

BIOCOMPOSITET BRUGDEK

Onderzoeks rapport naar lange duur gedrag

Lectoraat Kunststoftechnologie



BIO VEZELS



Februari 2015

LKT-COMH-105070-1502

Bio-composiet brugdek

Onderzoek naar lange duurbedrag

Lectoraat Kunststoftechnologie
Hogeschool Windesheim
Zwolle, februari 2015

Ir. P.G.F. Bosman
Ing. P. Schreuder
Dr. M.D.C. Topp

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport van het onderzoek naar de lange duurbedrag van bio-composiet (Windesheim). Dit onderzoek maakt deel uit van een reeks onderzoekopdrachten naar bio-composiet onder projectleiding van D. van Rooijen van Stenden. De andere onderzoeksopdrachten gaan enerzijds over de bepaling van de mechanische en fysische eigenschappen van bio-composiet (Stenden) en anderzijds over de milieukundige duurbedrag van bio-composieten (Windesheim en Stenden). Het onderzochte bio-composiet betreft vlasvezel versterkte kunststof gemaakt met hars van biologische oorsprong.

Het onderzoek heeft een aantal interessante en toepasbare resultaten opgeleverd. Hierbij hebben wij veel gehad aan de literatuurstudie en het laboratoriumwerk dat grotendeels is verricht door de studenten S. Chaudry en R. Subhan tijdens hun afstuderen aan de opleiding Civiele techniek Windesheim in opdracht van het lectoraat Kunststoftechnologie.

Voorts hebben wij veel gehad aan de samenwerking met de bij dit onderzoek betrokken bedrijven. We bedanken de heren J. ter Laak en D. Polling namens CTC group Hengelo en de heer R. Verleg namens DSM Composites Resins Zwolle voor de sponsoring van materialen, ter beschikking stellen van laboratorium en hun kennis en advies.

Verder willen wij de heren M. van den Oever namens Wageningen UR en A.W. van Vuure namens Universiteit Leuven bedanken voor het helpen vinden van relevante literatuur en het ter beschikking stellen van hun kennis.

Zwolle, februari 2015.

Samenvatting

Er worden reeds composiet draagconstructies, zoals brugdekken, gemaakt van glasvezel versterkte kunststoffen. Daarbij is doorbuiging veelal maatgevend.

Vanwege de gunstige stijfheid komen vlasvezels versterkte kunststoffen eveneens in aanmerking om draagconstructies mee te maken.

In dit onderzoek is ingezoomd op bio-composiet bestaande uit niet gedroogde UD vlasvezels zonder chemische voorbehandeling en kobaltvrije thermoharders.

Om inzicht te krijgen in lange termijn gedrag van zijn de volgende lange termijn effecten onderzocht: UV, chemicaliën, slijtage, verrotting, vocht, temperatuur, kruip en vermoeiing.

Alle effecten zijn onderzocht middels literatuuronderzoek en interviews. Daarnaast zijn er proeven uitgevoerd naar het belangrijkste degradatiemechanisme voor sterkte en stijfheid: vocht al dan niet in combinatie met temperatuur.

Vlasvezels kunnen veel omgevingsvocht opnemen zoals alle natuurlijke vezels. Bij grote vochtopname(fluctuaties) vindt grote terugval van mechanische eigenschappen plaats en kan verrotting door bacteriën en schimmels plaatsvinden.

Een coating zal de interne vochtigheidsgraad moeten beperken tot de gemiddelde uitwendige vochtigheidsgraad. Daarnaast heeft een coating positieve effecten tegen UV, slijtage en chemicaliën. Verrotting door bacteriën & schimmels kan worden ingeperkt door een thermische voorbehandeling van de vlasvezels.

Lange termijnfactoren voor vocht, temperatuur, kruip en vermoeiing zijn voorgesteld voor bio-composieten bestaande uit niet gedroogde UD vlasvezels zonder chemische voorbehandeling en kobaltvrije, styreen houdende thermoharders.

Summary

Nowadays there are more and more composite supporting structures, such as bridge decks, made of glass fiber reinforced polymers. Deflection is often decisive in this. Because of the favorable stiffness flax fiber reinforced polymers are also interesting to consider as composite supporting structures.

This study zooms in on bio-composites consisting of undried UD flax fibers without chemical pretreatment and cobalt-free thermosets.

To gain insight in the long-term behavior the following long term effects are investigated: UV, chemicals, abrasion, rot-decay, moisture, temperature, creep and fatigue. All components are investigated by literature study and interviews. Besides that, experiments were performed for most important the degradation mechanism for strength and stiffness: moisture whether or not in combination with temperature.

Flax fibers can absorb much moisture as all natural fibers. At large moisture intake (fluctuations) significant drop in mechanical properties take place and rot-decay by bacteria and fungi can occur.

A coating will have to limit the internal relative humidity to the mean relative humidity outside. In addition, a coating has positive effects against UV, abrasion and chemicals. Rot-decay by bacteria and fungi can be mitigated by a thermal pretreatment of the flax fibers.

Long-term factors for moisture, temperature, creep and fatigue are proposed for bio-composites consisting of non-dried UD flax fibers without chemical pre-treatment and cobalt-free, styrene-containing thermosets.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	2
Samenvatting.....	3
Summary.....	4
1. Inleiding	7
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Leeswijzer.....	9
2. Onderzoekopzet	10
2.1 Probleemstelling.....	10
2.2 Doelstelling	10
2.3 Onderzoeksvraag.....	10
2.4 Deelvragen.....	10
2.5 Methode van aanpak.....	12
3. Vooronderzoek.....	16
3.1 Natuurlijke vezels.....	16
3.1.1 <i>Modificatie van natuurlijke vezels</i>	19
3.2 Harsen	21
3.3 Klimaat waar bruggen aan worden blootgesteld	23
4. Resultaten literatuuronderzoek en interviews.....	24
4.1 UV-straling.....	24
4.2 Chemicaliën.....	25
4.3 Slijtage	26
4.4 Overige degradatiemechanismen.....	27
4.5 Temperatuur	28
4.6 Vocht	29
4.7 Kruip	33
4.8 Vermoeiing.....	35
5. Resultaten experimenteel onderzoek.....	39
5.1 Materialen.....	39
5.2 Voorbereiding proefstukken	39
5.4 Resultaten	41
6. Conclusies & Discussie	47
6.1 Degradatie door UV-straling, Slijtage, Chemicaliën en Verrotting.....	47
6.2 Invloed Temperatuur, Vocht, Kruip en Vermoeiing.....	47
6.2.1 <i>Temperatuur</i>	47
6.2.2 <i>Vocht</i>	47
6.2.3 <i>Kruip / tijd</i>	47
6.2.4 <i>Vermoeiing / dynamische modulus</i>	48
6.3 Conversiefactoren	48
6.4 Discussie.....	48
7. Aanbevelingen	50

Bibliografie.....	53
Bijlage A: Mindmap	55
Bijlage B: Conversiefactor kruip: experimenteel onderzoek?.....	55
Bijlage C: Stappenplan laminaat maken	58
Bijlage D: Voorbereiding van proefstukken	60
Bijlage E: Resultaten experimenteel onderzoek.....	62
Bijlage F: Data Sheets	67

1. Inleiding

Composieten zijn materialen, bestaande uit minimaal twee macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen (Nijssen, 2013).

Composieten bestaan al heel lang en worden in allerlei sectoren toegepast zoals de auto-industrie, huizenbouw en lucht- en ruimtevaart. Door de voordelen zoals het lage eigengewicht, grote vrijheid in vorm en proces, mogelijkheid tot hoge mate van integratie van functies, lage totale onderhoudskosten en de mogelijkheid om de sterkte, stijfheid, thermische- en elektrische weerstand te manipuleren wordt het ook steeds vaker toegepast in andere industrieën. Naast de vele voordelen heeft composiet ook nadelen. Een aantal van deze nadelen zijn de hoge materiaalkosten, onbekende rekenmethoden, onbekend gedrag van details, hoge investeringskosten en de nog niet ver ontwikkelde recycling.

Vezel versterkte kunststoffen [VVK] is een hoofdgroep binnen de composieten. Hierbij zijn de vezels verdeeld in een kunststofmatrix. Door de vezels 'gericht' aan te brengen worden unieke, richtingsafhankelijke eigenschappen verkregen. Door het succes van VVK en de voordelen ervan wordt het steeds breder toegepast. Een van de relatief nieuwe markten is de gebouwde omgeving. Naast nieuwe toepassingen worden ook nieuwe materiaalcombinaties voor VVK ontwikkeld. Eén nieuwe materiaalcombinatie binnen VVK is bio-VVK. Als in het vervolg gesproken wordt over composiet, dan wordt daarmee VVK bedoeld.

Dit onderzoeksrapport heeft betrekking op bio-composiet, bestaande uit vlasvezels en kobaltvrije thermoharders. Hierbij wordt er gekeken hoe vlas vezel versterkte kunststoffen [VVVK] zich op lange termijn gedraagt. Door middel van literatuuronderzoek en het uitvoeren van proeven is onderbouwd hoe dit materiaal zich op lange termijn gedraagt bij constructieve toepassingen.

De toegepaste vezels zijn voor 100% natuurlijk: vlasvezels worden verkregen van planten. Een biohars die is getest is een kobalt- en styreenvrije polyesterhars dat voor 40% biologisch is: enkel de alcohol groepen zijn namelijk vervangen door biologisch verkregen alcohol. Een regulier hars die is getest is een kobaltvrije vinylesterhars.

Om tot de gewenste resultaten te komen voor dit onderzoeksverslag is er een samenwerkingsverband aangegaan tussen Hogescholen Stenden, Hogeschool Windesheim. Stenden richt zich op de fysische en mechanische eigenschappen en Windesheim op de lange duur gedrag van het materiaal.

1.1 Aanleiding

Machinefabriek Emmen gaat samen met composietbouwer/ ingenieursbureau CTC-group uit Hengelo in opdracht van Volker Wessels / Dierenpark Emmen een klapbrug bouwen, met een brugdek in de vorm van een bio-composiet sandwichconstructie. Gemeente en provincie ondersteunen dit innovatieve en duurzame project.

Aangezien bio-composiet niet eerder in een dergelijke toepassing is gebruikt heeft CTC samen met DSM en AKZO gezocht naar een geschikte bio-hars in combinatie met niet gedroogde vlasvezels. Daarmee wordt door CTC een ontwerp gemaakt van het brugdek.

Omdat er geen gestandaardiseerde mechanische eigenschappen voor dit materiaal beschikbaar zijn moeten deze voor het ontwerp nog bepaald worden. Het onderzoeken van de korte duur sterktes, lange duur sterktes en degradatie is door Hogeschool Stenden en Windesheim, als een onafhankelijke partijen uitgevoerd. Bovendien onderzoeken deze de milieubelasting van dit nieuwe materiaal.

Directe aanleiding is de eerste toepassing van VVVK brugdek in de nieuwe dierentuin van Emmen voor een beweegbare voetgangersbrug. Vlasvezels lijken op voorhand ideaal voor deze toepassing, dit omdat vlasvezels:

- een veel lagere dichtheid hebben dan glasvezels en het brugdek geen contragewicht heeft;
- bijna net zo stijf zijn als glasvezels en doorbuiging bij brugdekken veelal maatgevend is;
- veel duurzamer zijn dan glasvezels, ze binden immers CO₂ bij groei i.p.v. uitstoten bij productie; voorts is VVVK geheel thermisch recyclebaar.

Eigenschap vezels	vlas	E-glas	eenheid	bron
Dichtheid	1,40	2,55	kg/dm ³	1
Stijfheid	50 à 70	72	GPa	"
Sterkte	0,5 à 1,1	2,0 à 3,5	GPa	"
Rek bij breuk	1,3 à 3,3	2,5	%	"
CO ₂	-1,95	+6,75	kgCO ₂ /dm ³	2
Materiaaldamping in kunststof	3,0±1,0	1,0±0,5	%	3
Vezelfractie in vacuüm infusie	45±5	≥50	vol.%	proeven

Tabel 1.1 Eigenschappen vlasvezels vergeleken met glasvezels.

¹ "Biocomposieten 2012, Natuurlijke vezels en bioharsen in technische toepassingen", M. van den Oever en K. Molenveld, Wageningen UR

² "Flax & Hemp fibres: a natural solution for the composite industry" Add-on release 2014, Technical book CELC

³ "FLAX PREPREG – Prepreg made of flax fibers / epoxy resin" LINEO

In tabel 1.1 zijn enkele eigenschappen van vlas- en glasvezels samengevat. Een gunstiger materiaaldemping van vlasvezels leidt, des te meer zonder gebruik van sizing, tot minder omgevingsgeluid⁴.

