hoeft echter geen probleem te zijn.

Wat prijs betreft zit een vinylester tussen een polyester en een epoxy in. Navraag bij DSM Composite Resins/Euroresins leerde dat de verhouding in prijs tussen een polyester, vinylester en een epoxy grofweg 1:2:3 (per kg) is. Deze verhouding is ook in verschillende bronnen gevonden²⁶.

5.1.5 Aanhechting

Een belangrijk deel van de uiteindelijke eigenschappen van het composiet worden bepaald door de aanhechting van de hars aan de vezel. Bij een slechte aanhechting zal de vezel onder belasting losraken van de hars. Een goede binding tussen vezel en hars zorgt voor een hogere trek- en druksterkte, betere interlaminaire treksterkte, hogere delaminatieweerstand en een betere vermoeiings- en corrosieweerstand.

Omdat synthetische vezels een hoog kristallijne structuur hebben, hebben ze een glad oppervlak waarop een hars niet goed kan hechten. Daarom is er eerst een oppervlaktebehandeling nodig om een goede hechting te kunnen verkrijgen tussen vezel en hars. Om de vezel wordt een dunne film aangebracht. Deze film wordt ook wel 'finish' of 'sizing' genoemd.

De finish kan twee verschillende toepassingen hebben. De ene toepassing is het eerder beschreven verkrijgen van een betere hechting tussen de vezel en de hars en de andere toepassing is voor een betere verwerking in

²⁶ Netcomposites - Resin comparison



de fabriek. Na de productie van de vezel wordt er een finish aangebracht wat het verder verwerken vergemakkelijkt. Omdat verschillende harsen verschillende chemische samenstelling hebben, wordt deze sizing aangepast aan een specifieke hars.

Omdat één vezel uit meerdere filamenten bestaat zou de vezel kunnen gaan pluizen tijdens de verwerking. De finish is een soort omhulsel waardoor de vezel tijdens drogen en wikkelen niet uit elkaar valt.

De prestatie van een finish voor de aanhechting van een hars aan aramidevezels, is echter beperkt. Boven een bepaalde hechting van de hars aan de vezel zal de vezel zich ontbinden door fibrillatie²⁷.

Fibrillatie van een versterkende vezel in een hars kan worden beschouwd als de manier waarop de vezel in langsrichting wordt opgedeeld in dunnere, samenhangende vezels²⁸.

Het fibrilleren van vezels kan worden gezien als gunstig. Door fibrilleren wordt het vezeloppervlak vergroot wat voordelig is voor de hechting tussen vezel en hars. Fibrillatie wordt gebruikt om pulp te maken. Pulp van vezel heeft een betere aanhechting door het vergrootte oppervlak, lage dichtheid en goede weerstand tegen temperatuur en impactbelasting. Daarom wordt gefibrilleerde vezel veel toegepast in technisch papier, banden en brandwerende kleding. Hier heeft het een gunstig effect voor de latere toepassing. Echter is dit in uitgeharde toestand nadelig. Doordat de vezel in langsrichting wordt gespleten zal er ontbinding optreden tussen de vezel en hars. Bij goede hechting van hars aan vezel zal dit verschijnsel eerder optreden dan bij slechte hechting. Bij slechte hechting zal de vezel eerder in geheel los raken van de hars. In beide gevallen zal het resulteren in verminderde mechanische eigenschappen van het composiet.

Aanhechting kan worden toegeschreven aan de vijf voornaamste mechanismen die alleen of in combinatie kunnen optreden²⁹:

- Chemische binding

Een chemische binding is de binding die gevormd wordt door een chemische groep op het vezeloppervlak en een compatibele chemische groep in de matrix. Dit type binding is van bijzonder belang aangezien dit de uitleg is voor het gebruik van sizings en finishes.

- Mechanische hechting

Bepaalde bindingen bestaan uitsluitend uit de mechanische binding tussen twee oppervlakken: een hars die alle details op het vezeloppervlak volledig volgt. Deze binding werkt zoals puzzelstukjes in elkaar vallen. Er zijn echter veel interne spanningen in een composiet tijdens verwerken en mechanisch testen die de (schijnbare) sterkte van het binding beïnvloeden.

- Adsorptie en benatting

Uitgaande van een oppervlak dat pieken en dalen kent, zullen de twee oppervlakken elkaar alleen raken met de pieken. Tussenliggende ruimtes waarbij de vlakken elkaar niet raken moeten opgevuld worden met hars. Bij de pieken zal de hechting erg sterk zijn, maar gemiddeld over het gehele oppervlak zal de hechting niet erg sterk zijn.

- Interdiffusie

Interdiffusie is de binding tussen twee oppervlakken waarbij de polymeermoleculen van het ene oppervlak zich

²⁷ Materials – Care and repair of advanced composites, pag. 57

²⁸ A quantitative measure of the degree of fibrillation of short reinforcing fibers

²⁹ An introduction to composite materials, pag. 38



verstrengelen met de polymeermoleculen van het andere oppervlak. Sterkte van de binding hangt af van de mate van moleculaire verstrengeling en de hoeveelheid betrokken moleculen. Dit mechanisme kan verantwoordelijk zijn voor een deel van de binding wanneer de vezels gecoat zijn met een polymeer vóórdat ze opgenomen worden in een polymeermatrix.

- Elektrostatische aantrekking

Elektrostatische aantrekking is een binding tussen twee oppervlakken waarbij het ene oppervlak een netto positieve lading heeft en het andere oppervlak een netto negatieve lading, zoals bij een zuur-base reactie en een ionische binding. De sterkte van de binding hangt af van de ladingsdichtheid.

5.1.6 Berekening aan composieten

Voor het maken van berekeningen aan composieten zijn er verschillende methodes. Een (nagenoeg) allesomvattende rekenmethode die in de literatuur veel gebruikt wordt is de Klassieke Laminaten Theorie. Voor het meer eenvoudige rekenen aan losse lamellen zijn in het verleden overzichtelijke formules opgesteld.

5.1.6.1 Klassieke laminaten Theorie

In de literatuur wordt voor het bepalen van de materiaaleigenschappen van een multi-axiaal weefsel of mat vaak verwezen naar de Klassieke Laminaten Theorie (*Laminate Plate Theory*). Deze theorie is van belang voor het bepalen van elasticiteitsmoduli, uitzettingscoëfficiënten, trek-, druk- en afschuifrekken en spanningen in en tussen de verschillende lamellen in een laminaat. Per lamel type moeten hierbij vooraf elasticiteitsmoduli, glijdingsmodulus, en dwarscontractiecoëfficiënten en uitzettingscoëfficiënten bepaald zijn.

Met de KLT kan worden afgeleid dat het belangrijk is om een laminaat symmetrisch op te bouwen^{30,31}. Ook is het mogelijk een laminaat, opgebouwd uit verschillende lamellen, te berekenen door het combineren van de eigenschappen van de verschillende lamellen³².

Ook is de KLT van belang bij het voorspellen van de mogelijke bezwijkmechanismen van het laminaat. Deze worden onderscheiden in drie soorten: vezelbreuk, spanningsbreuk haaks op de vezel en afschuiving in de lengterichting van de vezel. Deze drie bezwijkmechanismen zijn afhankelijk van de verschillende spanningen in het composiet³³.

5.1.6.2 Uitzettingscoëfficiënt lamellen

Om uitzettingscoëfficiënten te kunnen berekenen is er gekeken naar de manier waarop de CUR Aanbeveling 96 dit doet. Hierin is vermeld dat de uitzettingscoëfficiënten zoals daar vermeld voor UD-lamellen worden berekend door middel van de formules van Chamis. De formule van Chamis voor uitzettingscoëfficiënt in lengterichting is gelijk aan de formule van Schapery voor uitzettingscoëfficiënt in lengterichting:

$$\alpha_1 = \frac{E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m}$$

³⁰ An introduction to composite materials, pag. 113

³¹ Gurit Guide to composites, pag. 13

³² An introduction to composite materials, pag. 112

³³ An introduction to composite materials, pag. 119



Deze formule is relatief eenvoudig af te leiden: de uitzettingscoëfficiënt van het composiet is afhankelijk van de volumeverhoudingen tussen vezel en hars, de respectievelijke uitzettingscoëfficiënten en de bijbehorende stijfheden.

In dwarsrichting is het echter een ingewikkelder verhaal: de formule is minder gemakkelijk af te leiden. De formule van Chamis voor uitzettingscoëfficiënt in dwarsrichting die gebruikt is in de CUR, is:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_f \times \sqrt{V_f} + (1 - \sqrt{V_f}) \times \left(1 + \frac{V_f v_m E_f}{E_f V_f + E_m V_m} \right) \times \alpha_m$$

Met behulp van deze formules zijn de tabellen in de CUR voor UD-glaslamellen nagerekend. De waarden uit de CUR zijn daarbij vrij nauwkeurig benaderd.

Zoals uit bovenstaande formules voor de uitzettingscoëfficiënten blijkt, zijn hiervoor diverse materiaaleigenschappen benodigd: de vezel- en harsstijfheid, uitzettingscoëfficiënt van de vezel en hars, de vezel- en harsvolumefractie en de dwarscontractiecoëfficiënt. De waarde is dus in grote mate afhankelijk van de vezel- en harssoort die gebruikt wordt. Voor het empirisch onderzoek is uitgegaan van één vezelsoort: de Twaron 2200 Aramidevezel. Voor de hars zijn meer opties gebruikt. Bij succesvolle resultaten kan HM koolstof later eveneens worden onderzocht. De Twaron vezels zijn in de proefstuk toegepast in een polyester, vinylester en epoxy hars, zijnde de drie meest toegepaste harssoorten.

5.1.7 Verlenging anders dan door temperatuur

Behalve door invloed van temperatuur zijn er verschillende oorzaken aan te wijzen die zorgen voor een verandering van de lengte van het brugdek. Deze worden in deze paragraaf beschreven.

5.1.7.1 Krimp en kruip

Verlenging van een brugdek kan ook veroorzaakt worden door andere invloeden dan temperatuur. Bij traditionele bouwmaterialen als beton, staal en hout zijn krimp en kruip bekende verlengende en/of verkortende invloeden.

Krimp in het algemeen is verkorting door volumeverandering. Bij beton zijn dit uitdrogingskrimp, waarbij water uit het verharde beton verdampt, autogene krimp door chemische reactie van het cement met het water en thermische krimp, door het afkoelen van het beton na de hydratatiereactie.

Krimpverkorting bij hout is ook uitdrogingskrimp. Dit gebeurt door afgifte van vocht uit de celwanden. In het omgekeerde geval, waarbij de celwanden vocht opnemen, zal het hout zwellen.

Over composieten is in de literatuur niet veel te vinden over krimp en kruip. Over de individuele materialen waaruit een composiet is opgebouwd is wel informatie te vinden. Zo is een hars (uithardings)krimpgevoelig: afhankelijk van het type hars van 2% (epoxy) tot 8% (polyester). Het gaat hierbij voornamelijk om de volumeverandering door polymerisatie. De polymeren in de hars rangschikken zich tijdens uitharden en vormen een compact netwerk waardoor de polymeren minder ruimte innemen dan daarvoor.

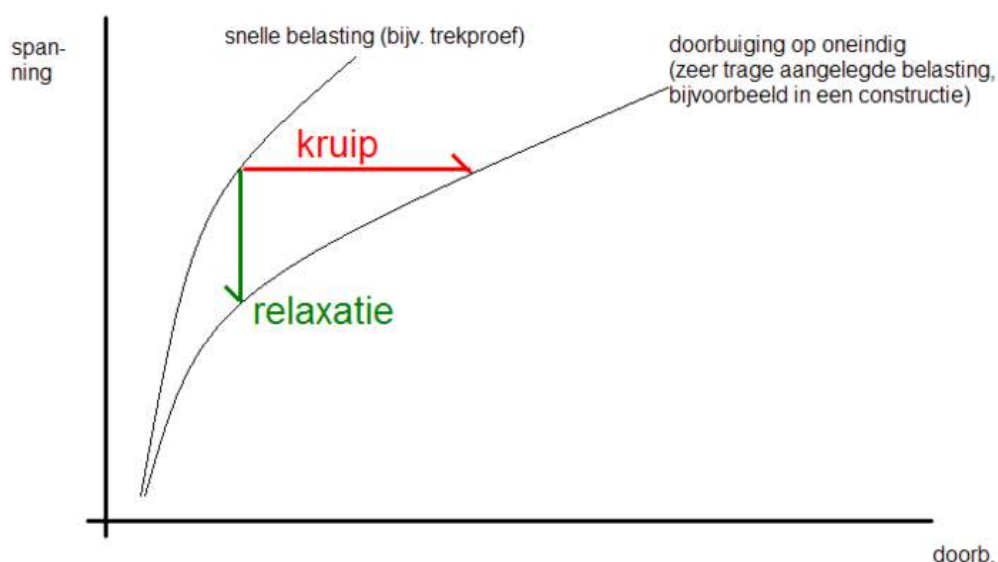


Vezels daarentegen zijn krimpongevoelig. Krimp bij een vezelversterkt kunststof treedt voor het grootste deel op voordat de brug geplaatst wordt, en is daarmee niet relevant voor deze studie. Door de verschillende stijfheden van de vezel en de hars treden er bij de krimp van hars tijdens uitharden trek-, druk- en schuifspanningen op, afhankelijk van de geometrie van de vezels.

Bij glasvezelversterkt kunststof kan volgens CUR 96 naast lengteveranderingen door wisselende vochtomstandigheden ook een reductie in de E-modulus van composiet optreden door wisselende temperatuur en wisselende belasting. Deze zijn echter éénmalig en langzaam optredend. Over het algemeen zijn bovenstaande lengteveranderingen aanzienlijk kleiner dan door temperatuur. Het is dus zinvol om na te gaan of de uitzetting door temperatuur te beperken is.

Kruip is het met de tijd toenemen van vervorming onder invloed van een constante belasting. Indien de vervorming constant is en de spanning in de tijd afneemt, dan wordt (materiaalkundig gezien) zelfde effect relaxatie genoemd. Voorbeeld van kruip is een houten boekenplank die na verloop van tijd veel meer gaat doorbuigen. Voorbeeld van relaxatie is de afname van een voorspankracht in de tijd.

Wat betreft kruip geldt in het algemeen dat glas- en koolstofvezels kruipongevoelig zijn³⁴. Volgens Teijin geldt dit ook voor aramidevezels³⁵, in tegenstelling tot het diktaat Composieten van InHolland³⁶ (met de opmerking dat dit mede afhankelijk is van ontwerp en belasting). Er zijn echter veel onderzoeken naar het kruipgedrag van aramidevezels die aantonen dat aramidevezels kruipen³⁷. Dit is afhankelijk van de toepassing, beoogde levensduur en mate van belasting. Over het algemeen leidt kruip van aramidevezels niet tot bezwijken^{38,39}.



Grafiek 5.2, verband tussen kruip en relaxatie.

³⁴ TohoTenax – What's carbon fiber?

³⁵ Teijin Aramid BV – Civieltechnische toepassingen

³⁶ Composieten – basiskennis, pag. 62

³⁷ Visco-elasticity of aramid fibres

³⁸ High-performance Fibers, pag. 15

³⁹ Long term creep and stress rupture of aramid fibre



In de achtergrondrapportage bij de CUR Aanbeveling 96 3.10 staat dat ‘voor kruip modellen bestaan waarmee materiaalkruip afgeschat kan worden. Testen is tijdrovend, inspectie is zeker aan te bevelen en in verschillende gevallen noodzakelijk.’

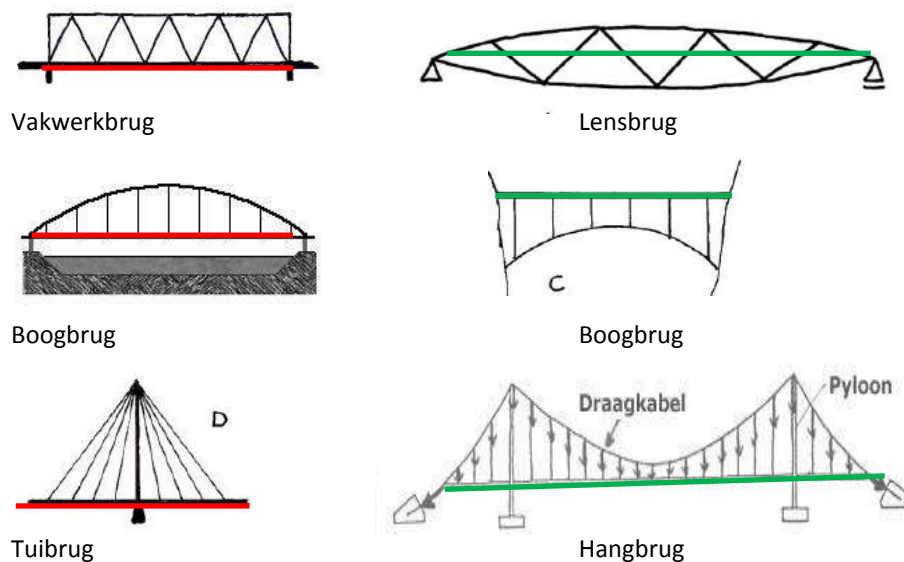
In het boek ‘Vezelversterkte kunststoffen’ van A.H.J. Nijhof staan meerdere formules voor het berekenen van kruip, maar elke formule heeft zijn eigen beperking en toepassingsgebied. De mate van kruip in lengterichting van de brug is afhankelijk van de grootte van de horizontale kracht en de duur dat die op een brugdek wordt uitgeoefend. Deze volgt uit de krachtswerking van de brug.

5.1.7.2 Krachtswerking

Afhankelijk van het ontwerp van een brug kan een brugdek van lengte veranderen door krachtswerking. Als het brugdek deel is van de constructie, kan het gebeuren dat het brugdek normaalkracht (trek of druk) op zal moeten nemen.

Bij een lensbrug met een dek ter hoogte van de neutrale lijn en zal het dek niet korter of langer worden door verticale verkeersbelasting. Bij een boogbrug, waarbij de boog afgesteund is op bijvoorbeeld rotsen en bij een hangbrug waarbij de kabels verankerd zijn aan de ondergrond, zal het brugdek ook niet van lengte veranderen door krachtswerking.

Bij een vakwerkbrug (met uitzondering van een lensbrug), boogbrug of een tuibrug kan het brugdek onder verticale verkeersbelasting naast buiging ook belast worden op trek of druk waardoor het brugdek korter of langer wordt.



Afbeelding 5.9, verschillende brugontwerpen.

Samengevat: als een brugdek ter hoogte van de neutrale lijn ligt van de gehele brug, zal de lengte van het brugdek niet veranderen door verticale verkeersbelasting.

Daarnaast kan het brugdek langer en korter worden door opnemen van horizontale rem- en aanzetbelasting. Deze effecten zijn echter tijdelijk van aard en kunnen eenvoudig worden opgevangen door een voegconstructie. Zie hiervoor paragraaf 5.7: Ontwerp.



5.2 Thermische uitzetting

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven en besproken van de metingen van de thermische uitzetting. De beschrijving van deze meting staat in hoofdstuk 4.3. De opbouw van de verschillende proefstukken staat in bijlage I.

5.2.1 Rekstrookjes

In de onderstaande tabel staat weergegeven wat de verschillen zijn tussen het wel of niet postcuren van de epoxylijm waarmee het rekstrookje op het referentiemateriaal geplakt is.

Invar 4h100°C	-7,4	-6,4	-6,9	-6,8	-6,8	-6,8	-6,9	-6,7	-6,9	-6,9
Invar 24h22°C	-7,4	-6,5	-6,9	-6,9	-6,9	-6,9	-7,0	-6,8	-6,9	-7,0

Tabel 5.5, variatie gemeten waarden Invar postcure 4h 100°C en 24h 22°C ($\cdot 10^{-6}$ mm/mm/°C)

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de gemeten ongecorrigeerde waarden van postcuren 4h op 100°C en 24h op 22°C nagenoeg gelijk zijn en dit dus geen relevant verschil maakt voor de lijn van de rekstrookjes.

Invar 4h 100°C	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Invar 24h 22°C	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Atlac 2LR 4h 100°C	-2,9	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6
Atlac 2LR 24h 22°C	-2,6	-2,7	-2,7	-2,7	-2,8	-2,8	-2,8	-2,7	-2,7	-2,7
Epoxy 2LR 4h 100°C	-3,4	-2,8	-2,9	-2,8	-2,8	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
Epoxy 2LR 24h 22°C	-3,2	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
Synolite 2LR 4h 100°C	-2,6	-2,5	-2,5	-2,5	-2,4	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
Synolite 2LR 24h 22°C	-2,2	-2,2	-2,2	-2,3	-2,3	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,1
Staal S235 24h 22°C	11,4	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,5	11,5

Tabel 5.6, variatie gemeten waarden postcure 4h100°C en 24h22°C ($\cdot 10^{-6}$ mm/mm/°C)

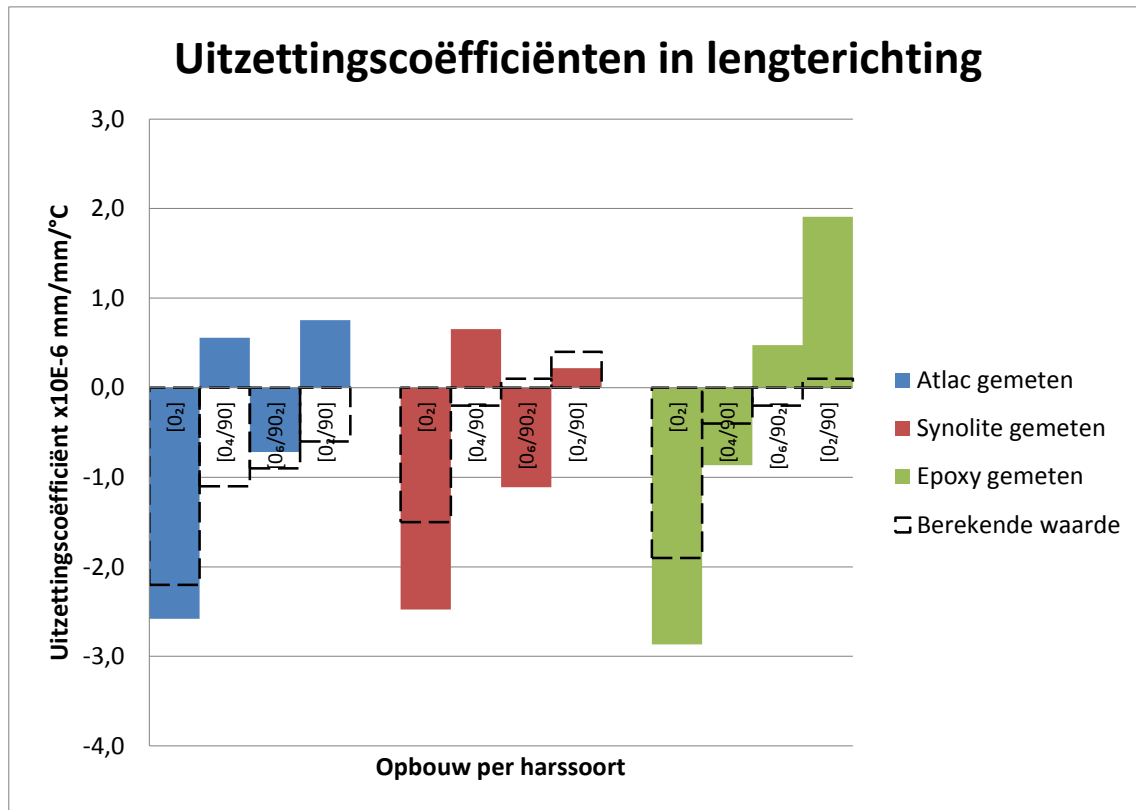
In de bovenstaande tabel is het effect van postcuren 4h op 100°C en 24h op 22°C weergegeven met behulp van de gemeten uitzettingscoëfficiënten. Hierbij is als referentiemeting de meting van het Invar 24h 22°C genomen. Deze waarde is gesteld op $1,3 \cdot 10^{-6}$ mm/mm/°C. De overige waarden zijn hieraan gecorrigeerd. Hieruit blijkt dat postcuren 4h op 100°C en 24h op 22°C ook op het beproefde materiaal geen significant verschil maakt.

5.2.2 Controlemeting staal

Ter controle is een meting met staal uitgevoerd. Uit deze meting komt een waarde van $11,5 \cdot 10^{-6}$ mm/mm/°C. Deze waarde ligt in lijn met de waarden die doorgaans voor staal worden gebruikt. Dit geeft vertrouwen in de gebruikte methode.

5.2.3 Gemeten uitzettingscoëfficiënten

De gemeten en theoretische waarden van de uitzettingscoëfficiënten van de proefstukken zijn samengevat in onderstaande grafiek:

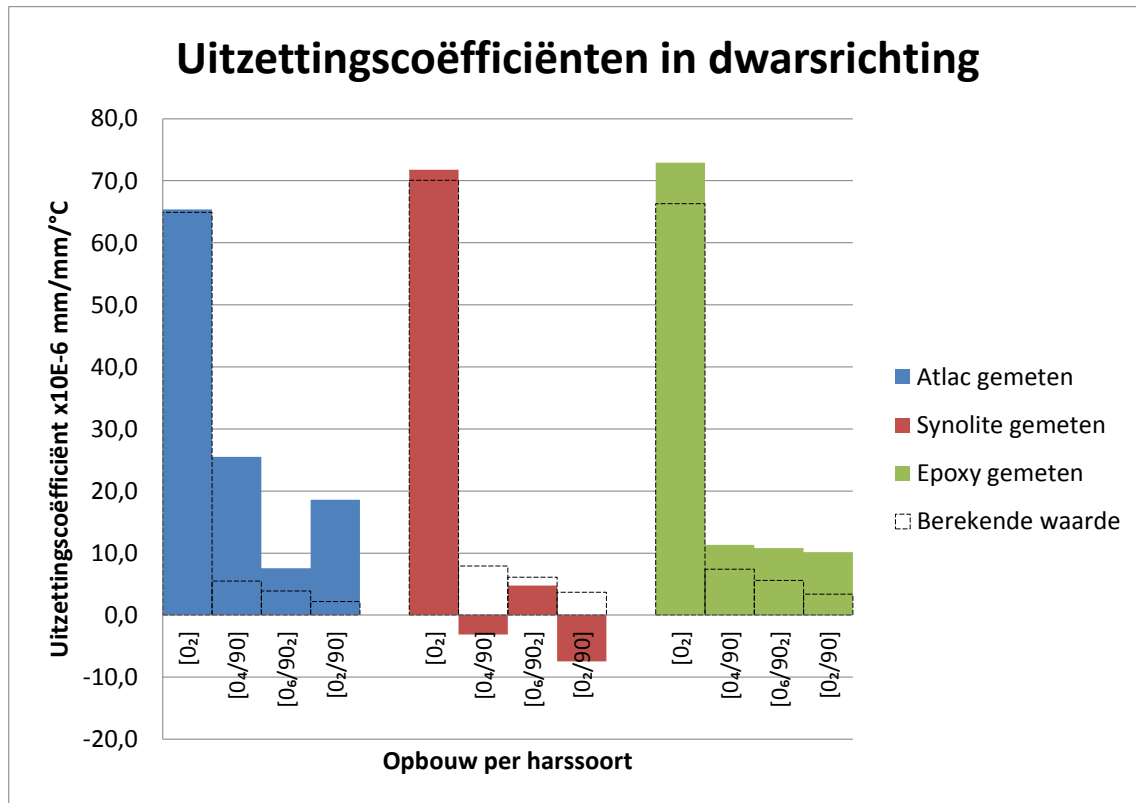


Grafiek 5.3, waarden uitzettingscoëfficiënten lengterichting (zie ook §4.3 en bijlagen I en XI)

In bovenstaande grafiek is een duidelijke trend te zien in de berekende waarden: hoe meer vezels in dwarsrichting in het materiaal liggen, hoe hoger de uitzettingscoëfficiënt zou moeten zijn. Deze theorie wordt bevestigd door de gemeten waarden van de Epoxy proefstukken. Dit verband is in de Atlac en Synolite proefstukken minder duidelijk aanwezig, voornamelijk door het te hoog uitkomen van de uitzettingscoëfficiënt van het [0₄/90] materiaal. De andere drie waarden volgen wel de berekende trend.

Daarnaast blijkt uit deze grafiek dat de verschillen in uitzettingscoëfficiënten van de proefstukken met verschillende harsen en dezelfde opbouw, minimaal zijn. Dit is te verklaren door de E-modulus en uitzettingscoëfficiënten van de harsen, die allemaal vergelijkbaar zijn, waardoor de uiteindelijke resultaten ook vergelijkbaar zijn.

Met slechts één meetwaarde moet gekeken worden naar de absolute verschillen tussen berekend en gemeten. Deze bedragen over het algemeen minder dan 1×10^{-6} , waaruit wel geconcludeerd kan worden dat theorie en praktijk in dezelfde orde van grootte vallen.



Grafiek 5.4, waarden uitzettingscoëfficiënten dwarsrichting (zie ook §4.3 en bijlagen I en XI)

Ook in deze grafiek is voor de berekende waarden een duidelijke trend te ontdekken: hoe meer vezels in dwarsrichting, hoe lager de uitzettingscoëfficiënt theoretisch zou moeten worden. Ook hier wordt de trend weer gevonden in de gemeten waarden voor de Epoxy proefstukken. Dit verband is in de Atlac en Synolite proefstukken niet te vinden.

De verschillen tussen de harssoorten zijn hier groter dan bij de uitzettingscoëfficiënten in lengterichting. Dit is (deels) te verklaren door het feit dat in dwarsrichting de harsen, door de hogere E-modulus van de hars, meer invloed hebben op de uitzettingscoëfficiënt, waardoor de verschillen tussen de harsen als het ware uitvergroot worden.

Met hier ook slechts één meetwaarde moet worden naar de absolute verschillen. Deze zijn over het algemeen onder de 10×10^{-6} , met een enkele uitschieter richting de 20×10^{-6} . Theorie en praktijk liggen in dit geval dus niet helemaal op dezelfde lijn.

Wat opvalt zijn de licht afnemende waarden gedurende de 40 cycli. Zie hiervoor de resultaten in bijlage XI (Atlac-proefstukken als voorbeeld, grafiek XI.1). Het opmerkelijke is dat dit bij alle gemeten proefstukken voorkomt, wat zou inhouden dat de hechting tussen vezel en hars toeneemt, wat echter zeer onwaarschijnlijk lijkt. Wat wel naar voren komt is dat de epoxyhars constantere waarden geeft dan de polyester- en vinylesterhars. Het verschil tussen de eerste en veertigste cyclus is echter over het algemeen niet groter dan 1×10^{-6} , wat voor de beoogde toepassing niet significant is.



5.2.4 DMA

Met behulp van een DMA (Dynamic Mechanic Analyser) is ter referentie voor het meten met rekstrookjes vastgesteld wat de uitzettingscoëfficiënt van de hars is. Dit is gedaan door eerst harsplaten te maken van de uitgezochte harsen. Uit deze platen zijn proefstukken gezaagd voor in de DMA. Uit dezelfde platen zijn ook de proefstukken gezaagd waarmee gemeten zal worden in de klimaatkast met rekstrookjes. De DMA warmt de proefstukken op en meet daarbij continu de uitzetting. Hierdoor is het mogelijk om de uitzettingscoëfficiënt vast te stellen. Deze manier van werken met de DMA is door DSM Composite Resins echter nog niet gebruikt, waardoor de betrouwbaarheid van de uiteindelijke resultaten betwijfeld kunnen worden.