Bij GVVK bruggen worden veelal meerdere lagen aan elkaar gestikte uni-directionele (UD) legfels toegepast die tezamen een laminaat vormen, omdat legfels geen ingebouwde krimp hebben. Dit VVVK onderzoek zich daarom tot UD beperkt. Het onderzoek beperkt zich voorts tot niet geconditioneerde, niet chemisch behandelde vlasvezels. Dit vanwege de gekozen uitgangspunten dat de brug zo productievriendelijk resp. milieuvriendelijk moest zijn.

Om financiële redenen is gekozen voor vinyl en polyester harsen, die ook doorgaans in VVVK brugdekken wordt toegepast. Omdat er in de vlasvezels nog vocht zit, is gekozen voor kobalt vrije uitharder.

Omdat veel eigenschappen van bio-composiet nog onbekend zijn, maakt dit het lastig om te ontwerpen met dit materiaal. Bovendien is het onduidelijk hoe dit materiaal zich op lange termijn zal gedragen.

Normaal gesproken toetst men in Nederland constructies aan de hand van de Eurocodes. Er bestaan echter geen Eurocodes voor composiet, laat staan voor bio-composiet. De huidige Nederlandse richtlijn voor het gebruik van VVK, de CUR 96 (2003), richt zich slechts op glasvezels. De herziening hiervan CUR 96+ (2015) richt zich breder, maar er zijn geen concrete factoren en materiaal gegevens opgenomen voor bio-composieten.

Om bio-composiet daadwerkelijk te kunnen toepassen in draagconstructies is het van belang om de fysische en mechanische eigenschappen te bepalen en kennis op te doen over het lange duur gedrag van dit materiaal. In dit onderzoek wordt er enkel gekeken naar het lange duur gedrag.

De fysische en mechanische eigenschappen voor de korte duur worden parallel onderzocht door Stenden.

Daarna is onderzoek voorzien naar de milieu-impact middels een LCA.

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de onderzoeksopzet omschreven. Eerst worden probleem- en doelstelling uitgewerkt en vervolgens is dit uitgewerkt tot de onderzoeksvraag. Daarna volgen de deelvragen en als laatste is de methode van aanpak per deelvraag omschreven.

Hoofdstuk 3 is een vooronderzoek waarin achtergrondinformatie wordt gegeven over de bestanddelen van bio-composiet en over bruggen. Als eerste zijn de natuurvezels behandeld, gevolgd door informatie over harsen.

Hierna zijn in hoofdstuk 4 de resultaten van het literatuuronderzoek en interviews per deelvraag weergegeven. Gevolgd door de beschrijving van het experimentele onderzoek naar invloed van vocht en temperatuur op bio-composiet in hoofdstuk 5 en de resultaten van dit experimentele onderzoek eveneens in hoofdstuk 5. In hoofdstukken 6 en 7 zijn de conclusies en de aanbevelingen opgenomen.

⁴ "Invloed van de vezel-matrix interface op de materiaaldemping van vlas- en koolstofvezelversterkte composieten" – S. Huysmans, 2012, Universiteit Gent

2. Onderzoeksopzet

2.1 Probleemstelling

Civiele draagconstructies dienen veelal een ontwerplevensduur van 50 tot 100 jaar te hebben. Naast dat een draagconstructie bij aanvang de belasting op moet kunnen nemen, dient deze dit ook aan het einde van de levensduur nog te kunnen. Omdat bio-composiet een relatief nieuw materiaal is in het Civieltechnische werkveld, is het nog niet bekend hoe het materiaal zich op lange termijn zal gedragen bij draagconstructies onder invloed van belastingen en externe factoren zoals omgeving en klimaat.

2.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is het achterhalen hoe bio-composiet, bestaande uit UD vlasvezel en een vinyl of polyester thermoharder zich op lange termijn gedraagt.

2.3 Onderzoeksvraag

Hoe gedraagt bio-composiet, bestaande uit niet geconditioneerde UD vlasvezel zonder chemisch voorbehandeling en een vinyl of polyester thermoharder, toegepast in civiele draagconstructies zich op lange termijn?

Deze algemeen gestelde vraag is concreet gemaakt in onderstaande hoofddeelvragen:

- a) Wat zijn de maatregelen die moeten worden getroffen om dit bio-composiet duurzaam te houden?
- b) Kunnen de factoren die in de loop van tijd invloed hebben op de mechanische eigenschappen worden gekwantificeerd voor dit bio-composiet?

Bij dit alles wordt regelmatig de vergelijking gemaakt ten opzichte van glas-composiet.

2.4 Deelvragen

De mechanische eigenschappen van een materiaal kunnen in de loop van tijd inwendig veranderen (afnemende sterkte en stijfheid) onder invloed van belastingen en externe factoren. Ook kan een materiaal in de loop van tijd vanaf de buitenzijde degraderen (afnemende oppervlakte) onder invloed van belastingen en externe factoren. In bijlage A is een mindmap opgenomen die als hulp heeft gediend om de hoofdvraag op te delen in deelvragen. Hierin zijn tevens de korte termijn eigenschappen opgenomen.

De volgende deelvragen worden onderscheiden:

1. Welke invloed heeft UV-straling op het bio-composiet*?
2. Welke invloed hebben omgevingschemicaliën op de mechanische eigenschappen van het bio-composiet*?
3. Hoe gevoelig is het bio-composiet* op slijtage en welke oplossingen zijn hiervoor?
4. Welke eventueel andere degradatie mechanismen zijn van invloed op het bio-composiet*?
5. Wat voor invloed heeft temperatuur op het bio-composiet*?

6. Welke invloed heeft vocht op (de hechting tussen vlasvezels en matrix in) het bio-composiet*?
7. Welke invloed heeft kruip/ lange duur sterkte op het bio-composiet*?
8. Wat voor invloed hebben wisselende belastingen in de tijd (vermoeiing) op sterkte en stijfheid van het bio-composiet*?

*Bio-composiet: niet geconditioneerde UD vlasvezel zonder chemische behandeling en een vinyl of polyester thermoharder.

De eerste vier deelvragen betreffen de hoofdgroep degradatie van buitenaf. De laatste vier deelvragen betreffen de hoofdgroep beïnvloeding van de inwendige eigenschappen. De opdeling van de laatste vier deelvragen is overeenkomstig de vier conversiefactoren die onderscheiden worden voor (glas)vezel versterkte kunststoffen in de CUR 96. Met de antwoorden op alle deelvragen tezamen moet antwoord gegeven kunnen worden op de hoofdvraag.

Er is gekozen om een onderscheid te maken tussen de twee hoofdgroepen, ondanks dat deze indeling overlap kan hebben. Zo kan vocht invloed hebben op zowel inwendige als uitwendige eigenschappen. In dat laatste geval wordt vocht gezien als een chemische stof.

Daarnaast kunnen deelaspecten binnen een hoofdgroep ook invloed op elkaar uitoefenen. Zo hebben vocht en temperatuur elk hun invloed op de inwendige eigenschappen, maar kunnen deze elkaar ook beïnvloeden.

2.5 Methode van aanpak

In deze paragraaf is per deelvraag beschreven welke onderzoeksmethoden zijn gebruikt en voor het hele onderzoek welke bronnen zijn gebruikt.

UV-straling

Bij dit deel van het onderzoek is gekeken naar het invloed van UV-straling op bio-composiet bestaande uit vlasvezel en een vinyl of polyester thermoharder. UV-straling zal op den duur tot zekere diepte door het hars indringen, veelal herkenbaar aan verkleuring.

Hoe ver de indringing en degradatie reikt is onderzocht door middel van literatuurstudie en interviews.

Er zijn interviews gehouden met specialisten van Universiteit Wageningen, Universiteit Leuven, CTC en DSM.

Chemicaliën

Voordat onderzocht is hoe bio-composiet reageert op chemicaliën, is eerst vastgesteld welke chemicaliën bij civiele draagconstructies zoals (loop)bruggen van belang zijn.

Voor deze chemicaliën is onderzocht welke invloed deze hebben op vlasvezels in een vinyl of polyester thermoharder middels literatuuronderzoek en interviews met specialisten van bovengenoemde instituten.

Binnen het literatuuronderzoek naar chemicaliën is zo nodig gekeken naar composieten:

- c) bestaande uit vergelijkbare bio-vezels en dit te vertalen naar composieten met vlasvezels;
- d) bestaande uit glasvezels en thermoharders en dit te vertalen naar composieten bestaande uit vlasvezels en een vinyl of polyester thermoharder.

Naast dat sommige chemicaliën een negatieve effect kunnen hebben, worden andere chemicaliën ook gebruikt om de (aanhechting)eigenschappen te verbeteren. Dit wordt voornamelijk gedaan door de oppervlakte van vlasvezels te behandelen. Dit wordt echter niet in deze deelvraag behandeld.

Slijtage

Bovenop een brugdek wordt doorgaans een slijtlaag aangebracht. Dit bestaat meestal uit asfalt of epoxy met grit. Een vervangbare slijtlaag zorgt enerzijds voor afscherming van de draagconstructie tegen verkeer en anderzijds voor een ruw oppervlak voor het verkeer.

Aan de zijkanen en onderkant van het brugdek kan een coating bescherming bieden tegen slijtage door wind en regen. Coatings worden ook gebruikt om lossen uit de mal te vereenvoudigen, om esthetische redenen en bescherming tegen UV-straling en / of chemicaliën.

Onderzocht is of een coating bij het bio-composiet ten opzichte van traditionele composieten extra noodzakelijk is. Voorts is onderzocht of slijtlagen en coatings hechten aan een vinyl of polyester thermoharder. Dit is onderzocht door middel van interview met een expert van DSM en literatuuronderzoek.

Overige degradatiemechanismen

Bij dit onderdeel is onderzocht welke andere degradatiemechanismen er zijn die invloed kunnen hebben op het bio-composiet. Tevens is onderzocht hoe deze degradatie kan worden beperkt.

Dit is gedaan middels literatuurstudie en interviews met dezelfde partijen als genoemd bij UV-straling.

Temperatuur

Temperatuur heeft invloed op glasvezel composieten. Bij hoge temperaturen verweekt het hars in glasvezel composieten, waardoor vervormingen kunnen optreden (CUR-Commissie C 124, 2003). In de CUR wordt bij glasvezel composieten voor temperatuur effecten een conversiefactor van 0,9 aangehouden voor zowel sterkte als stijfheid. Het is nog onbekend hoe composiet bestaande uit vlasvezels en kobaltvrije thermoharder zich onder wisselende temperaturen gedraagt (Verleg).

N.B.: *conversiefactoren* brengen de voorziene *lange duur effecten* van temperatuur (vocht, tijd en cyclische belasting) in rekening ten opzichte van gemeten waarden bij korte duurproeven die eenmalig worden belast bij kamertemperatuur en bij kamervochtomstandigheden.

Omdat UD legfels krimparmer en goedkoper zijn dan bijvoorbeeld weefsels of matten worden deze bij composiet bruggenbouw doorgaans toegepast. Derhalve is onderzoek voor alle conversiefactoren gericht op de waarden voor de lange duur effecten van UD vlasvezels.

Bij dit onderdeel is onderzocht wat de invloed van temperatuur in de range van circa -25 tot 75°C zijnde de temperatuurrange van draagconstructies die buiten staan (bijv. bruggen) in het Nederlandse klimaat. Dit is onderzocht door middel van literatuurstudie en door middel van experimenteel onderzoek.

Aangezien er geen specifieke ISO-normen of andere normen zijn voor temperatuur effecten zijn er zelf proeven ontwikkeld. Deze proeven zijn hieronder omschreven.

Experimenteel onderzoek

Lamel proefstukken blootstellen aan verschillende temperaturen in een klimaatkast. Daarna wordt de buigsterkte in langs- en dwarsrichting gemeten volgens ISO-14125. Met deze metingen kan bepaald worden wat de invloed van temperatuur is op een composiet als geheel en of het vlasvezels en kobaltvrije hars goed hechten.

Vocht

Volgens de CUR 96 kan vocht binnendringen in een glasvezel composiet door middel van een diffusieproces. In het algemeen leidt vochtopname tot een reductie van de mechanische eigenschappen en de glasovergangstemperatuur. Door te kiezen voor een hars met een goede weerstand tegen vocht en het aanbrengen van een geschikte gelcoating of topcoating kan dit probleem in de hand worden gehouden (CUR-Commissie C 124, 2003). Er wordt volgens de CUR 96 onderscheid gemaakt tussen drie situaties, namelijk droge omstandigheden met een conversiefactor van 1,0, wisselende vochtomstandigheden en droge omstandigheden met een conversiefactor van 0,9 en

vochtige omstandigheden met een conversiefactor van 0,8. Deze factoren zijn hetzelfde voor sterkte en voor stijfheid.

Welke conversiefactoren voor bio-composiet gelden is juist de vraag. Hiervoor wordt literatuuronderzoek verricht en experimenteel onderzoek.

Experimenteel onderzoek

Voor vocht is onderzocht welke invloed het heeft op de hechting tussen de hars en vezel. Dit is gedaan door middel van proeven. Hierbij zijn de lamel proefstukken volgens ISO-175 in waterbaden bij verschillende temperaturen gelegd en na verschillende tijdsintervallen uit het waterbad gehaald om de buigsterkte te meten volgens ISO-14125. Er zijn buigproeven uitgevoerd op UD-lamel proefstukken evenwijdig aan de vezels en haaks op de vezels. De proefstukken in evenwijdige richting geven informatie over stijfheid en buigsterkte van het composiet. De proeven in de dwarsrichting bieden een (extra) indicatie voor de hechting tussen de hars en de vezels. Bovendien zijn de proefstukjes bij buigproeven klein ten opzichte van bijvoorbeeld trekproeven. Het experimentele onderzoek wordt gedaan met vlasvezels in een experimentele bio-hars en ook in een traditionele hars dat zich al bewezen heeft met glasvezels in brugtoepassingen.

Kruip

Kruip is een fenomeen waarbij onder lange duurbedlasting een blijvende vervorming bij materiaal ontstaat. Ter onderscheid met deze lange duur / **kruipvervorming** wordt de **lange duur sterkte** onderscheiden. In de CUR 96 zijn beide fenomenen bijeengevoegd, omdat voor glascomposiet dezelfde conversiefactor kan worden aangehouden. Voor vlascomposiet kunnen deze factoren echter ook ongelijk zijn, daarom worden kruipvervorming en kruip breuk apart onderzocht. Dit wordt alleen gedaan middels literatuurstudie en interviews omdat bij lichte composiet bruggen, waarbij het eigengewicht van ondergeschikt belang is, beide vormen van ondergeschikt belang zijn.

Voor UD glasvezels is het lange duur effect relatief gering: $t^{-0,01}$ met t in uren (100 jaar: 0,9). Voor de matrix is de kruip zeer groot (dit geldt ook voor bio-hars): daarom dragen volgens de CUR alleen glasvezels in de belaste richting de lang durende belasting, scheef/haaks op de belasting georiënteerde vezels zullen vanwege kruip van de matrix op den duur niets meer bijdragen.

In bijlage B wordt nader stilgestaan hoe de conversiefactor voor kruip bepaald zou kunnen worden met aanvullend experimenteel onderzoek.

Vermoeiing

Vermoeiing is een fenomeen waarbij een materiaal bezwijkt onder aanhoudende, wisselende belasting. Door de wisselende belasting kan, afhankelijk van de belasting grootte en herhalingen, breuk optreden. Over de **vermoeiingssterkte** bij glasvezel is veel bekend. Er staan bijvoorbeeld rekenregels in de CUR 96(+).

Aangezien vermoeiingsproeven zeer lang duren en deze voor loopbruggen niet nodig zijn, is alleen middels literatuurstudie en interview met specialist uit Leuven het vermoeiingsgedrag van vlas-composiet onderzocht.

Daarnaast kan door cyclische belasting de elasticiteitsmodulus wijzigen, dit verschijnsel wordt ter onderscheid met vermoeiingssterkte ook wel **dynamische modulus** genoemd. Bij glasvezelcomposiet moet voor de dynamische modulus conform CUR 96

een conversiefactor van 0,9 worden aangehouden ten opzichte van de eerste (test)cyclus.

Middels literatuuronderzoek is onderzocht wat hiervoor de waarde is voor vlas-composiet.

Informatie

Voor het verzamelen van bestaande gegevens zijn voornamelijk twee soorten bronnen gebruikt, te weten wetenschappelijke literatuurstudies en interview van experts. De experts die geïnterviewd zijn, zijn onderzoekers van Universiteit Leuven en Wageningen, daarnaast zijn leveranciers van vlasvezels en hars geïnterviewd. Voor de wetenschappelijke artikelen is er gebruik gemaakt van databases van Hogeschool Windesheim, TU Delft en UTwente. Beide universiteiten beschikken over een uitgebreide interne en externe bibliotheek.

3. Vooronderzoek

VVK bestaat normaal gesproken uit twee componenten: hars en vezels.

De vezels zorgen binnen een composiet voor sterkte en stijfheid (draag functie). Meestal wordt er gekozen om maar één soort vezel toe te passen, maar het is ook mogelijk om meerdere soorten vezels in een composiet te gebruiken. Dit wordt ook wel hybride composiet genoemd. Dit wordt dan gedaan om gunstigere eigenschappen te verkrijgen door de verschillende soorten vezels te combineren. Zo is uit een recent onderzoek gebleken dat de combinatie van vlas- en koolstofvezels geschikt is voor het gebruik in constructies (Fiore V, 2012).

De laatste jaren worden steeds vaker synthetische vezels in composieten vervangen door natuurlijke vezels. Natuurlijke vezels bieden een aantal economische, technische en ecologische voordelen ten opzichte van synthetische vezels (Shah D, 2012).

Verharde hars noemt men matrix. De matrix zorgt binnen een composiet voor samenwerking tussen de vezels (lijmfunctie) zodat ze tezamen bijvoorbeeld ook druk op kunnen nemen en voor bescherming van de vezels voor invloeden van buitenaf (conserveringsfunctie). Hiervoor geldt dat steeds vaker wordt gekeken of grondstof hiervan niet aardolie maar een natuurlijke olie kan zijn.

3.1 Natuurlijke vezels

Natuurlijke vezels worden steeds vaker gebruikt in composieten. Natuurvezels zijn in vergelijking met de synthetische vezels zoals koolstof en glas lichter, verkrijgbaar in overvloed, worden jaarlijks geoogst en zijn afbreekbaar. Ze hebben verder als voordeel dat ze beter isoleren, beter bestand zijn tegen scheurvorming, minder impact gevoelig en geen huid- en ademhalingsirritatie veroorzaken. In tabel 3.1.1 is een overzicht van plantaardige en glas vezels gegeven van economische, technische en ecologische aspecten. Hieruit blijkt dat de ecologische aspecten veelal doorslaggevend zijn om te kiezen voor natuurlijke vezels.

	Properties	Natural fibres	Glass fibre
Economy	Annual global production (tonnes)	31.000.000	4.000.000
	Distribution for FRPs in EU (tonnes)	Moderate (40.000)	High (600.000)
	Cost of raw fibre (£/kg)	Low (~0,5-1,5)	Low (1,3)
Technical			
	Density (g cm ⁻³)	Low (~1,35-1,55)	High (2,66)
	Tensile Stiffness (GPa)	Moderate (~30-80)	Moderate (73)
	Tensile Strength (GPa)	Low (~0,4-1,5)	Moderate (2,0-3,5)
	Tensile failure strain (%)	Low (~1,4-3,2)	Low (2,5)
	Specific tensile stiffness (GPa/g cm ⁻³)	Moderate (~20-60)	Low (27)
	Specific tensile strength (GPa/g cm ⁻³)	Moderate (~0,3-1,1)	Moderate (0,7-1,3)
	Abrasive to machines	No	Yes
Ecological			
	Energy consumption (MJ/kg of fibre)	Low (4-15)	Moderate (30-50)
	Renewable source	Yes	No
	Recyclable	Yes	Partly
	Biodegradable	Yes	No
	Toxic (upon inhalation)	No	Yes

Tabel 3.1.1 Vergelijking van tussen glasvezels en natuurvezels (Shah D, 2012)

Er zijn vele soorten natuurvezels die gebruikt worden in composieten. Eén van deze groepen is vezels gebaseerd op cellulose. Hieronder vallen naast vlas ook katoen, jute, ramie en sisal vezels. Deze vezels kunnen afkomstig zijn van verschillende delen van een planten. De meeste vezels die worden gebruikt in composieten zijn afkomstig van de stam. In tabel 3.1.2 is er een overzicht van de samenstelling van verschillende natuurvezels en in tabel 3.1.3 is er een overzicht van de mechanische eigenschappen.

	Cotton	Jute	Flax	Ramie	Sisal
Cellulose	82,7	64,4	64,1	68,6	65,8
Hemi-cellulose	5,7	12,0	16,7	13,1	12,0
Pektin	5,7	0,2	1,8	1,9	0,8
Lignin		11,8	2,0	0,6	9,9
Water soluble	1,0	1,1	3,9	5,5	1,2
Wax	0,6	0,5	1,5	0,3	0,3
Water	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

Tabel 3.1.2 Chemische samenstelling van verschillende natuurvezels (Bledzki A.K, 1999)

Types of fibres	fibres	Density (g/cm ³)	Tensile strenght (MPa)	Young modulus (GPa)
Stem fibres	Flax	1,5	345-2000	15-80
	Bamboo	0,6-0,91	192-600	20,6-46,0
	Hemp	1,48	550-900	26-80
	Jute	1,3	393-800	13-55
	Kenaf	1,45	157-930	22.1-60
	Ramie	1,5	400-938	61,4-128
Leaf fibres	Banana	0,72-0,88	161,8-789,3	7,6-9,4
	Pineapple	1,07	126,6	4,4
	Sisal	1,5	468-700	9,4-22
Fruit fibres	Coir	1,2	175	4,0-6,0
	Oil Palm	0,7-1,55	50-400	0,57-9,0
Wood fibres	Softwood	1,5	1000	18-40
	Hardwood	1,2	-	37,9
Synthetic fibres	E-glass	2,5	2000-3500	70
	S-Glass	2,5	4570	86
	Aramide	1,4	3000-3150	63,0-67,0

Tabel 3.1.3 Overzicht van eigenschappen van verschillende vezels (Technologies and Products of Natural Fibre Composiet, 2008)

Plantaardige vezels bestaan niet zoals bijvoorbeeld glas uit één continue homogene draad, maar zijn eigenlijk samengestelde vezels. De technische vlasvezel, zoals deze uit de plant wordt gewonnen, is circa 1 meter lang en bestaat weer uit zogenaamde elementaire vezels. Deze elementaire vezels zijn de afzonderlijke plantencellen, ze zijn circa 3 cm lang en 15 tot 25 µm in doorsnee, en ze zijn aan elkaar verbonden via een pectinelaag. Deze pectinelaag is veel zwakker dan de hoog kristallijne cellulose waaruit de elementaire vezels bestaan en dit heeft tot gevolg dat technische vlasvezels een factor 2 zwakker zijn dan de elementaire vezels (800 MPa tegen 1500 MPa, zie ook tabel 3.1.4). Wanneer de vezels worden gebruikt in een composiet worden ze in principe helemaal benut en goed ingebed, daarom is de verwachting

dat de elementair vezels effectief belast kunnen worden en de hoge sterkte van deze vezels kan worden benut. Een voorwaarde hiervoor is wel dat de hechting tussen de vezels en de matrix optimaal is. (Wingerde, Delft, & e.a., 2002)

3.1.1 Modificatie van natuurlijke vezels

Een goede hechting tussen de vezels en de matrix is zeer belangrijk bij composieten. Daarom zijn er methoden ontwikkeld om de vezels te behandelen, zodat de hechting tussen beide beter wordt. Er zijn fysische en chemische behandelingen van de vezels voor een betere hechting.

De fysische behandelingen hebben beperkt invloed op de chemische samenstelling van de vezels. Deze behandelingen hebben invloed op de structuur en oppervlakte eigenschappen van de vezels, wat de mechanische hechting tussen de vezels en matrix beïnvloed. Dit is voornamelijk van belang voor thermoplasten, omdat deze alleen een mechanische hechting hebben met de vezels. Een aantal van deze fysische behandelingen zijn uittrekken, kalenderen, thermische behandeling, elektrische ontlading en het produceren van hybride draden (Bledzki A.K, 1999).