Afbeelding 5.10, DMA

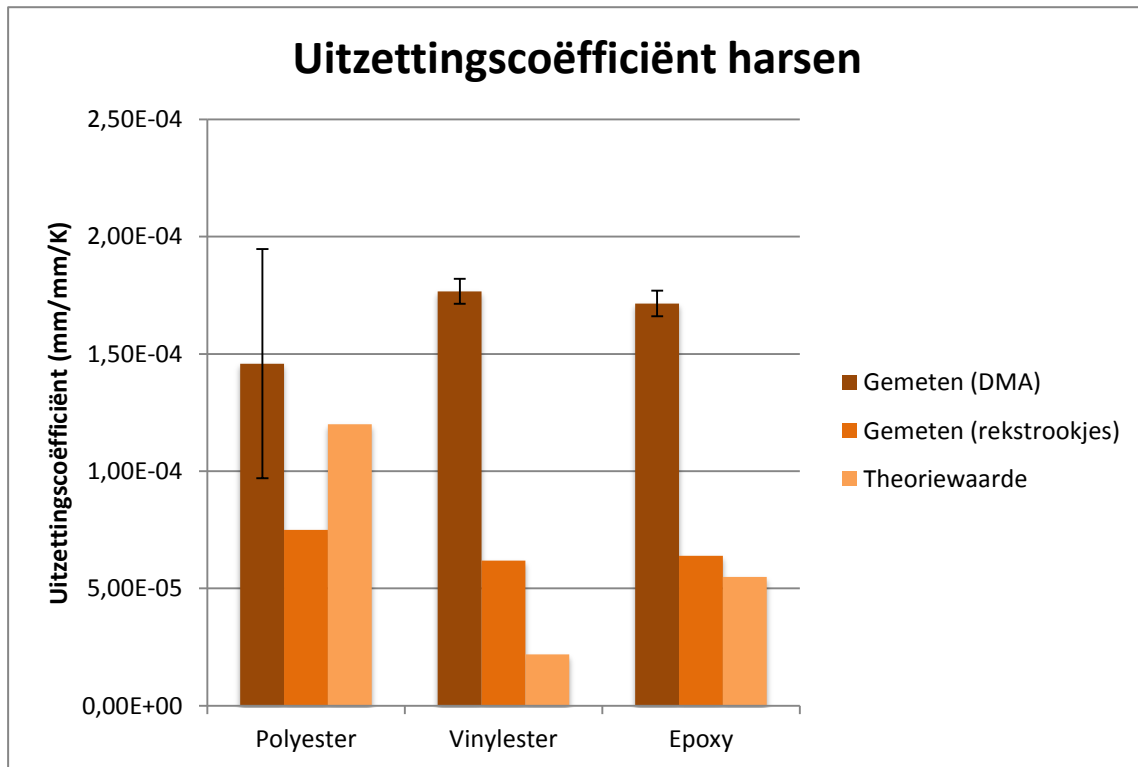
De DMA levert onderstaande gegevens (alleen middelste drie kolommen):

	Lengte bij 25°C	Uitzetting	Lengte bij 75°C	Uitz.coëfficiënt
Proefstuk	(mm)	(mm)	(mm)	(mm/mm/°C)
Polyester (1)	27,946	0,272	28,218	1,95E-04
Polyester (2)	27,404	0,133	27,537	9,71E-05
Vinylester (1)	29,189	0,250	29,439	1,71E-04
Vinylester (2)	27,472	0,250	27,722	1,82E-04
Epoxy (1)	27,231	0,226	27,457	1,66E-04
Epoxy (2)	27,466	0,243	27,709	1,77E-04

Tabel 5.7, gegevens uitzettingscoëfficiënt uit DMA

Uit de gemiddelde lengte van de proefstukken en de uitzetting over de temperatuurrange van 25°C-75°C kan de thermische uitzettingscoëfficiënt worden berekend, zoals te zien in de rechterkolom.

Het opmerkelijke aan deze resultaten is dat, op de uitschieter in de Polyester (2) na, de uitzettingscoëfficiënten opmerkelijk hoog en in overeenstemming met elkaar zijn. Dit komt overeen met de verwachting van DSM dat de verschillende harssoorten in dit opzicht weinig van elkaar verschillen, maar komt niet overeen met de theorie. De enige overeenkomst met de theorie is de Polyester (2), orde van grootte $100 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.



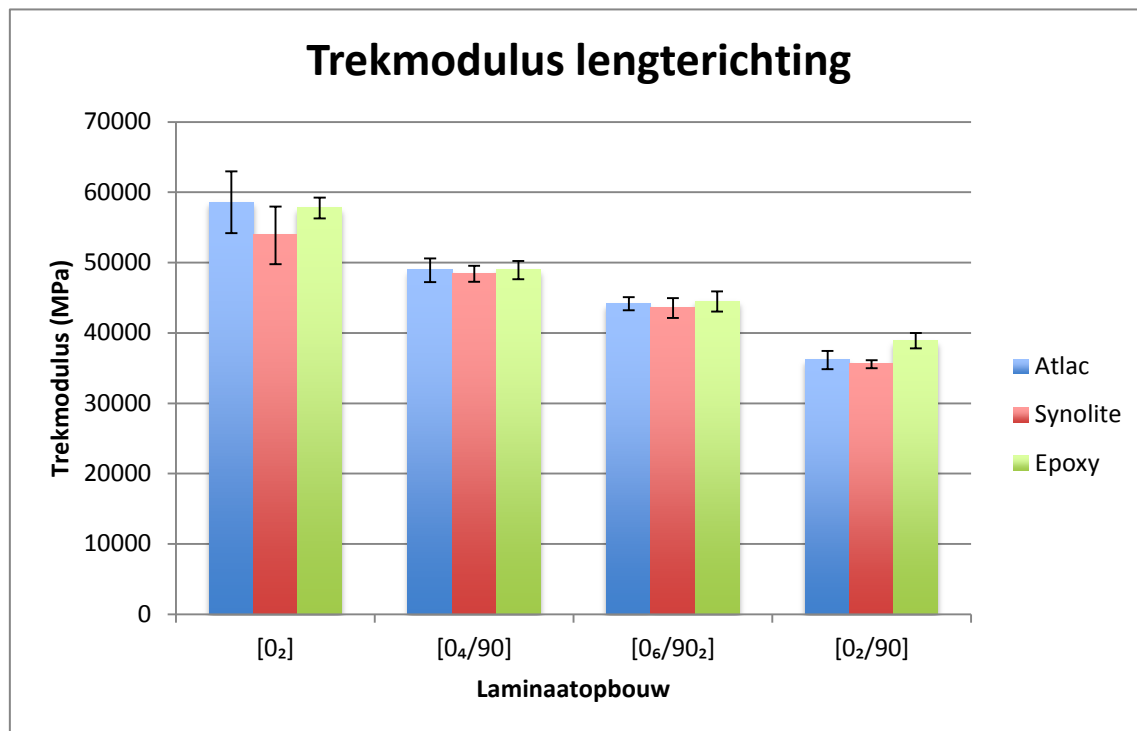
Grafiek 5.5, gegevens uitzettingscoëfficiënt hars (zie ook tabellen 5.4 en 5.7, bijlagen I en XI)

Deze resultaten zoals te zien hierboven geven opmerkelijke verschillen. De waarden gemeten met de DMA zijn significant hoger dan de waarden gemeten met de rekstrookjes. De waarden gemeten met de rekstrookjes komen beter overeen met de theoretische waarden. De overeenkomst tussen de waarden gemeten met de DMA en met de rekstrookjes is dat de uitzettingscoëfficiënt per soort hars minder verschilt dan de theorie doet vermoeden. De metingen laten zien dat ongeacht het type hars de uitzettingscoëfficiënten grofweg gelijk zijn. Dit zou betekenen dat de gemaakte proefstukken van hars en vezel in principe bij gelijke opbouw een zelfde uitzetting zouden moeten laten zien, onafhankelijk van de harssoort. Dit wordt bevestigd in de eerder in dit hoofdstuk beschreven resultaten.



5.3 Treksterkte

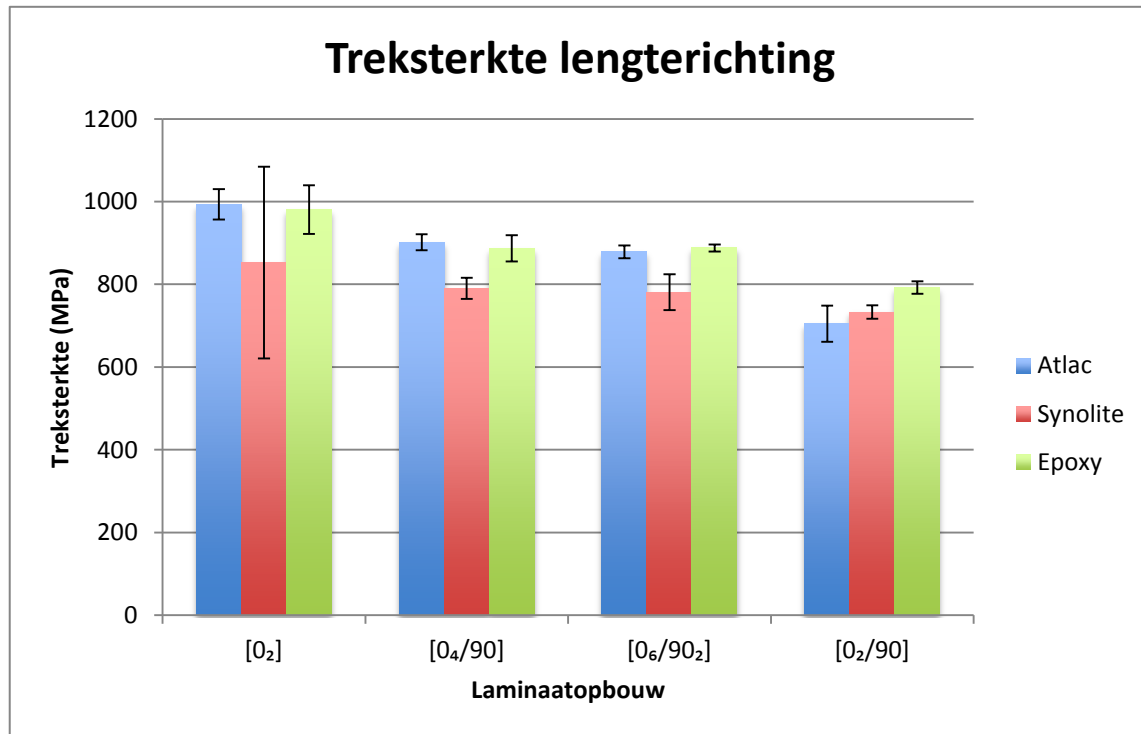
In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de trekproeven. De beschrijving van deze meting staat in hoofdstuk 4.4. De resultaten voor de trekmodulus en de treksterkte staan weergegeven in de onderstaande grafieken:



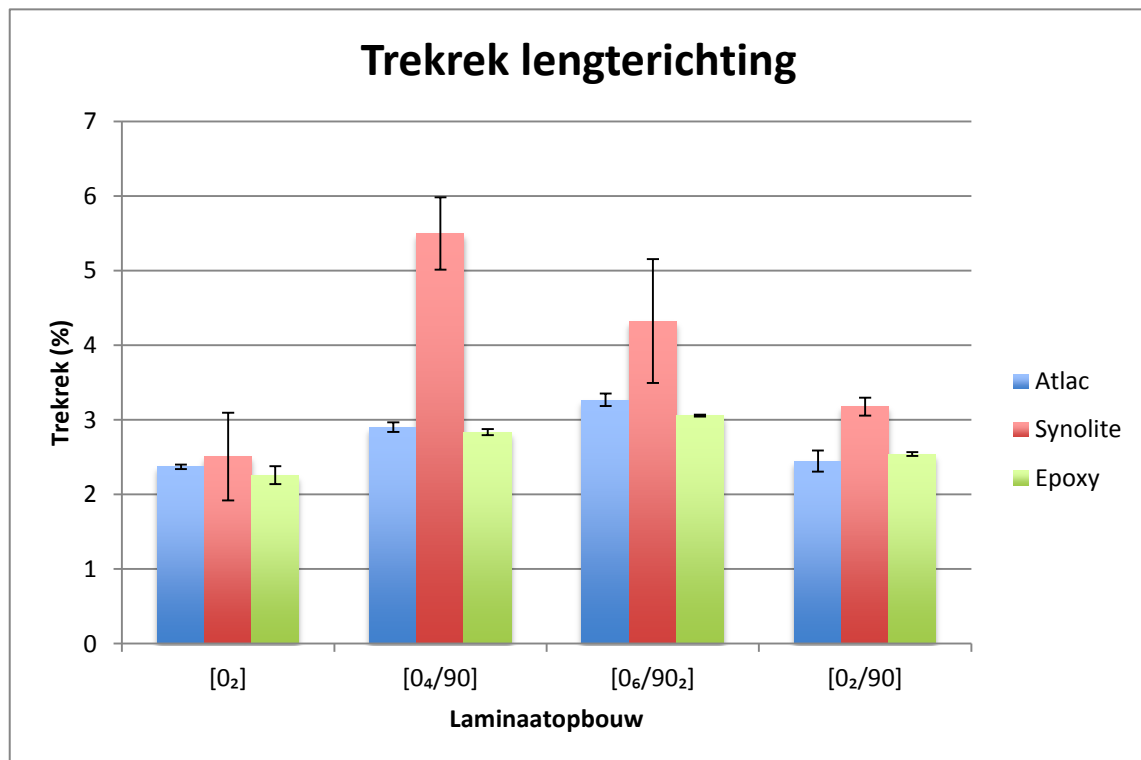
Grafiek 5.6, resultaten trekmodulus van laminaat lengterichting (zie ook §4.4 en bijlage VI)

Grafiek 5.6 en grafiek 5.7 laten de gemiddelde gemeten waarden zien voor de trekmodulus en treksterkte in lengterichting van het laminaat, verdeeld over de verschillende varianten in laminaatopbouw en harsen. Per laminaatopbouw is zowel de treksterkte als de trekmodulus in lengterichting vergelijkbaar, dus onafhankelijk van de gebruikte harssoort.

Er is een vrij eenvoudige logica te zien in de verkregen waarden: het [0₂] UD-materiaal (100% van de vezels ligt in lengterichting) heeft grofweg een sterkte van 1000 Mpa. Logischerwijs zou het [0₄/90] laminaat (80% van de vezels in lengterichting) op een sterkte van ca. 800 MPa uitkomen, het [0₆/90₂] laminaat (75% van de vezels in lengterichting) op een sterkte van ca. 750 MPa uitkomen en het [0₂/90] laminaat (67% van de vezels in lengterichting) op een sterkte van ca. 670 MPa uitkomen. Dit komt redelijk overeen met de gemeten waarden.



Grafiek 5.7, resultaten treksterkte van laminaat lengterichting (zie ook §4.4 en bijlage VI)



Grafiek 5.8, resultaten trekrek bij bezwijken laminaat lengterichting (zie ook §4.4 / bijlage VI)



Uit de literatuur komen waarden naar voren van ongeveer 1400 MPa voor een aramidevezelversterkt composiet. Deze waarde is niet gehaald. Dit kan verschillende oorzaken hebben: de invloed van het vochtgehalte in de vezel (zie ook hoofdstuk 7.5), UV-degradatie van de vezel (deze ligt al enkele jaren in de werkplaats bij DSM), vezels die enigszins gedraaid in het proefstuk liggen en natuurlijk de kunde en ervaring waarmee de proefstukken zijn gemaakt (hoewel dit gezien de constante verkregen waarden minder waarschijnlijk lijkt).

Zo op het oog lijkt het grootste verschil te zitten in de trekrek bij bezwijken in lengterichting, zoals te zien in onderstaande grafiek:

Een mogelijke verklaring voor het opmerkelijke verschil in trekrek is te vinden in het feit dat bij de Synolite (rood in de grafiek) de 'klemdruk' van de klemmen van de trekbank ingesteld was op 50 bar, wat vervolgens stapsgewijs opgevoerd is naar 400 bar (zie hiervoor ook hoofdstuk 6.3). Hierdoor kwam het voor dat sommige proefstukken slipten in de klemmen. De resultaten laten dus de som zien van de materiaalrek + de sliplengte, waardoor deze te hoog uitvallen.

Alle resultaten van de trektesten (ook in dwarsrichting) en bijbehorende grafieken zijn te vinden in bijlage VI.

De treksterkte van de uni-directionele proefstukken is ongeveer 70% van de waarde uit de literatuur. Mits degradatie van sterkte en stijfheid in gelijke mate teruglopen in de tijd zou gedegradeerde vezel aangetoond kunnen worden door de E-modulus te berekenen met behulp van de E-modulus(trek) van het composiet, het berekende vezelpercentage en de E-modulus van de gebruikte harsen, met de formule:

$$E_c = v_f \cdot E_f + v_m \cdot E_m, \text{ waarin } v_m = 1 - v_f.$$

Zie voor de gebruikte waarden bijlage VI en bijlage VIII.

Hars	Gemeten E-modulus composiet (MPa)	Gemeten vezelpercentage (%)	Opgegeven E-modulus hars (MPa)	Berekende E-modulus vezel (Mpa)
Atlac 430	58571	60,9	3400	93992
Synolite 0175-N-7	53886	51,5	3700	101148
Epoxy Hexion 235	57772	55,7	3200	101175

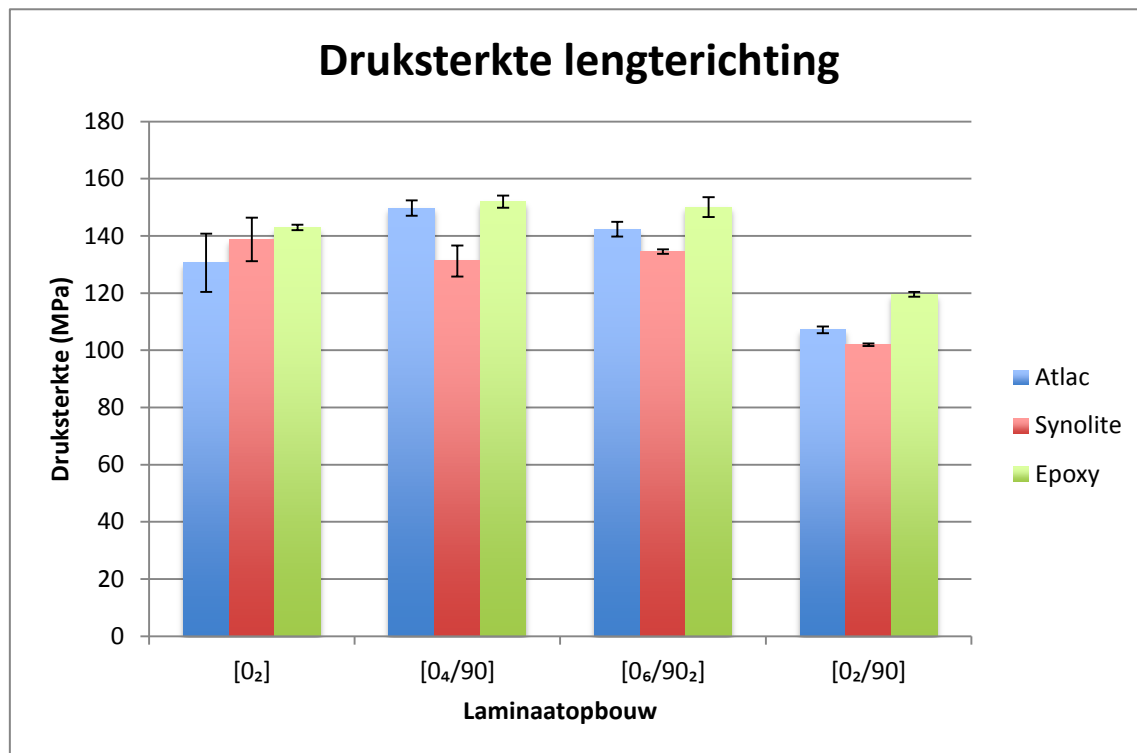
Tabel 5.8, berekende E-moduli vezels in proefstukken

Hieruit blijkt dat de E-modulus van de vezel grofweg 100.000MPa is. Dit ligt ongeveer 25% lager dan de waarde opgegeven door de fabrikant, 130.000MPa. Dit zou een goede verklaring kunnen zijn voor treksterktes die grofweg 30% lager liggen dan de waardes uit literatuur.



5.4 Druksterkte

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de drukproeven. De beschrijving van deze meting staat in hoofdstuk 4.5. De resultaten van de druksterkte in lengterichting zijn als volgt:

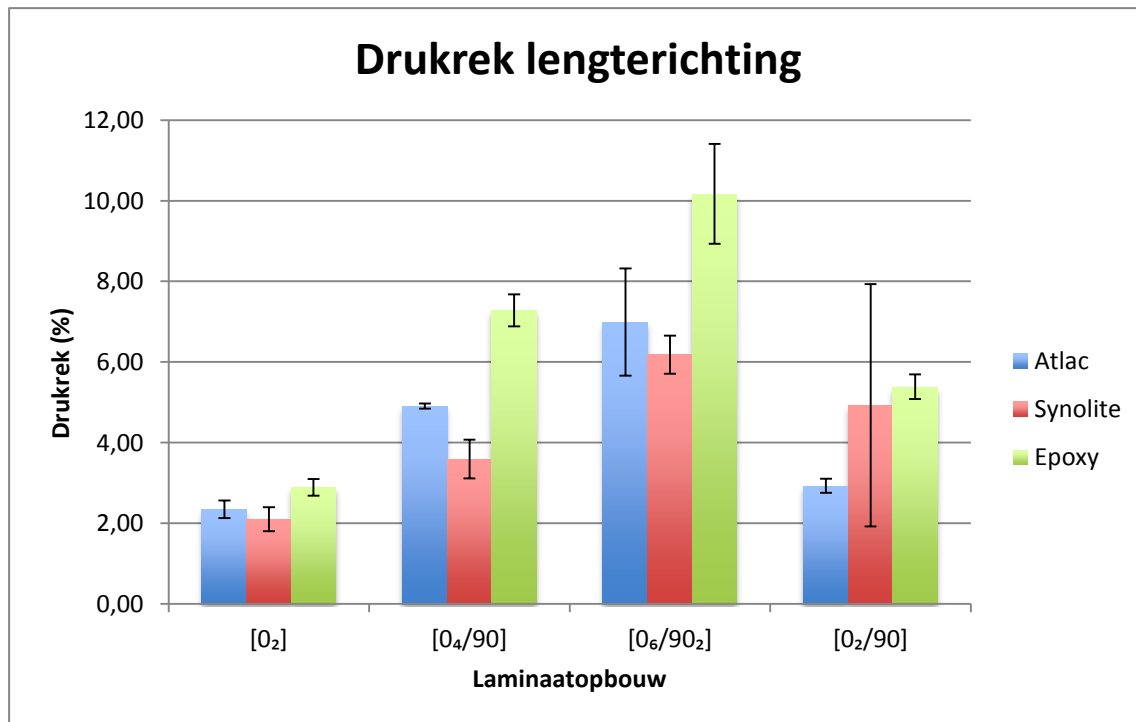


Grafiek 5.9, testresultaten druksterkte van laminaat lengterichting (zie ook §4.5 en bijlage VII)

Uit bovenstaande grafiek van de testresultaten van de druksterkte in lengterichting blijkt dat de druksterkte (uitgedrukt in N/mm^2) niet zozeer afhankelijk is van de verhouding van de diktes van het materiaal, maar veel meer van de verhouding tussen het aantal langs- en dwarslagen in het materiaal. Het [0₄/90] en [0₆/90₂] laminaat hebben vergelijkbare druksterktes. Deze laminaten hebben 75% tot 80% van de vezels in drukrichting. Het [0₂/90] laminaat heeft echter maar 67% van de vezels in drukrichting, waardoor de waarde van de druksterkte significant lager is.

Deze theorie doortrekkend is de conclusie dat de druksterkte van unidirectioneel [0₂] laminaat te laag ligt, en eerder op $180\text{--}200 \text{ N/mm}^2$ zou moeten liggen. Dit is te verklaren door het feit dat de [0₂] laminaten bij druk uitknikken (de knikkracht is kleiner dan de druksterkte). Dit geeft een verkeerd beeld van de druksterkte van het UD-materiaal. Voor eventueel vervolgonderzoek zou het verstandig zijn dit te voorkomen door de dikte van het laminaat te vergroten. Zie hiervoor ook hoofdstuk 8, aanbevelingen.

Uit de testen die gedaan zijn met betrekking op drukrek bij bezwijken kwamen de volgende resultaten:



Grafiek 5.10, resultaten drukrek bij bezwijken laminaat lengterichting (zie ook §4.5 / bijlage VII)

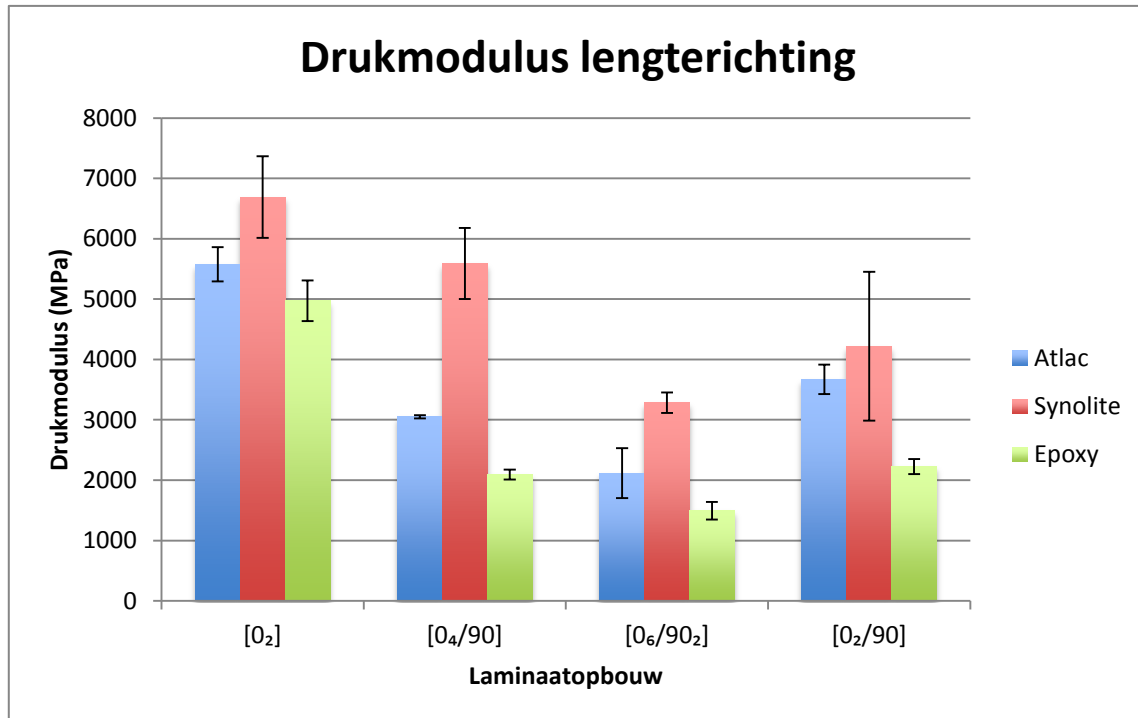
Het opmerkelijke aan deze resultaten is dat de drukrek toeneemt met de dikte van het materiaal (duidelijk te zien bij de Atlac en de Epoxy). Dit suggereert dat in de uiteindelijke toepassing, waarbij een composiet zal worden toegepast in lagen die dikker zijn dan de maximale geteste dikte, de drukrek hoger zal zijn dan 10% (Epoxy).

Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn de dunnere proefstukken, [O₂] en [O₂/90], niet getest zijn tot bezwijken, maar eerder uit zijn geknikt. Als de proefstukken dikker geweest zouden zijn zou de drukrek bij bezwijken gemeten kunnen worden die hoger zal liggen dan de gemeten drukrek bij uitknikken.

Een andere verklaring zou kunnen zijn dat bij dikkere proefstukken, [O₄/90] en [O₆/90₂], de kern van het materiaal kapot gedrukt wordt, maar wel bij elkaar gehouden wordt door de buitenkant, waardoor de druksterkte (gedeeltelijk) behouden wordt. Uiteindelijk zal ook de buitenkant bezwijken. Hierdoor wordt dus een zeer taaie breuk bewerkstelligd, waardoor de gemeten drukrek relatief hoog wordt.

Een andere conclusie die getrokken kan worden uit de grafiek is dat de drukrek van de Synolite 0175-N-7 en de Atlac 430 grofweg gelijk zijn. De drukrek van de Epoxy Hexion 235 is in alle gevallen hoger dan die van de andere twee harssoorten.

In het eerste deel van de spanning-rekdiagram, waarin de E-modulus is gemeten, ook wel het elastische gebied genoemd, is bij een gelijkblijvende druksterkte en een toenemende drukrek het logische gevolg dat de drukmodulus afneemt, zoals ook te zien in onderstaande grafiek:



Grafiek 5.11, resultaten drukmodulus laminaat in lengterichting (zie ook §4.5 en bijlage VII)

In dwarsrichting had het testen van de [0₂] geen zin omdat de proefstukken al uitknikten voordat er een kracht op werd gezet. Dit is ook de reden waarom er in de bijlage geen waarden staan vermeld bij het [0₂] laminaat.

Alle resultaten van de druktesten en bijbehorende grafieken zijn te vinden in bijlage VII.



5.5 Vochtgehalte

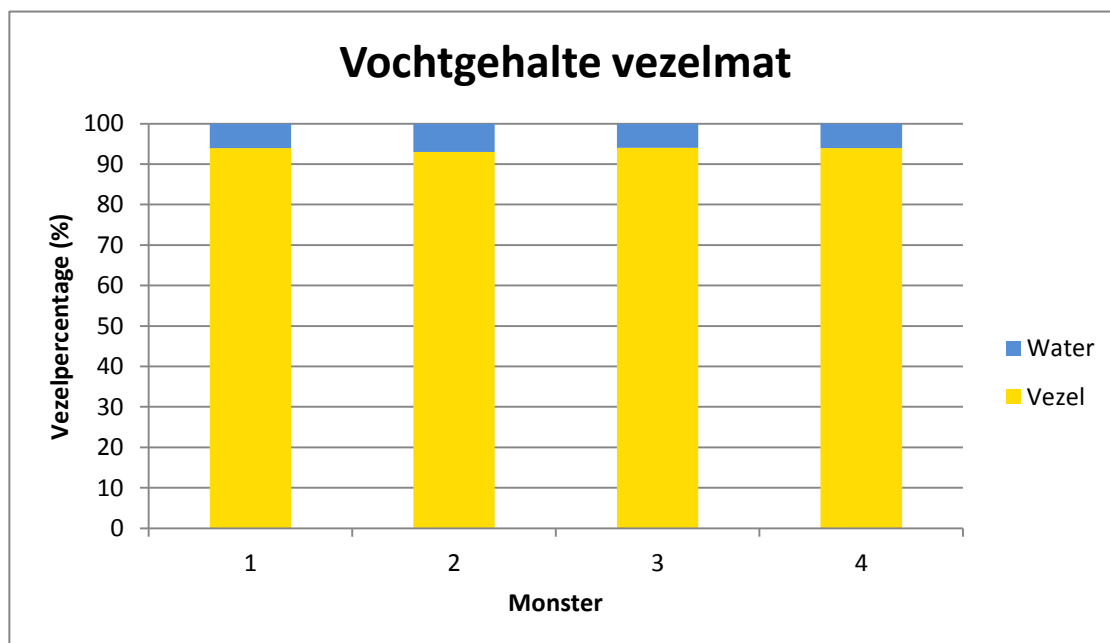
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de bepaling van het vochtgehalte in de vezelmat weergegeven. De beschrijving hiervan staat in hoofdstuk 4.6.

Uit de vochtgehalte-tests kwamen de volgende waarden naar voren:

Monster	1	2	3	4			
Gewicht af rol	0,910	0,858	0,875	0,679	g	T=20°C	t=0min
	93,96	93,01	94,06	93,96	%	T=110°C	t=10min
Gewicht warm	0,855	0,798	0,823	0,638	g		

Tabel 5.9, resultaten vochtgehalte vezelmat

Dit resulteert in onderstaande grafiek:



Grafiek 5.12, resultaten vochtgehalte vezelmat (zie ook §4.6)

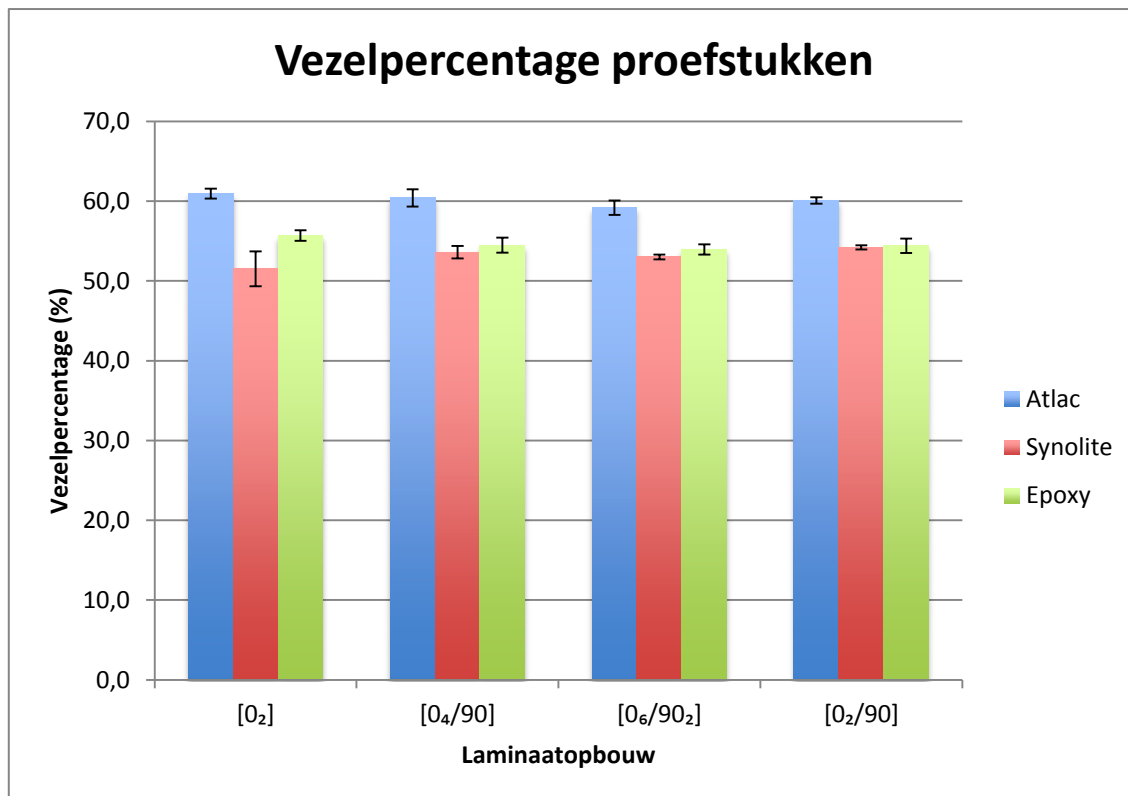
Bovenstaande grafiek maakt het vochtgehalte in de vezelmat inzichtelijk: grofweg 6-7%. Dit is meer dan de op het productblad van Twaron vermelde 3,2-5%. Dit zou kunnen komen doordat de rol UD-vezel bij DSM al enkele jaren in de werkplaats lag, wat de vezel tijd heeft gegeven om meer water aan te trekken.