Vezel [soort]	Dichtheid [kg/m ³]	Treksterkte [MPa]	E-modulus [GPa]	Vochtopname bij RH= 100%
Waterrootvlas	1,4	911 ± 192	50 - 60	38-50% mas.
Dauwrootvlas	1,4	733 ± 99	50 - 60	26-28% mas.
Waterrootvlas ontvet	1,4	760 ± 59	50 - 60	
Duralin vlas	1,4	737 ± 57	50 - 60	18-20% mas.
Elementaire vlasvezels	1,4	1800	70	
E-glas	2,6	2600	73	

Tabel 3.1.4 Vezeleigenschappen van verschillende voorbehandelde vlasvezels en glasvezel (Wingerde, Delft, & e.a., 2002); kolom vochtopname overgenomen uit bron figuur 3.1.1

Uit de gegevens in tabel 3.1.4 kan opgemerkt worden dat de voorbehandeling van het vlas bepalend is voor de vezelsterkte en vochtopname, maar niet voor de stijfheid. Bij ontvetten en Duralin behandeling (door CERES) vermindert de sterkte van vlas. Wordt bij vlas gekeken naar de elementaire vezels i.p.v de technische vezels dan blijken deze beduidend sterker te zijn.

Door de veel lagere dichtheid van vlas ten opzichte van glas is de specifieke sterkte van de elementaire vlasvezels vergelijkbaar met de specifieke sterkte van glasvezels. De moduli (stijfheid) van de verschillende versterkingsmaterialen zijn van een zelfde orde grootte.

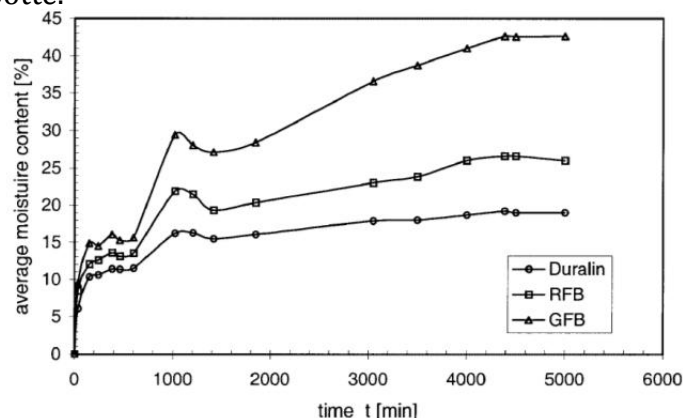


Fig. 7. Average moisture content $\overline{MC}$ for GFB-green, RFB-(dew)-retted and upgraded Duralin-fibers at RH = 100%.

Figuur 3.1.1 Vochtopname vlasvezels (Bismarck, Aranberri-Askargorta, & Springer, 2002)

Materiaal •••vlas-epoxy	ILSS [MPa]	σ -buig [MPa]	E-buig [MPa]	σ -druk [GPa]	E-druk [GPa]
waterroot droog	16,3±1.4	294±12	26,4±1.4	143±8	30
waterroot nat	-	293±7	21,4±1.2	111±71	-
waterroot ontvet, droog	-	-	-	137±13	-
dauwroot, droog	-	-	-	121±7	-
Duralin, droog	22,7±1.3	385±19	32,7±3.5	152±7	34

Tabel 3.1.5 Compositieigenschappen van verschillende voorbehandelde vlasvezels in epoxyhars (Wingerde, Delft, & e.a., 2002)

Uit tabel 3.1.5 blijkt dat de voorbehandeling van het vlas naast invloed op de vezelsterkte ook invloed heeft op de sterkte van de composietmaterialen. De materialen die versterkt zijn met Duralin vlas zijn duidelijk het sterkst en stijfst. Het ontvetten van de vezels heeft geen duidelijke invloed op de compositieigenschappen. Toepassen droge vlas vezels blijkt gunstig. Wat er gebeurt met vlas wat alsnog nat wordt zodra het in een composiet verwerkt is, is voor zover bekend niet bepaald. Bij chemische behandelingen worden koppelingsmiddelen gebruikt om zo de chemische hechting tussen vlasvezels en matrix te verbeteren. Hieronder is een overzicht van waarop de meeste chemische behandelingen op zijn gebaseerd (Baley C B. F., 2006):

- Chemische verbinding: koppelingsmiddel die een atoomverbinding tussen beide materialen veroorzaakt
- Zwake grensvlakken: koppelingsmiddelen elimineren de zwakke grensvlakken
- Vervormbare laag: koppelingsmiddel maakt een taai en flexibele laag
- Bevochtiging: koppelingsmiddelen die bevochtiging tussen het vezel en matrix verbeteren (geldt voor polymeren)
- Zuur-base: koppelingsmiddel verandert de zuurgraad van de vezels

Van de boven genoemde behandelingen is de chemische verbinding de meest toegepaste behandeling.

Verder is het ook mogelijk om vezels te impregneren met een polymeer dat compatibel is met de toe te passen matrix. Hiervoor worden een oplossing of mengsel gebruikt met een lage viscositeit. Dit is al gedaan voor zowel jute als vlasvezel in thermoplasten. (Bledzki A.K & Sperber V.E., 2002)

In dit onderzoek is ervoor gekozen om uit te gaan van vlasvezels zonder chemische behandeling. Dit omdat chemische behandeling de milieu impact voordelen van de natuurvezels weer (deels) te niet doen.

Ter referentie: synthetische vezels (zoals glas en koolstof) worden behandeld zodat ze compatible zijn voor een chemische verbinding met het beoogde type hars (UP, VE, EP). Dit gebeurt door de vezels aan het eind van de productie te coaten met middelen een zogenaamde sizing / bonding agent.

3.2 Harsen

In tabel 3.2.1 is een overzicht met de buigsterktes en E-Moduli van diverse matrixfamilies die in composieten zijn getest samen met hennep vezels (Technologies and Products of Natural Fibre Composiet, 2008). Hennep- en vlasvezels zijn beide stamvezels en vertonen grote overeenkomsten.

Matrix	Tensile (MPa)		Young's modulus (GPa)		References
	Pure resin	Composite	Pure resin	Composite	
Polypropylene	22.8-35.46	28.1-45.33 (40% hemp fibres)	1.07-1.1	3.5-3.72 (40% hemp fibres)	[153-155]
Polylactic acid	47.5-51	75-85 (30% hemp fibres)	3.5-5	8-11 (30% hemp fibres)	[156, 157]
Polystyrene	34.1±0.68	40.4±0.55 (22.5% hemp fibres)	-	-	[158]
Epoxy	25	60±5 (30% hemp fibres)	0.7	3.6±0.4 (30% hemp fibres)	[159]
Polyester	12.5±2.5	60±5 (35% hemp fibres)	1.1±0.2	1.75±1.5 (35% hemp fibres)	[160]
Unsaturated polyester	25±5	65±2.5 (30% hemp fibres)	1.5±1	8.75±1.25 (30% hemp fibres)	[161]

Tabel 3.2.1, eigenschappen hennep- en vlasvezels

De aandacht in dit onderzoek gaat uit naar een vinyl of polyester thermoharders. Er zijn twee thermoharders getest in combinatie met vlasvezels.

De geteste bio-hars is een onverzadigde polyester (UP) zonder styreen van DSM, te weten Beyone. De geteste conventionele hars voor draagconstructies is een vinylester, te weten Atlac® 430 met styreen. Voor de specifieke mechanische eigenschappen van beiden wordt verwezen naar het productbladen in bijlage F.

Beiden harsen zijn uitgehard met AKZO Nobels kobaltvrije, Blucure versneller system Nouryact® CF 12 N. Aangezien de uitharding van vinyl en polyester harsen met standaard kobalt-peroxide niet werkt⁵, zijn de door DSM en AKZO Nobel nieuw ontwikkelde kobalt-vrije Blucure™ uithardingssystemen toegepast.

In onderstaande brochure tekst van (DSM) voor UP-bio-hars Beyone zijn de eigenschappen van Beyone vergeleken met epoxy harsen.

“Beyone bestaat voor 40% uit bio-based ruwe materialen. Vanwege de lage viscositeit kan het hars makkelijk geïmpregneerd worden. Vanwege het ontbreken van styreen, heeft de hars nauwelijks geuremissie in zowel vloeibare als uitgeharde vorm.

Beyone hars heeft uitstekende sterkte, vergelijkbaar of beter dan epoxy harsen, zie tabel 3.2.2. Beyone laminaten hebben uitstekende mechanische eigenschappen geschikt voor

⁵ ‘Removing barriers for bio-based composites production with novel water-insensitive cure systems’ Akzo Nobel, Reinforced Plastics; Feb 2015

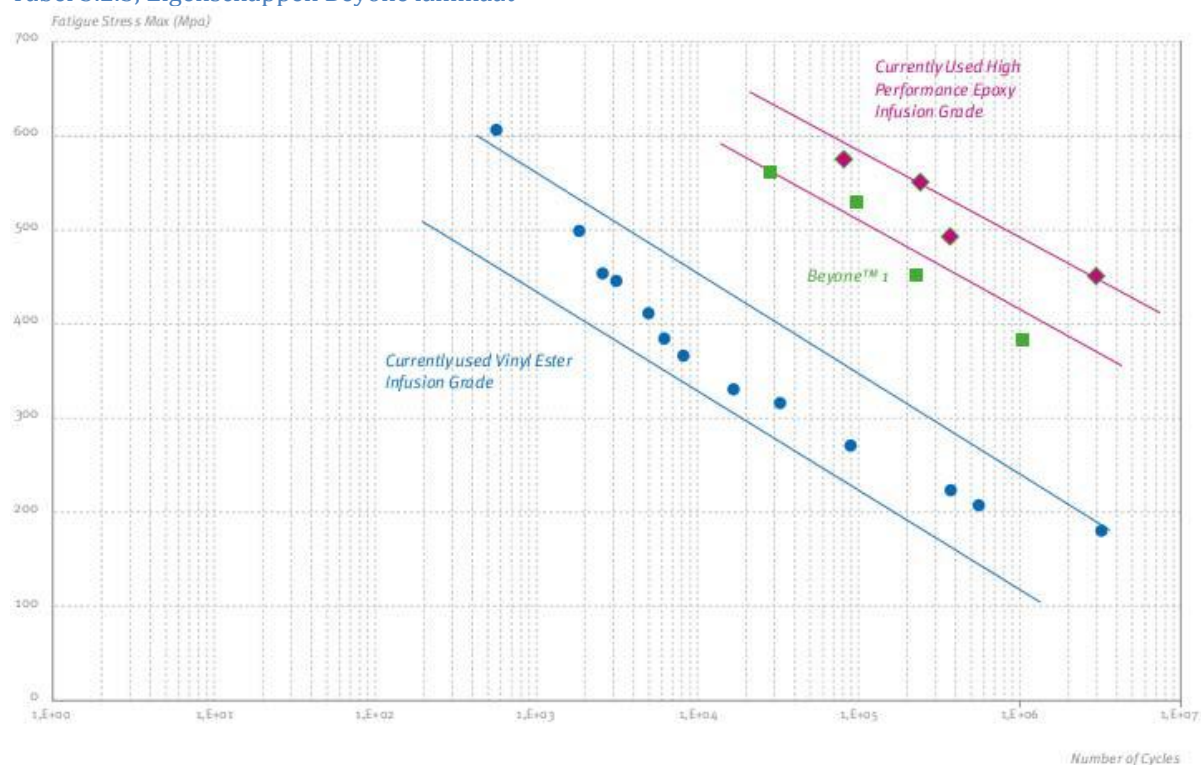
grote constructies, zie tabel 3.2.3. Beyone laminaten hebben overeenkomstige vermoeiingsweerstand als laminaten op basis van epoxyharsen, zie figuur 3.2.1.