5.6 Vezelpercentage

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de bepaling van de vezelpercentages van de gebruikte proefstukken. De beschrijving hiervan staat in hoofdstuk 4.7.

Uit het bepalen van de vezelpercentages ontstaat onderstaande grafiek:



Grafiek 5.13, bepaalde vezelpercentages (zie ook §4.7 en bijlage VIII)

Hieruit blijkt dat het vezelpercentage niet of nauwelijks afhankelijk is van de dikte van het laminaat, maar veelmeer van de gebruikte harssoort (en daarmee samenhangend de manier waarop het proefstuk is gemaakt. Zie hiervoor ook hoofdstuk 4.2 en bijlage I).

Ook kan het afhankelijk zijn van de ervaring waarmee de proefstukken werden gemaakt: de Synolite werd eerst gemaakt, gevolgd door de Epoxy, en als laatste de Atlac. Het opmerkelijke is dat in die volgorde de vezelvolumepercentages ook oplopen.

Gemiddelde waarden per harssoort zijn: Atlac 60%, Synolite 53% en Epoxy 55%.

Alle resultaten van de metingen zijn te vinden in bijlage VIII.



5.7 Ontwerp

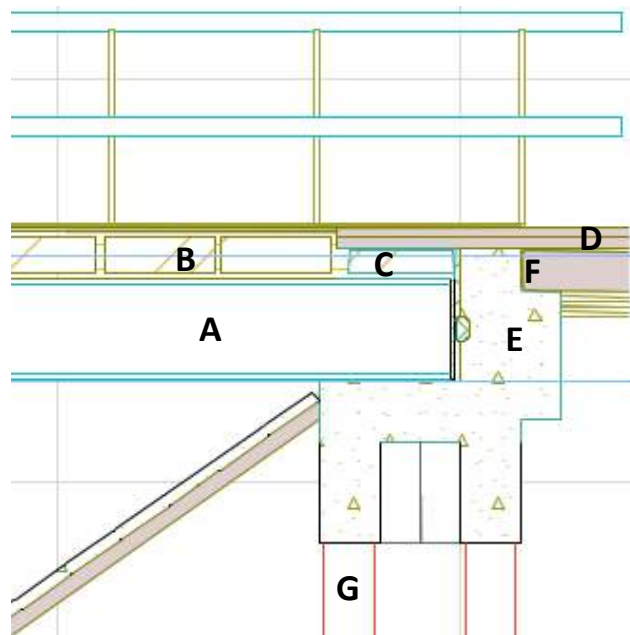
In dit hoofdstuk is een ontwerp opgesteld hoe een brug eruit zou kunnen zien waarbij het dek is uitgevoerd in uitzettingsvrij composiet. Hierbij is een open voegconstructie niet meer nodig omdat het dek ten gevolge van temperatuur niet uitzet.

5.7.1 Opbouw

In de huidige composietbrugdekken zijn (onder meer) navolgende twee verschillende soorten opbouw te onderscheiden. Deze betreffen een compleet monoliet vacuüm ge-infuseerd dek (in 1 keer gemaakt, over het algemeen geprefabriceerd en vervoerd naar de plaats van bestemming) en een samengesteld dek bestaande uit constructieprofielen in lengterichting en dek(planken) in dwarsrichting, die met elkaar verlijmd of anderszins verbonden worden⁴⁰. Dit kan eveneens geprefabriceerd.

Bij slim opdelen van het dek kan gewerkt worden met een standaardonderdeel wat meerdere keren wordt gemaakt, wat de kosten drukt. Voor de brug in dit concept-ontwerp is hiervoor gekozen, waarbij het dek is opgebouwd uit slechts 3 verschillende onderdelen: hoofdliggers, dekdelen en 'passtukken'.

In hoofdrichting is gekozen voor aramidevezelversterkte kunststof I-profielen (A), de precieze samenstelling van de hoofdliggers (vezels in langsrichting, dwarsrichting en andere richtingen) zal moeten blijken uit berekeningen. Het grootste deel van de vezels zal in de flenzen in de lengterichting van het profiel gepositioneerd zijn. In de lijven zullen met name diagonale vezelrichtingen aanwezig moeten zijn. Dit is nodig voor de krachtsafdracht; voor de thermische uitzetting zijn vezels in lengterichting gunstig. Bovenop deze I-profielen is een relatief dunne sandwichstructuur (B) geplaatst, die moet zorgen voor de afdracht en verdeling van de verkeersbelasting naar respectievelijk over de hoofdliggers. Ook hier geldt dat een groot



Afbeelding 5.11, doorsnede landhoofd+opbouw dek

deel van de vezels in de lengterichting van de brug gepositioneerd worden, wat gunstig is voor de uitzettingscoëfficiënt. Daarnaast zijn bij de aansluitingen nog twee passtukken (C) gemaakt. Deze bestaan uit een nog dunnere sandwichstructuur waar overheen geasfalteerd kan worden om zo een ideale aansluiting van het asfalt (D) op het dek te kunnen garanderen.

⁴⁰ Meerdink Bruggen – Composiet brugdek



De landhoofden (E) en eventuele tussensteunpunten zijn gemaakt van gewapend beton. Dit is natuurlijk hét ‘standaardmateriaal’ voor de onderbouw. Ook de stootplaten (F) (en oplegging daarvan) en heipalen (G) zijn conventioneel uitgevoerd. Vezelversterkt kunststof zou hier (gedeeltelijk) ook toegepast kunnen worden. Hier zal echter eerst nader onderzoek naar gedaan moeten worden.

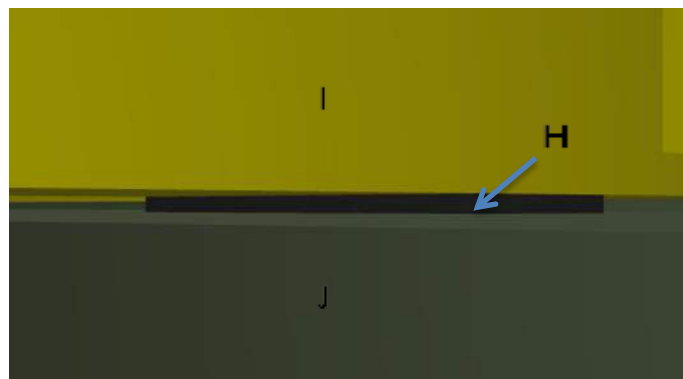
5.7.2 Oplegging

Bij een conventionele brug met ‘los’ dek wordt gebruik gemaakt van oplegblokken om verticale krachten over te brengen van het dek naar de onderbouw, en om thermische uitzetting (= horizontale verplaatsing) van het dek op te vangen. Deze oplegblokken worden over het algemeen versterkt met staal om wél veel horizontale verplaatsing op te kunnen nemen en niet te ver in kunnen drukken.



Afbeelding 5.12, conventioneel oplegblok

Bij dit concept-ontwerp is de thermische uitzetting (horizontale verplaatsing) echter verwaarloosbaar, waardoor de hoogte van het oplegblok (H) drastisch verminderd kan worden. Er is gekozen voor een oplegblok met een (arbitraire) hoogte van 10 mm. Dit geeft nog steeds de verticale belasting door van het dek (I) naar de onderbouw (J), en zorgt ervoor dat het dek niet direct op het beton komt te liggen (in verband met slijtage). Ook kan het een geringe verdraaiing van het dek (ten gevolge van belasting op het dek) opvangen.



Afbeelding 5.13, dun oplegblok

5.7.3 Voegen

Omdat de thermische uitzetting van het dek nagenoeg nihil is, is het mogelijk om de brug uit te voeren als een integraalbrug. Dit houdt in dat dek en landhoofden monoliet aan elkaar verbonden zijn. Omdat het hier echter twee verschillende materialen betreft is het lastig om er een monoliet van te maken. Wel kan dit principe worden benaderd met een pompvoeg⁴¹.

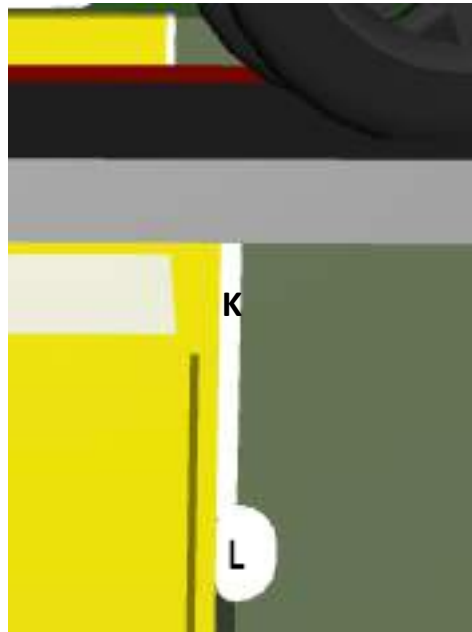
Dit werkt als volgt: in de voeg (K) tussen het dek en het landhoofd wordt een platgeslagen dunwandige stalen buis geplaatst op een vooraf bepaalde positie. Deze wordt vervolgens onder hoge druk ‘opgeblazen’ met water. De openstaande voeg wordt vervolgens afgevuld met bijvoorbeeld een krimparme

⁴¹ Staal-beton brug met pompvoeg klaar voor de praktijk

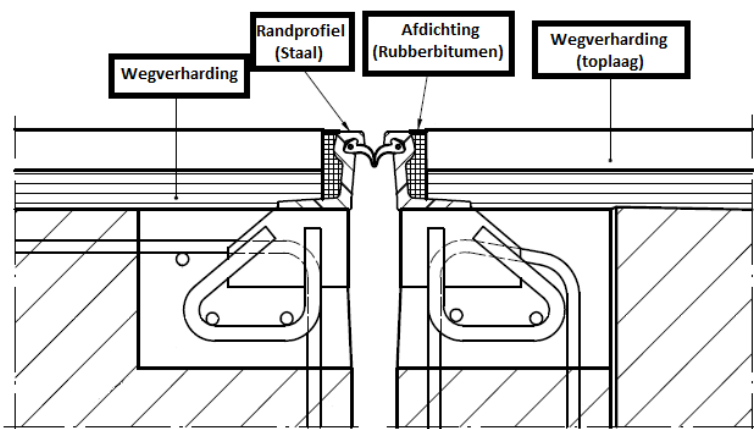


mortel (K). Zodra dit uitgehard is wordt de buis gevuld met grout (L). Dit wordt bij beide landhoofden tegelijk gedaan. De landhoofden worden als het ware uit elkaar gedrukt, wat door de grond achter het landhoofd voorkomen wordt. Hierdoor worden dek en landhoofden tegen elkaar aan gedrukt, waardoor het gaat samenwerken als één geheel bij het afdragen van krachten. Hier kan (in dit concept-ontwerp) overheen geasfalteerd worden, waardoor voegen in het dek niet meer te zien zijn, en vervelende bijgeluiden (kedeng-kedeng) worden voorkomen.

Het grote voordeel van een integraalbrug is dat de twee landhoofden door middel van het dek op elkaar afgestempeld worden, waardoor er geen schoorpalen maar loodpalen toegepast kunnen worden. Dit is eenvoudiger bij het heien, levert tijdswinst en dus geld. In afbeelding 5.15 is een doorsnede weergegeven van een traditionele voegovergang met stalen klauwen en een rubberprofiel.



Afbeelding 5.14, pompvoeg



Afbeelding 5.15, voegovergang

5.7.4 Geluid bij voegen

Voegovergangen in kunstwerken vormen de overgangsconstructies in rijbanen tussen kunstwerken en landhoofden en kunstwerkdelen onderling. Deze onderdelen zijn kwetsbaar en vergen frequent onderhoud. Op basis van inspecties heeft Rijkswaterstaat vastgesteld dat voortijdig functieverlies van voegovergangen in toenemende mate leidt tot schade aan de voegovergangen en aangrenzende constructies. Deze schade uit zich onder andere in het losrijden van materiaal dat kan leiden tot ongevallen. Onderhoud aan voegovergangen kost Rijkswaterstaat ca. € 20 mln./jr. Rijkswaterstaat streeft daarom naar:

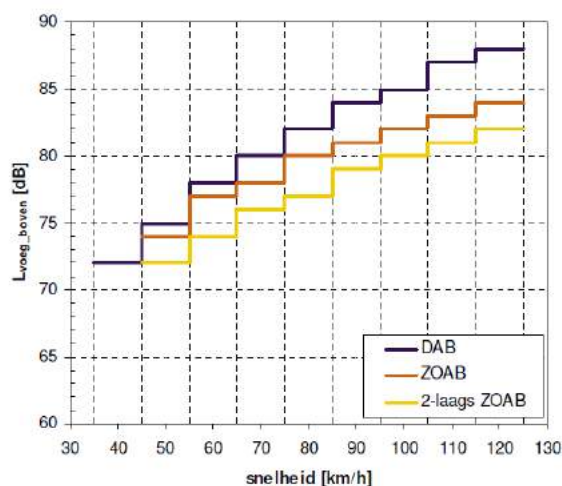
- significante kostenbesparingen op het beheer en onderhoud van voegovergangen door het verlengen van de onderhoudsintervallen en het beperken van het aantal schades;



- verbetering van de doorstroming door minimaliseren van verkeershinder als gevolg van onderhoud en vervanging.

Daarnaast is er door de toename van geluid reducerende maatregelen in de vorm van geluidsschermen en/of (tweelaags) ZOAB ook behoefte aan stille duurzame voegovergangen. Op wegvakken, waar geluid reducerende maatregelen zijn toegepast, vallen de geluidspieken bij voegovergangen extra op. Dit is belastend voor de omwonenden.

Sinds 2010 is de norm NBD00401 “Geluidseisen aan Voegovergangen” van kracht voor elk nieuw in te bouwen voegovergang in het rijkswegennet. Het doel is om de hinder van voegen in geluidgevoelige situaties zoveel mogelijk te beperken. Ook door andere wegbeheerders of in bestaande situaties kan de norm van toepassing worden verklaard.



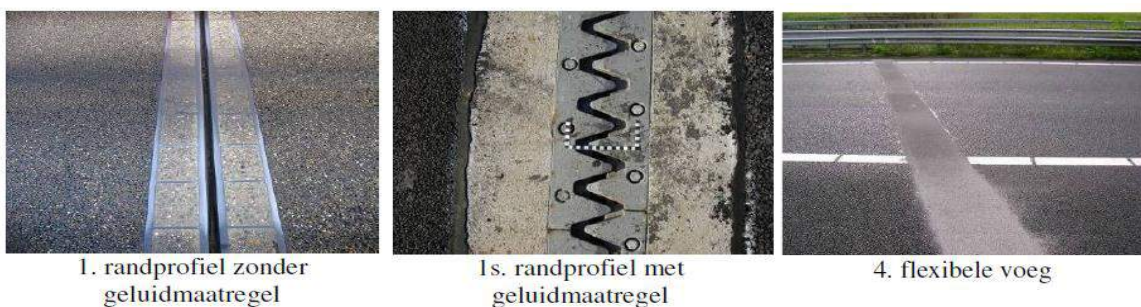
Geluidseisen volgens de 'nieuwe' NBD00401 aan de bovenzijde van het kunstwerk bij verschillende typen aangrenzende verharding

Afbeelding 5.16, geluidseisen voegovergangen

Afhankelijk van het type van de aangrenzende verharding en de maximum rij snelheid zijn geluidseisen gesteld in dB aan de voegen (zie hiernaast).

Aan deze eisen ligt een relatie tussen het gemeten geluidsniveau (dB) en subjectieve waarneming van het extra geluid door de voegen ten grondslag. Het verifiëren of wordt voldaan aan de gestelde geluidseis kan met de Meerkeuze-matrix van RWS of met een rapportage van een leverancier waarmee aantoonbaar is dat aan de eis zal worden voldaan.

Voegovergangen met een klein dilaterend vermogen van -50mm +50mm (ofwel totaal 100mm) zijn het grootst in aantal: circa 4000 kunstwerken. Hiervoor zijn voegen met een randprofiel (1) (Engels: Nosing joint) de standaard omdat deze veel minder onderhoud vergen dan bitumineuze voegen (4). Het randprofiel (1s) met geluidmaatregel voldoet veelal aan de gestelde eisen bij voegovergangen.

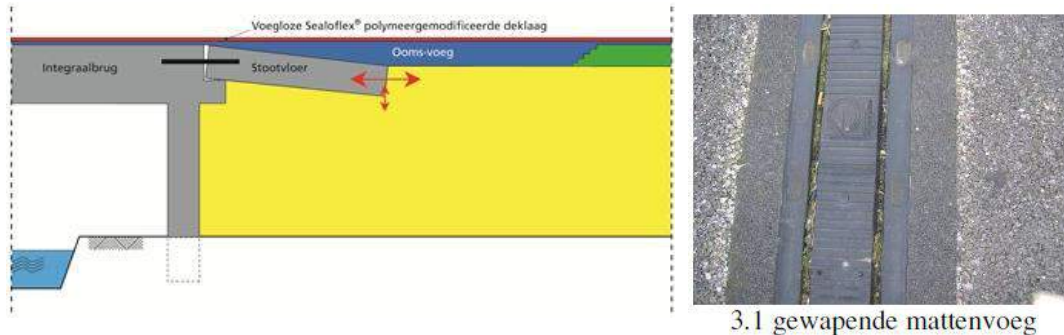


Afbeelding 5.17, voegovergang 1, 1s en 4.



Bij een kunstwerk van minder dan 20 (à 50) meter lengte kan een integraal brug (6) worden toegepast. Het asfalt wordt niet onderbroken door voegen, de lengteverandering van het kunstwerk wordt opgenomen in aangepaste asfaltpakketten achter beide landhoofden.

Matvoegen (3) hebben acceptabel onderhoud, maar voldoen niet altijd aan de geluidseisen.



Afbeelding 5.18, voegovergang 6 en 3.1.

Alleen bij voegovergangen met een grotere capaciteit geldt dat (nog) niet altijd/geheel te voldoen is met de bestaande voegen aan de gestelde geluidseis. Dan moet het ALARA-principe "As Low As Reasonably Achievable" (zo laag als redelijker wijze bereikbaar is) worden toegepast. Bij 70 à 100mm voegcapaciteit voldoet randprofiel (1s) veelal en blijft soms het dichtst in de buurt komen van de geluidseisen. Bij 70 à 100mm voegcapaciteit blijft randprofiel (1s) het dichtst in de buurt komen van de geluidseisen. Bij een voeg met een capaciteit van totaal >100mm komen de lamellenvoeg (7) met geluidmaatregel en de vingervoeg (2) veelal nog dichtst in de buurt van de eisen.



Afbeelding 5.19, Voegovergangen 7, 7s en 2.

Bij uitzettingsvrije brugdekken kunnen pompvoegen worden gebruikt. Bij pompvoegen wordt de ruimte tussen brugdek en landhoofd voorzien van een flexibel, rond profiel dat volgepompt wordt met grout (onder druk). Daarmee wordt het dek als het ware ingeklemd tussen de landhoofden. Daarna wordt het gedeelte boven het ronde profiel gevuld met grout (zonder druk) tot aan onderzijde verharding, waarna er overheen geasfalteerd kan worden. Dit levert geen extra rijgeluid bij de voegovergangen.

Met twee voegen met elk 100mm aan totale dilaterende capaciteit is een (aaneengesloten prefab) deklengte van meer dan 100m te realiseren. Indien hiervoor bij de landhoofden randprofielen met geluidsmaatregel (1s) wordt toegepast, is een uitzettingsarm brugdek niet onontbeerlijk om aan de geluidseisen te voldoen.



Bij langere aaneengesloten brugdekken is op geluidaspect wel meerwaarde te verkrijgen met uitzettingsarme brugdekken in plaats van de lamellenvoeg met geluidmaatregel (7s) of de vingervoeg (2).



Links een voeg met randprofiel en geluidmaatregel (1s), rechts een lamellenvoeg met geluidmaatregel (7s)

Afbeelding 5.20, voegovergang 1s en 7s



Afbeelding 5.21, links: kunststof dek met onzichtbare pompvoeg, rechts: betondek met zichtbare open voeg

5.7.5 Concept-ontwerp

Alle bovengenoemde punten zijn verwerkt in een 3d-model om een impressie te geven van hoe een brug er in de uiteindelijke situatie uit kan gaan zien.

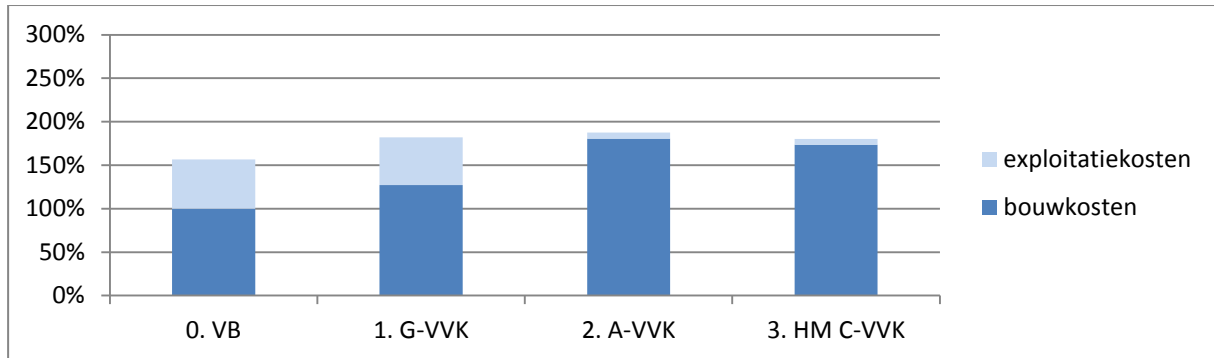


Afbeelding 5.22, concept-ontwerp



5.8 Kostenanalyse

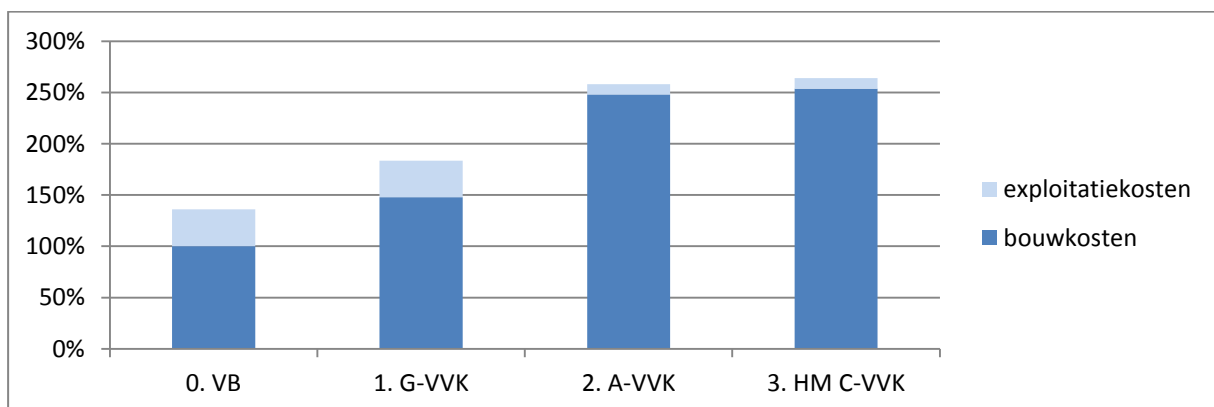
De resultaten van de levenscycluskosten vergelijking zijn hieronder weergegeven in twee staafgrafieken voor brug A en B.



Afbeelding 5.23, Kostenverhouding brugdekvarianten brug A. (zie ook *bijlage XIII en XIV*)

Bij kleine overspanningen (tot zeg $L < 15\text{m}$) blijken:

- de toekomstige (exploitatie)kosten voor vervanging van voegen en opleggingen relatief groot te zijn bij druk bereiden bruggen;
- glasvezelcomposietbruggen enkele tientallen procenten duurder te zijn dan voorgespannen betonnen bruggen;
- bij druk bereiden bruggen blijken de totale levenscyclus kosten van uitzettingsvrije brugdek varianten niet significant hoger te zijn dan de glasvezelcomposietbrugdek variant.



Afbeelding 5.24, Kostenverhouding brugdekvarianten brug B. (zie ook *bijlage XIII en XIV*)

Bij middelgrote overspanningen (tot zeg $L < 30\text{m}$) blijken de verschillen verder uiteen te lopen, voorgespannen beton is de kosten gunstigste variant.

Bij de dimensionering blijkt dat met:

- voorgespannen beton de grootste slankheid kan worden bereikt ($L/32,5$);
- glasvezelcomposiet de kleinste slankheid kan worden bereikt ($L/12,5$);
- uitzettingsvrije composieten daar tussenin zitten (aramide $L/15$ & carbon $L/22,5$).

Bij de dimensionering van composiet brugdekken blijkt dat doorgaans doorbuiging maatgevend is, en dat bij grote verkeersaantallen vermoeiing ook maatgevend kan worden.



6. Conclusie

De eerste hoofdvraag waar antwoord naar is gezocht luidt: welke combinatie van vezel en hars is nodig om een uitzettingsvrij composiet samen te stellen dat geschikt is om toe te passen in een brugdek. Deze vraag is onderverdeeld in drie subvragen: welke vezels zijn er beschikbaar, welke harsen zijn er beschikbaar en wat zijn eisen voor de beoogde toepassing.

Grofweg zijn de vezels in te delen in een aantal groepen. Glasvezels, koolstofvezels, aramidevezels en overige synthetische vezels. Voor de vezels was een negatieve uitzettingscoëfficiënt een belangrijke eigenschap. Hieraan voldeden de koolstofvezels en aramidevezels en de overige synthetische vezels. Voor de toepassing in een composiet bleven de koolstofvezel en aramidevezel over, omdat deze met regelmaat in composiet zijn toegepast. Vanwege de lagere uitzettingscoëfficiënt van aramidevezels ten opzichte van koolstofvezels is gekozen voor aramidevezels.

Voor de harsen bleek het lastig om op basis van theoretische waarden een harssoort te kiezen, omdat de uitzettingscoëfficiënt door de leverancier/producent van de harsen over het algemeen niet wordt bepaald. Daarom is gekozen om van de drie meest gangbare harssoorten (polyester, vinylester en epoxy) proefstukken te maken, om zo zelf vast te stellen wat de meest geschikte hars is. Alle drie soorten hars leverden ongeveer dezelfde uitzettingscoëfficiënten op. Daarom kan op andere aspecten geselecteerd worden. Epoxy heeft de gunstigste eigenschappen: onder andere de grootste treksterkte dwars op het laminaat, beste potentiële hechting aan vezels en minste verhardingskrimp; maar is tevens de duurste.

Om de uitzettingscoëfficiënt van de hars te bepalen is gebruik gemaakt van twee methoden: met behulp van rekstrookjes en met behulp van een DMA. Bij de bepaling van de uitzettingscoëfficiënt met behulp van de DMA werden op voorhand al kanttekeningen geplaatst. De gemeten waarden volgden uit de proef met de rekstrookjes en de gemeten waarden volgende uit de proef met de DMA bleken niet overeen te komen. De waarden gemeten met behulp van de rekstrookjes bleken beter overeen te komen met de theoretische waarden. Hieruit kwam naar voren dat de gebruikte methode met behulp van de DMA niet bij uitstek geschikt was om de thermische uitzettingscoëfficiënt te bepalen.

Voor de beoogde toepassing als brugdek, zal omdat de druksterkte van aramidevezel een factor 5 á 6 lager ligt dan de treksterkte, nog verdere engineering nodig zijn. De gemeten waarden van het proefmateriaal bij de uitzettingstest liggen orde van grootte in de buurt van de theoretische waarden. Het is mogelijk om een composiet te maken waarbij de temperatuurswisselingen vrijwel geen invloed hebben op de uitzetting van het materiaal. Er kan geconcludeerd worden dat er door (alleen) temperatuurswisselingen geen onthechting optreedt tussen vezel en hars, omdat bij onthechting een steeds hoger wordende uitzettingscoëfficiënt verwacht wordt. Uit metingen blijkt dat uitzettingsarm composiet na meerdere temperatuurcycli uitzettingsarm blijft.



De tweede hoofdvraag is: hoe verhoudt een ontwerp van een uitzettingsvrij composiet brugdek zich tot veel voorkomende hedendaagse brugdekconstructies. Deze vraag is verdeeld in twee deelvragen, te weten: ‘Hoe zien brugdekontwerpen van een hedendaagse brugconstructie eruit?’ en ‘Hoe ziet een brugdekontwerp van een vergelijkbare brug uitgevoerd in EFC eruit?’

Bij het vergelijken van de brugdekontwerpen is vooral gekeken naar twee hoofdpunten: opleggingen en voegovergangen. Bij een hedendaagse brugconstructie wordt gebruik gemaakt van relatief hoge, gewapende oplegblokken om verticale krachten en horizontale verplaatsing van het brugdek op te vangen. Bij het wegvallen van de thermische uitzetting (verticale verplaatsing) in een EFC-ontwerp hoeven deze oplegblokken veel minder hoog en ongewapend uitgevoerd te worden. Dit scheelt zowel in aanleg als in onderhoud: oplegblokken zonder stalen wapening corroderen immers niet.

Daarnaast wordt bij hedendaagse brugconstructies gebruik gemaakt van voegconstructies, die aan het oppervlak van het asfalt zitten en ongewenste bijgeluiden geven voor zowel mensen in als buiten het voertuig. Een voeg is bij een uitzettingsloos brugdek theoretisch niet meer nodig. Toch zit er een voeg in, omdat de brug niet monoliet gemaakt wordt (kunststof en beton). Daarom is gekozen voor het toepassen van een pompvoeg. Dit heeft als voordelen dat het principe van een integraalbrug benaderd wordt (met alle bijbehorende voordelen), de uiteindelijke constructie waterdicht is en de voeg aan het asfaltoppervlak niet zichtbaar is.

De kosten voor uitzettingsvrije aramide- en carbonvezel versterkte kunststof variant verschillen onderling niet significant, maar blijken voor vaste bruggen economisch gezien (nog?) niet aantrekkelijk.



7. Discussie

Bij het bepalen van de drukcapaciteit van de proefstukken is gebruik gemaakt van een methode waarover nog niet veel bekend was. Voor de bepaling van de E-modulus in druk zou gebruik gemaakt moeten worden van rekstrookjes. In dit onderzoek is dit omwille van de tijd en de kosten niet gedaan, maar is de rek bepaald met de verplaatsing van de drukbank en de daarvoor benodigde kracht. Dit is minder nauwkeurig dan de rek meten met behulp van een rekstrookje op het punt waar de rek gemeten zou moeten worden.

Voor het maken van de proefstukken is gebruik gemaakt van niet gestikte uni-directionele vezelmat. De vezels in deze mat werden bij elkaar gehouden door een vezelnetje aan de onder en bovenkant. In vergelijking met een gestikte vezelmat liggen de vezel niet strak en netjes in vergelijking met een gestikte UD-vezelmat. Zie hiervoor afbeelding 7.1 en 7.2.



Afbeelding 7.1 / 7.2, verschil tussen gestikte/geweven vezelmat en niet gestikt/geweven

Ondanks dat er met uiterste zorg en precisie gewerkt is, bestaat de mogelijkheid dat de vezels niet exact in de juiste richting liggen. Deze imperfectie kan bij de proefstukken met vezels in twee richtingen een grotere afwijking geven.

Omdat er veel kleine waarden gemeten worden (tussen grofweg $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ en $-2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) kunnen afwijkingen in de meting relatief grote gevolgen hebben voor de uitkomst. Dit in combinatie met het feit dat de thermische proeven slechts één of twee keer zijn uitgevoerd, geeft dat de genoemde getallen alleen een richting aangeven. Wat vooral aangetoond is, is dat uitzettingsarm composiet na meerdere temperatuurr cycli uitzettingsarm blijft.

Zowel dimensionering als kostenraming zijn relatief grof verricht, maar geven bestaande inzichten weer en bieden daarmee naar verwachting ook voldoende richting ter onderlinge vergelijking.