Property	Unit	Beyone™ 1	Epoxy Reference*	Test Method
Viscosity at 23 °C	mPa.s	160-190	700-1,000	
K _{1C}	MPa√m	1.4	~1	ISO 17281
Tensile strength	MPa	74	60-75	ISO 527-2
Tensile modulus	MPa	3,500	2,700-3,200	ISO 527-2
Elongation at break	%	6	8	ISO 527-2
Flexural strength	MPa	124	90-120	ISO 178
Flexural modulus	MPa	3,500	~3,000	ISO 178
T _g at Tan Delta	°C	112	92.4	Flex Non Resonance 5 Hz, Amplitude 0.01%
Curing system		1% Butanox® LPT IN	Hardener 137	

Tabel 3.2.2, Vergelijking Beyone hars met een epoxy-referentie hars

Property	Unit	Beyone™ 1	Test Method
Glass type	SE 1200		
Flexural strength	MPa	1,003	ISO 178
Flexural modulus	GPa	33.3	ISO 178
ENF Max Load	N	2,930	
ENF G _{2C}	J/m ²	4,040	
Transversal Flexural strength	MPa	110	ISO 178
Transversal Flexural modulus	GPa	13.5	ISO 178
Transversal Tensile strength	MPa	51.98	ISO 527-2
Transversal Tensile modulus	GPa	14,530	ISO 527-2

Tabel 3.2.3, Eigenschappen Beyone laminaat



Figuur 3.2.1, Vermoeiingsweerstand Beyone laminaat vergeleken met VE en EP laminaten

De voordelen van Beyone zijn kort samengevat:

- Uitstekende sterkte- en vermoeiingseigenschappen;
- Eenvoudige verwerking;
- Kobaltvrij en styreenvrij: bijna nul emissie; 40% bio-based."

3.3 Klimaat waar bruggen aan worden blootgesteld

Temperatuur

De temperatuur die een constructie in de buitenlucht in Nederland kan bereiken is afhankelijk van de kleur. Donkere kleuren worden warmer dan lichtere kleuren.

Brugdekken zijn veelal voorzien van een zwarte, grijze of rode slijtlaag.

Voor betonnen brugdekken geldt aan de bovenzijde -17°C en $32+1,5 \times 15 = 55^{\circ}\text{C}$ en voor stalen brugdekken aan de bovenzijde -28°C en $46+1,6 \times 18 = 75^{\circ}\text{C}$, beiden uitgaande van een zwarte epoxy-slurry slijtlaag.

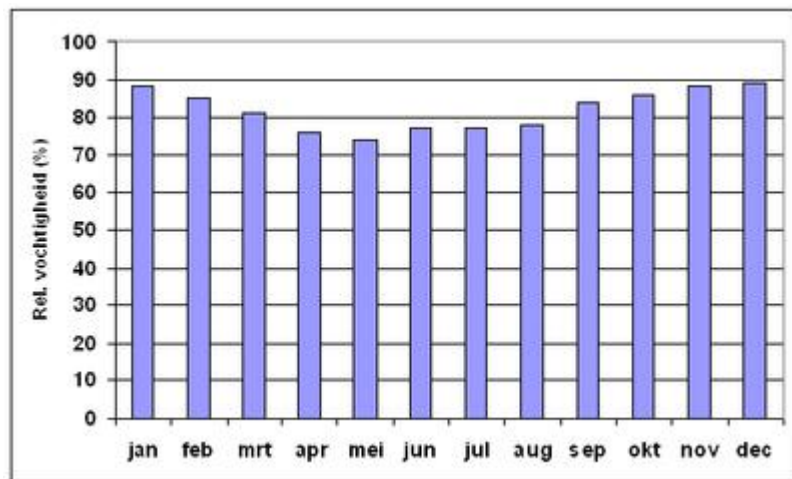
(eurocode EN-1991-5 tabel 5.2).

Voor VVK wordt voorzichtigheidshalve uitgegaan van -25°C en $+75^{\circ}\text{C}$ bij een zwarte epoxy slurry slijtlaag.

Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid, Relative Humidity (RH) (ook wel water activity) is afhankelijk of de draagconstructie binnen of buiten staat.

De relatieve vochtigheid bedraagt binnenshuis in Nederland meestal tussen de 40 à 60%. De relatieve vochtigheid in de buitenlucht varieert in Nederland van minder dan 20% tot 100%. De maand-gemiddelden van de relatieve vochtigheid in de Bilt schommelen tussen de ruim 70% en bijna 90% (zie figuur hiernaast) (KNMI).



Voor draagconstructies buiten geldt dus een gemiddelde RH van 80% in Nederland.

Figuur 3.3.1. Grafiek luchtvochtigheid gemiddelde per maand.

Figuur 3.1. van Eurocode 1991-1-1 voor betonconstructies geeft voor buitenmilieu eveneens (gemiddeld) $\text{RH}=80\%$.

UV straling

De UV straling bedraagt jaarlijks ruwweg $1000 \text{ kJ}/\text{m}^2$ (RIVM).

Chemicaliën

Een van de belangrijkste omgevingschemicaliën bij bruggen zit in pek, te weten zout (NaCl).

Andere chemicaliën kunnen bijvoorbeeld zitten in schoonmaakmiddelen, smeermiddelen, (vogel)poep, en beton: bijvoorbeeld enzymen, vetten, oliën, soda (Na_2CO_3), ammonia (NH_3), zoutzuuroplossing (HCl), wasbenzine ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), spiritus ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), verdunners (o.a. Toluëen $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ en Xyleen C_8H_{10}), basen.

4. Resultaten literatuuronderzoek en interviews

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van het literatuuronderzoek en interviews uitgewerkt per deelvraag. Als eerste is het resultaat van de literatuur behandeld en vervolgens is vermeld wat de specialisten over de onderwerpen vinden.

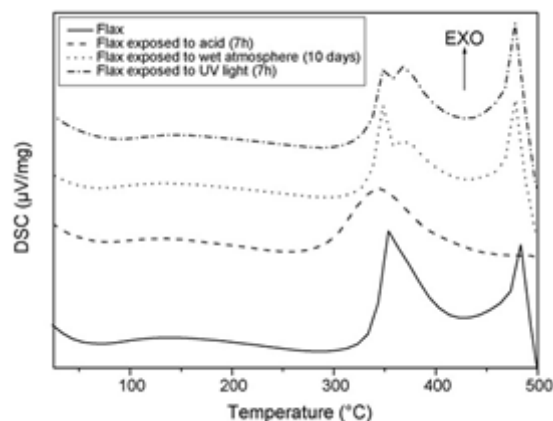
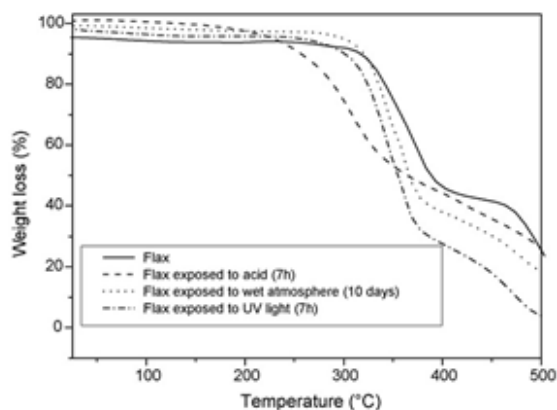
4.1 UV-straling

De invloed van UV-straling op de sterkte- en stijfheidseigenschappen van een composiet zijn meestal beperkt, omdat de eventuele schade tot de eerste ca. 1 mm van de oppervlaktelaag beperkt blijft. De kleur en glans van de hars kunnen na verloop van jaren veranderen onder invloed van UV-straling veranderen.

De meeste vezels zijn niet erg gevoelig voor UV-schade en worden door de omringende hars sowieso beschermd (Nijssen, 2013, p. 63).

De enige literatuur die gevonden omtrent UV op vlasvezels heeft betrekking op vlascanvas schilderijen. Het betreft het effect van UV-straling, zuur en vocht op schilderijen die gemaakt zijn op vlascanvas.

De blootstelling aan zonlicht is gesimuleerd door het bestralen van het doek met een UV-lamp (vermogen: $0,7 \times 10^{-3}$ Watt/cm²) gedurende 7 uur, overeenkomend met het gemiddelde normale daglicht van ongeveer 3 jaar. Tijdens de blootstelling werd elk uur een infrarood (FT-IR)-spectra gemeten. Voorts zijn SEM, TGA en DCA metingen verricht, en is gezien of de spanning in het doek werd gehandhaafd. Vocht resulteerde niet in degradatie, zuur in grote degradatie en UV straling in daar tussenin. De doekspanning relaxeerde bij vlascanvas.



Figuur 4.1.1 Thermogravimetrische analyse (TGA) curves. Figuur 4.1.2 DSC van vlasvezels. (Cerchiara T, 2009)

Uit onderzoek van Singh en Gupta blijkt dat verwerking over een periode van 2 jaar bij jute / fenol composiet resulteerde in kleur vervaging, barsten in de hars, uitpuiling, fibrillatie en zwarte vlekken. Bovendien werden aanzienlijke reductie van mechanische eigenschappen waargenomen, bijvoorbeeld: buigsterkte verminderd met 22%. (Stamboulis A, 2000)

Aangezien jute- en vlasvezels beide natuurvezels zijn, wordt verwacht dat UV-straling wel degelijk effect heeft op vlasvezels. Dit is ook geconstateerd bij vlascanvas.

De geïnterviewde specialisten A.W. van Vuure (Universiteit Leuven), R. Verleg (DSM-Composite resins) en D. Polling (CTC) verwachten dat het effect van UV-straling beperkt en slechts oppervlakkig is, al kunnen zij het effect niet precies kwantificeren. Een coating kan het effect van UV-straling sowieso inperken.

4.2 Chemicaliën

In tabel 4.2.1. staat de bestendigheid van vlasvezels tegen chemicaliën.

Chemicaliën	Invloed
Zouten	Zouten veroorzaken hydrolyse, waardoor de vezelstructuur beschadigd wordt
Zuren	Vlasvezels worden aangetast door hoge concentraties zuren maar lage concentraties hebben geen invloed indien ze niet voor lange tijd in contact komen met de vlasvezels
Basische stoffen	Vlasvezels hebben een zeer goede weerstand tegen basische stoffen en zijn bestand tegen hoge concentraties
Bleekmiddelen (Organische) oplosmiddelen	Chloor heeft geen invloed op de vlasvezels. Oplosmiddelen hebben geen invloed op vlasvezels.

Tabel 4.2.1 Invloed van chemicaliën op vlasvezels. (Islam N, 2013)

Alleen zouten en zuren in hoge concentraties kunnen tot problemen leiden. Dooizouten zitten in pekkel, en kunnen in (vogel)poep zitten.

Aangezien vezels ingebed zijn in de matrix worden zij beschermd tegen directe blootstelling van chemicaliën. Het is daarom belangrijk dat de hars goed bestendig is tegen zouten en zuren.

Onverzadigde polyesters worden al ongeveer 100 jaar gebruikt en zijn zo ver ontwikkeld dat ze zeer goed bestand zijn tegen de meeste chemicaliën (Goodman S.H, 2013).

Een nadeel van polyesterharsen is de beperkte alkaliënbestendigheid, dit is echter te verbeteren door het gehalte aan glycol te vergroten. (Lubin G)

Harsleveranciers hebben uitgebreid onderzoek gedaan naar de invloed van chemicaliën op hun harsen. Zo heeft DSM een uitgebreide data sheet (zie bijlage F) waarin de invloed van chemicaliën op hun harsen staat vermeld. Atlac 430 is een VE hars die geschikt is tegen vele chemicaliën en voor toepassing bij bruggen.

Volgens geïnterviewde A.W. van Vuure is de invloed van de bovenstaande chemicaliën op vlascomposiet, net zo gering als op glascomposiet.

Volgens geïnterviewde M. van den Oever (Wageningen UR) kunnen harsen die goed bestand zijn tegen chemicaliën ook de vezels goed tegen de chemicaliën beschermen. Bovendien wordt deze vorm van degradatie ingeperkt door een eventuele slijtlaag en/of coating.

4.3 Slijtage

Slijtage van composieten is een aspect waar relatief weinig aandacht aan wordt besteed. Dit komt doordat de schade meestal tot de bovenkant beperkt blijft en het pas negatieve invloed heeft op de eigenschappen wanneer de onderliggende lamellen beschadigd worden (Nijssen, 2013, p. 63).

Volgens de geïnterviewde R. Verleg is slijtage eenvoudig tegen te gaan door gebruik te maken van een slijtlaag en/of coating. Aangezien een coating of slijtlaag net zo goed kan hechten aan een hars uit bio-olie als aan een hars uit aardolie en de type vezels geen invloed hebben op de hechting tussen het composiet en de coating of slijtlaag is hier geen verder onderzoek naar nodig.

Volgens de geïnterviewde M. van den Oever zullen wind en regen verwaarloosbare invloed hebben op slijtage. Bovendien kan fysieke slijtage kan worden ingeperkt door een slijtlaag of coating.