Bij betonnen bruggen met kleine lengten (zeg $L < 15\text{m}$) en middelgrote lengten (zeg $L \approx 30\text{m}$) worden de landhoofden steeds vaker monoliet aan het dek verbonden. Dit geschiedt onder de naam integraalbruggen. Er worden daarbij geen voegen en opleggingen toegepast en de asfaltconstructie achter de landhoofden moeten/kunnen de beperkte uitzettingen van het dek opnemen. Deze betonnen bruggen zijn nauwelijks duurder in bouwkosten, maar kennen wel reeds minder exploitatiekosten. Deze (0⁺) variant is niet gepresenteerd in bovenstaande staaftafelbeelden.



Voor grote overspanningen (zeg $L > 30\text{m}$) zijn composietbruggen (nog?) niet geschikt. In beton worden plaatbruggen toegepast tot circa 50m in één overspanning voordat aanvullende constructies zoals kokers, vakwerken, bogen, tuien, hangkabels worden gekozen. In geval van aanvullende constructies zijn veldlengtes van ruwweg 20 meter zeer gebruikelijk, waarbij ook gedacht kan worden aan composiet dek in een hybride brug.



8. Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek opgesomd. Deze aanbevelingen volgen uit wat er tijdens het uitvoeren van de verschillende proeven naar voren is gekomen en uit het voortschrijdende inzicht gedurende het onderzoek.

8.1 Aramidevezel

Van aramidevezels is bekend dat deze onder invloed van zonlicht (UV-straling) na verloop van tijd verminderde mechanische eigenschappen gaan vertonen. De gebruikte vezelmat in dit onderzoek is jaren opgeslagen in een loods en is blootgesteld aan dag- en kunstlicht. Bij het doen van hetzelfde soort onderzoek kunnen bij gebruik van 'nieuw' Twaron andere uitzettingscoëfficiënten gevonden worden. Een lagere elasticiteitsmodulus door veroudering kan zorgen voor een hogere uitzettingscoëfficiënt. Door gebruik te maken van niet gedegradeerde vezel zou dit dus kunnen resulteren in een lagere uitzettingscoëfficiënt.

Een ander bekend fenomeen van aramidevezels is dat de vezels in de tijd vocht opnemen. De in dit onderzoek gebruikte vezelmat heeft jaren de tijd gehad om vocht op kunnen nemen. Uit onderzoek bleek dat de in dit onderzoek gebruikte Twaron een vochtgehalte had van 6-7%. Dit is meer dan de 3-5% die opgegeven is door de fabrikant. Het is niet bekend wat de invloed hiervan is op het composiet. Het zou matige hechting tussen vezel en matrix kunnen veroorzaken, omdat daar, waar vocht zit, de matrix niet kan hechten aan de vezel.

8.2 Proefstukken

Bij het maken van proefstukken is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een UD-legsel wat in twee verschillende richtingen is gelegd. Hierdoor kan het zijn dat de hoofdrichtingen niet precies haaks op elkaar lagen. Dit kan zorgen voor kleine afwijkingen in de meetwaarden, mede omdat de gemeten waarden zeer klein zijn. Voor vervolgonderzoek is het aan te bevelen om gestikte vezelmat te gebruiken om er voor te zorgen dat de vezels in exacte de juiste richting liggen. Tijdens dit onderzoek is gebleken dat de gemaakte proefstukken achteraf niet overeenstemmen met de normen. Dit geldt voor dikte van de proefstukken. De verschillen in diktes van de proefstukken lijken invloed te hebben op de resultaten van de verschillende proeven die in dit onderzoek zijn uitgevoerd. Dit geldt met name bij de drukproef die is uitgevoerd. Aanbevolen wordt om de genormeerde diktes aan te houden.

8.3 Eigenschappen

Omdat de drukcapaciteit van aramidevezel in vergelijking met de trekcapaciteit laag is, is het aan te bevelen onderzoek te doen naar verbetering van de drukcapaciteit. De lage drukcapaciteit komt doordat de aramidevezels uitknikken onder drukbelasting. Ook zou gekeken kunnen worden naar een materiaal samengesteld uit een combinatie van aramidevezels en glas- of carbonvezels. Dit kan eventueel nog gecombineerd worden met een fenolhars die theoretisch een lagere uitzetting zou moeten hebben dan de drie



typen hars die gebruikt zijn in dit onderzoek.

Ten behoeve van een expansievrij composiet lijken aramidevezels in eerste instantie gunstiger dan koolstofvezels omdat aramidevezel een grotere negatieve thermische uitzettingscoëfficiënt heeft en goedkoper is dan koolstofvezel. Koolstofvezel heeft als voordeel boven aramidevezel dat ze een grotere stijfheid kan hebben. Het gaat hier dan om de Ultra-Hoog-Modulus vezel. Ander belangrijk voordeel ten opzichte van aramidevezel is dat koolstofvezel ook goed is in het opnemen van drukkracht. Ook is de verwerkbaarheid van koolstofvezel beter dan van aramidevezel.

In bijlage XII staan een aantal rekenvoorbeelden waarbij met behulp van de klassieke laminaten theorie een aantal uitzettingsvrije aramide- en koolstofcomposieten zijn uitgerekend. Hieruit komt naar voren dat er met UHM koolstofvezel meer ontwerpruimte is om tot een uitzettingsvrij composiet te komen. Daarom wordt geadviseerd om een zelfde soort proeven te doen, zoals beschreven in dit rapport, maar dan met koolstofvezel. Dit kan met dezelfde harsen als die nu zijn gebruikt, die vallen reeds in de gewenste orde grootte van $+60 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Naast de vezelverdeling zoals die in dit onderzoek zijn gebruikt ($[0]$, $[0_4/90]_s$, $[0_6/90_2]_s$ & $[0_2/90]_s$) worden ook proeven aanbevolen met $[-45/0/45/90]_s$ & $[-45_3/0_3/45_3/90_{11}]_s$.

Daarnaast wordt ook aanbevolen om vermoeiing en toelaatbare rek van aramidevezelversterkte kunststoffen verder te onderzoeken. Mogelijk geeft de nieuwe CUR96 hieromtrent informatie.

8.4 Kosten en alternatieven

Aanbevolen wordt om de prijs voor vezels met negatieve uitzettingscoëfficiënten te blijven volgen. Alleen als deze in de toekomst fors mochten dalen ten opzichte van de referentiematerialen, dan kunnen uitzettingsvrije composiet brugdekken voor vaste bruggen interessant worden.

In bijzondere situaties zoals bij beweegbare bruggen kunnen uitzettingsvrije brugdekken wel interessant zijn.

Ontwerpers wordt aanbevolen om uitzettingsvrije variant mee te nemen bij:

- lange beweegbare brugdekken: om de breedte van de open voeg bij krimpen van brugdek door lage temperatuur te beperken;
- brede beweegbare brugdekken: om klapperen van vooropleggingen door bol staan door temperatuur te beperken.



9. Literatuurlijst

- [1] ir. W.C. Drees e.a., 2003. Constructieer Voorgespannen Beton, 2^e druk. 's Hertogenbosch: ENCI Media. (ISBN 90-71806-52-9)
- [2] Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004. Handleiding Werken met Instandhoudingsplannen. Utrecht: KIOSK.
- [3] Stedelijk Museum Amsterdam: uitgekiende mix van vezels en harsen houdt 'badkuip' strak, 2012.
<http://www.bebouw.nl/nl/nieuws/detail/stedelijk-museum-amsterdam-uitgekiende-mix-van-vezels-en-harsen-houdt-badkuip-strak>, geraadpleegd op 05-09-2013.
- [4] ir. P. van der Zanden, 2009. Integraal kunstwerk met verassing. Cement, 2009/2, pag. 44-49
- [5] dr.ir. A.H. de Bondt e.a., 2006. Voegloze overgangen van asfaltbeton voor integraalbruggen. Cement, 2006/6, pag. 78-81
- [6] P. Spencer e.a., 2009. Standaarddetails voor betonnen bruggen, versie 1.1 (doc.nr. NBD 00730)
- [7] Vishay PG, 2010. Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gages (Tech Note TN-513-1, doc.nr. 11063).
- [8] F. Lanze di Scalea, 1998. Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Composites Using Strain Gages, Experimental Mechanics vol. 38 no. 4, pag. 233-241
- [9] SPi Supplies. M-Bond™ 610 Adhesive System. http://www.2spi.com/catalog/spec_prep/glue.shtml, geraadpleegd op 21-11-2013
- [10] Teijin Aramid BV, 2011. Twaron – a versatile high-performance fiber. http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2011/08/0090168-product-brochure-revised_V2_C.pdf, geraadpleegd op 02-09-2013
- [11] Gurit Services AG. Gurit Guide to Composites, versie GTC-3-0509.
- [12] [13] [14] R.P.L. Nijssen, 2013. Composieten – basiskennis. (ISBN 978-90-77812-44-0)
- [15] Kamenny Vek Advanced Basalt Fiber. Basfiber® Market and Applications.
<http://www.basfiber.com/application>, geraadpleegd op 14-11-13
- [16] D. Hull, 1995. An Introduction to Composite Materials, 8^e druk. Cambridge (UK): Cambridge University Press (ISBN 0-521-23991-5)



- [17] A.H.J. Nijhof, 2006. Vezelversterkte Kunststoffen – mechanica en ontwerp, 1^e druk. Delft: VSSD (ISBN 90-407-2484-9)
- [18] Vectran Fiber, Inc., 2010. Vectran[®] LCP Fiber: an unique combination of properties for demanding applications. <http://www.vectranfiber.com/BrochureProductInformation/Applications.aspx>, geraadpleegd op 24-09-2013
- [19] Teijin Aramid BV. Composites. <http://www.teijinaramid.com/applications/composites/>, geraadpleegd op 24-09-2013
- [20] [21] R.P.L. Nijssen, 2013. Composieten – basiskennis (ISBN 978-90-77812-44-0)
- [22] The Engineering Toolbox. Coefficients of Linear Thermal Expansion. http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html, geraadpleegd op 18-09-2013
- [23] American Elements. Thermal Expansion Coefficient of Metals & Materials. <http://www.americanelements.com/thermal-expansion-coe.html>, geraadpleegd op 18-09-2013
- [24] Azom.com. Resin properties for Composite Materials – comparison of resin properties. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=997>, geraadpleegd op 19-09-2013
- [25] A.H.J. Nijhof, 2006. Vezelversterkte Kunststoffen – mechanica en ontwerp, 1^e druk. Delft: VSSD (ISBN 90-407-2484-9)
- [26] Netcomposites i.s.m. Gurit Services AG. Resin comparison. <http://www.netcomposites.com/guide/resin-comparison/18>, geraadpleegd op 14-11-2013
- [27] Materials – Care and repair of advanced composites. <http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Resins.pdf>, geraadpleegd op 14-11-2013
- [28] A.R. Henn en P.B. Fraundorf, 1990. A quantitative measure of the degree of fibrillation of short reinforcing fibers. J. Mater. Sci. 25, pag. 3659-3663
- [29] [30] D. Hull, 1995. An Introduction to Composite Materials, 8^e druk. Cambridge (UK): Cambridge University Press (ISBN 0-521-23991-5)
- [31] Gurit Services AG. Gurit Guide to Composites, versie GTC-3-0509.
- [32] [33] D. Hull, 1995. An Introduction to Composite Materials, 8^e druk. Cambridge (UK): Cambridge University Press. (ISBN 0-521-23991-5)



[34] TohoTenax. What's carbon fiber? <http://www.tohotenax-eu.com/en/products/whats-carbon-fiber.html>, geraadpleegd op 03-12-2013

[35] Teijin Aramid BV. Civieltechnische toepassingen. <http://www.teijinaramid.com/nl/applications/civieltechnische-toepassingen/>, geraadpleegd op 03-12-2013

[36] R.P.L. Nijssen, 2013. Composieten – basiskennis (ISBN 978-90-77812-44-0)

[37] C.J. Burgoyne en K.G.N.C. Alwis, 2008. Visco-elasticity of aramid fibres. J. Mater. Sci. 43, pag. 7091-7101

[38] J.W.S. Hearle, 2001. High-performance Fibers. Boca Raton (USA): CRC Press (ISBN 1 85573 539 3)

[39] G.M. Fallatah et al., 2007. Long term creep and stress rupture of aramid fibre. Plastics, rubber and composites 2007-36-9, pag. 403 e.v.

[40] Meerdink Bruggen. Brugdekken, composiet brugdek. <http://www.meerdinkbruggen.nl/2013-03-27-14-43-03/composiet-brugdek>, geraadpleegd op 14-01-2014

[41] ing. S.J. Poot sr., 1999. Staal-beton brug met pompvoeg klaar voor de praktijk. Bouwen met staal nr. 146, januari-februari 1999, pag. 24-26

[42] J.N. Booij Rijkswaterstaat, et al., Stille en duurzame voegovergangen: noodzaak! bijdrage Wegbouwkundige Werkdagen 2006;

[43] J.N. Booij Rijkswaterstaat et al., Geluid van voegovergangen. Rijkswaterstaat 2008

[44] HighTemp Metals. Invar 36 Technical Data. <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitemplnvar36data.php>, geraadpleegd op 18-11-2013

[45] National Electronic Alloys Inc. Invar 36 Alloy low expansion stencil & etching alloys. http://www.nealloys.com/36_alloy_invar.php, geraadpleegd op 18-11-2013

[46] Nickel Institute. 36% Nickel-Iron alloy for low temperature service. http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/36_Nickel_IronAlloyforLowTemperatureService_410_.pdf, geraadpleegd op 18-11-2013

[47] ESPI Metals. Invar 36. <http://www.espimetals.com/index.php/technical-data/96-invar-36>, geraadpleegd op 18-11-2013



Bijlagen



BIJLAGE I Maken van proefstukken

Vezel:

40x40cm Twaron 2200 300g/m²

	Opbouw	Verhouding 0/90	Dikte
• - 2 lagen UD	0°/0°	1:0	±0,9 mm
• - 3 lagen bi-axiaal	0°/90°/0°	2:1	±1,3 mm
• - 5 lagen bi-axiaal	0°/0°/90°/0°/0°	4:1	±2,4 mm
• - 8 lagen bi-axiaal	0°/90°/0°/0°/0°/0°/90°/0°	3:1	±3,3 mm

Hars:

- Synolite 0175-N-7

Onverzadigd polyester hars gebaseerd op dicyclopentadien.

Casting MTD131007

Per 100 gr hars 1% NL 49P en 1% Butanox M 50

Curing: 22h 22°C, 4h 100°C

VA-RTM MTD131029

1) Per 100 gr hars 5.5% styreen, 0.5% NL 49P, 1% Butanox M 50

Curing: 18h 20°C, 4h 100°C

Peroxide mengen: 16:45

Start infusie: 16:51

Flow-mesh : 16:55

Vezel oppervlak: -

- Atlac 430

Epoxy bisfenol A vinylester.

Casting MTD131008

Per 100 gr hars 0.5% NL 49P en 2% Butanox LPT-IN

Curing: 22h 22°C, 4h 100°C

VA-RTM 1e keer MTD131033 / 2e keer MTD131043 / 3e keer MTD 131072 / 4e
keer MTD 131073 / 5e keer MTD 131096 / 6e keer MTD 131097

1) Per 100 gr hars 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1.2%

Butanox LPT IN

Curing: -

Peroxide mengen: 15:55

Start infusie: 16:00

Flow-mesh: -

Vezel oppervlak: -

2) Per 100 gr hars 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1.2%

Butanox M 50

Curing: 18h 20°C, 4h 100°C

Peroxide mengen: 14:35

Start infusie: 14:43

Flow-mesh: 14:51

Vezel oppervlak: 15:02



3) Per 100 gr hars 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1%

Butanox LPT-IN

Curing: 18h 20°C, 4h 100°C

Peroxide mengen: 16:08

Start infusie: 16:15

Flow-mesh: 17:03

Vezel oppervlak: -

4) Per 100gr hars 10% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1.5%

Butanox LPT-IN

Curing: niet

Peroxide mengen: -

Start infusie: -

Flow-mesh: -

Vezel oppervlak: -

5) Per 100gr hars 10% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1.5%

Butanox LPT-IN

Curing: 18h 40°C, 4h 80°C

Peroxide mengen: -

Start infusie: -

Flow-mesh: -

Vezel oppervlak: -

6) Per 100gr hars 10% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1.5%

Butanox LPT-IN

Curing: 18h 40°C, 4h 100°C

Peroxide mengen: 16:07

Start infusie: 16:13

Flow-mesh: 16:37

Vezel oppervlak: 16:47

- Epoxy Hexion MGS RIMR 235

Casting MTD131010

Per 100 gr hars 35% Hexion MGS RIMR 237

Curing: 96h 22°C, 16h 80°C

VA-RTM MTD131044

1) Per 100 gr hars 35% Hexion MGS RIMR 237

Curing: 24h 40°C, 16h 80°C

Harder mengen: 11:35

Start infusie: 11:50

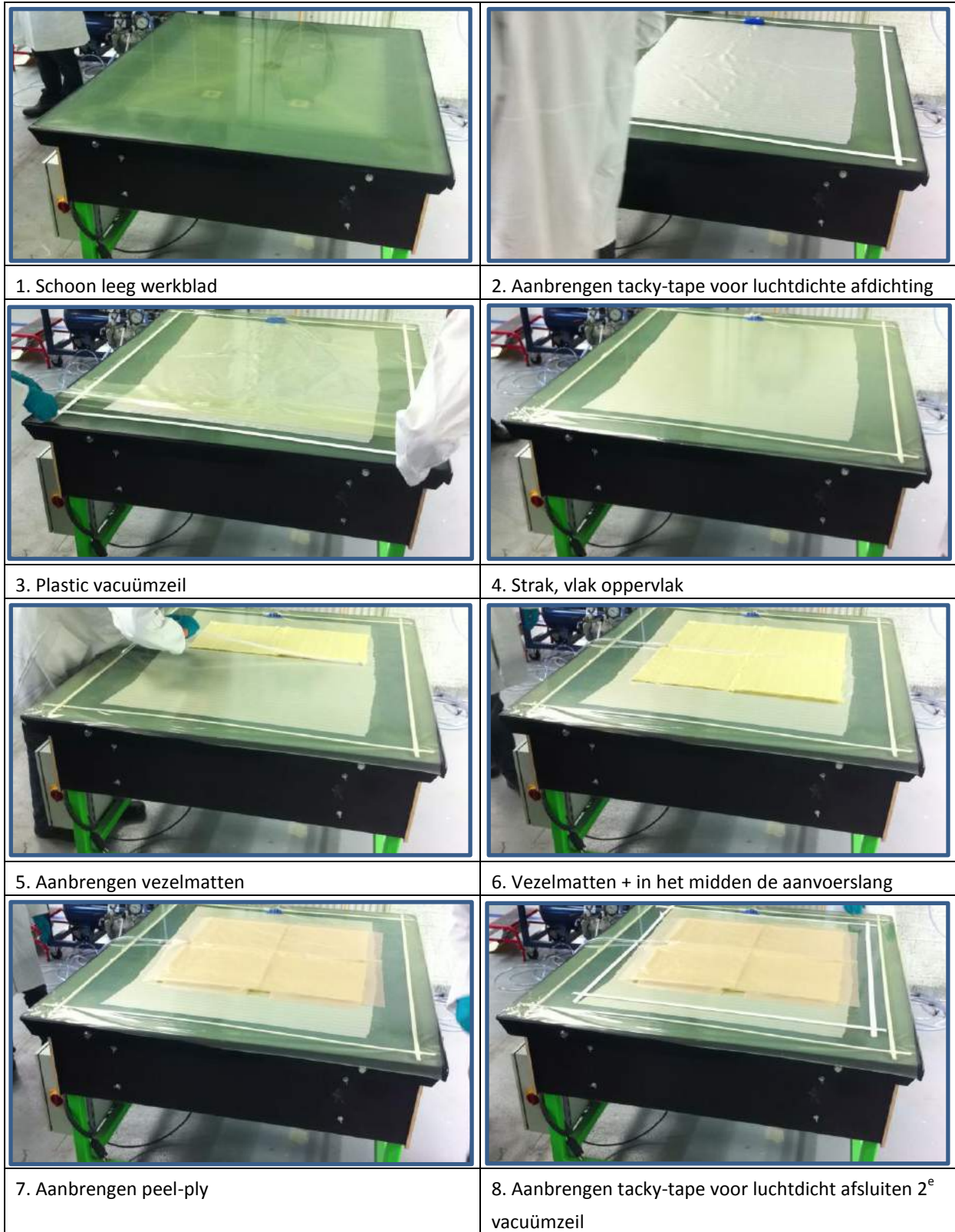
Flow-mesh: 12:00

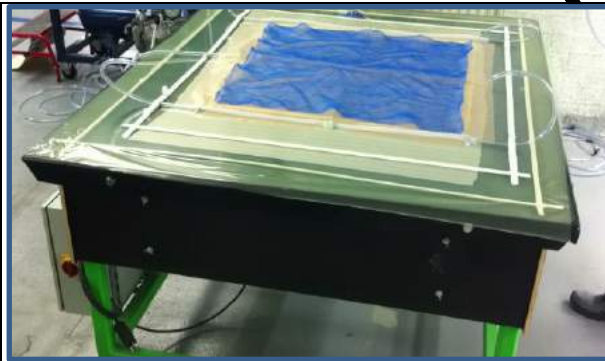
Vezel oppervlak: 12:20

Aan de polyesterhars en de vinylesterhars is extra styreen toegevoegd om de hars een lagere viscositeit te geven, wat de injectie vergemakkelijkt.

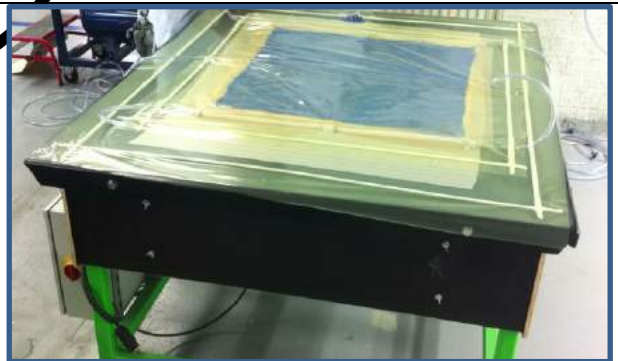


BIJLAGE II Fotocollage VA-RTM

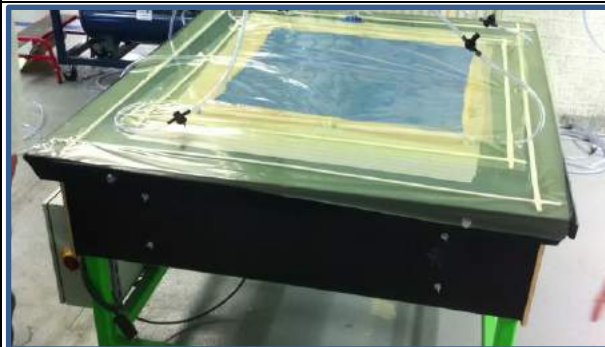




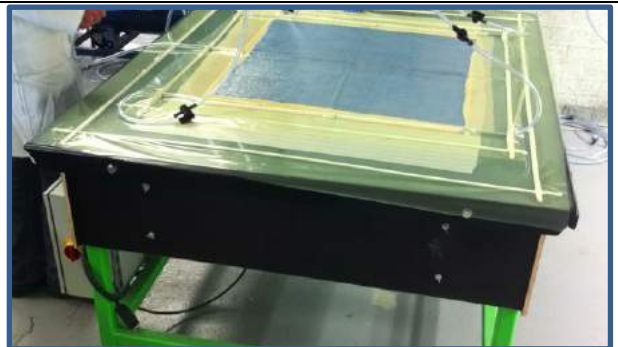
9. Aanbrengen flow-medium + spiraalslang voor vacuüm



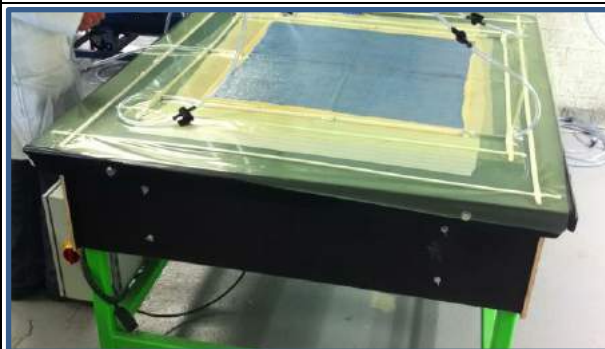
10. Aanbrengen vacuümzeil



11. Aansluiten spiraalslangen voor vacuüm op vacuümpomp



12. Vacuüm trekken



13. Controle op lekken bij bijv. de slangaansluitingen



14. Afwegen hars



15. Toevoegen accelerator



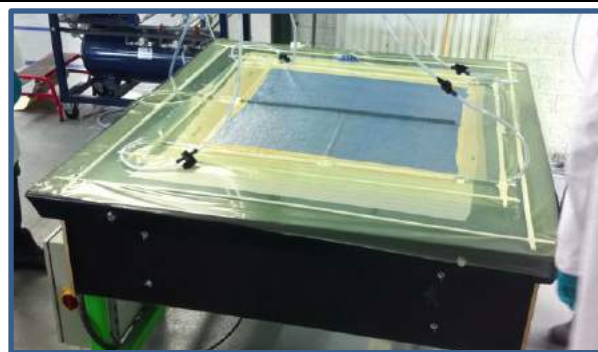
16. Mengen



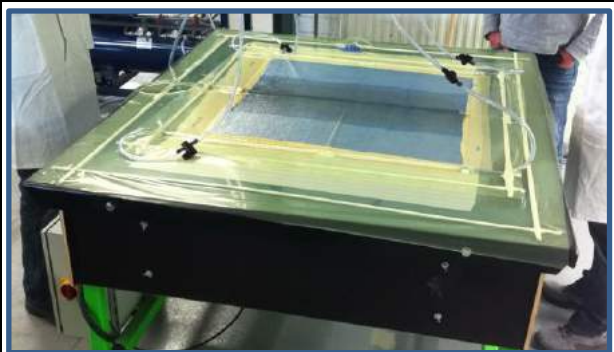
17. Toevoegen peroxide



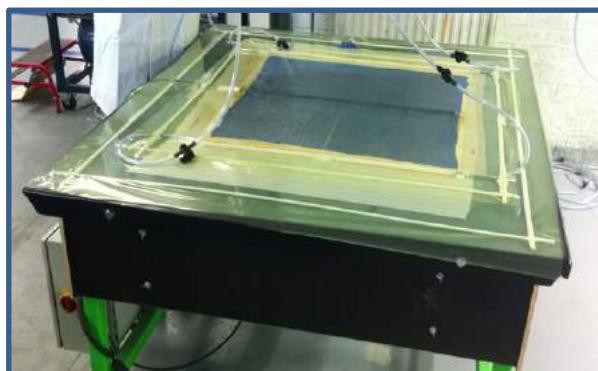
18. Na laatste keer mengen klaar voor infusie.



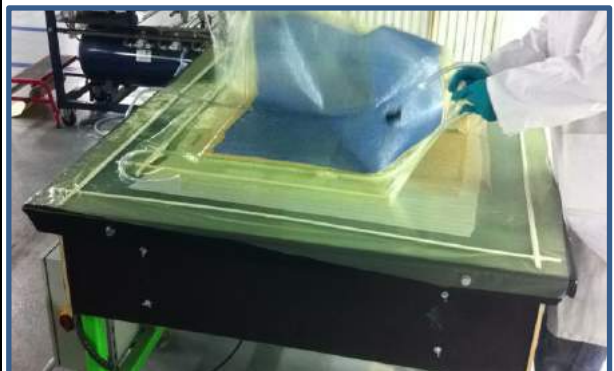
19. Aanvoerspiraalslang vol hars



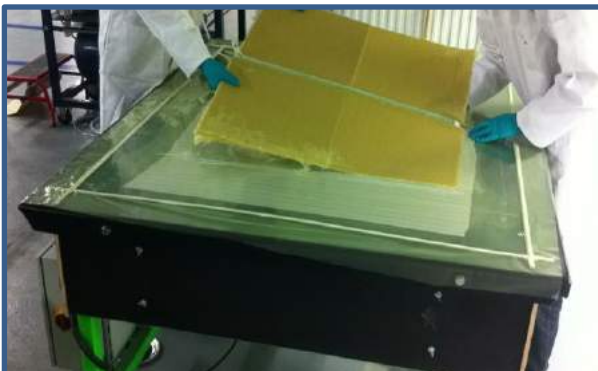
20. Flow-medium loopt langzaam vol hars



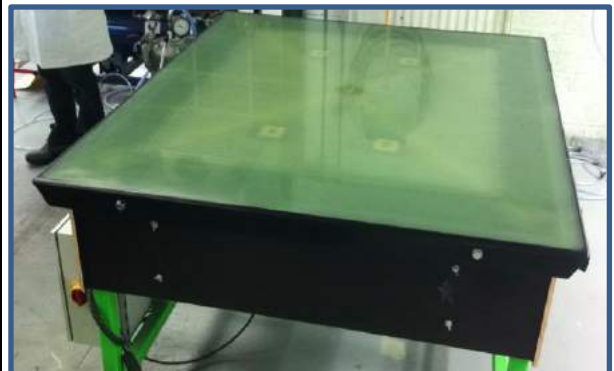
21. Flow-media + vezelmatten vol hars



22. Na eerste curing proefstukken lossen



23. Uiteindelijke resultaat + postcure in de oven



24. Tafel schoon achterlaten



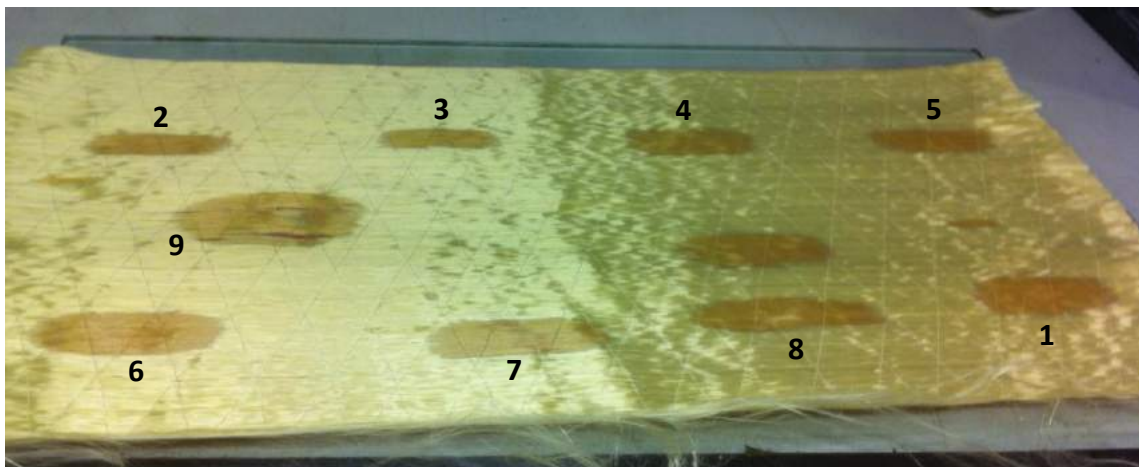
BIJLAGE III Vaststellen harsopname door vezel met en zonder additieven

Per variant is 100gram Atlac 430 afgewogen waarna 1gram additief is toegevoegd.

1. Atlac 430
2. Atlac 430 + 1% BYK-051 (Ontschuiming)
3. Atlac 430 + 1% BYK-088 (Ontschuiming)
4. Atlac 430 + 1% BYK-D 410 (Bevordering van stroming van de hars)
5. Atlac 430 + 1% BYK-A 501 (Ontluchting)
6. Atlac 430 + 1% BYK-A 555 (Ontluchting)
7. Atlac 430 + 1% BYK-A 560 (Ontluchting)
8. Atlac 430 + 1% BYK-W 980 (Benatting en doordringing)
9. Atlac 430 + 15% Styreen



Afbeelding III.1, toegevoegde additieven



Afbeelding III.2, resultaat



BIJLAGE IV Reactiviteitstest Atlac 430

Per sample is 100gr hars afgewogen waarna eerst de styreen is toegevoegd. Na mengen is de NL 49P en de H 076 toegevoegd. Als laatste is de peroxide toegevoegd.

1^e reactiviteitstest, verschil in peroxides

1. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1% Butanox M50
Geltijd: -
Piektemperatuur: -
2. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1% Butanox LPT-IN
Geltijd: 81 minuten
Piektemperatuur: 56°C

2^e reactiviteitstest, verschillen in hoeveelheden accelerator en peroxide

1. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1% Butanox LPT-IN
Geltijd: 178 minuten
Piektemperatuur: 47°C
2. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.5% NL 49P, 0.05% H 076 en 1% Butanox LPT-IN
Geltijd: *ging niet in de gel*
Piektemperatuur: 34°C
3. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 2% Butanox LPT-IN
Geltijd: 37 minuten
Piektemperatuur 121°C
4. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.5% NL 49P, 0.05% H 076 en 2% Butanox LPT-IN
Geltijd: 20 minuten
Piektemperatuur 122°C
5. Per 100gr hars: 15% styreen, 0.5% NL 49P en 2% Butanox LPT-IN
Geltijd: 21 minuten
Piektemperatuur 149°C
6. Per 100gr hars: 10% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1% Butanox LPT-IN
Geltijd: 81 minuten
Piektemperatuur 105°C

3^e reactiviteitstest, uiteindelijk gebruikte hars en uithardingssysteem

1. Per 100gr hars: 10% styreen, 0.2% NL 49P, 0.05% H 076 en 1.5% Butanox LPT-IN
Geltijd: 47 minuten
Piektemperatuur 128°C



BIJLAGE V Vezeleigenschappen

Materiaaltype	Treksterkte MPa	E-modulus LR GPa	E-modulus DR GPa	Dichtheid kg/m3	Trek-rek %	CTE LR 10 ⁻⁶ /K	CTE DR 10 ⁻⁶ /K	Waterabsorptie gewichts%
Glas	2200	73	73	2600	3,5	5	5	0,1
E-glas	2400	69		2500	1,8-3,2			0,1
	1500-3000	72						
	3400	72		2600				
S-glas	3450	86		2500				
Quartz glas	3700	69		2200				
Carbon HS	3500	160-270		1800				
Carbon IM	5300	270-325		1800				
Carbon HM	3500	325-440		1800				
Carbon UHM	2000	440+		2000				
Carbon HT	4800	235	15	1700	1,5	-0,1	10	0,1
Carbon	3500-7000	230-540			0,7-2,0			0
Aramide LM	3600	60		1450				
Aramide HM	3100	120		1450				4,1-5,5
	3600	120	5,4	1450	2,8	-3,5	17	3,5
Aramide UHM	3400	180		1470				
Twaron	2400-3600	60-120			2,2-4,4	-3,5		3,2-5
Technora	3400	78			4,6	-6		1,9
Aramide						-4,9		
Nomex					22	18		
Vectran NT	1100	52		1400				
Vectran HT	3200	75		1400		-4,8		<0,1
Vectran UM	3000	103		1400				<0,1
Zylon	5800	180-270		1540-1560	2,5-3,5	-6		0,6-2,0
UHMW PE	2200-3900	52-132			3-4			<0,1
Dyneema				970		-12		0
PET	1100	-			10-15			0,4
Aluminium	400	1069		2700				
	600	70		2800				
Beton (C30/37)								
Staal (S5 Grade)	450	205		7800				
Staal	370	0,2	0,2	7890	25	13	13	
Titanium	950	110		4500				
	1300	110		4500				

	Gurit's Guide to Composites (GTC-3-0509), pagina 25, tabel 1
	http://www.saertex.com/produkt_technik/produkte/fasereigenschaften/
	http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2011/08/0090168-product-brochure-revised_V2_C.pdf
	http://www.vectranfiber.com/BrochureProductInformation.aspx
	http://www.poly-dk.dk/pictures_org/Dozens.pdf
	http://www.toyobo.co.jp/seihin/kc/pbo/technical.pdf
	http://www.nakedwhiz.com/gasketsafety/nomextechnicalguide.pdf
	http://www.teijin.com/products/advanced_fibers/aramid/contents/aramid/technora/eng/bussei/tech_bussei.htm

Tabel V.1, eigenschappen verschillende vezels

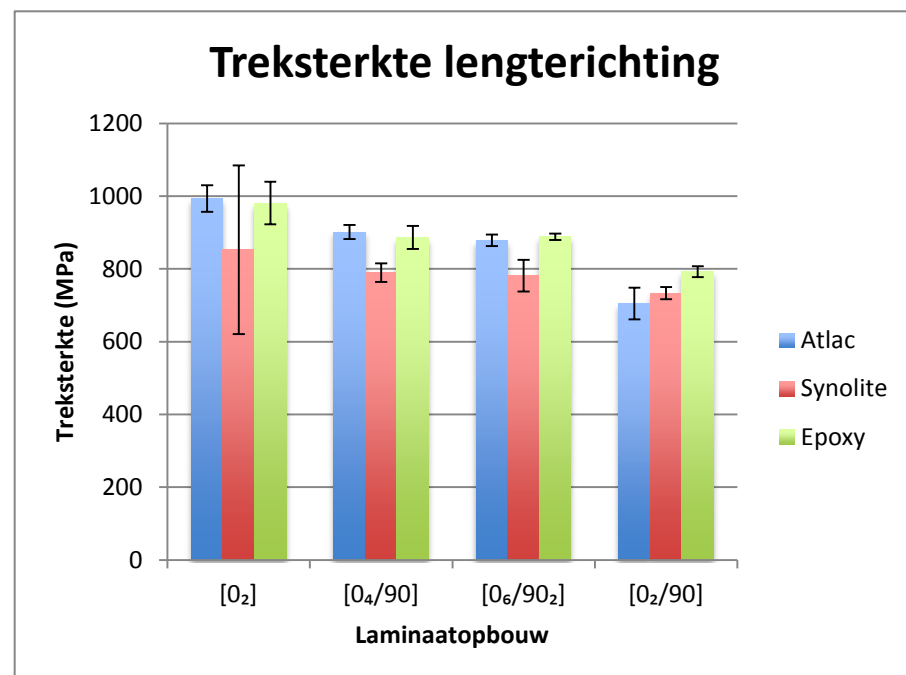


BIJLAGE VI Resultaten trektesten

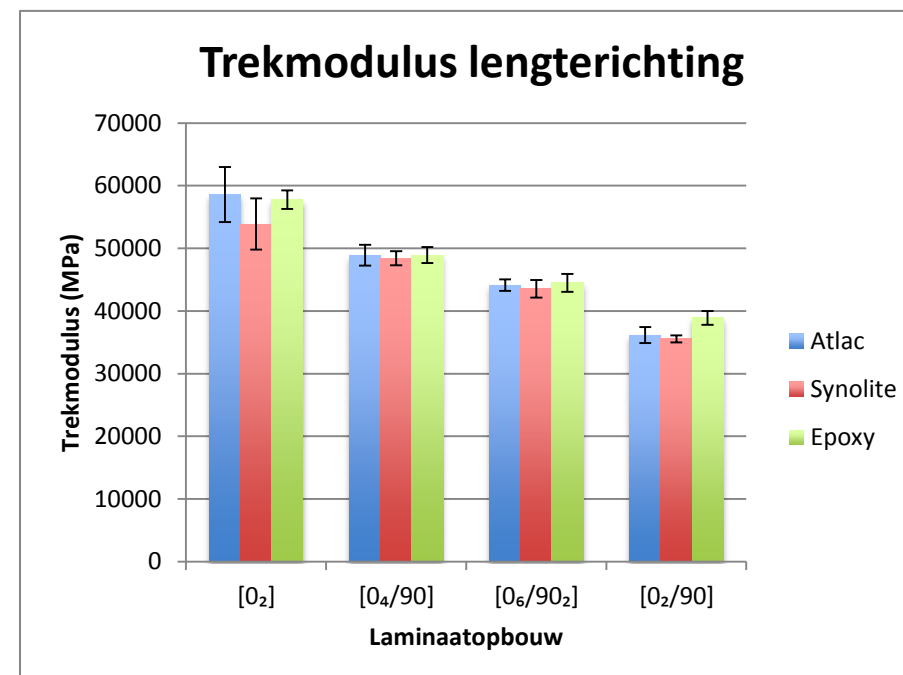


Atlac	Treksterkte (N/mm2)			Trekmodulus (N/mm2)			Rek bij breuk (%)			Rek bij F(max) (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Treksterkte	Treksterkte	Trekmodulus	Trekmodulus	Rek bij breuk	Rek bij breuk
LR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	1024,3	942,3	1014,1	57143	54054	64516	2,41	2,34	2,36	2,38	2,09	2,29	0,87	0,84	0,85	9,67	9,58	9,46	993,6	36,5	58571,0	4388,8	2,37	0,03
[O ₄ /90]	919,1	910,9	874,9	47619	51282	47847	2,96	2,81	2,93	2,89	2,73	2,68	1,92	1,94	1,95	9,71	9,63	9,56	901,6	19,2	48916,0	1675,6	2,90	0,06
[O ₆ /90 ₂]	877,4	860,2	898,4	43478	45455	43478	3,32	3,33	3,15	3,14	3,11	3,12	3,14	3,11	3,12	9,99	9,97	9,9	878,7	15,6	44137,0	932,0	3,27	0,08
[O ₂ /90]	705,9	757,6	650,4	35413	37956	35088	2,57	2,52	2,25	2,39	2,44	2,24	1,25	1,28	1,29	10,19	9,87	9,76	704,6	43,8	36152,3	1282,3	2,45	0,14
Atlac	Treksterkte (N/mm2)			Trekmodulus (N/mm2)			Rek bij breuk (%)			Rek bij F(max) (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Treksterkte	Treksterkte	Trekmodulus	Trekmodulus	Rek bij breuk	Rek bij breuk
DR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]																								
[O ₄ /90]	236,9	260,9	236,6	11364	11765	10753	2,14	2,36	2,26	2,14	2,36	2,26	2,07	2,06	2,01	9,68	9,69	9,99	244,8	11,4	11294,0	416,1	2,25	0,09
[O ₆ /90 ₂]	341,2	359	326,6	13245	14184	13245	2,64	2,67	2,55	2,64	3,67	2,55	3,18	3,1	3,13	10,06	10,08	10,12	342,3	13,2	13558,0	442,6	2,62	0,05
[O ₂ /90]	365,4	388,9	399,3	17391	17544	18519	2,04	2,24	2,22	1,25	1,27	1,26	1,25	1,27	1,26	9,95	9,97	10,04	384,5	14,2	17818,0	499,6	2,17	0,09
Synolite	Treksterkte (N/mm2)			Trekmodulus (N/mm2)			Rek bij breuk (%)			Rek bij F(max) (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Treksterkte	Treksterkte	Trekmodulus	Trekmodulus	Rek bij breuk	Rek bij breuk
LR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	529,5	966,3	1061,7	48780	54054	58824	1,7	3,09	2,73	1,58	2,95	2,73	0,96	0,9	0,87	9,88	9,83	9,79	852,5	231,7	53886,0	4102,2	2,51	0,59
[O ₄ /90]	825,4	778,1	766,5	50000	47619	47619	5,63	6,01	4,85	5,5	3,33	3,31	1,97	2,03	1,95	10,02	10,04	10,08	790,0	25,5	48412,7	1122,4	5,50	0,48
[O ₆ /90 ₂]	721,9	798,5	823,6	42553	42553	45546	5,3	4,4	3,27	3,23	3,74	2,88	3,11	3,19	3,23	10,08	10,09	10,07	781,3	43,3	43550,7	1410,9	4,32	0,83
[O ₂ /90]	729,9	754,8	715	36364	35198	35088	3,02	3,31	3,2	2,95	1,28	1,25	1,23	1,28	1,25	9,76	9,78	9,87	733,2	16,4	35550,0	577,3	3,18	0,12
Synolite	Treksterkte (N/mm2)			Trekmodulus (N/mm2)			Rek bij breuk (%)			Rek bij F(max) (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Treksterkte	Treksterkte	Trekmodulus	Trekmodulus	Rek bij breuk	Rek bij breuk
DR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]																								
[O ₄ /90]	250,2	170,2	258,1	11296		11494	2,36	1,49	2,4	2,05	2,09	2,03	2,05	2,09	2,03	10,13	10,17	10,19	226,2	39,7	11395,0	99,0	2,08	0,42
[O ₆ /90 ₂]	301,4	265	318,4	13245	13072	13333	2,51	2,45	2,57	3,18	3,2	3,21	3,18	3,2	3,21	10,17	10,19	10,18	294,9	22,3	13216,7	108,4	2,51	0,05
[O ₂ /90]	380,5	404,8	378	16260	16807	17311	2,38	2,44	2,12	2,38	2,44	2,12	1,26	1,25	1,24	9,9	9,76	9,79	387,8	12,1	16792,7	429,2	2,31	0,14
Epoxy	Treksterkte (N/mm2)			Trekmodulus (N/mm2)			Rek bij breuk (%)			Rek bij F(max) (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Treksterkte	Treksterkte	Trekmodulus	Trekmodulus	Rek bij breuk	Rek bij breuk
LR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	1050,3	906,8	985,4	58824	55669	58824	2,31	2,09	2,37	2,3	2,09	2,15	0,85	0,89	0,88	9,95	9,97	9,98	980,8	58,7	57772,3	1487,3	2,26	0,12
[O ₄ /90]	863,8	931,7	864,8	47116	49696	50000	2,88	2,84	2,78	2,66	2,84	2,59	2,03	2,04	2,03	10,13	10,09	10,14	886,8	31,8	48937,3	1293,8	2,83	0,04
[O ₆ /90 ₂]	876,2	895	893,4	43478	46512	43478	3,04	3,06	3,07	3,01	2,89	2,91	3,26	3,24	3,24	10,23	10,07	10,07	888,2	8,5	44489,3	1430,2	3,06	0,01
[O ₂ /90]	811,1	774,5	790,6	40404	38462	37823	2,51	2,54	2,57	2,5	2,54	2,56	1,25	1,28	1,26	9,93	9,94	9,96	792,1	15,0	38896,3	1097,5	2,54	0,02
Epoxy	Treksterkte (N/mm2)			Trekmodulus (N/mm2)			Rek bij breuk (%)			Rek bij F(max) (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Treksterkte	Treksterkte	Trekmodulus	Trekmodulus	Rek bij breuk	Rek bij breuk
DR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	14,2	14,5	14,3				0,11	0,12		0,11	0,12	0,04	0,94	0,93	0,88	10,09	10,12	10,11	14,3	0,1			0,12	0,01
[O ₄ /90]	266,8	251,1	255,2	11448	11429	10929	2,26	2,14	2,26	2,26	2,14	2,26	2,12	2,09	2,08	10,27	10,26	10,3	257,7	6,6	11268,7	240,3	2,22	0,06
[O ₆ /90 ₂]	362,4	355,4	368,1	12903	13793	14280	2,63	2,49	2,54	2,63	2,49	2,54	3,22	3,24	3,26	10,21	10,22	10,21	362,0	5,2	13658,7	570,1	2,55	0,06
[O ₂ /90]	412,4	391,1	399,4	17544	17017	17094	2,27	2,17	2,23	2,27	2,17	2,23	1,28	1,28	1,3	9,93	9,98	9,98	401,0	8,8	17218,3	232,4	2,22	0,04

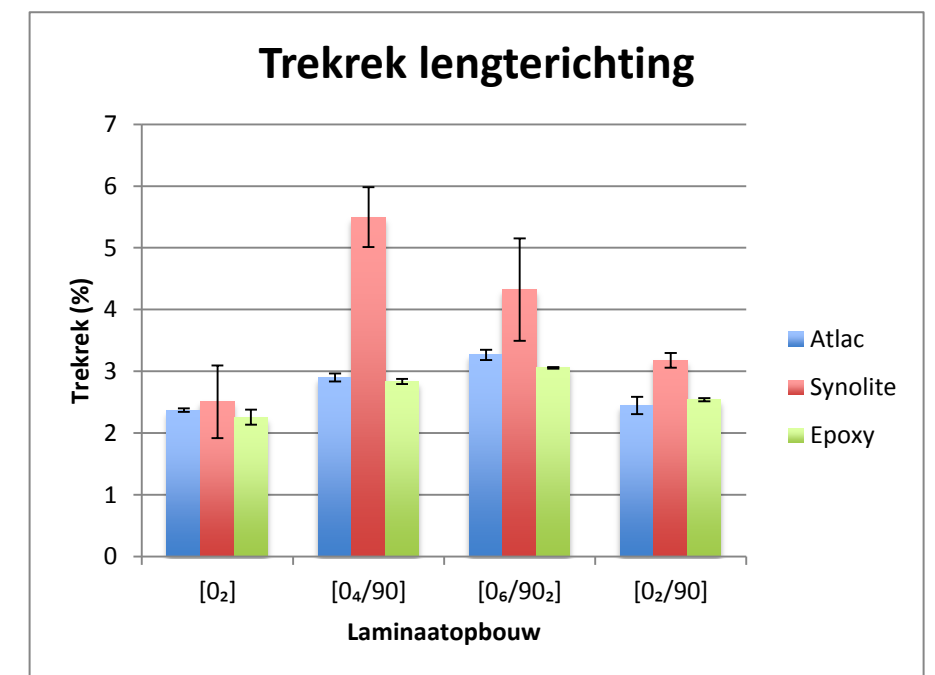
Tabel VI.1, resultaten trektests



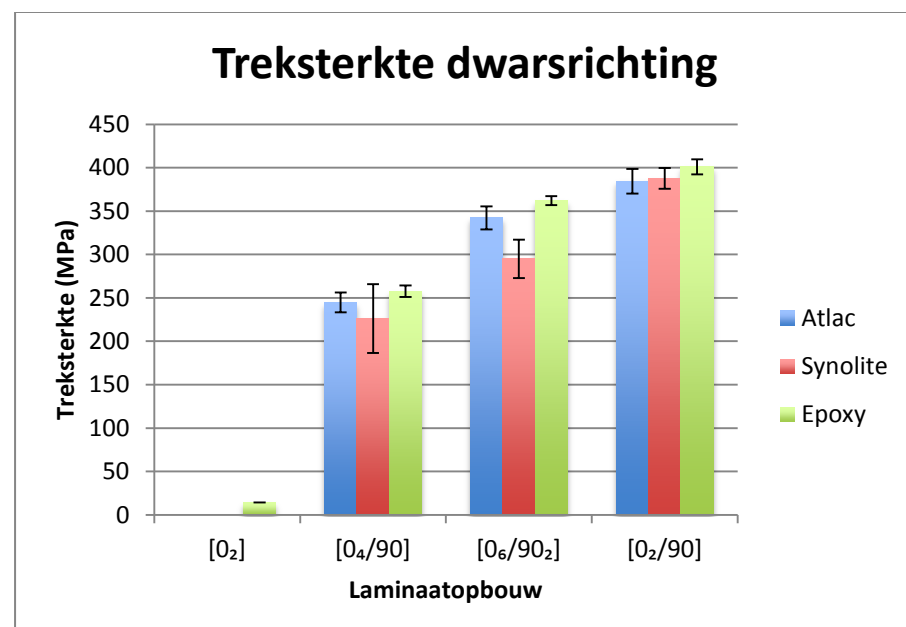
Grafiek VI.1, resultaten treksterkte in lengterichting



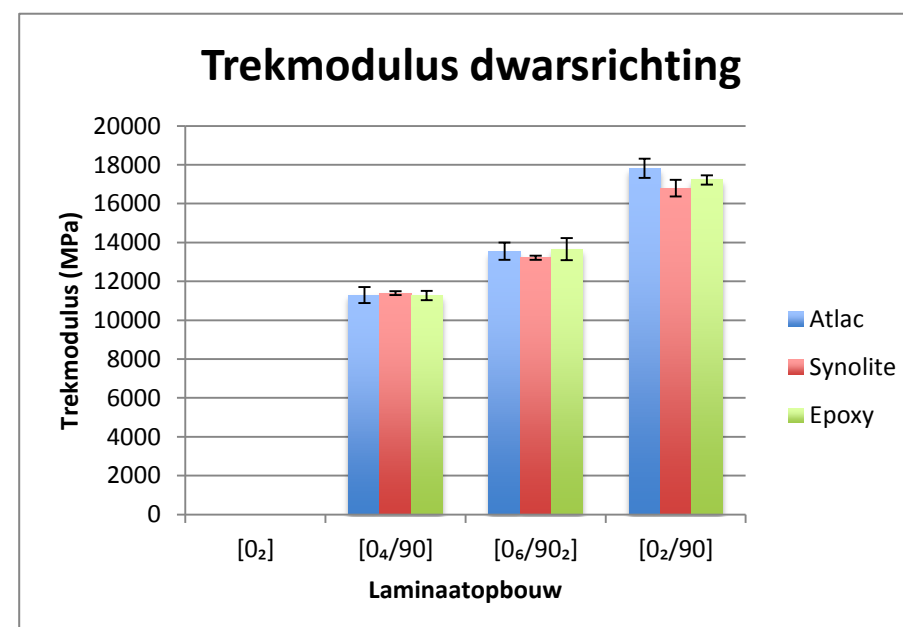
Grafiek VI.2, resultaten trekmodulus in lengterichting



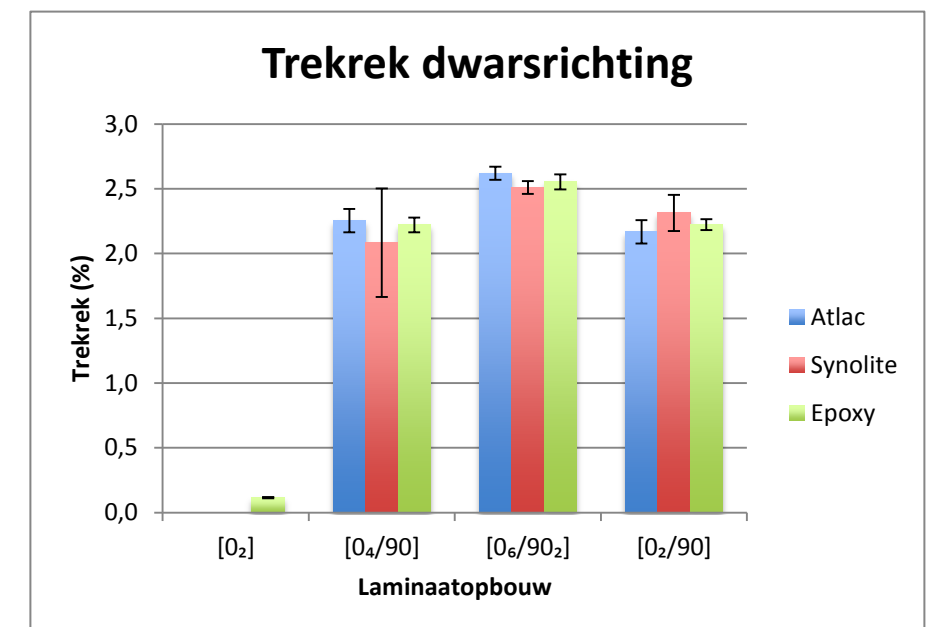
Grafiek VI.3, resultaten trekrek in lengterichting



Grafiek VI.4, resultaten treksterkte in dwarsrichting



Grafiek VI.5, resultaten trekmodulus in dwarsrichting



Grafiek VI.6, resultaten trekrek in dwarsrichting

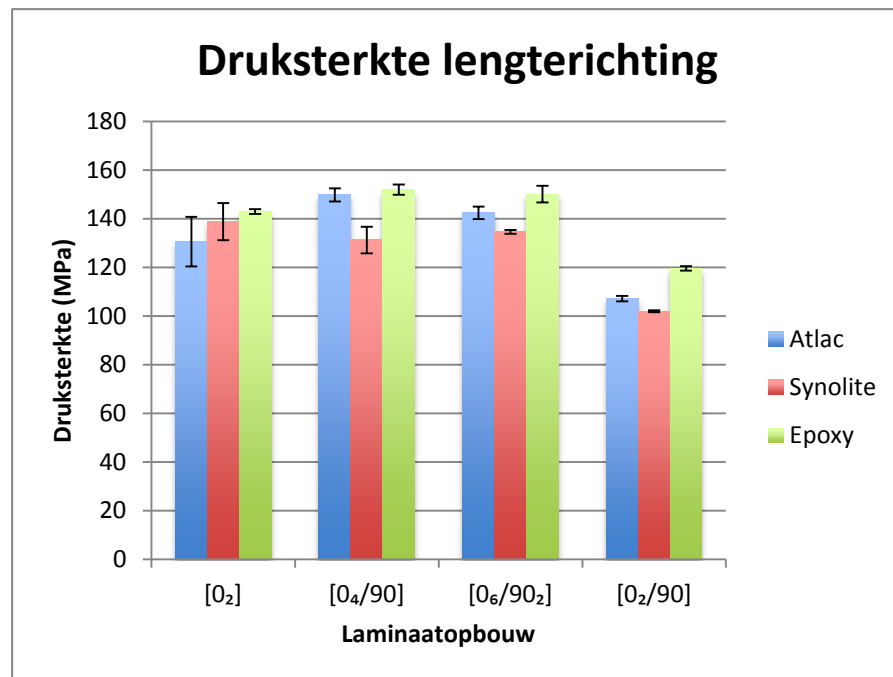


BIJLAGE VII Resultaten druktesten

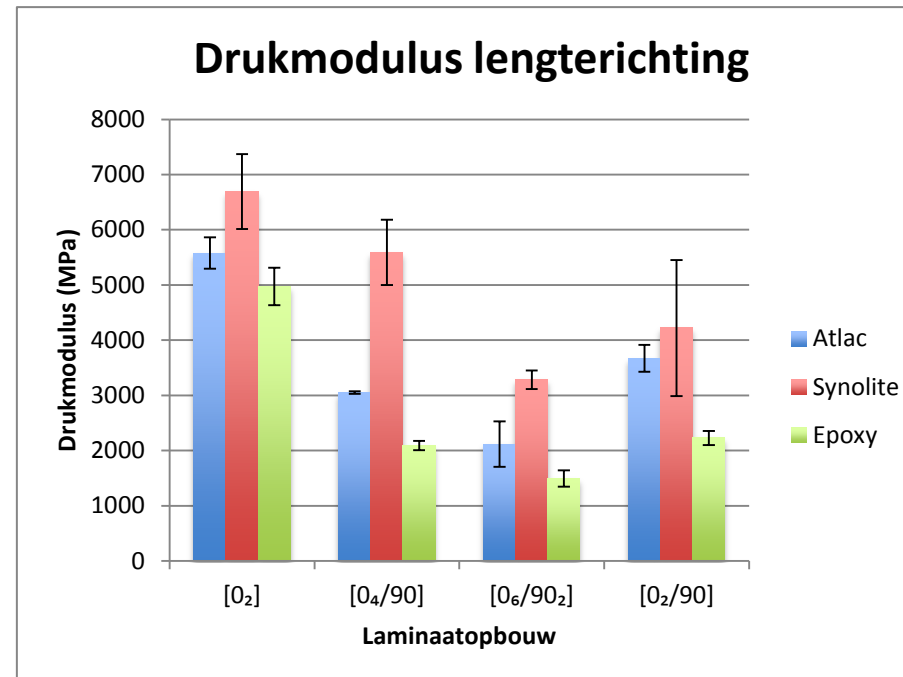


Atlac	Druksterkte (N/mm2)			Drukmodulus (N/mm2)			Rek bij bezwijken (mm)			Rek bij bezwijken (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Gedrukte lengte (mm)			Druksterkte	Druksterkte	Drukmodulus	Drukmodulus	Rek bij bezwijken	Drukrek
LR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	141,2	133,7	116,8	5864,5	5189,2	5678,3	0,3	0,32	0,26	2,41	2,58	2,06	0,9	0,88	0,88	11,72	11,78	11,76	12,46	12,42	12,64	130,6	10,2	5577,3	284,8	2,35	0,22
[O ₄ /90]	147,7	148	153,5	3017	3058,7	3075	0,61	0,6	0,62	4,90	4,84	4,99	1,99	1,98	1,89	11,91	11,84	11,78	12,46	12,40	12,42	149,7	2,7	3050,2	24,4	4,91	0,06
[O ₆ /90 ₂]	145,5	139,2	142,4	1968,2	2678	1699,2	0,93	0,67	1,04	7,39	5,20	8,38	3,12	3,15	3,11	12,13	12,17	12,13	12,58	12,89	12,41	142,4	2,6	2115,1	412,9	6,99	1,33
[O ₂ /90]	107	108,6	105,8	3848,9	3837,2	3327,4	0,35	0,36	0,4	2,78	2,83	3,18	1,27	1,29	1,22	11,9	11,9	11,91	12,59	12,72	12,58	107,1	1,1	3671,2	243,1	2,93	0,18
Atlac	Druksterkte (N/mm2)			Drukmodulus (N/mm2)			Rek bij bezwijken (mm)			Rek bij bezwijken (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Gedrukte lengte (mm)			Druksterkte	Druksterkte	Drukmodulus	Drukmodulus	Rek bij bezwijken	Drukrek
DR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[O ₄ /90]	70,5	72,2	55,6	1250,1	853,9	1225,2	0,71	1,04	0,57	5,64	8,46	4,54	2,02	2,04	2,05	12,01	11,96	11,97	12,59	12,30	12,56	66,1	7,5	1664,6	181,2	6,21	1,65
[O ₆ /90 ₂]	82,5	87,1	86,5	696,54	693,04	646,67	1,49	1,62	1,66	11,84	12,57	13,38	3,12	3,15	3,11	12,13	12,17	12,13	12,58	12,89	12,41	85,4	2,0	1018,1	22,7	12,60	0,63
[O ₂ /90]	54	-	51	2765,3	-	2340,3	0,24	0,22	0,27	1,95	1,76	2,18	1,28	1,26	1,23	12,2	12,11	12,12	12,29	12,47	12,39	52,5	24,8	2552,8	1215,8	1,97	0,17
Synolite	Druksterkte (N/mm2)			Drukmodulus (N/mm2)			Rek bij bezwijken (mm)			Rek bij bezwijken (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Gedrukte lengte (mm)			Druksterkte	Druksterkte	Drukmodulus	Drukmodulus	Rek bij bezwijken	Drukrek
LR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	133	149,5	133,7	7623,3	6033	6417,6	0,22	0,31	0,26	1,74	2,48	2,08	0,89	0,9	0,86	11,81	11,82	11,83	12,61	12,51	12,48	138,7	7,6	6691,3	677,5	2,10	0,30
[O ₄ /90]	125,6	138,6	129,5	3625,3	4495,6	3060,9	0,44	0,39	0,55	3,46	3,08	4,23	2,05	2,03	2,09	12,02	12,02	12,18	12,70	12,65	13,00	131,2	5,4	5590,9	590,1	3,59	0,48
[O ₆ /90 ₂]	134,3	133,7	135,6	2387,6	1974,4	2205,6	0,72	0,86	0,79	5,63	6,77	6,15	3,17	3,18	3,18	12,17	12,07	12,07	12,80	12,70	12,85	134,5	0,8	3283,8	169,1	6,18	0,47
[O ₂ /90]	101,9	102,5	101,4	1112	3339,3	3987,3	1,14	0,38	0,31	9,16	3,07	2,54	1,3	1,3	1,3	11,78	11,8	11,8	12,44	12,38	12,19	101,9	0,4	4219,3	1231,5	4,93	3,00
Synolite	Druksterkte (N/mm2)			Drukmodulus (N/mm2)			Rek bij bezwijken (mm)			Rek bij bezwijken (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Gedrukte lengte (mm)			Druksterkte	Druksterkte	Drukmodulus	Drukmodulus	Rek bij bezwijken	Drukrek
DR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[O ₄ /90]	60,1	53,9	57,9	1697,5	1604,5	230,71	0,45	0,43	3,27	3,54	3,36	25,10	2,13	2,18	2,18	12,16	12,17	12,17	12,71	12,80	13,03	57,3	2,6	1177,6	670,6	10,67	10,20
[O ₆ /90 ₂]	49,6	55,6	55,2	1321	1816,7	1161	0,49	0,4	0,61	3,75	3,06	4,75	3,27	3,34	3,34	12,17	12,2	12,19	13,05	13,07	12,83	53,5	2,7	2149,4	279,2	3,86	0,70
[O ₂ /90]	37,9	33,7	35,1	2737,7	1511,5	1965,6	0,17	0,27	0,22	1,38	2,23	1,79	1,31	1,31	1,32	11,8	11,63	11,77	12,28	12,11	12,32	35,6	1,7	2071,6	-	1,80	0,35
Epoxy	Druksterkte (N/mm2)			Drukmodulus (N/mm2)			Rek bij bezwijken (mm)			Rek bij bezwijken (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Gedrukte lengte (mm)			Druksterkte	Druksterkte	Drukmodulus	Drukmodulus	Rek bij bezwijken	Drukrek
LR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	143,9	143,3	141,6	4884,8	4607,6	5423,7	0,37	0,39	0,33	2,95	3,11	2,61	0,91	0,91	0,89	11,97	11,94	11,96	12,56	12,54	12,64	142,9	1,0	4972,1	338,8	2,89	0,21
[O ₄ /90]	150,1	150,8	154,9	2168,9	2126,1	1977,3	0,89	0,91	1,02	6,92	7,09	7,83	2,06	2,03	2,06	12,07	12,1	12,11	12,86	12,83	13,02	151,9	2,1	2090,7	82,1	7,28	0,40
[O ₆ /90 ₂]	152,1	145,2	152,9	1553,2	1634,8	1291,5	1,23	1,12	1,5	9,79	8,88	11,84	3,23	3,23	3,23	12,03	12,06	12,06	12,56	12,61	12,67	150,1	3,5	1493,1	146,4	10,17	1,24
[O ₂ /90]	118,6	120,7	119,4	2284,9	2343,1	2053,3	0,64	0,63	0,71	5,19	5,15	5,81	1,25	1,28	1,27	11,9	11,88	11,87	12,33	12,23	12,21	119,6	0,9	2227,1	125,2	5,39	0,30
Epoxy	Druksterkte (N/mm2)			Drukmodulus (N/mm2)			Rek bij bezwijken (mm)			Rek bij bezwijken (%)			Dikte (mm)			Breedte (mm)			Gedrukte lengte (mm)			Druksterkte	Druksterkte	Drukmodulus	Drukmodulus	Rek bij bezwijken	Drukrek
DR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking	Gemiddeld	St.afwijking
[O ₂]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[O ₄ /90]	86,6	82,8	87,5	921,04	907,92	816,88	1,18	1,15	1,34	9,40	9,12	10,71	2,2	2,21	2,2	12,27	12,29	12,28	12,55	12,61	12,51	85,6	2,0	881,9	46,3	9,74	0,08
[O ₆ /90 ₂]	99,3	103,2	102,2	647,48	733,93	815,03	1,96	1,79	1,59	15,34	14,06	12,54	3,34	3,32	3,33	12,18	12,16	12,21	12,78	12,73	12,68	101,6	1,7	732,1	68,4	13,98	0,15
[O ₂ /90]	63,1	71,3	67,1	2284,6	2651,1	2121,4	0,34	0,33	0,39	2,76	2,69	3,16	1,3	1,29	1,26	11,98	11,98	11,93	12,31	12,27	12,33	67,2	3,3	2352,3	221,5	2,87	0,21