4.4 Overige degradatiemechanismen

Verrotting door schimmels en bacteriën

Uit literatuur blijkt dat verrotting in vochtige omstandigheden door schimmels en bacteriën voor degradatie van vlascomposiet kan zorgen. Andere mechanismen zijn niet gevonden in de literatuur en bij de interviews.

Een vochtige omgeving veroorzaakt niet alleen vezel zwellen wat kan leiden tot delaminatie, toename in oppervlakte ruwheid en verlies van sterkte, maar kan ook leiden tot groei van schimmels en bacteriën, waardoor verrotting kan plaatsvinden (Dicker M.P.M, Green composites: A review of material attributes and complementary Applications, 2013).

Stamboulis en Baillie hebben schimmelgroei op vlasvezels onderzocht. Na 3 dagen werd schimmelgroei geconstateerd. Dit resulteerde in degradatie van de vezels, wat leidde tot afname van de mechanische eigenschappen.

Nadali heeft een bagasse / polypropyleen composiet blootgesteld aan rainbow schimmel (*Coriolus versicolor*): na 4 maanden werd een vermindering van 30-50% in buigsterkte, buigmodulus en hardheid waargenomen. Dit onderzoek is gebaseerd op een *thermoplast* bestaande uit bagasse. (Stamboulis A, 2000)

De geïnterviewde specialisten verwachten dat bacteriën en schimmels bij vochtige omstandigheden grote invloed kunnen hebben op de vlasvezels. Er kan verrotting optreden, wat kan leiden tot afname van de mechanische eigenschappen. Dit komt overeen met wat gevonden is in de literatuur.

Voorkomen degradatie door verrotting

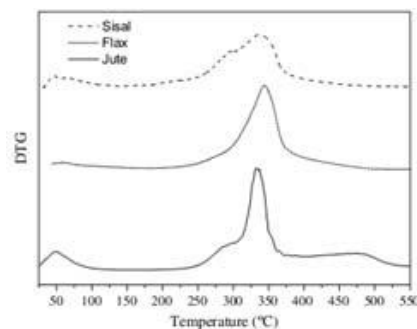
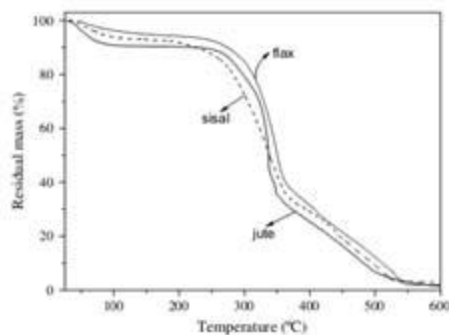
Een oplossing om verrotting door bacteriën en schimmels tegen te gaan is het composiet te behandelen met een zogenaamde Duralin behandeling. De Duralin behandeling bestaat als eerste uit een stoom-of-water-verwarming van het stro-vlas bij temperaturen boven 160° C gedurende ongeveer 30 minuten in een autoclaaf. Daarna volgt een droogstap en een verwarming (uitharding) stap boven 150°C gedurende ongeveer twee uur. Hierdoor wordt er een betere weerstand tegen schimmels verkregen. Verder heeft de behandeling met Duralin meerdere voordelen zoals: een betere dimensionale vezel- en temperatuurstabiliteit en algemeen verbeterde mechanische eigenschappen. Nadeel van deze behandeling zijn de aanzienlijke energiekosten door de hoge temperaturen die nodig zijn om het levende materiaal af te breken (M.P.M. Dicker, 2013).

4.5 Temperatuur

Onomkeerbare degradatie door temperatuur van -25 tot circa 75°C op zowel vlasvezels als (bio-)matrix is volgens de gevonden literatuur niet te verwachten. Over de invloed van deze temperaturen op sterkte en stijfheid is geen literatuur gevonden.

Expert A. W. van Vuure (Leuven) verwacht dat deze temperatuur range niet zoveel invloed zal hebben op vlascomposieten. Voor de resultaten van eigen experimenteel onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Het afbraak gedrag van de verschillende natuurlijke vezels is onderzocht met Thermogravimetrische (TGA) analyse.



Figuur 4.5.1 TGA curves van de natuurlijke vezels.

Figuur 4.5.2 DTG curves van de natuurlijke vezels.

Bij natuurlijke vezels omvat de degradatie bij hoge temperaturen twee stappen. De eerste stap is de thermische depolymerisatie van de hemicellulose en het splitsen van de glycosidische bindingen van cellulose. De tweede stap houdt verband met de ontleding van de α -cellulose. De ontleding van de lignine vindt plaats in een breed temperatuurgebied tussen 200 en 500°C. De afgeleide van de restmassa percentage (DTG) voor de verschillende vezels wordt in figuur 4.5.1 getoond.

Conform figuur 4.5.2 beginnen vlasvezels te degraderen bij hoge temperaturen, waarbij de hoofdpijk bij 345°C ligt en een kleine piek die overeenkomt met de hemicellulose bij 285°C.

De betere thermische stabiliteit van de vlasvezels ten opzichte van andere natuurlijke vezels wordt toegeschreven aan het lagere lignine gehalte. Ook ten aanzien van brandweerstand bieden vlasvezels de grootste weerstand: lange tijd tot ontbranding en tot vlamoverslag.

(Manfredi L.B, 2006)

4.6 Vocht

Veel gevonden publicaties gaan over vlasvezels in een epoxy matrix, terwijl dit onderzoek gaat over vlasvezels en (bio-)poly/vinylester. Verwacht wordt dat vocht globaal dezelfde effecten zal hebben bij vlasvezels in een (bio-)poly/vinylester matrix als in een epoxy matrix, met dien verstande dat een (bio-)poly/vinylester matrix zelf meer vocht opneemt en het vocht sneller doorlaat naar de vezels.

Invloed vocht op vlasvezel

In figuur 4.6.1 is te zien dat de sterkte van natuurvezels verschillend reageert op vocht. Bij vlasvezels heeft vocht een positieve invloed op de sterkte van de vezel: het verschil tussen droog en volledig nat bedraagt 40 à 50%. De axiale zwelling/lengteverandering van vlasvezels door vocht is slechts 0,05 à 0,2 %. De transversale zwelling van vlasvezels door vocht is echter maar liefst 20-25%.

(Flex and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry, pp. 2012: 53-54)

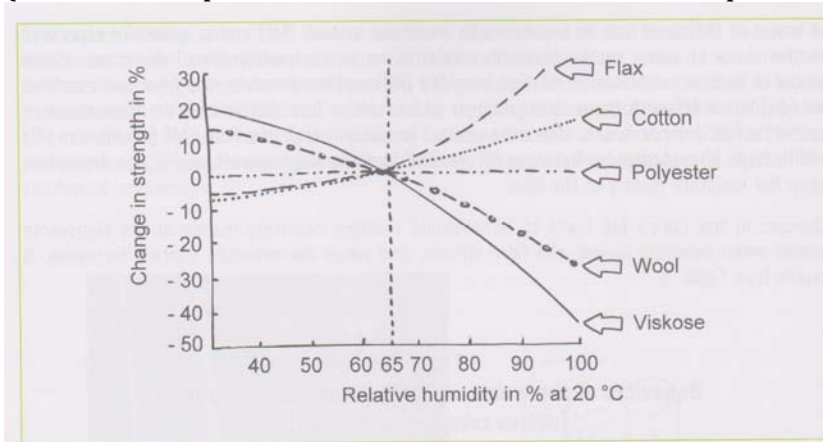


Fig. 4.6.1 Natuurvezelsterktes als functie van de relatieve vochtigheid bij 20°C.

Invloed vocht op vlasvezelcomposiet

In een composiet vraagt een groot wisselende zwelling in dwarsrichting enorm veel van de matrix en de samenwerking van vezel met matrix. Dit is in figuur 4.6.2 gevisualiseerd. (Azwa ZN, 2013)

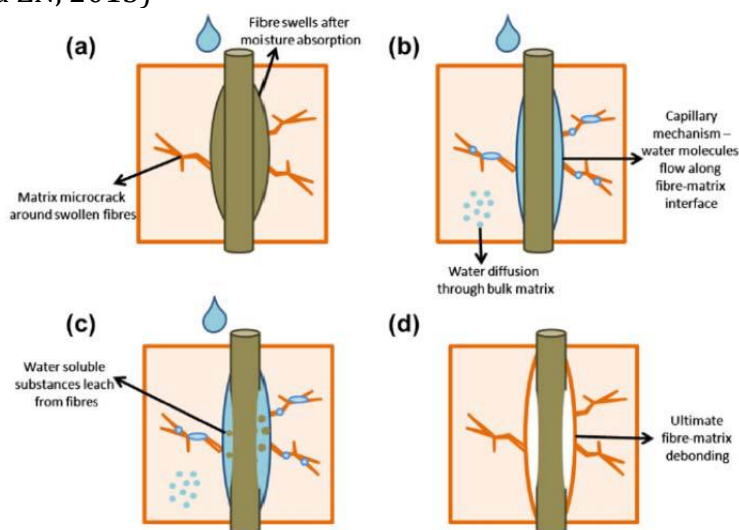


Fig. 4.6.2 Effect van vocht op de natuurvezel-matrix interface.

Invloed van vooraf drogen van vlasvezels in composiet

Uit onderzoek naar de invloed van drogen van de vezels op de mechanische eigenschappen van vlasvezels blijkt dat de sterkte van gedroogd (24h op 105°C) UD vlasvezel in composiet circa 45% minder is dan bij RH=48%. Voorts blijkt dat de stijfheid van gedroogd vlasvezel in UD composiet nauwelijks veranderd t.o.v. RH=48%. (Baley C L. B., 2012).

Tensile properties of plies reinforced by unidirectional flax fibres.

Material	V_f (%)	E_L (GPa)	$\sigma_{UD L}$ (MPa)	$\varepsilon_{UD L}$ (%)
Flax/epoxy	40.4 ± 1.2	22.50 ± 1.51	328 ± 18	1.6 ± 0.2
Dry flax/epoxy	40.0 ± 0.9	22.94 ± 2.65	210 ± 25	1.2 ± 0.1

Tabel 4.6.1 Trek eigenschappen van lamellen versterkt met al dan niet gedroogde UD vlasvezels.

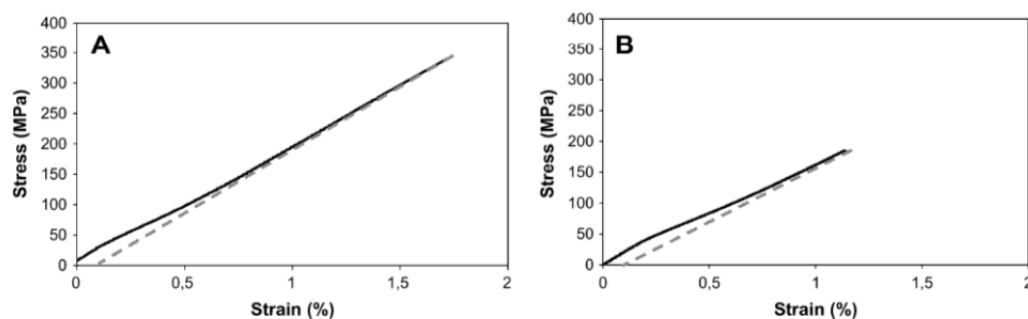


Fig. 6. Examples of stress-strain plots for UD composite reinforced by as-received (A) and dried flax fibres (B). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Fig. 4.6.3 Invloed van drogen vlasvezels in UD composiet.

Onder water invloed bij vlas- t.o.v. glascomposiet

Proeven waarbij de invloed van onder water zetten is vergeleken voor UD vlas- en glasvezelcomposiet in een epoxy matrix laten zien dat a) de gewichtstoename door vocht 13,5% bedraagt bij vlascomposiet ten opzichte van 1,05% bij glascomposiet, b) de elasticiteitsmodulus bij vlascomposiet in 10 dagen 40% afneemt ten opzichte van 10% bij glascomposiet.