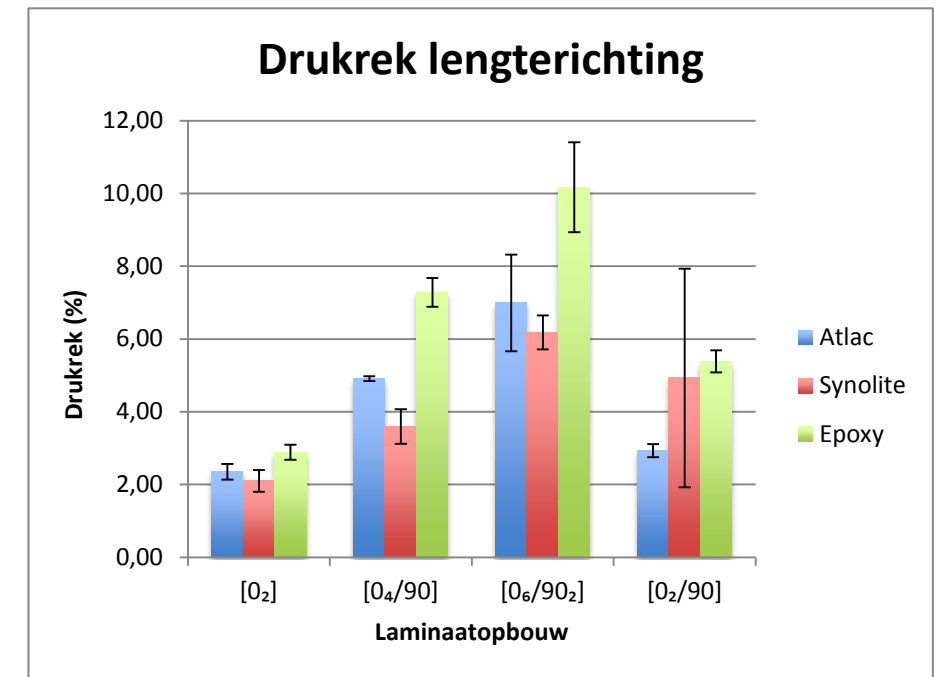
Tabel VII.1, resultaten druktests



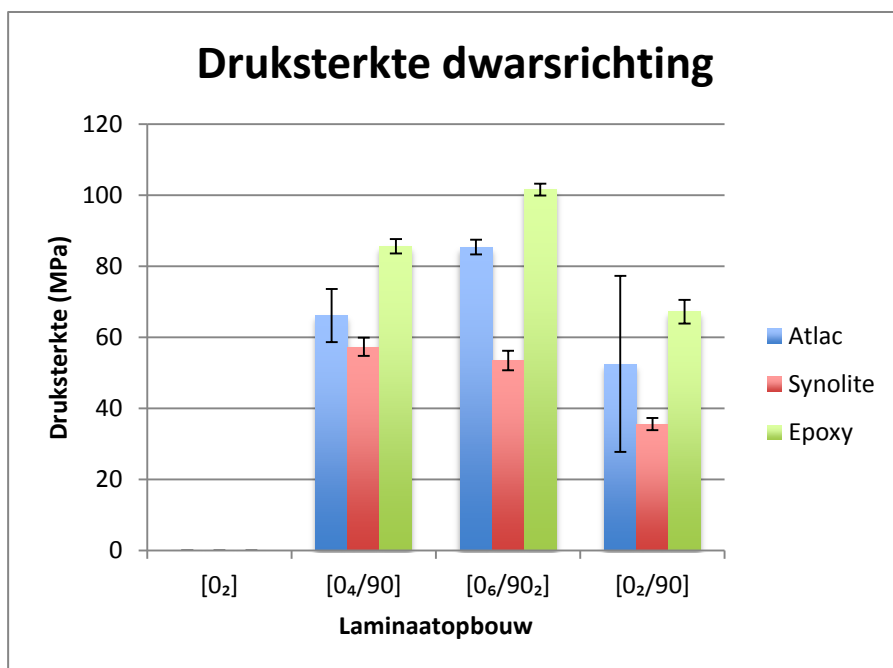
Grafiek VII.1, resultaten druksterkte in lengterichting



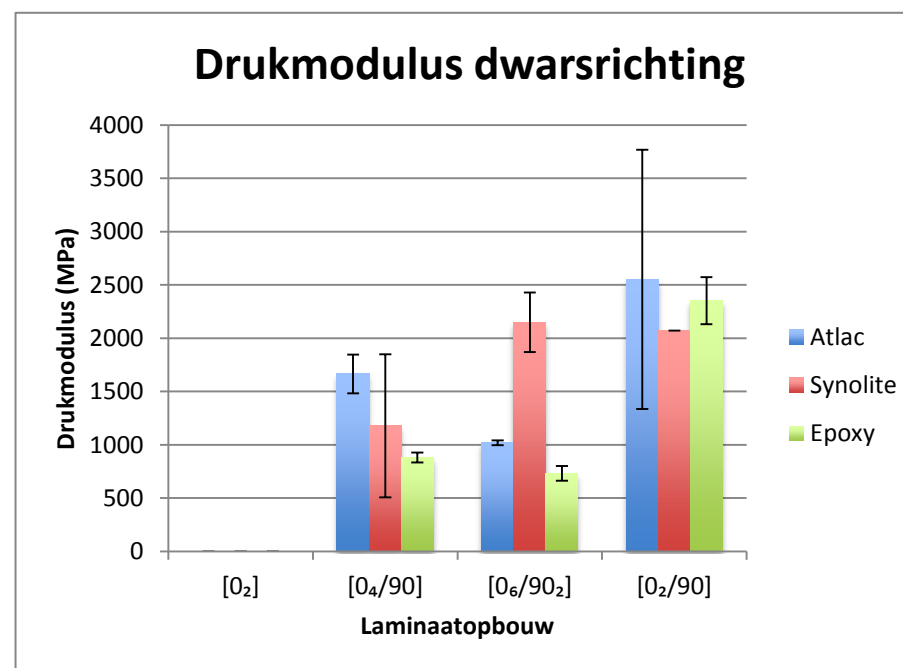
Grafiek VII.2, resultaten drukmodulus in lengterichting



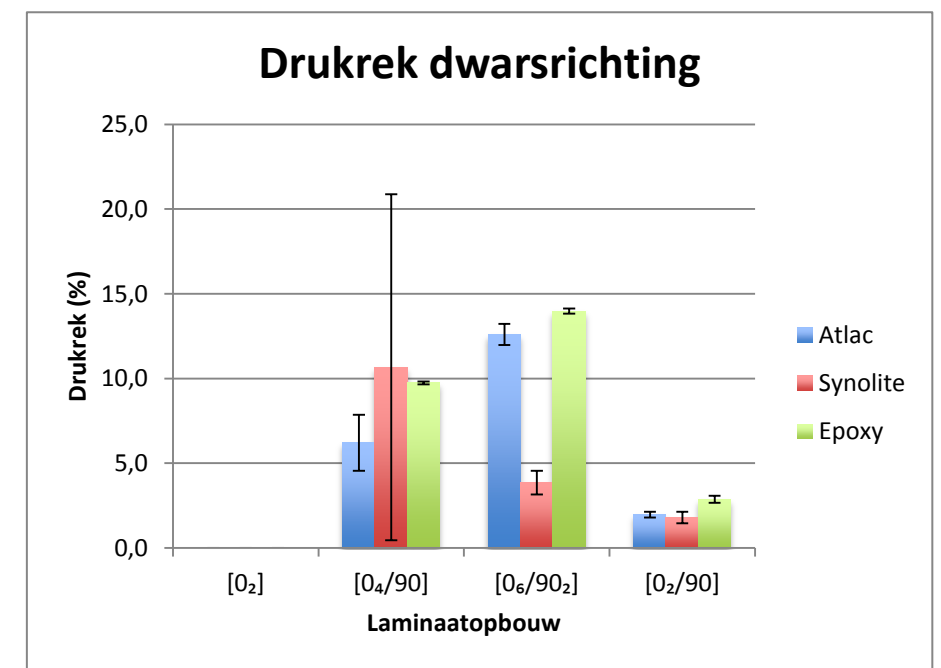
Grafiek VII.3, resultaten drukrek in lengterichting



Grafiek VII.4, resultaten druksterkte in dwarsrichting



Grafiek VII.5, resultaten drukmodulus in dwarsrichting



Grafiek VII.6, resultaten drukrek in dwarsrichting



BIJLAGE VIII Bepaling vezelpercentages

Atlac	Gewicht	Gewicht	Gewicht	Lengte	Lengte	Lengte	Breedte	Breedte	Breedte	Dikte	Dikte	Dikte	Opp.	Opp.	Opp.	Volume	Volume	Volume	Vezelgew.	Vezelgew.	Vezelgew.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A2	6,1857	6,1523	6,2623	80,15	80,16	80,13	79,88	79,85	79,85	0,82	0,84	0,86	6402,38	6400,78	6398,38	5249,95	5376,65	5502,61	3,8414	3,8405	3,8390
A3	9,3235	9,3511	9,4136	80,16	80,14	80,18	79,96	79,98	79,94	1,25	1,23	1,27	6409,59	6409,60	6409,59	8011,99	7883,80	8140,18	5,7686	5,7686	5,7686
A5	15,1568	15,1618	15,2548	80,07	80,00	80,04	79,97	80,00	79,95	1,95	2,02	1,92	6403,20	6400,00	6399,20	12486,24	12928,00	12286,46	9,6048	9,6000	9,5988
A8	24,5142	24,4200	24,6423	80,25	80,13	80,14	80,02	79,95	79,96	3,19	3,04	3,09	6421,61	6406,39	6407,99	20484,92	19475,44	19800,70	15,4119	15,3753	15,3792

Synolite	Gewicht	Gewicht	Gewicht	Lengte	Lengte	Lengte	Breedte	Breedte	Breedte	Dikte	Dikte	Dikte	Opp.	Opp.	Opp.	Volume	Volume	Volume	Vezelgew.	Vezelgew.	Vezelgew.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S2	6,7801	6,8157	6,6877	80,07	79,99	80,05	79,70	79,68	79,63	0,89	0,82	0,86	6381,58	6373,60	6374,38	5679,61	5226,35	5481,97	3,8289	3,8242	3,8246
S3	9,8680	9,7700	9,8306	79,92	79,86	79,93	79,79	79,80	79,84	1,28	1,25	1,25	6376,82	6372,83	6381,61	8162,33	7966,04	7977,01	5,7391	5,7355	5,7435
S5	16,1628	16,2709	16,2612	80,26	80,24	80,23	80,03	80,10	80,07	1,98	1,96	2,04	6423,21	6427,22	6424,02	12717,95	12597,36	13104,99	9,6348	9,6408	9,6360
S8	25,9769	26,0114	26,0233	80,28	80,26	80,25	80,12	80,13	80,13	3,15	3,17	3,13	6432,03	6431,23	6430,43	20260,91	20387,01	20127,25	15,4369	15,4350	15,4330

Epoxy	Gewicht	Gewicht	Gewicht	Lengte	Lengte	Lengte	Breedte	Breedte	Breedte	Dikte	Dikte	Dikte	Opp.	Opp.	Opp.	Volume	Volume	Volume	Vezelgew.	Vezelgew.	Vezelgew.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
E2	6,7354	6,7478	6,9494	80,17	80,22	80,18	79,95	79,95	80,00	0,90	0,89	0,93	6409,59	6413,59	6414,40	5768,63	5708,09	5965,39	3,8458	3,8482	3,8486
E3	10,2756	10,1091	10,0239	80,07	80,00	80,01	79,85	79,97	79,92	1,33	1,28	1,31	6393,59	6397,60	6394,40	8503,47	8188,93	8376,66	5,7542	5,7578	5,7550
E5	16,5978	16,5996	16,6387	80,33	80,30	80,32	80,14	80,11	80,10	2,01	2,06	2,13	6437,65	6432,83	6433,63	12939,67	13251,64	13703,64	9,6565	9,6492	9,6504
E8	26,5258	26,6749	26,5323	80,23	80,24	80,25	80,10	80,13	80,10	3,20	3,33	3,30	6426,42	6429,63	6428,03	20564,55	21410,67	21212,48	15,4234	15,4311	15,4273

Gew.%	Gew.%	Gew.%	Gew.hars	Gew.hars	Gew.hars	Dichth.hars	Vol.hars	Vol.hars	Vol.hars	Vol%hars	Vol%hars	Vol%hars	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel
1	2	3	1	2	3	g/mm3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking
62,1	62,4	61,3	2,3443	2,3118	2,4233	0,001124	2085,65	2056,79	2155,94	39,7	38,3	39,2	60,3	61,7	60,8	60,9	0,60791189
61,9	61,7	61,3	3,5549	3,5825	3,6450	0,001124	3162,69	3187,24	3242,86	39,5	40,4	39,8	60,5	59,6	60,2	60,1	0,39282737
63,4	63,3	62,9	5,5520	5,5618	5,6560	0,001124	4939,50	4948,22	5032,03	39,6	38,3	41,0	60,4	61,7	59,0	60,4	1,09470304
62,9	63,0	62,4	9,1023	9,0447	9,2631	0,001124	8098,17	8046,85	8241,20	39,5	41,3	41,6	60,5	58,7	58,4	59,2	0,92143145

Gew.%	Gew.%	Gew.%	Gew.hars	Gew.hars	Gew.hars	Dichth.hars	Vol.hars	Vol.hars	Vol.hars	Vol%hars	Vol%hars	Vol%hars	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel
1	2	3	1	2	3	g/mm3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking
56,5	56,1	57,2	2,9512	2,9915	2,8631	0,00111	2658,70	2695,08	2579,34	46,8	51,6	47,1	53,2	48,4	52,9	51,5	2,18751153
58,2	58,7	58,4	4,1289	4,0345	4,0871	0,00111	3719,70	3634,64	3682,12	45,6	45,6	46,2	54,4	54,4	53,8	54,2	0,2649161
59,6	59,3	59,3	6,5280	6,6301	6,6252	0,00111	5881,07	5973,03	5968,63	46,2	47,4	45,5	53,8	52,6	54,5	53,6	0,77169919
59,4	59,3	59,3	10,5400	10,5764	10,5903	0,00111	9495,51	9528,32	9540,78	46,9	46,7	47,4	53,1	53,3	52,6	53,0	0,28796643

Gew.%	Gew.%	Gew.%	Gew.hars	Gew.hars	Gew.hars	Dichth.hars	Vol.hars	Vol.hars	Vol.hars	Vol%hars	Vol%hars	Vol%hars	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel	Vol%vezel
1	2	3	1	2	3	g/mm3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Gemiddeld	St.afwijking
57,1	57,0	55,4	2,8896	2,8996	3,1008	0,00115	2512,73	2521,43	2696,31	43,6	44,2	45,2	56,4	55,8	54,8	55,7	0,67680441
56,0	57,0	57,4	4,5214	4,3513	4,2689	0,00115	3931,63	3783,70	3712,12	46,2	46,2	44,3	53,8	53,8	55,7	54,4	0,89824013
58,2	58,1	58,0	6,9413	6,9504	6,9883	0,00115	6035,94	6043,78	6076,74	46,6	45,6	44,3	53,4	54,4	55,7	54,5	0,94160022
58,1	57,8	58,1	11,1024	11,2438	11,1050	0,00115	9654,25	9777,20	9656,56	46,9	45,7	45,5	53,1	54,3	54,5	54,0	0,63998099

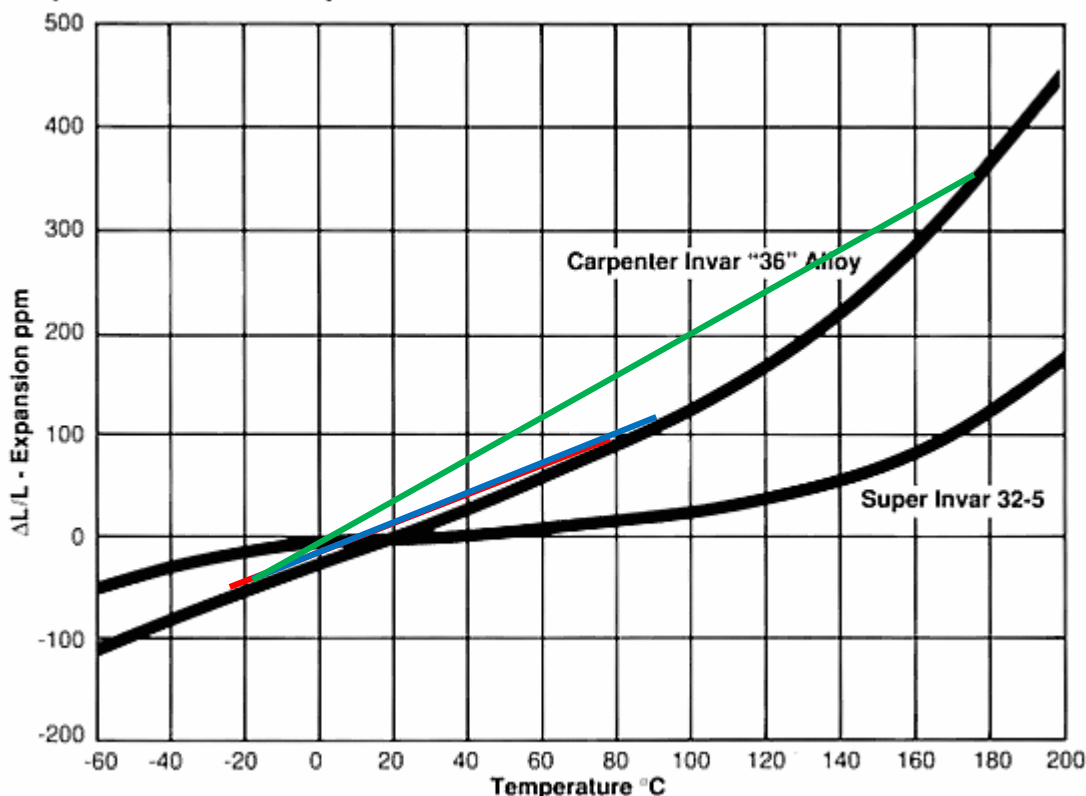
Tabel VIII.1, bepaling vezelpercentages



BIJLAGE IX Referentiemateriaal Invar 36

In de onderstaande grafiek is een vergelijking weergegeven tussen Super Invar 32-5 en Invar 36. De voor dit onderzoek interessante range is tussen -25°C en 75°C. Uit de onderstaande grafiek blijkt dat de uitzetting in deze range zo goed als lineair is.

Comparison of Thermal Expansion Curves - Carpenter Super Invar 32-5 vs. Carpenter Invar "36" Alloy



Afbeelding IX.1, vergelijk Super Invar 32-5 en Invar 36⁴²

Gevonden bronnen geven geen getallen voor de thermische uitzetting tussen -25°C en 75°C (rode lijn). Thermische uitzetting voor temperaturen onder 0°C bleek een lastig punt. Er zijn twee bronnen gevonden die thermische uitzetting gaven voor temperaturen onder 0°C:

Temperatuurrange	Uitzettingscoëfficiënt
-18°C tot 175°C	$1,6 \cdot 10^{-6}$ (groene lijn) ⁴³
-18°C tot 93°C	$1,26 \cdot 10^{-6}$ (blauwe lijn) ^{44,45}

De temperatuurrange van -18°C tot +93°C benaderd de in dit onderzoek te gebruiken temperatuurrange het best. Uit de grafiek blijkt dat de er in de blauwe lijn tussen -18°C en 93°C nauwelijks van richting verschilt ten opzichte van de rode lijn tussen -25°C en 75°C.

⁴² HighTemp Metals - Invar 36 Technical Data

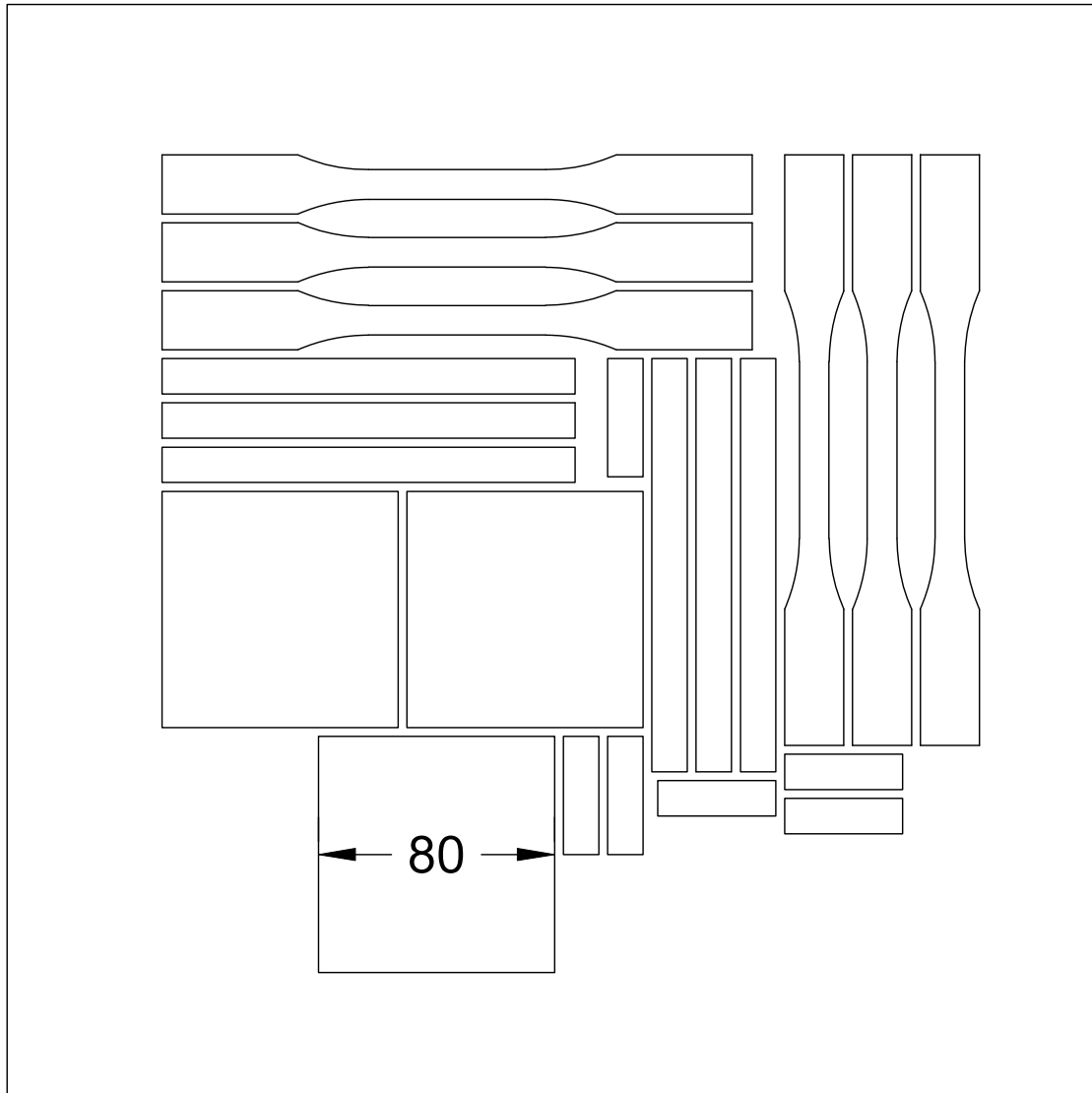
⁴³ NEA Inc – Invar 36 Alloy low expansion stencil & etching alloys

⁴⁴ Nickel Institute – 36% Nickel-Iron alloy for low temperature service

⁴⁵ ESPI Metals – Invar 36



BIJLAGE X Layout waterstraalsnijden



Afbeelding X.1, layout waterstraalsnijden



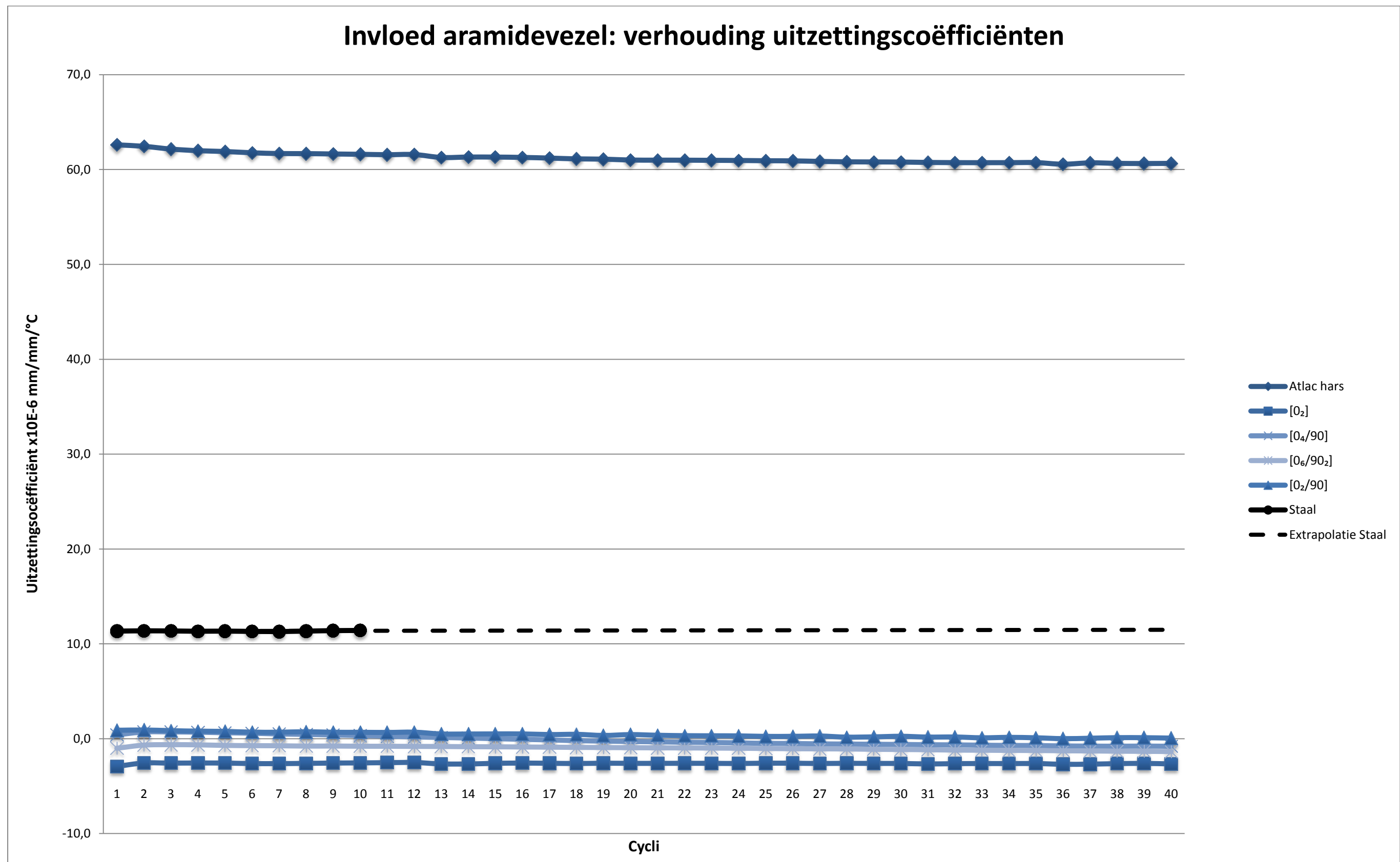
BIJLAGE XI Resultaten testen uitzettingscoëfficiënt



Serie 1	VVF	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17	1-18	1-19	1-20	1-21	1-22	1-23	1-24	1-25	1-26	1-27	1-28	1-29	1-30	1-31	1-32	1-33	1-34	1-35	1-36	1-37	1-38	1-39	1-40	1-41	
Invar met PC		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
Invar zonder PC		1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2		
Atlac		62,6	62,4	62,2	62,0	61,9	61,8	61,7	61,7	61,7	61,6	61,6	61,6	61,6	61,3	61,3	61,3	61,3	61,2	61,1	61,1	61,0	61,0	61,0	61,0	61,0	60,9	60,9	60,9	60,8	60,8	60,8	60,7	60,7	60,7	60,7	60,6	60,7	60,7	60,6	60,7	60,6	60,7
Epoxy		63,0	64,9	64,1	63,9	63,8	63,7	63,6	63,7	63,7	63,7	63,7	63,7	63,9	63,5	63,6	63,7	63,6	63,6	63,6	63,7	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,6	63,5	63,4	63,6	63,5	63,5	63,6	63,6
Synolite		75,4	75,4	74,9	74,7	74,6	74,4	74,3	74,3	74,2	74,1	74,1	74,0	73,7	73,7	73,7	73,7	73,6	73,5	73,4	73,2	73,1	73,1	73,0	73,1	73,0	73,1	73,0	72,9	72,8	72,8	72,7	72,7	72,6	72,6	72,6	72,6	72,3	72,5	72,4	72,5	72,4	72,5
Atlac 2LR	60,3	-2,9	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,5	-2,5	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6	-2,7	-2,6	
Atlac 2DR	60,3	68,4	66,8	66,2	65,8	65,6	65,1	64,9	64,8	64,6	64,4	64,2	64,1	63,7	63,5	63,5	63,4	63,2	63,0	63,0	62,9	62,8	62,7	62,6	62,5	62,4	62,3	62,2	62,1	62,0	62,2	61,8	61,7	61,9	61,5	61,8	61,0	61,6	61,5	61,4	61,6	61,2	
Atlac 3LR	60,5	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
Atlac 3DR	60,5	17,2	18,5	18,9	19,0	18,9	18,7	18,5	18,3	18,3	18,1	18,0	17,8	17,6	17,4	17,2	17,0	16,8	16,5	16,5	16,4	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,6	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,4	14,4	14,4	14,4	14,3	14,2	14,2
Epoxy 2LR	56,4	-3,4	-2,8	-2,9	-2,8	-2,8	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,8	-2,8	-2,9	-2,9	-2,9	-2,8	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,8	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-3,0	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	
Epoxy 2DR	56,4	78,4	75,4	73,7	73,1	72,7	72,4	72,3	72,2	72,2	72,1	72,0	72,1	71,8	71,8	71,8	71,7	71,7	71,5	71,6	71,6	71,5	71,5	71,4	71,4	71,4	71,3	71,3	71,3	71,2	71,2	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	70,8	71,1	71,0	71,0	71,1	71,1	
Epoxy 3LR	53,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5			
Epoxy 3DR	53,8	9,3	9,6	9,7	10,0	10,2	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,6	10,7	10,6	10,7	10,9	11,1	11,3	11,4	11,4	11,3	11,2	11,0	10,9	10,8	10,8	10,5	10,3	10,1	10,0	9,9	9,8	9,7	9,7	9,6	9,5	9,5	9,6	9,6	9,6	9,6		
Synolite 2LR	53,2	-2,6	-2,5	-2,5	-2,5	-2,4	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6		
Synolite 2DR	53,2	76,2	74,1	73,0	72,4	71,9	71,4	71,1	70,9	70,7	70,4	70,2	70,1	69,7	69,6	69,5	69,3	69,2	68,9	68,8	68,7	68,6	68,5	68,5	68,4	68,3	68,2	68,2	68,0	68,0	67,9	67,8	67,8	67,8	67,7	67,5	67,7	67,6	67,6	67,5	67,6	67,5	
Synolite 3LR	54,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	
Synolite 3DR	54,4	-9,4	-8,8	-8,2	-7,7	-7,4	-7,3	-7,1	-7,0	-6,9	-6,9	-6,7	-6,7	-6,7	-6,8	-6,7	-6,6	-6,5	-6,5	-6,4	-6,4	-6,3	-6,2	-6,1	-6,0	-6,0	-5,9	-5,9	-5,8	-5,7	-5,7	-5,5	-5,5	-5,4	-5,3	-5,3	-5,2	-5,2	-5,1	-5,0	-5,0	-5,0	-4,9

Serie 2	VVF	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
Invar 4h 100°C		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Invar 24h 22°C		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Atlac 2LR zonder PC	61,7	-2,7	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8		-2,8	-2,7	-2,7	-2,7	-2,8	-2,8	-2,8	-2,7	-2,7
Epoxy 2LR zonder PC	55,8	-3,2	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-2,9		-3,2	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
Synolite 2LR zonder PC	48,4	-2,2	-2,3	-2,3	-2,3	-2,4	-2,2	-2,3	-2,3	-2,2	-2,2		-2,2	-2,2	-2,2	-2,3	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,1
Staal S235 zonder PC		11,3	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,4	11,4		11,4	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,5

Serie 3	VVF	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18	3-19	3-20	3-21	3-22	3-23	3-24	3-25	3-26	3-27	3-28	3-29	3-30	3-31	3-32	3-33	3-34	3-35	3-36	3-37	3-38	3-39	3-40
Invar met PC		1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4
Invar zonder PC		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Atlac 8LR zonder PC	60,5	-1,0	-0,7	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,4		
Atlac 8DR zonder PC	60,5	7,2	6,9	7,4	7,8	7,7	7,5	7,7	7,7	7,7	7,6	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	6,7	6,6	6,6	6,6	6,5	6,5	6,4	6,3	6,2	6,1	6,1	6,0	6,0	5,7	5,9	5,8	5,7	5,6	5,8	5,7	5,6	5,7	5,6		
Epoxy 5LR zonder PC	53,4	-1,2	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8	-0,9	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-0,9	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,3	-1,4	-1,2	-1,3	-1,2
Epoxy 5DR zonder PC	53,4	11,1	11,4	11,3	11,4	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,4	11,3	11,1	11,2	11,3	11,4	11,3	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,7	11,7	11,8	11,7	11,6	11,5	11,5	11,5	11,6	11,5	11,4	11,2	10,9	10,7	
Epoxy 8LR zonder PC	53,1	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4		
Epoxy 8DR zonder PC	53,1	11,5	11,0	10,9	10,9	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,4	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0		
Synolite 5LR zonder PC	53,8	1,3	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4		
Synolite 5DR zonder PC	53,8	1,5	-2,3	-3,5	-3,9	-3,7	-3,6	-3,2	-2,9	-2,6	-2,5	-2,3	-2,3	-2,3	-2,2	-2,2	-2,1	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0		
Synolite 8LR zonder PC	53,1	-0,7	-1,0	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4		
Synolite 8DR zonder PC	53,1	3,1	4,1	4,1	4,6	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,1	5,2	5,2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,8	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5		



Grafiek XI.1, invloed van aramidevezel op uitzettingscoëfficiënt proefstukken



BIJLAGE XII Uitzettingsvrij composiet met Twaron en UHM Carbon mbv KLT

Twaron versterkte uitzettingsvrij composiet

Voor de buitenlagen is vezelvolumefractie (v.v.f.) van 55% reëel. Voor binnen lijven is een vezelvolumefractie van 30% reëel [Fibercore]. Twaron is geschikt voor trek, maar kan beperkt druk opnemen.

CUR96 vereist voor een plaat: >15% onder -45° , >15% onder 0° , >15% onder 45° & >15% onder 90° , mogelijk zijn dan bijvoorbeeld: $[-45/0/45/90_{1,6}]_s$, $[-45/0_2/45/90]_s$, $[-45_3/0_{11}/45_3/90_3]_s$ of $[-52/0/52]_s$.

Met een Twaron UD legsel $[-45/0/45/90_{1,6}]_s$ (32% vezels in dwarsrichting) en een v.v.f.=55% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de langsrichting mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Gedacht kan worden aan toepassing in geïntegreerde dekplaten en onderflenzen dan liggen er echter slechts 22% vezels in hoofdrichting op trek.

Met een Twaron UD legsel $[-52/0/52]_s$ (evenveel vezels in drie richtingen) en een v.v.f.=30% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de langsrichting mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Gedacht kan worden aan toepassing in geïntegreerde lijven in een brug. Slechts een van de diagonale lagen wordt efficiënt belast op trek.

Een uitzettingscoëfficiënt voor de matrix van $+20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ is alleen mogelijk bijzondere harsen zoals een phenolhars. $[-52/0/52]_s$ voldoet niet aan de CUR richtlijnen.

Met een Twaron UD legsel $[-45_3/0_{11}/45_3/90_3]_s$ (55% vezels in langsrichting) en een v.v.f.=55% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de langsrichting mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Gedacht kan worden aan toepassing in separate dekplaten en onderflenzen. Gedrukte flenzen zijn niet efficiënt.

Met een Twaron UD legsel $[-45/0/45/90]_s$ (evenveel vezels in alle vier richtingen) en een v.v.f.=55% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de alle richtingen mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+44 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Gedacht kan worden aan toepassing in separaat gemaakte lijven. Slechts één van de twee diagonale lagen wordt efficiënt belast op trek.

Uitzettingscoëfficiënten voor de matrix van $+44$ & $+100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ zit in de verkrijgbare range voor gebruikelijke harsen. Twaron vezels voor uitzettingsvrij composiet lenen zich separaat te maken onderdelen met verschillende harseigenschappen. Deze onderdelen kunnen dan aan elkaar gelast worden tot een brug.

De volgende mechanische lameleigenschappen zijn aangehouden t.b.v. uitzettingsvrij composiet (met 55% vezels & $a_m = 6,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$):



Vezelsoort: Lameleigenschap	C-HM	C-UHM	Twaron	E-glas
E_L [GPa]	241,4	418,5	70,3	41,2
E_T [GPa]	6,8	3,8	2,2	9,7
G_{LT} [GPa]	3,8	3,8	1,6	3,9
m_{LT} [-]	0,31	0,31	0,37	0,28
m_{TL} [-]	0,009	0,003	0,012	0,066
a_L [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	-0,50	-1,4	-2,1	7,1
a_T [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	26,1	36,6	65,3	24,4

Tabel XII.1, mechanische lameleigenschappen

Koolstof vezel uitzettingsvrij composiet

Voor de buitenlagen is vezelvolumefractie (v.v.f.) van 55% reëel. Voor de binnen lijven is een vezelvolumefractie van 30% reëel [Fibercore]. Carbon is geschikt voor zowel trek als druk!

CUR96 vereist voor een plaat: >15% onder -45° , >15% onder 0° , >15% onder 45° & >15% onder 90° , mogelijk zijn dan bijvoorbeeld: $[-45_3/0_3/45_3/90_{11}]_s$ (4x25%) & $[-45_3/0_3/45_3/90_{11}]_s$ (3x15% + 55%).

Met een hybride carbon UD legsel $[-45_3/0_3/45_3/90_{11}]_s$ van 67% UHM & 33% HM (55% vezels in dwarsrichting) en een v.v.f.=55% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de langsrichting mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Als de stijfheid van de dwarslamellen op 0 wordt gezet zakt de uitzettingscoëfficiënt met $1,5 \times 10^{-6}$, hetgeen nog steeds beperkt is.

Met een UHM carbon UD legsel $[-45_3/0_3/45_3/90]_s$ (evenveel vezels in alle vier richtingen) met een v.v.f.=30% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de langsrichting mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft.

Met een hybride carbon UD legsel $[-45_3/0_{11}/45_3/90_3]_s$ van 7,5% glas & 92,5% HM (55% vezels in langsrichting) en een v.v.f.=55% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de langsrichting mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Gedacht kan worden aan toepassing in separaat gemaakte dekplaten met naast globale tevens lokale afdracht van wielbelasting in langsrichting naar lijven in dwarsrichting.

Met een hybride carbon UD legsel $[-45_3/0_3/45_3/90]_s$ van 20% UHM & 80% HM (evenveel vezels in alle vier richtingen) en een v.v.f.=55% is een nihil thermische uitzettingscoëfficiënt in de alle richtingen mogelijk als de matrix een uitzettingscoëfficiënt van $+60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ heeft. Als de stijfheid van de dwarslamellen op 0 wordt gezet zakt de uitzettingscoëfficiënt met circa $1,0 \times 10^{-6}$, hetgeen nog steeds beperkt is.

Een matrix met een uitzettingscoëfficiënt van $+60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ zit in de verkrijgbare range voor diverse gebruikelijke harsen, een geschikte matrix kan dus op basis van meerdere, gewenste eigenschappen worden geselecteerd. Met één (uitzettingscoëfficiënt voor de) matrix is er reeds voldoende speelruimte om alle gebruikelijke vezelrichtingsverhoudingen te kunnen maken voor uitzettingsvrije, koolstofvezel versterkte composiet constructieonderdelen.



BIJLAGE XIII Dimensionering (uitzettingsvrije) brugdekvarianten

0: Brugdek Voorgespannen Beton

B	5,0 m		
L	13,0 m	H=L/32,5	6,5 m

hulp

Belasting

NEN-EN 1991-2 4.3.2

0	p	12,3 kN/m ²		
1	F	300 kN/as	c.t.c. 1,2 m	5,9 m
2	F	300 kN/as		
3	p	5,4 kN/m ²		

Moment - hoofdrichting

M ₀	260 kNm/m	1,05	273 kNm/m
M ₁	177 kNm/m	1,35	239 kNm/m
M ₂	177 kNm/m	1,35	239 kNm/m
M ₃	114 kNm/m	1,35	154 kNm/m
	<u>728 kNm/m</u>	<u>1,24</u>	<u>905 kNm/m</u>

Doorsnedegrootheden - Glasvezel

H= 400 mm

Hoofdrichting - B=1,0m dek

E	34.000 N/mm ²	W _b 2,67E+07 mm ³ /m
I	5,33E+09 mm ⁴ /m	W _o 2,67E+07 mm ³ /m

Doorbuiging

Spanning

EG

EG + VB

δ ₁	13,7 mm	σ _b	-9,7 N/mm ²	-27 N/mm ²
δ ₂	13,7 mm	σ _o	9,7 N/mm ²	27 N/mm ²
δ ₃	<u>11,1 mm</u>			
	39 mm			
	L/337	<	L/300	

ROK

NEN-EN 1992-1-1 7.4.1

Ap	3.350 mm ²	VSP		
Fp	4.050 kN	σ _n	-10,1 N/mm ²	EG + VSP EG+VSP+VB
ep	97,5 mm	σ _b	14,8 N/mm ²	-5,1 N/mm ² -22,6 N/mm ²
Mp	394,9 kNm	σ _o	-14,8 N/mm ²	-15,2 N/mm ² 2,4 N/mm ²

Wp 1,30E+07 mm³/m

(asfalt)

	A _c	A _p	A _s	A _{slijtlaag}
	0,40	0,34%	0,30%	0,100
	24	78,5	78,5	23 kN/m ³
1,0m ²	1,0m ²	9,60	0,24	2,30 kN/m ²
				59 kg/m ³

ondersteuning	bekisting	beton	voorspanning	wapening	slijtlaag			
Kosten	50	70	0,06	2,5	1,25	0,10	Eur/kg	[W+B]
	50	70	58	66	29	23	296 Eur/m ²	materiaal
							<u>incl</u> Eur/m ²	arbeid
							296 Eur/m ²	totaal
								739 Eur/m ³

I-A-7



EN 1992-1-1 2.4.2.4						
Mat	riaalfactor		Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
	beton	γ_m	1,5	1,5	1,0	1,5
	wapening	γ_m	1,15	1,15	1,0	1,15
	voorspanning	γ_m	1,1	1,1	1,0	1,1

Vermoeiing

Brugdek			hulp		
	B	5,0 m			
	L	13,0 m			6,5 m

Belasting			NEN-EN 1991-2 4.6.2		
1	F	210 kN/as	c.t.c. 1,2 m		
2	F	210 kN/as			5,9 m
3	p	1,6 kN/m ²			

Moment - hoofdrichting		γ_{ff}			
M_1	124 kNm/m	1,0	124 kNm/m		
M_2	124 kNm/m	1,0	124 kNm/m		
M_3	34 kNm/m	1,0	34 kNm/m		
	<u>282 kNm/m</u>		<u>282 kNm/m</u>		

$\Delta\sigma_p$ 22 N/mm ²			UD	
			51 N/mm ²	42%
$\Delta\sigma_{Rsk}$ 120 N/mm ²				
N*	1.000.000	wisselingen k1		
	5			
k2	7	(stalen omhullingsbuis)		
$\Delta\sigma_{Rsk}$	51 N/mm ²	γ_m verwerkt		
NEN-EN 1991-2 4.6.1				
2.000.000	zware voertuigen/jaar			
100	jaar levensduur			
200.000.000	zware voertuigen in levensduur			



1: Brugdek Glasvezel composiet

B	5,0 m				
L	13,0 m	H=L/15,0	6,5 m	L	0,18 m

Belasting NEN-EN 1991-2 4.3.2

0	p	1,9 kN/m ²			0	p	0,7 kN/m ²
1	F	300 kN/as	c.t.c. 1,2 m	5,9 m	1	p	938 kN/m ²
2	F	300 kN/as	3,0 m				
3	p	5,4 kN/m ²	9,0 kN/m ²		3	p	9,0 kN/m ²

Moment - hoofdrichting

M ₀	40 kNm/m	1,05	42 kNm/m
M ₁	177 kNm/m	1,35	239 kNm/m
M ₂	177 kNm/m	1,35	239 kNm/m
M ₃	114 kNm/m	1,35	154 kNm/m
	508 kNm/m	1,33	673 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M ₀	0,0 kNm/m	1,05	0,0 kNm/m
M ₁	2,4 kNm/m	1,35	3,2 kNm/m
M ₃	0,0 kNm/m	1,35	0,0 kNm/m
	2,42 kNm/m		3,27 kNm/m

Doorsnedegrootheden - Glasvezel

Hoofdrichting - B=1,0m dek

E	72.000 N/mm ²	W _b	7,80E+06 mm ³ /m
I	3,09E+09 mm ⁴ /m	W _o	6,58E+06 mm ³ /m

Dwarsrichting - B=1,0m dekplaat / bovenflens

EI	2,90E+10
W	26.895 mm ³ /m

Doorsnede

δ ₁	15,4 mm	σ _b	-86 N/mm ²	-0,12% > -0,54%	11%	σ _{o,b}	122 N/mm ²	11%
δ ₂	15,4 mm	σ _o	102 N/mm ²	0,14% < 0,81%	17%		0,3 mm	
δ ₃	12,4 mm						L/533	
	43 mm							
	L/301	<	L/300	ROK	100%			

NEN-EN 1992-1-1 7.4.1

Doorsnedegrootheid

	b	h	A	vv%	A _f	f _L %	f _T %	A _{TL}	A _{TT}
bovenflens	1000 mm	30,00 mm	30.000	55%	16.500	56%	33%	9.306	5.379
lijven b=5mm	29 mm	815,00 mm	23.286	35%	8.150	36%	36%	2.901	2.901
onderflens	1000 mm	20,0 mm	20.000	55%	11.000	68%	21%	7.458	2.266
		865 mm	73.286	49%	35.650			19.665	10.546

	A _{TLi}	z _i	z _i x A _i	(z _i -z _{tot}) ² x A _i	I _i	I	3,09E+09 mm ⁴
bovenflens	9.306	850,00	7,91E+06	1,35E+09	6,98E+05		
lijven	2.901	427,50	1,24E+06	5,02E+06	1,61E+08	W _b	7,80E+06 mm ³
onderflens	7.458	10,00	7,46E+04	1,57E+09	2,49E+05	W _o	6,58E+06 mm ³
	19.665	469,10	9,23E+06	2,93E+09	1,62E+08		

	bovenflens	richting	lijven	richting	onderflens	richting
longitudinal:	4	0 N/mm ²	1	0°	5	0°
	1	45°	1	-60°	1	45°
	2	90°	1	60°	1	90°
	1	-45°			1	-45°
total:	8		3		8	

Hoeveelheden

	A _f	A _m	A _{core}	A _{sluitlaag}	(epoxy slurry)
	0,036	0,038	0,865	0,012 m ³ / m ²	
	25,4	12	0,4	14 kN/m ³	
	0,91	0,45	0,35	0,17	1,87 kN/m ²
	0,017	0,014		0,012 m ³ / m ²	
	25,4	12		14 kN/m ³	
	0,42	0,16		0,17	0,75 kN/m ²

Kosten

2,5	2,0	1,0	3,0	Eur/kg	[Solico]
226	90	35	50	402 Eur/m ²	
				201 Eur/m ²	materiaal
				603 Eur/m ²	arbeid & hulpwerk
					totaal



Breukrek

gem.	kar.	kar. <i>f</i> _{limic}
> - 1,60%	> - 1,28%	> - 0,54%
< 2,40%	< 1,92%	< 0,81%
CUR 96		

I - A - 1

Materiaalfactor

	Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
γ_{m1}	1,35 CUR096 6.3			materiaalspreiding
γ_{m2}	1,40 CUR096 6.3 tabel 1			productiemethode, VA RTM not cured
γ_m	1,89 >1,5		$\gamma_m \cdot \gamma_f$	2,51 >2,50
γ_{ct}	1,1 CUR096 6.4		temperatuur	vast gegeven
γ_{cv}	1,1 CUR096 6.4		vocht	wisselend vochtig
γ_{ck}	1,03 CUR096 6.4		lange duur sterkte	24 h UD
γ_{cf}	1,1 CUR096 6.4		belastinghistorie	stijfheid niet van belang
γ_c	1,25	1,21	1,37	
$\gamma_m \cdot \gamma_c$	2,36	2,29		2,60

Vermoeiing

Brugdek
B 5,0 m
L 13,0 m

hulp

6,5 m

L

0,18 m

Belasting

NEN-EN 1991-2 4.6.2

1 F 210 kN/as
2 F 210 kN/as
3 p 1,6 kN/m2

c.t.c. 1,2 m

5,9 m

1

p 656 kN/m2

3

p 2,7 kN/m2

Moment - hoofdrichting

γ_{ff}

M_1	124 kNm/m	1,0	124 kNm/m
M_2	124 kNm/m	1,0	124 kNm/m
M_3	34 kNm/m	1,0	34 kNm/m
	282 kNm/m		282 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M_1	1,7 kNm/m	1,0	1,7 kNm/m
M_3	0,0 kNm/m	1,0	0,0 kNm/m
	1,68 kNm/m		1,68 kNm/m

1,59%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1142 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 604 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m
σ_{amp} 43 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R 0,0	
σ_{mean} 21 N/mm2	
k 9	(glas-polyester)

Nf	22.206.650.391	wisselingen	Voor R= -1,0
Nf	30.723.866.657	wisselingen	Voor R= 0,0

1,59%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1142 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 604 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m
σ_{amp} 63 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R -0,3	
σ_{mean} 22 N/mm2	
k 9	

Nf	732.141.964	wisselingen	Voor R= -1,0
Nf	1.020.586.417	wisselingen	Voor R= -0,3

NEN-EN 1991-2 4.6.1

2.000.000 zware voertuigen/jaar
100 jaar levensduur
200.000.000 zware voertuigen in levensduur

NEN-EN 1991-2

4.000.000 zware voertuigwielen/jaar
100 jaar levensduur
400.000.000 zware voertuigwielen in levensduur



2: Brugdek Aramidevezel composiet

hulp

B 5,0 m

L 13,0 m

H=L/16,5

6,5 m

L

0,15 m

Belasting NEN-EN 1991-2 4.3.2

0 p 1,3 kN/m²

1 F 300 kN/as

2 F 300 kN/as

3 p 5,4 kN/m²

c.t.c. 1,2 m

5,9 m

p 0,5 kN/m²

p 938 kN/m²

p 9,0 kN/m²

Moment

M₀ 28 kNm/m

1,05

29 kNm/m

M₁ 177 kNm/m

1,35

239 kNm/m

M₂ 177 kNm/m

1,35

239 kNm/m

M₃ 114 kNm/m

1,35

154 kNm/m

496 kNm/m

661 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M₀ 0,0 kNm/m

1,05

0,0 kNm/m

M₁ 1,8 kNm/m

1,35

2,4 kNm/m

M₃ 0,0 kNm/m

1,35

0,0 kNm/m

1,78 kNm/m

2,40 kNm/m

Doorsnedegrootheden - Aramidevezel

Hoofdriching - B=1,0m dek

E 125.000 N/mm²

I 1,77E+09 mm⁴/m

W_b 6,44E+06 mm³/m

W_o 3,44E+06 mm³/m

Dwarsrichting - B=1,0m dekplaat / bovenflens

EI 4,32E+10

W 24.273 mm³/m

Doorbuiging

Spanning

UC

δ₁ 15,5 mm

σ_b -103 N/mm²

-0,08% > -0,16%

53%

σ_{o,b}

99 N/mm²

UC

51%

δ₂ 15,5 mm

σ_o 192 N/mm²

0,15% < 0,78%

20%

0,1 mm

δ₃ 12,5 mm

L/1261

43 mm

L/299

<

L/300

ROK

100%

NEN-EN 1992-1-1 7.4.1

Doorsnedegrootheid

	b	h	A	vv%	A _f	f _t %	f _t %	A _{fL}	A _{fT}
bovenflens	1000 mm	28,5 mm	28.500	55%	15.675	56%	33%	8.841	5.110
lijven b=5mm	33 mm	751,5 mm	25.050	35%	8.768	36%	36%	3.121	3.121
onderflens	1000 mm	10,0 mm	10.000	55%	5.500	68%	21%	3.729	1.133
		790 mm	63.550		29.943			15.691	9.364

	A _{fL}	z _i	z _i × A _i (z _i -z _{tot}) ² × A _i	I _i	I
bovenflens	8.841	775,75	6,86E+06	6,01E+08	5,98E+05
lijven	3.121	385,75	1,20E+06	5,21E+07	1,47E+08
onderflens	3.729	5,00	1,86E+04	9,70E+08	3,11E+04
	15.691	515,00	8,08E+06	1,62E+09	1,48E+08

	bovenflens	richting	lijven	richting	onderflens	richting
longitudinal:	4	0°	1	0°	5	0°
	1	45°	1	-60°	1	45°
	2	90°	1	60°	1	90°
	1	-45°			1	-45°
total:	8		3		8	

Hoeveelheden

	A _f	A _m	A _{core}	A _{slijtlaag}	(epoxy slurry)
	0,030	0,034	0,790	0,012	m ³ / m ²
	14,4	12	0,4	14	kN/m ³
	0,43	0,40	0,32	0,17	1,32 kN/m ²
	0,016	0,013		0,012	m ³ / m ²
	14,4	12		14	kN/m ³
	0,23	0,15		0,17	0,55 kN/m ²



Kosten	20	2,0	1,0	3,0	Eur/kg	[Solico]
	862	81	32	50	1.025	Eur/m2
					201	Eur/m2
					1.226	Eur/m2
						materiaal
						arbeid & hulpwerk
						totaal

Breukrek

gem.	kar.	kar./ $\gamma_m \gamma_c$
> -0,46%	> -0,37%	> -0,16%
< 2,30%	< 1,84%	< 0,78%

Materiaalfactor

	Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
γ_{m1}	1,35 CUR096 6.3			materiaalspreiding
γ_{m2}	1,40 CUR096 6.3 tabel 1			productiemethode, VA RTM not cured
γ_m	1,89 >1,5		$\gamma_m \bullet \gamma_f$	0,00 >2,50
γ_{ct}	1,1 CUR096 6.4		temperatuur	vast gegeven
γ_{cv}	1,1 CUR096 6.4		vocht	wisselend vochtig
γ_{ck}	1,03 CUR096 6.4		lange duur sterkte	24 h UD
γ_{cf}	1,1 CUR096 6.4		belastinghistorie	stijfheid niet van belang
γ_c	1,25	1,21	1,37	
$\gamma_m \bullet \gamma_c$	2,36	2,29		2,60

Vermoeiing

Brugdek

B	5,0 m				
L	13,0 m		6,5 m	L	0,15 m

Belasting

		NEN-EN 1991-2 4.6.2			
1	F	210 kN/as	c.t.c. 1,2 m	5,9 m	1 p 656 kN/m2
2	F	210 kN/as			
3	p	1,6 kN/m2			3 p 2,7 kN/m2

Moment - hoofdrichting

		γ_{ff}	
M_1	124 kNm/m	1,0	124 kNm/m
M_2	124 kNm/m	1,0	124 kNm/m
M_3	34 kNm/m	1,0	34 kNm/m
	282 kNm/m		282 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M_1	1,2 kNm/m	1,0	1,2 kNm/m
M_3	0,0 kNm/m	1,0	0,0 kNm/m
	1,24 kNm/m		1,24 kNm/m

1,52%	γ_c verwerkt	1,52%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1901 N/mm2	γ_c verwerkt	σ_{Rk} 1901 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 1006 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m	$\sigma_{t,Rd}$ 1006 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m
σ_{amp} 82 N/mm2	$\Delta\sigma_d$	σ_{amp} 51 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R 0,0		R -0,3	
σ_{mean} 41 N/mm2		σ_{mean} 18 N/mm2	
k 9	(glas-polyester)	k 9	
Nf 6.262.189.159	wisselingen	Nf 455.522.052.143	wisselingen
Nf 9.108.801.863	wisselingen	Nf 535.089.598.899	wisselingen
	Voor R= -1,0		Voor R= -1,0
	Voor R= 0,0		Voor R= -0,3

NEN-EN 1991-2 4.6.1
2.000.000 zware voertuigen/jaar
100 jaar levensduur
200.000.000 zware voertuigen in levensduur

NEN-EN 1991-2
4.000.000 zware voertuigwielen/jaar
100 jaar levensduur
400.000.000 zware voertuigwielen in levensduur



3: Brugdek - Carbonvezel composiet

hulp

B	5,0 m				
L	13,0 m	H=L/23,9	6,5 m	L	0,12 m

Belasting NEN-EN 1991-2 4.3.2

0	p	1,0 kN/m ²			p 0,4 kN/m ²
1	F	300 kN/as	c.t.c. 1,2 m	5,9 m	p 938 kN/m ²
2	F	300 kN/as			
3	p	5,4 kN/m ²			p 9,0 kN/m ²

Moment

M ₀	21 kNm/m	1,05	22 kNm/m
M ₁	177 kNm/m	1,35	239 kNm/m
M ₂	177 kNm/m	1,35	239 kNm/m
M ₃	114 kNm/m	1,35	154 kNm/m
	<u>489 kNm/m</u>		<u>654 kNm/m</u>

Moment - dwarsrichting

M ₀	0,0 kNm/m	1,05	0,0 kNm/m
M ₁	1,1 kNm/m	1,35	1,5 kNm/m
M ₂	1,1 kNm/m	1,35	1,5 kNm/m
M ₃	0,0 kNm/m	1,35	0,0 kNm/m
	<u>1,14 kNm/m</u>		<u>1,54 kNm/m</u>

Doorsnedegrootheden - HM Carbonvezel

Hoofdrichting - B=1,0m dek

E	436.000 N/mm ²	W _b	2,17E+06 mm ³ /m
I	5,15E+08 mm ⁴ /m	W _o	1,68E+06 mm ³ /m

Dwarsrichting - B=1,0m dekplaat / bovenflens

EI	1,27E+10
W	4.669 mm ³ /m

Doorbuiging

Spanning

UC

UC

δ ₁	15,2 mm	σ _b	-301 N/mm ²	-0,07% > -0,27%	26%	σ _{o,b}	329 N/mm ²	28%
δ ₂	15,2 mm	σ _o	390 N/mm ²	0,09% < 0,34%	26%		0,2 mm	
δ ₃	12,3 mm						L/725	
	<u>43 mm</u>							
	L/304	<	L/300	ROK	99%			

NEN-EN 1992-1-1 7.4.1

Doorsnedegrootheid

	b	h	A	vv%	A _f	f _L %	f _T %	A _{fL}	A _{fT}
12,5 bovenflens	1000 mm	12,5 mm	12.500	55%	6.875	56%	33%	3.878	2.241 lijven
b=5mm	42 mm	525,5 mm	21.896	35%	7.664	36%	36%	2.728	2.728
7 onderflens	1000 mm	7,0 mm	7.000	55%	3.850	68%	21%	2.610	793
800		545 mm	41.396		18.389			9.216	5.763

	A _{fL}	z _i	z _i x A _i (z _i -z _{tot}) ² x A _i	I _i	I	5,15E+08 mm ⁴
bovenflens	3.878	538,75	2,09E+06	2,07E+08	5,05E+04	
lijven	2.728	269,75	7,36E+05	3,89E+06	6,28E+07	W _b 2,17E+06 mm ³
onderflens	2.610	3,50	9,14E+03	2,41E+08	1,07E+04	W _o 1,68E+06 mm ³
	<u>9.216</u>	307,52	2,83E+06	4,52E+08	6,28E+07	

	bovenflens	richting	lijven	richting	onderflens	richting
longitudinal:	4	0°	1	0°	5	0°
	1	45°	1	-60°	1	45°
	2	90°	1	60°	1	90°
	<u>1</u>	-45°			<u>1</u>	-45°
total:	8		3		8	

Hoeveelheden

(epoxy slurry)

A _f	A _m	A _{core}	A _{slijtlaag}
0,018	0,023	0,545	0,012 m ³ / m ²
18,4	12	0,4	14 kN/m ³
0,34	0,28	0,22	0,17 1,00 kN/m ²
0,007	0,006		0,012 m ³ / m ²
18,4	12		14 kN/m ³
0,13	0,07		0,17 0,36 kN/m ²

Kosten

25	2,0	1,0	3,0	Eur/kg	[Solico]
846	55	22	50	973 Eur/m ²	
				<u>201</u> Eur/m ²	materiaal
				1.174 Eur/m ²	arbeid & hulpwerk
					totaal

gem.	kar.	kar./ $\gamma_m \gamma_c$
> -0,80%	> -0,64%	> -0,27%
1,00%	< 0,80%	< 0,34

materialaalspreiding
productiemethode, VA RTM not cured
D >2,50

γ_{m1}	1,35 CUR096 6.3			materialaalspreiding
γ_{m2}	1,40 CUR096 6.3 tabel 1			productiemethode, VA
γ_m	1,89 >1,5	$\gamma_m \bullet \gamma_f$	0,00 >2,50	
γ_{ct}	1,1 CUR096 6.4	temperatuur		vast gegeven
γ_{cv}	1,1 CUR096 6.4	vocht		wisselend vochtig
γ_{ck}	1,03 CUR096 6.4	lange duur sterkte		24 h UD
γ_{cf}	1,1 CUR096 6.4	belastinghistorie		stijfheid niet van belang
c	1,25	1,21	1,37	
c	2,36	2,29	2,60	

L 0,12 m

3 p 2,7 kN/m²

M_1 0,8 kNm/m	1,0	0,8 kNm/m
M_3 0,0 kNm/m	1,0	0,0 kNm/m
0,79 kNm/m		<u>0,79 kNm/m</u>

0,66%	γ_c verwerkt			0,66%	γ_c verwerkt		
σ_{Rk} 2883 N/mm2	γ_c verwerkt			σ_{Rk} 2883 N/mm2	γ_c verwerkt		
$\sigma_{t,Rd}$ 1525 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m	UD		$\sigma_{t,Rd}$ 1525 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m	UD	
σ_{amp} 168 N/mm2	$\Delta\sigma_d$	179	94%	σ_{amp} 169 N/mm2	$\Delta\sigma_d$	175 N/mm2	97%
R 0,0				R -0,3			
σ_{mean} 84 N/mm2		0,055		σ_{mean} 59 N/mm2			
k 9	(glas-polyester)			k 9			
Nf 412.380.363	wisselingen	Voor R= -1,0		Nf 386.990.369	wisselingen	Voor R= -1,0	
Nf 687.259.973	wisselingen	Voor R= 0,0		Nf 553.040.958	wisselingen	Voor R= -0,3	

400.000.000 zware voertuigwielen in levensduur



0: Brugdek Voorgespannen Beton

hulp

B	5,0 m		
L	27,0 m	H=L/32,7	13,5 m

Belasting

NEN-EN 1991-2 4.3.2

0	p	22,9 kN/m ²		
1	F	300 kN/as	c.t.c. 1,2 m	12,9 m
2	F	300 kN/as		
3	p	5,4 kN/m ²		

Moment - hoofdrichting

M ₀	2089 kNm/m	1,05	2193 kNm/m
M ₁	387 kNm/m	1,35	522 kNm/m
M ₂	387 kNm/m	1,35	522 kNm/m
M ₃	492 kNm/m	1,35	664 kNm/m
	<u>3355 kNm/m</u>	1,16	<u>3903 kNm/m</u>

Doorsnedegrootheden - Glasvezel

H= 825 mm

Hoofdrichting - B=1,0m dek

E	34.000 N/mm ²	W _b	1,13E+08 mm ³ /m
I	4,68E+10 mm ⁴ /m	W _o	1,13E+08 mm ³ /m

Doorbuiging

Spanning

EG

EG + VB

δ ₁	14,8 mm	σ _b	-18,4 N/mm ²	-30 N/mm ²
δ ₂	14,8 mm	σ _o	18,4 N/mm ²	30 N/mm ²
δ ₃	<u>23,5 mm</u>			
	53 mm			

L/509

<

L/300

ROK

NEN-EN 1992-1-1 7.4.1

Ap	5.900 mm ²	VSP		
Fp	7.133 kN	σ _n	-8,6 N/mm ²	EG + VSP EG+VSP+VB
ep	292,5 mm	σ _b	18,4 N/mm ²	-8,7 N/mm ² -19,8 N/mm ²
Mp	2086,4 kNm	σ _o	-18,4 N/mm ²	-8,6 N/mm ² 2,5 N/mm ²