(Assarar M, 2011)

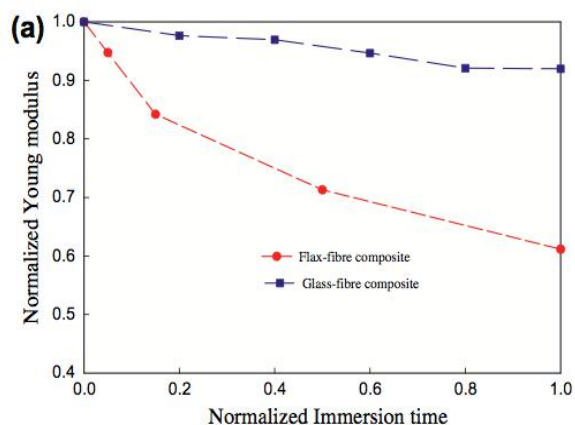


Fig. 4.6.4 De E-Modulus in water uitgezet tegen de tijd.

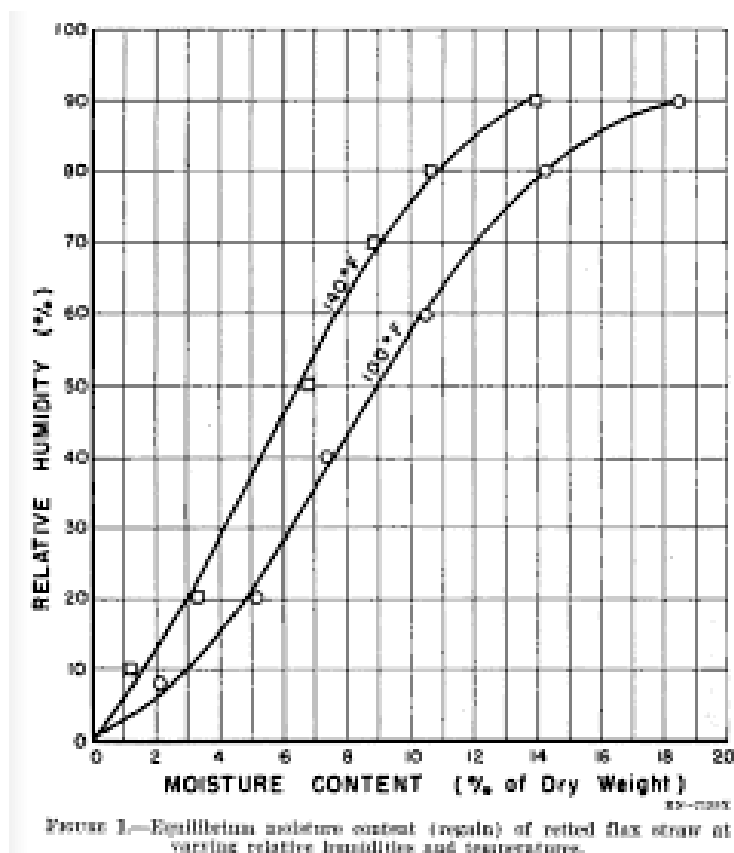
Nat-droog cycli

Proeven waarbij gewoven vlas-epoxy composiet aan een aantal nat-droog cycli is onderworpen laten zien dat na de eerste cyclus de treksterkte is afgenomen met 11% en na 4 cycli met maar liefst 84%. Dit heeft te maken met het feit dat door vochtopname de vlasvezels gaan uitzetten en na het drogen de vezels de oorspronkelijke vorm weer aannemen. Hierdoor ontstaan er scheurtjes in de matrix en neemt de hechting tussen de hars en vlas af.

(Newman R.H, 2009).

Onder water ten opzichte van $RH = 100\%$

Loos en Springer hebben voor glas polyester composiet de vochtopname gemeten bij verschillende omstandigheden. Hieruit blijkt dat het voor glas composiet nauwelijks uitmaakt of het in een waterbad ligt of in omgeving met 100% relatieve vochtigheid (Loos A.C, 1981).



Figuur 4.6.5 is een voorbeeld van de grafieken die zijn gemaakt de gewichtstoename van vlasvezels onder invloed van relatieve vochtigheid.

Uit diverse grafieken is voor $RH=80\%$ bij vlasvezels een gewichtstoename te zien die ligt rond de 12% afhankelijk van temperatuur, textieltype (UD-legsel / weefsel / mat) en dergelijke.

Bij een $RH=80\%$ is voor vlasvezels de vochttoename ruwweg de helft ten opzichte van die bij $RH=100\%$ / onder water.

Fig. 4.6.5 De gewichtstoename van vlasvezels versus RH.
(Brandenburg N.B.)

Voor- of nabehandeling

Natuurvezels kunnen worden voorbehandeld met:

- coupling agents MAPP of (bio based) LDI om een betere interface tussen vezels en matrix te krijgen en tevens om minder vocht aan te trekken;
 - KOH of NaOH om de mechanische eigenschappen te beïnvloeden en tevens om minder vocht aan te trekken;
 - Silaan om de weerstand tegen wateruitspoeling te verbeteren.
- Coupling agents (sizings) reageren met de vrije OH groepen van de vezels en

verhinderen dat water daarmee later een binding kan aangaan wat gepaard gaat met scheurvorming in de matrix.

Coatings om het werkstuk kunnen de aanvoer van vocht van buitenaf op onmiddellijke tot korte / middellange termijn vertragen.

(Azwa ZN, 2013, p. 429)

Effect van eenzijdig waterblootstelling zonder en met coating

Indien slechts aan één zijde van het composiet van water staat, zeker indien aan de natte zijde een gelcoating is voorzien, wordt de gewichtstoename door vocht aanzienlijk beperkt bij vlascomposieten: tot waardes die bij glascomposiet gebruikelijk zijn.

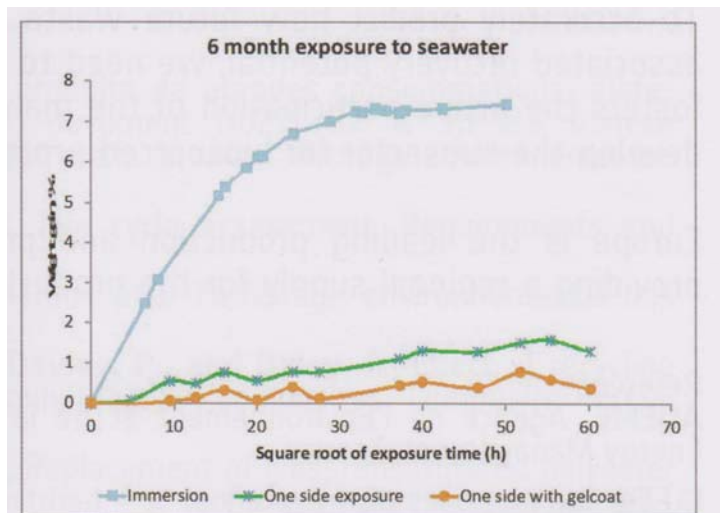


Fig. 4.6.6 De gewichtstoename van vlascomposiet bij waterblootstelling aan één zijde.

(Flex and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry, p. 2014: 34)

Expert opinion

Volgens geïnterviewde A.W. van Vuure en R. Verleg zijn bij glasvezel composieten diffusie door de matrix en capillaire werking via glas/hars interface de vochttransportmechanismen. Bij natuurvezels komt daar de capillaire werking door de holtes in de vezels bij. Voorts trekken bij cellulose vezels de OH-groepen water aan.

Beide eigenschappen zorgen er voor dat het composiet snel en veel vocht opneemt. Volgens geïnterviewde A.W. van Vuure en M. van den Oever is vocht de meest cruciale factor voor natuurvezel composieten. Er zijn diverse vezelbehandelingen die toegepast kunnen worden om de vochtopname te beperken en daarmee de vezel-matrix hechting beter te houden.

4.7 Kruip

Kruipvervorming

De meeste koolstof- en glasvezels zijn net als staal nauwelijks gevoelig voor kruip terwijl de meeste harsen juist heel erg kruipgevoelig zijn. (Nijssen, 2013).

Bij natuurvezel composieten waarbij UD vezels in de belastingsrichting liggen, is de kruip evenals bij glasvezels afhankelijk van de natuurvezels. (Zafeiropoulos N.E, 2011) (Wong S., 2007)

Volgens Bcomp (leverancier van UD vlasvezels) zijn vlasvezels met name kruipgevoelig onder drukbelasting als deze hoger is dan de helft van de bezwijksterkte. Dit niveau wordt in de praktijk nooit gehaald vanwege materiaal- en belastingsfactoren. Er zijn voor zover hen bekend geen literatuurgegevens over de mate van kruip van vlasvezels. De verwachte kruip van vlasvezels kan bij gebrek aan informatie ingeschat worden door naar houtconstructies te kijken omdat beiden uit cellulose bestaan.

Hout kruipt afhankelijk van omgevingsvochtigheden verschillend, zie tabel 4.6.1.

In composieten treedt bij hoge vochtigheden ook onthechting van de hygroscopische natuurvezels en matrix op: dit resulteert ook in extra vervormingen. Deze effecten zijn in de vorige paragraaf reeds beschreven.

Klimaatklasse voor hout Relatieve Vochtigheid (RV)	$1/(1 + k_{\text{def}})$ E-reductie (vanwege kruip)	k_{mod} σ -reductie (onder blijvende belasting)
RV < 65% (<12% vochttopname)	$1/(1 + 0,6) = 0,63$	0,60
RV < 85% (<20% vochttopname)	$1/(1 + 0,8) = 0,56$	0,60
RV > 85% (>20% vochttopname)	$1/(1 + 2,0) = 0,33$	0,50

Tabel 4.6.1 Lange duur factoren hout (gezaagd hout, gelijmd gelamineerd hout & gelam. fineerhout). (EN1995-1, 2005).

Langeduur sterkte

Naast kruipvervorming kan er bij vezels kruipbreuk optreden, ofwel de lange duursterkte is dan lager dan de korte duursterkte. Hiervoor wordt voor glascomposieten dezelfde conversiefactor aangehouden als voor de kruipvervorming. (CUR 96).

Er zijn voor zover Bcomp bekend geen gemeten gegevens over de lange duursterkte (creep rupture) van vlasvezels. De verwachte lange duursterkte van vlasvezels kan bij gebrek aan informatie eveneens ingeschat worden door naar houtconstructies te kijken.

Hout breekt bij zeer lang durende belasting eveneens afhankelijk van de omgevingsvochtigheden verschillend, zie tabel 4.6.1.

Voor de lange duur sterkte zijn in de Eurocode reductiefactoren k_{mod} onderscheiden voor zeer kort, kort (<1 week), middellang (1week-6maanden), lang (6maanden-10 jaar) en blijvend (>10jaar). De factor k_{mod} varieert van 0,5 resp. 0,6 bij blijvende belasting tot 1,1 bij zeer kort durende belasting zoals wind of explosie. Een factor 1,0 hoort bij de voorgeschreven test duur van 5 ± 2 minuten.

Lange duur factoren bundelen

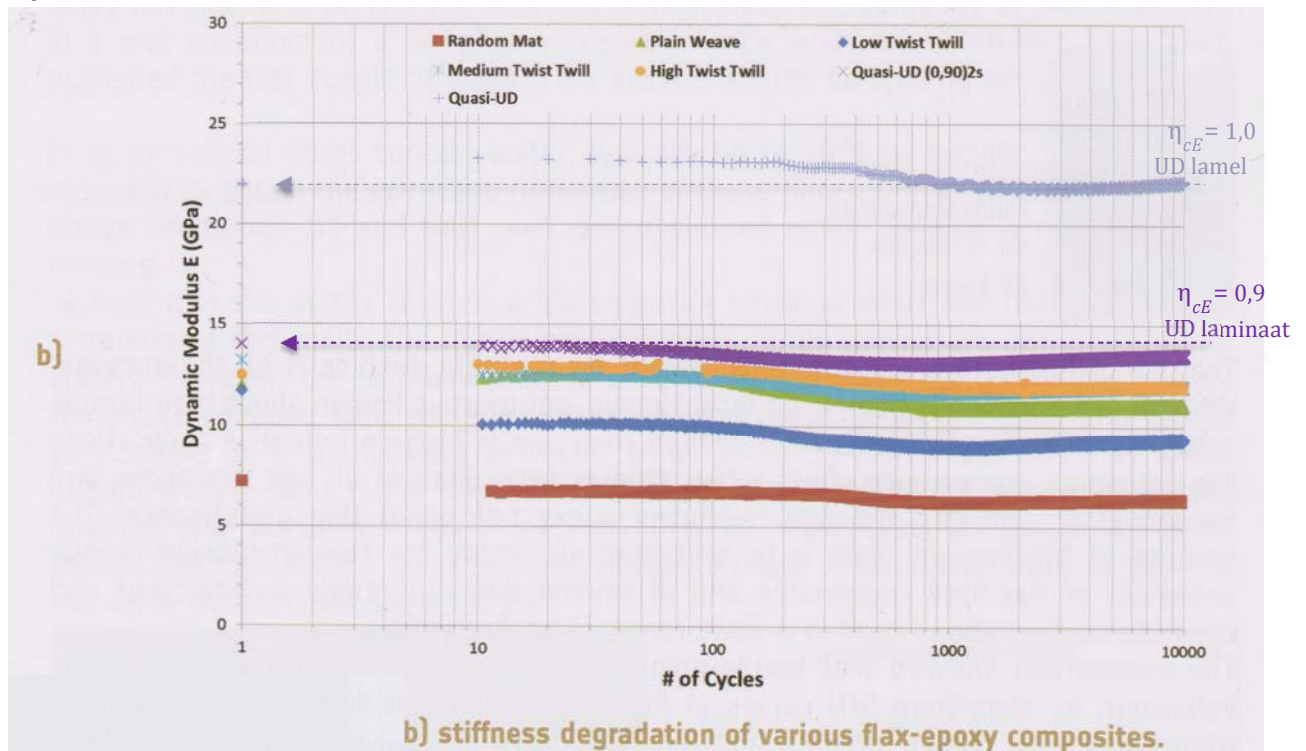
De lange duurfactor voor sterkte en stijfheid blijken voor hout ongeveer gelijk voor $RH < 65\%$ en $RH < 85\%$, net zoals voor glasvezel ook steeds één waarde voor sterkte en stijfheid wordt aangehouden.