Wp 8,04E+07 mm³/m

A _c	A _p	A _s	A _{slijtlaag}
0,83	0,59%	0,30%	0,100
24	78,5	78,5	23 kN/m ³
1,0m ²	1,0m ²	19,80	0,46
		0,24	2,30 kN/m ²
			29 kg/m ³

ondersteuning	bekisting	beton	voorspanning	wapening	slijtlaag			
Kosten	50	70	0,06	2,5	1,25	0,10	Eur/kg	[W+B]
	50	70	119	116	29	23	Eur/m ²	materiaal
							incl	arbeid
							407	493
							Eur/m ²	Eur/m ³

EN 1992-1-1 2.4.2.4

factor	Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
Materi	beton	γ _m	1,5	1,5
	wapening	γ _m	1,15	1,15
	voorspanning	γ _m	1,1	1,1



Vermoeiing

Brugdek

B 5,0 m
L 27,0 m

hulp

13,5 m

Belasting

NEN-EN 1991-2 4.6.2

1 F 210 kN/as
2 F 210 kN/as
3 p 1,6 kN/m²

c.t.c. 1,2 m

12,9 m

Moment - hoofdrichting

γ_{Ff}

M ₁	271 kNm/m	1,0	271 kNm/m
M ₂	271 kNm/m	1,0	271 kNm/m
M ₃	148 kNm/m	1,0	148 kNm/m
	<u>689 kNm/m</u>		<u>689 kNm/m</u>

UD

$\Delta\sigma_p$ 9 N/mm²

51 N/mm²

17%

$\Delta\sigma_{Rsk}$ 120 N/mm²

N* 1.000.000 wisselingen

k1 5

k2 7 (stalen omhullingsbuis)

$\Delta\sigma_{Rsk}$ 51 N/mm² γ_m verwerkt

NEN-EN 1991-2 4.6.1

2.000.000 zware voertuigen/jaar

100 jaar levensduur

200.000.000 zware voertuigen in levensduur



1: Brugdek Glasvezel composiet

B 5,0 m
L 27,0 m
H=L/13,5
13,5 m
L 0,18 m

Belasting

NEN-EN 1991-2 4.3.2

0 p 2,9 kN/m²
1 F 300 kN/as
2 F 300 kN/as
3 p 5,4 kN/m²
3,0 m
9,0 kN/m²
c.t.c. 1,2 m
12,9 m
0 p 0,7 kN/m²
1 p 938 kN/m²
3 p 9,0 kN/m²

Moment - hoofdrichting

M₀ 261 kNm/m
M₁ 387 kNm/m
M₂ 387 kNm/m
M₃ 492 kNm/m
1527 kNm/m
1,05
1,35
1,35
1,35
1,30
274 kNm/m
522 kNm/m
522 kNm/m
664 kNm/m
1983 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M₀ 0,0 kNm/m
M₁ 2,4 kNm/m
M₃ 0,0 kNm/m
2,42 kNm/m
1,05
1,35
1,35
0,0 kNm/m
3,2 kNm/m
0,0 kNm/m
3,27 kNm/m

Doorsnedegrootheden - Glasvezel

Hoofdrichting - B=1,0m dek

E 72.000 N/mm²
I 1,84E+10 mm⁴/m
W_b 1,99E+07 mm³/m
W_o 1,71E+07 mm³/m

Dwarsrichting - B=1,0m dekplaat / bovenflens

EI 2,90E+10
W 26.895 mm³/m

Doorsnede

δ₁ 24,4 mm
δ₂ 24,4 mm
δ₃ 38,7 mm
87 mm
L/309
Spinning
σ_b -100 N/mm²
σ_o 116 N/mm²
-0,14% > -0,54%
0,16% < 0,81%
116
26%
20%
σ_{o,b} 122 N/mm²
0,3 mm
L/533
ROK
NEN-EN 1992-1-1 7.4.1
97%

Doorsnedegrootheid

	b	h	A	vv%	A _f	f _L %	f _T %	A _{FL}	A _{FT}
bovenflens	1000 mm	30,00 mm	30.000	55%	16.500	56%	33%	9.306	5.379
lijven b=5mm	29 mm	1950,00 mm	55.714	35%	19.500	36%	36%	6.942	6.942
onderflens	1000 mm	20,0 mm	20.000	55%	11.000	68%	21%	7.458	2.266
		2000 mm	105.714	44%	47.000			23.706	14.587
	A _{FL}	z _i	z _i x A _i	(z _i -z _{tot}) ² x A _i	I _i			I	1,84E+10 mm ⁴
bovenflens	9.306	1.985,00	1,85E+07	7,73E+09	6,98E+05				
lijven	6.942	995,00	6,91E+06	4,30E+07	2,20E+09			W _b	1,99E+07 mm ³
onderflens	7.458	10,00	7,46E+04	8,44E+09	2,49E+05			W _o	1,71E+07 mm ³
	23.706	1.073,75	2,55E+07	1,62E+10	2,20E+09				

	bovenflens	richting	lijven	richting	onderflens	richting
longitudinal:	4	0 N/mm ²	1	0°	5	0°
	1	45°	1	-60°	1	45°
	2	90°	1	60°	1	90°
	1	-45°			1	-45°
total:	8		3		8	

Hoeveelheden

A _f	A _m	A _{core}	A _{slijtlaag}	
0,047	0,059	2,000	0,012	m ³ / m ²
25,4	12	0,4	14	kN/m ³
1,19	0,70	0,80	0,17	2,87 kN/m ²
0,017	0,014		0,012	m ³ / m ²
25,4	12		14	kN/m ³
0,42	0,16		0,17	0,75 kN/m ²



Kosten	2,5	2,0	1,0	3,0	Eur/kg	[Solico]
	298	141	80	50	570 Eur/m2	materiaal
					285 Eur/m2	arbeid & hulpwerk
					855 Eur/m2	totaal

Breukrek

gem.	kar.	kar./ $\gamma_m \gamma_c$
> -1,60%	> -1,28%	> -0,54%
< 2,40%	< 1,92%	< 0,81%
CUR 96		

Materiaalfactor

	Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
γ_{m1}	1,35 CUR096 6.3			materiaalspreiding
γ_{m2}	1,40 CUR096 6.3 tabel 1			productiemethode, VA RTM not cured
γ_m	1,89 >1,5		$\gamma_m \bullet \gamma_t$	2,45 >2,50
γ_{ct}	1,1 CUR096 6.4		temperatuur	vast gegeven
γ_{cv}	1,1 CUR096 6.4		vocht	wisselend vochtig
γ_{ck}	1,03 CUR096 6.4		lange duur sterkte	24 h UD
γ_{cf}	1,1 CUR096 6.4		belastinghistorie	stijfheid niet van belang
γ_c	1,25	1,21	1,37	
$\gamma_m \bullet \gamma_c$	2,36	2,29		2,60

Vermoeiing

Brugdek
B 5,0 m
L 27,0 m

hulp

13,5 m

L

0,18 m

Belasting

NEN-EN 1991-2 4.6.2

- 1 F 210 kN/as
2 F 210 kN/as
3 p 1,6 kN/m2

c.t.c. 1,2 m

12,9 m

1

p 656 kN/m2

3

p 2,7 kN/m2

Moment - hoofdrichting

γ_{ff}

M_1	271 kNm/m	1,0	271 kNm/m
M_2	271 kNm/m	1,0	271 kNm/m
M_3	148 kNm/m	1,0	148 kNm/m
689 kNm/m			689 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M_1	1,7 kNm/m	1,0	1,7 kNm/m
M_3	0,0 kNm/m	1,0	0,0 kNm/m
1,68 kNm/m			1,68 kNm/m

1,59%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1142 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 604 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m
σ_{amp} 40 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R 0,0	
σ_{mean} 20 N/mm2	
k 9	(glas-polyester)

Nf	39.225.013.061	wisselingen	Voor R= -1,0
Nf	53.182.814.439	wisselingen	Voor R= 0,0

NEN-EN 1991-2 4.6.1

2.000.000 zware voertuigen/jaar
100 jaar levensduur
200.000.000 zware voertuigen in levensduur

2

1,59%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1142 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 604 N/mm2	
σ_{amp} 63 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R -0,3	
σ_{mean} 22 N/mm2	
k 9	

Nf	732.141.964	wisselingen	Voor R= -1,0
Nf	1.020.586.417	wisselingen	Voor R= -0,3

NEN-EN 1991-

4.000.000 zware voertuigwielen/jaar
100 jaar levensduur
400.000.000 zware voertuigwielen in levensduur



Kosten	20	2,0	1,0	3,0	Eur/kg	[Solico]
	1.193	132	71	50	1.447 Eur/m2	
					285 Eur/m2	
					1.731 Eur/m2	
						materiaal
						arbeid & hulpwerk
						totaal

Breukrek

gem.	kar.	kar./ $\gamma_m \gamma_c$
> -0,46%	> -0,37%	> -0,16%
< 2,30%	< 1,84%	< 0,78%

Materiaalfactor

	Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
γ_{m1}	1,35 CUR096 6.3			materiaalspreiding
γ_{m2}	1,40 CUR096 6.3 tabel 1			productiemethode, VA RTM not cured
γ_m	1,89 >1,5		$\gamma_m \cdot \gamma_f$	0,00 >2,50
γ_{ct}	1,1 CUR096 6.4		temperatuur	vast gegeven
γ_{cv}	1,1 CUR096 6.4		vocht	wisselend vochtig
γ_{ck}	1,03 CUR096 6.4		lange duur sterkte	24 h UD
γ_{cf}	1,1 CUR096 6.4		belastinghistorie	stijfheid niet van belang
γ_c	1,25	1,21	1,37	
$\gamma_m \cdot \gamma_c$	2,36	2,29		2,60

Vermoeiing

Brugdek					
B 5,0 m					
L 27,0 m			13,5 m	L	0,18 m

Belasting NEN-EN 1991-2 4.6.2

1 F 210 kN/as	c.t.c. 1,2 m	12,9 m	1	p 656 kN/m2
2 F 210 kN/as				
3 p 1,6 kN/m2			3	p 2,7 kN/m2

Moment - hoofdrichting

	γ_f	
M_1 271 kNm/m	1,0	271 kNm/m
M_2 271 kNm/m	1,0	271 kNm/m
M_3 148 kNm/m	1,0	148 kNm/m
689 kNm/m		689 kNm/m

1,52%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1901 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 1006 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m
σ_{amp} 73 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R 0,0	
σ_{mean} 36 N/mm2	0,036
k 9	(glas-polyester)

Nf 18.393.713.994	wisselingen	Voor R= -1,0
Nf 25.627.140.533	wisselingen	Voor R= 0,0

NEN-EN 1991-2 4.6.1

2.000.000 zware voertuigen/jaar
100 jaar levensduur
200.000.000 zware voertuigen in levensduur

Moment - dwarsrichting

M_1 1,2 kNm/m	1,0	1,2 kNm/m
M_3 0,0 kNm/m	1,0	0,0 kNm/m
1,24 kNm/m		1,24 kNm/m

1,52%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 1901 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 1006 N/mm2	
σ_{amp} 51 N/mm2	$\Delta\sigma_d$
R -0,3	52 N/mm2 98%
σ_{mean} 18 N/mm2	
k 9	

Nf 455.522.052.143	wisselingen	Voor R= -1,0
Nf 535.089.598.899	wisselingen	Voor R= -0,3

NEN-EN 1991-

4.000.000 zware voertuigwielen/jaar
100 jaar levensduur
400.000.000 zware voertuigwielen in levensduur



3: Brugdek - Carbonvezel composiet

hulp

B	5,0 m					
L	27,0 m	H=L/22,5	13,5 m	L	0,12 m	

Belasting NEN-EN 1991-2 4.3.2

0	p	1,7 kN/m ²			p 0,4 kN/m ²
1	F	300 kN/as	c.t.c. 1,2 m	12,9 m	p 938 kN/m ²
2	F	300 kN/as			
3	p	5,4 kN/m ²			p 9,0 kN/m ²

Moment

M ₀	150 kNm/m	1,05	158 kNm/m
M ₁	387 kNm/m	1,35	522 kNm/m
M ₂	387 kNm/m	1,35	522 kNm/m
M ₃	492 kNm/m	1,35	664 kNm/m
	<u>1417 kNm/m</u>		<u>1867 kNm/m</u>

Moment - dwarsrichting

M ₀	0,0 kNm/m	1,05	0,0 kNm/m
M ₁	1,1 kNm/m	1,35	1,5 kNm/m
M ₃	0,0 kNm/m	1,35	0,0 kNm/m
	<u>1,14 kNm/m</u>		<u>1,54 kNm/m</u>

Doorsnedegrootheden - HM Carbonvezel

Hoofdrichting - B=1,0m dek

E	436.000 N/mm ²	W _b 5,47E+06 mm ³ /m
I	2,97E+09 mm ⁴ /m	W _o 4,51E+06 mm ³ /m

Dwarsrichting - B=1,0m dekplaat / bovenflens

EI	1,27E+10
W	4.669 mm ³ /m

Doorbuiging

Spanning

UC

δ ₁	25,0 mm	σ _b	-341 N/mm ²	-0,08% > -0,27%	29%	σ _{o,b}	329 N/mm ²	UC
δ ₂	25,0 mm	σ _o	414 N/mm ²	0,09% < 0,34%	28%		0,2 mm	
δ ₃	39,7 mm						L/725	
	<u>90 mm</u>							

L/301 < L/300 ROK 100%
NEN-EN 1992-1-1 7.4.1

Doorsnedegrootheid

	b	h	A	vv%	A _f	f _t %	f _r %	A _{FL}	A _{FT}
12,5 bovenflens	1000 mm	12,5 mm	12.500	55%	6.875	56%	33%	3.878	2.241
lijven b=5mm	42 mm	1180,5 mm	49.188	35%	17.216	36%	36%	6.129	6.129
7 onderflens	1000 mm	<u>7,0 mm</u>	<u>7.000</u>	55%	<u>3.850</u>	68%	21%	<u>2.610</u>	<u>793</u>
800		1200 mm	68.688		27.941			12.617	9.163

	A _{FLi}	z _i	z _i x A _i (z _i -z _{tot}) ² x A _i	I _i	I	2,97E+09 mm ⁴
bovenflens	3.878	1.193,75	4,63E+06	1,11E+09	5,05E+04	
lijven	6.129	597,25	3,66E+06	2,24E+07	7,12E+08	W _b 5,47E+06 mm ³
onderflens	<u>2.610</u>	<u>3,50</u>	<u>9,14E+03</u>	<u>1,12E+09</u>	<u>1,07E+04</u>	W _o 4,51E+06 mm ³
	12.617	657,73	8,30E+06	2,25E+09	7,12E+08	

	bovenflens	richting	lijven	richting	onderflens	richtin	g
longitudinal:	4	0°	1	0°	5	0°	
	1	45°	1	-60°	1	45°	
	2	90°	1	60°	1	90°	
	<u>1</u>	<u>-45°</u>	<u>1</u>		<u>1</u>	<u>-45°</u>	
total:	8		3		8		

Hoeveelheden

A _f	A _m	A _{core}	A _{slijtlaag}
0,028	0,041	1,200	0,012 m ³ / m ²
18,4	12	0,4	14 kN/m ³
0,51	0,49	0,48	0,17 1,65 kN/m ²
0,007	0,006		0,012 m ³ / m ²
18,4	12		14 kN/m ³
0,13	0,07		0,17 0,36 kN/m ²



Kosten	25	2,0	1,0	3,0	Eur/kg	[Solico]
	1.285	98	48	50	1.481 Eur/m2	materiaal
					285 Eur/m2	arbeid & hulpwerk
					1.766 Eur/m2	totaal

Breukrek	gem.	kar.	kar./ $\gamma_m \gamma_c$
	> -0,80%	> -0,64%	> -0,27%
	< 1,00%	< 0,80%	< 0,34%

Materiaalfactor	Sterkte	Vermoeiing	Vervorming	Stabiliteit
	γ_{m1}	1,35 CUR096 6.3		materiaalspreiding
	γ_{m2}	1,40 CUR096 6.3 tabel 1		productiemethode, VA RTM not cured
	γ_m	1,89 >1,5	$\gamma_m \cdot \gamma_f$	0,00 >2,50
	γ_{ct}	1,1 CUR096 6.4	temperatuur	vast gegeven
	γ_{cv}	1,1 CUR096 6.4	vocht	wisselend vochtig
	γ_{ck}	1,03 CUR096 6.4	lange duur sterkte	24 h UD
	γ_{cf}	1,1 CUR096 6.4	belastinghistorie	stijfheid niet van belang
	γ_c	1,25	1,21	1,37
	$\gamma_m \cdot \gamma_c$	2,36	2,29	2,60

Vermoeiing

Brugdek			hulp		
B 5,0 m					
L 27,0 m			13,5 m	L	0,18 m
Belasting	NEN-EN 1991-2 4.6.2				
1 F 210 kN/as	c.t.c. 1,2 m	12,9 m		1	p 656 kN/m2
2 F 210 kN/as					
3 p 1,6 kN/m2				3	p 2,7 kN/m2

Moment - hoofdrichting

	γ_{ff}	
M_1	271 kNm/m	1,0
M_2	271 kNm/m	1,0
M_3	148 kNm/m	1,0
	689 kNm/m	689 kNm/m

Moment - dwarsrichting

M_1	0,8 kNm/m	1,0	0,8 kNm/m
M_3	0,0 kNm/m	1,0	0,0 kNm/m
	0,79 kNm/m		0,79 kNm/m

0,66%	γ_c verwerkt	0,66%	γ_c verwerkt
σ_{Rk} 2883 N/mm2	γ_c verwerkt	σ_{Rk} 2883 N/mm2	γ_c verwerkt
$\sigma_{t,Rd}$ 1525 N/mm2	σ_{Rk}/γ_m	$\sigma_{t,Rd}$ 1525 N/mm2	UD
σ_{amp} 153 N/mm2	$\Delta\sigma_d$	σ_{amp} 169 N/mm2	$\Delta\sigma_d$ 175 N/mm2 97%
R 0,0		R -0,3	
σ_{mean} 76 N/mm2	0,050	σ_{mean} 59 N/mm2	
k 9	(glas-polyester)	k 9	
Nf 977.472.991	wisselingen	Nf 386.990.369	wisselingen
Nf #####	wisselingen	Nf 553.040.958	wisselingen
NEN-EN 1991-2 4.6.1		NEN-EN 1991-2	
2.000.000 zware voertuigen/jaar		4.000.000 zware voertuigwielen/jaar	
100 jaar levensduur		100 jaar levensduur	
200.000.000 zware voertuigen in levensduur		400.000.000 zware voertuigwielen in levensduur	



Bijlage XIV Kostenraming uitzettingsvrije brugdekken



1. G-VVK

onderdeel				kosten	na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek	
glasvezeldek excl. slijtlaag	91 m2	€	525,00	€	47.775,00	0	1,00 €	47.775,00 zie dimensionering	B 7 m
palen, L=15m vierkant 0,32m 5:1	32 stuks		€	21.200,00	0	1,00 €	21.200,00 W+B	L 13 m	
voeg	14 m	€	1.000,00	€	14.000,00	0	1,00 €	14.000,00 TBI	H 0,865 m
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€	115,00	€	920,00	0	1,00 €	920,00 Vilton	H=L/15,0
Initiële kosten IC							€	83.895,00	Palen L 15 m
onderhoud brugdek (100 jaar)							€	4.061,03	(de)mob heist € 2.000
voeg vervangen	14 m	€	1.500,00	€	21.000,00	25	0,60 €	12.672,76 TBI	lev+heien € 40 /m'
voeg vervangen	14 m	€	1.500,00	€	21.000,00	50	0,36 €	7.647,56 TBI	W+B
voeg	14 m	€	1.500,00	€	21.000,00	75	0,22 €	4.615,03 TBI	
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€	140,00	€	1.120,00	50	0,36 €	407,87	
wegafzetting	1 stuks	€	5.000,00	€	5.000,00	25	0,60 €	3.017,32 Visser (CROW), Assen; 4 rijbanen met afgezett	
wegafzetting	1 stuks	€	5.000,00	€	5.000,00	50	0,36 €	1.820,85	
wegafzetting	1 stuks	€	5.000,00	€	5.000,00	75	0,22 €	1.098,82	
omrijd-/file schade	1 stuks					25	0,60 €	-	
omrijd-/file schade	1 stuks					50	0,36 €	-	
omrijd-/file schade	1 stuks					75	0,22 €	-	
<u>vijzelmeester</u>	8 man h.	€	110,00	€	880,00	50	0,36 €	320,47	Spanbeton 2013, 8werkuren+3reisuren à €62,
vijzelsysteem huren	2 dag		€ 400/dag	€	800,00	50	0,36 €	291,34	Spanbeton 2013, €400/dag vijzelinst. 1 dag ex
vijzels huren (zonder verkeer)	8 vijzels		€ 5,0/v/dag	€	80,00	50	0,36 €	29,13	Spanbeton 2013, €6/vijzel/dag, 1 dag extra ha
(met verkeer)	8 vijzels		€ 4,0/v/dag	€	64,00	50	0,36 €	23,31	
leuningen, geleiderails losmaken	8 man h.	€	50,00	€	400,00	50	0,36 €	145,67	
werkvoorbereiding & plan opstellen	8 man h.	€	75,00	€	600,00	50	0,36 €	218,50	
Exploitatie kosten EC							€	36.369,66	
Levenscyclus kosten LCC							€	120.264,66	

2. A-VVK

onderdeel				kosten	na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek	
aramidevezeldek excl. slijtlaag	91 m2	€	1.150,00	€	104.650,00	0	1,00 €	104.650,00 zie dimensionering	B 7 m
palen, L=15m vierkant 0,32m	16 stuks		€	11.600,00	0	1,00 €	11.600,00 W+B	L 13 m	
<u>pompvoeg</u>	14 m	€	100,00	€	1.400,00	0	1,00 €	1.400,00 ingeschat	H 0,79 m
oplegstrook	14 m	€	115,00	€	1.610,00	0	1,00 €	1.610,00 Vilton	H=L/16,5
Initiële kosten IC							€	119.260,00	
onderhoud brugdek (100 jaar)							€	4.447,80	
Exploitatie kosten EC							€	4.447,80	
Levenscyclus kosten LCC							€	123.707,80	



Doorwaai over een pompvoeg.



3. HM C-VVK

onderdeel			kosten	na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek	
carbonvezeldek excl. slijtlaag	91 m2	€ 1.100,00	€ 100.100,00	0	1,00	€ 100.100,00 zie dimensionering	B	7 m
palen, L=15m vierkant 0,32m	16 stuks		€ 11.600,00	0	1,00	€ 11.600,00 W+B	L	13 m
pompvoeg	14 m	€ 100,00	€ 1.400,00	0	1,00	€ 1.400,00 ingeschat	H	0,55 m
oplegstrook	14 m	€ 115,00	€ 1.610,00	0	1,00	€ 1.610,00 Vilton	H=L/23,9	
Initiële kosten IC						€ 114.710,00		
onderhoud brugdek (100 jaar)						€ 4.254,41		
<u>Exploitatie kosten EC</u>						€ 4.254,41		
Levenscyclus kosten LCC						€ 118.964,41		

0. VB

onderdeel			kosten	na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek	
Betonnen brugdek excl. slijtlaag	91 m2	€ 275,00	€ 25.025,00	0	1,00	€ 25.025,00 zie dimensionering	B	7 m
palen, L=15m vierkant 0,40m 5:1	32 stuks		€ 26.000,00	0	1,00	€ 26.000,00 W+B	L	13 m
voeg	14 m	€ 1.000,00	€ 14.000,00	0	1,00	€ 14.000,00 TBI	H	0,400 m
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€ 125,00	€ 1.000,00	0	1,00	€ 1.000,00 Spanbeton	H=L/32,5	
Initiële kosten IC						€ 66.025,00	Palen L	15 m
onderhoud brugdek (100 jaar)						€ 4.254,41	(de)mob heist.	€ 2.000
voeg	14 m	€ 1.500,00	€ 21.000,00	25	0,60	€ 12.672,76 TBI	lev.+heien	€ 50 /m'
voeg	14 m	€ 1.500,00	€ 21.000,00	50	0,36	€ 7.647,56 TBI		W+B
voeg	14 m	€ 1.500,00	€ 21.000,00	75	0,22	€ 4.615,03 TBI		
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€ 150,00	€ 1.200,00	50	0,36	€ 437,00 Spanbeton		
wegafzetting	1 stuks	€ 5.000,00	€ 5.000,00	15	0,74	€ 3.692,85 Visser (CROW), Assen; 4 rijbanen met afgezett		
wegafzetting	1 stuks	€ 5.000,00	€ 5.000,00	50	0,36	€ 1.820,85		
wegafzetting	1 stuks	€ 5.000,00	€ 5.000,00	75	0,22	€ 1.098,82		
omrijd-/file schade	1 stuks			25	0,60	€ -		
omrijd-/file schade	1 stuks			50	0,36	€ -		
omrijd-/file schade	1 stuks			75	0,22	€ -		
<u>vijzelmeester</u>	8 man h.	€ 110,00	€ 880,00	50	0,36	€ 320,47 Spanbeton 2013, 8werkuren+3reisure à €62,		
vijzelsysteem huren	2 dag	€ 400/dag	€ 800,00	50	0,36	€ 291,34 Spanbeton 2013, €400/dag vijzelinst. 1 dag ex		
vijzels huren (zonder verkeer)	8 vijzels	€ 6,0/v/dag	€ 96,00	50	0,36	€ 34,96 Spanbeton 2013, €6/vijzel/dag, 1 dag extra ha		
(met verkeer)	8 vijzels	€ 4,0/v/dag	€ 64,00	50	0,36	€ 23,31		
leuning, geleiderails losmaken	8 man h.	€ 50,00	€ 400,00	50	0,36	€ 145,67		
werkvoorbereiding & plan opstellen	8 man h.	€ 75,00	€ 600,00	50	0,36	€ 218,50		
<u>Exploitatie kosten EC</u>						€ 37.273,53		
Levenscyclus kosten LCC						€ 103.298,53		



1. G-VVK

onderdeel			kosten
glasvezeldek excl. slijtlaag	135 m2	€ 780,00	€ 105.300,00
palen, L=15m vierkant 0,40m 5:1	32 stuks		€ 26.000,00
voeg	10 m	€ 1.000,00	€ 10.000,00
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€ 125,00	€ 1.000,00

Exploitatie kosten EC

onderhoud brugdek (100 jaar)

voeg	10 m	€ 1.500,00	€ 15.000,00
voeg	10 m	€ 1.500,00	€ 15.000,00
voeg	10 m	€ 1.500,00	€ 15.000,00
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€ 150,00	€ 1.200,00
wegafzetting	1 stuks	€ 5.000,00	€ 5.000,00
wegafzetting	1 stuks	€ 5.000,00	€ 5.000,00
wegafzetting	1 stuks	€ 5.000,00	€ 5.000,00
omrijd-/file schade	1 stuks		
omrijd-/file schade	1 stuks		
omrijd-/file schade	1 stuks		
<u>vijzelmeester</u>	8 man h.	€ 110,00	€ 880,00
vijzelsysteem huren	2 dag	€ 400/dag	€ 800,00
vijzels huren (zonder verkeer)	8 vijzels	€ 6,0/v/dag	€ 96,00
(met verkeer)	8 vijzels	€ 4,0/v/dag	€ 64,00
leuning, geleiderails losmaken	8 man h.	€ 50,00	€ 400,00
werkvoorbereiding & plan opstellen	8 man h.	€ 75,00	€ 600,00

Exploitatie kosten EC

Levenscyclus kosten LCC

2. A-VVK

onderdeel			kosten
aramidevezeldek excl. slijtlaag	135 m2	€ 1.650,00	€ 222.750,00
palen, L=15m vierkant 0,40m	16 stuks		€ 14.000,00
pompvoeg	10 m	€ 100,00	€ 1.000,00
oplegstrook	10 m	€ 115,00	€ 1.150,00

Exploitatie kosten EC

onderhoud brugdek (100 jaar)

Exploitatie kosten EC

Levenscyclus kosten LCC

na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek
0	1,00	€ 105.300,00 zie dimensionering	B
0	1,00	€ 26.000,00 W+B	L
0	1,00	€ 10.000,00 TBI	H
0	1,00	€ 1.000,00 Vilton	H=L/13,5
		€ 142.300,00	Palen L
		€ 8.950,85	(de)mob heist.
			lev.+heien
25	0,60	€ 9.051,97 TBI	
50	0,36	€ 5.462,55 TBI	
75	0,22	€ 3.296,45 TBI	
50	0,36	€ 437,00	
25	0,60	€ 3.017,32 Visser (CROW), Assen; 4 rijbane	
50	0,36	€ 1.820,85	
75	0,22	€ 1.098,82	
25	0,60	€ -	
50	0,36	€ -	
75	0,22	€ -	
50	0,36	€ 320,47 Spanbeton 2013, 8werkuren+3	
50	0,36	€ 291,34 Spanbeton 2013, €400/dag vijze	
50	0,36	€ 34,96 Spanbeton 2013, €6/vijzel/dag,	
50	0,36	€ 23,31	
50	0,36	€ 145,67	
50	0,36	€ 218,50	
		€ 34.170,05	
		€ 176.470,05	

na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek
0	1,00	€ 222.750,00 zie dimensionering	B
0	1,00	€ 14.000,00 W+B	L
0	1,00	€ 1.000,00 ingeschat	H
0	1,00	€ 1.150,00 Vilton	H=L/15,2
		€ 238.900,00	
		€ 9.467,24	
		€ 9.467,24	
		€ 248.367,24	





3. HM C-VVK

onderdeel

carbonvezeldek excl. slijtlaag	135 m2	€	1.690,00	€	228.150,00
palen, L=15m vierkant 0,40m 5:1	16 stuks			€	14.000,00
pompvoeg	10 m	€	100,00	€	1.000,00
oplegstrook	10 m	€	115,00	€	1.150,00

Exploitatie kosten EC

onderhoud brugdek (100 jaar)

Exploitatie kosten EC

Levenscyclus kosten LCC

na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek
0	1,00	€ 228.150,00 zie dimensionering	B
0	1,00	€ 14.000,00 W+B	L
0	1,00	€ 1.000,00	H
0	1,00	€ 1.150,00 Vilton	H=L/22,5
		€ 244.300,00	
		€ 9.696,75	
		€ 9.696,75	
		€ 253.996,75	

0. VB

onderdeel

Betonnen brugdek excl. slijtlaag	135 m2	€	385,00	€	51.975,00
palen, L=15m vierkant 0,50m	32 stuks			€	33.200,00
voeg	10 m	€	1.000,00	€	10.000,00
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€	135,00	€	1.080,00

Exploitatie kosten EC

onderhoud brugdek (100 jaar)

voeg	10 m	€	1.500,00	€	15.000,00
voeg	10 m	€	1.500,00	€	15.000,00
voeg	10 m	€	1.500,00	€	15.000,00
oplegblokken incl. scheg	8 stuks	€	160,00	€	1.280,00
wegafzetting	1 stuks	€	5.000,00	€	5.000,00
wegafzetting	1 stuks	€	5.000,00	€	5.000,00
wegafzetting	1 stuks	€	5.000,00	€	5.000,00
omrijd-/file schade	1 stuks				
omrijd-/file schade	1 stuks				
omrijd-/file schade	1 stuks				
vijzelmeester	8 man h.	€	110,00	€	880,00
vijzelsysteem huren	2 dag	€	400/dag	€	800,00
vijzels huren (zonder verkeer)	8 vijzels	€	7,0/v/dag	€	112,00
(met verkeer)	8 vijzels	€	4,0/v/dag	€	64,00
leuningen, geleiderails losmaken	8 man h.	€	50,00	€	400,00
werkvoorbereiding & plan opstellen	8 man h.	€	75,00	€	600,00

Exploitatie kosten EC

Levenscyclus kosten LCC

na # jaar	2%	NCW kosten bron	Dek
0	1,00	€ 51.975,00 zie dimensionering	B
0	1,00	€ 33.200,00 W+B	L
0	1,00	€ 10.000,00 TBI	H
0	1,00	€ 1.080,00 Spanbeton	H=L/32,7
		€ 96.255,00	Palen L
		€ 8.836,09	(de)mob heist.
25	0,60	€ 9.051,97 TBI	lev.+heien
50	0,36	€ 5.462,55 TBI TBI	
75	0,22	€ 3.296,45 Spanbeton	
50	0,36	€ 466,14 Visser (CROW), Assen; 4 rijbane	
15	0,74	€ 3.692,85	
50	0,36	€ 1.820,85	
75	0,22	€ 1.098,82	
25	0,60	€ -	
50	0,36	€ -	
75	0,22	€ -	
50	0,36	€ 320,47 Spanbeton 2013, 8werkuren+3	
50	0,36	€ 291,34 Spanbeton 2013, €400/dag vijze	
50	0,36	€ 40,79 Spanbeton 2013, €6/vijzel/dag,	
50	0,36	€ 23,31	
50	0,36	€ 145,67	
50	0,36	€ 218,50	
		€ 34.765,78	
		€ 131.020,78	

Lectoraat Kunststoftechnologie