Deze houtreductiefactoren voor $RV < 65\%$ (1) en $RV < 85\%$ (2) in tabelvorm zijn beide te vangen in de formule $t^{-0,04}$ met t in uren:

Sterkte lange duur				Stijfheid / kruip													
	years		load example	kmod		1			1			load ex.		duration		formule	
				1 & 2	3	1	2	3	1	2	3			years	hours	-0,04	
														100 years	100	876.000	0,58 0,51
												dead load		50 years	50	438.000	0,59 0,53
blijvend	10		dead load	0,60	0,50	0,63	0,56	0,33	0,60	0,80	2,00	storage		10 yaers	10	87.600	0,63 0,56
lang	0,5	10	storage	0,70	0,55							floor load		0,5 year	0,5	4.380	0,72 0,63
middellang	0,02	0,5	floorload, snow	0,80	0,65							snow		1 week	0,019	168	0,81 0,72
kort		0,02	snow, wind	0,90	0,70									1 hour	1,1E-04	1,0	1,00 0,89
test				1,00	0,90									5 minutes	5,7E-06	0,05	1,13 1,00
zeer kort			wind, explosion	1,10								wind		15 seconds	4,8E-07	0,0042	1,25 1,10
												explosion		1 second	3,2E-08	0,0003	1,39 1,23

4.8 Vermoeiing

Dynamische modulus



Figuur 4.8.1 Dynamische modulus.

(Flex and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry, pp. 2014: 35-36)

Figuur 4.8.1 laat voor UD vlaslamellen zien dat de E-modulus na 1 cyclus ca. 22 GPa bedraagt, dit bij 10 à 100 cycli toeneemt tot ca. 23 GPa, en bij 1.000 à 10.000 cycli weer afneemt tot ca. 22 GPa. Dit kan verschijnsel kan verklaard doordat de vezel in de eerste cyclus wordt gestrekt waardoor de stijfheid tegen nieuwe belasting toeneemt. Vervolgens treedt pas 'vermoeiing' of onderscheidend geformuleerd 'dynamische modulus'.

Deze twee effecten kunnen voor UD-vlasvezel legfels in lamellen tegen elkaar worden weggestrept.

Voor UD- vlasvezellaminaten blijken de vezels in dwarsrichting er voor te zorgen dat er niet eerst een toename plaatsvindt van E-modulus. De afname van de E-modulus bedraagt ca. een factor 0,9. Deze waarde is gelijk aan de factor die de CUR96 voorschrijft voor glasvezellaminaten van UD-legfels, weefsels en matten.

Vermoeiingssterkte

Vermoeiing is een fenomeen waarbij een materiaal bezwijkt onder aanhoudende wisselende belasting.

In recente literatuur (Shah D, 2012) zijn enkele natuurlijke stamvezels (in composieten) onderling vergeleken op het aspect vermoeiing. Eerst zijn de algemene eigenschappen van vergeleken bio-vezels in tabel 4.8.1 weergegeven.

List of plant fibre material and their properties (mean $\pm$ stdv.).

Yarn ID	Fibre type	Supplier	Price ^a (€/kg)	Density ^b (gcm ⁻³)	Linear density ^b (tex)	Twist level ^b (tpm)	Apparent yarn diameter ^b (mm)
J190	Jute	Janata and Sadat Jute Ltd. (Bangladesh)	~1.1	1.433 $\pm$ 0.005	206 $\pm$ 21	190	0.452
H180	Hemp	Safilin (Poland)	~7.6	1.531 $\pm$ 0.003	278 $\pm$ 17	180	0.488
F50	Flax	Composites Evolution (UK)	~10.0	1.529 $\pm$ 0.003	229 $\pm$ 22	50	0.468
F20	Flax	Safilin (Poland)	~13.3	1.574 $\pm$ 0.004	396 $\pm$ 16	20	0.623

Tabel 4.8.1 Lijst van natuurlijke vezels en hun algemene eigenschappen.

Naast de algemene eigenschappen van de stamvezels is een overzicht van de fysische en mechanische (statische / vermoeiing) eigenschappen van UD-composieten opgenomen in tabel 4.8.2.

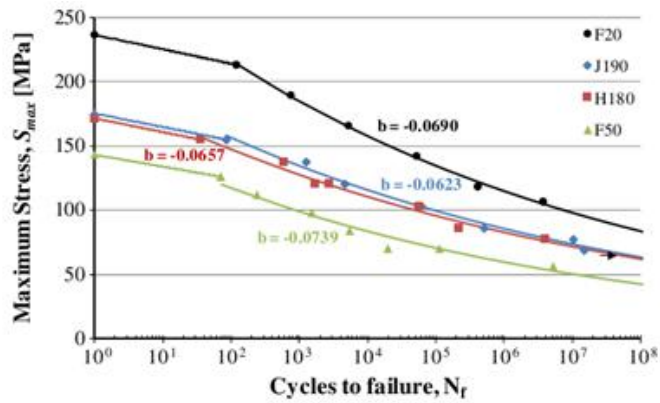
Physical and mechanical (static and fatigue) properties (means $\pm$ stdv.) of the fabricated composite laminates.

Experimental Variable	Fibre type	Layout	Fibre volume fraction v_f [%]	Composite density ρ [gcm ⁻³]	Void volume fraction v_p [%]	Experimental ultimate Strength UTS/(UCS) [MPa]	Fatigue stress ratio R tested under	Theoretical single cycle ultimate strength S_0 [MPa] ^d	Fatigue strength coefficient b ^d
Fibre type	J190	[0] ₄	31.7 $\pm$ 0.1	1.225 $\pm$ 0.002	4.2 $\pm$ 0.8	175.1 $\pm$ 10.3	0.1 ^a	211.3	-0.0657
	H180	[0] ₄	35.6 $\pm$ 0.8	1.303 $\pm$ 0.006	1.3 $\pm$ 0.4	171.3 $\pm$ 6.5	0.1 ^a	196.4	-0.0623
	F50	[0] ₄	27.7 $\pm$ 0.3	1.282 $\pm$ 0.004	0.9 $\pm$ 0.3	143.0 $\pm$ 6.8	0.1 ^a	164.3	-0.0739
	F20	[0] ₄	26.9 $\pm$ 0.1	1.291 $\pm$ 0.006	0.9 $\pm$ 0.4	236.3 $\pm$ 12	0.1 ^a	297.4	-0.0690
Fibre volume fraction	J190	[0] ₂	17.1 $\pm$ 0.1	1.238 $\pm$ 0.003	0.3 $\pm$ 0.2	90.2 $\pm$ 9.9	0.1 ^a	99.8	-0.0585
	J190	[0] ₃	25.2 $\pm$ 0.1	1.251 $\pm$ 0.004	0.7 $\pm$ 0.3	140.7 $\pm$ 7.7	0.1 ^a	173.5	-0.0656
	J190	[0] ₄	31.7 $\pm$ 0.1	1.225 $\pm$ 0.002	4.2 $\pm$ 0.8	175.1 $\pm$ 10.3	0.1 ^a	211.3	-0.0657
	J190	[0] ₅	37.8 $\pm$ 0.1	1.276 $\pm$ 0.002	1.1 $\pm$ 0.2	224.7 $\pm$ 26.5	0.1 ^a	262.6	-0.0669
Textile architecture	F50	[0] ₄	27.7 $\pm$ 0.3	1.282 $\pm$ 0.004	0.9 $\pm$ 0.3	143 $\pm$ 6.8	0.1 ^a	164.3	-0.0739
	F50	[± 45] ₄	28.9 $\pm$ 0.1	1.293 $\pm$ 0.005	0.3 $\pm$ 0.2	51.4 $\pm$ 2.8	0.1 ^a	73.7	-0.0872
	F50	[90] ₄	25.8 $\pm$ 0.3	1.278 $\pm$ 0.004	0.7 $\pm$ 0.2	13.2 $\pm$ 0.4	0.1 ^a	19.8	-0.0698
Stress ratio	H180	[0] ₄	35.6 $\pm$ 0.8	1.303 $\pm$ 0.006	1.3 $\pm$ 0.4	171.3 $\pm$ 6.5	0.1 ^a	196.4	-0.0623
	H180	[0] ₄	35.6 $\pm$ 0.8	1.303 $\pm$ 0.006	1.3 $\pm$ 0.4	171.3 $\pm$ 6.5	0.3 ^a	234.8	-0.0548
	H180	[0] ₄	35.6 $\pm$ 0.8	1.303 $\pm$ 0.006	1.3 $\pm$ 0.4	171.3 $\pm$ 6.5	0.5 ^a	255.4	-0.0526
	H180	[0] ₄	35.6 $\pm$ 0.8	1.303 $\pm$ 0.006	1.3 $\pm$ 0.4	(95.1 $\pm$ 6.9)	-1 ^b	(161.7/50.5)	-0.1567/-0.03
	H180	[0] ₄	35.6 $\pm$ 0.8	1.303 $\pm$ 0.006	1.3 $\pm$ 0.4	(95.1 $\pm$ 6.9)	2.5 ^c	(124.4)	-0.0373

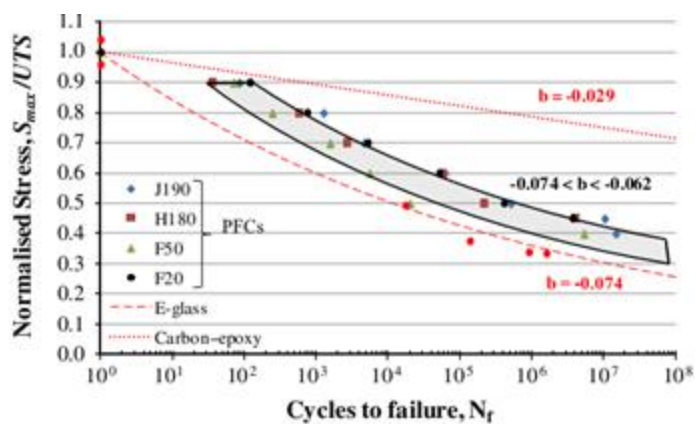
Tabel 4.8.2 Statistische en vermoeiingseigenschappen van de bio-composiet laminaten.

Laminaten zijn cyclisch onderworpen met een ontspanning versus maximale spanning verhouding van $R = 0,1$ op verschillende spanningsniveaus. Daarbij wordt een geleidelijke afname van de vermoeiingssterkte bij een toenemend aantal cycli waargenomen. Dit is over het algemeen kenmerkend voor composieten waarbij vermoeiing vergezeld gaat met matrix scheurgroei en inter-laminaire scheuren. Matrix scheuren loodrecht op de spanningsrichting komen al voor op het oppervlak aan het begin van de levensduur.

Bij de σ - n diagram in figuren 4.8.2 en 4.8.3 wordt opgemerkt dat, hoewel de statische sterkte van natuurlijke vezels varieert van 140 tot 240 MPa, de vermoeiingscoëfficiënten b zeer vergelijkbaar zijn: - 0,074 à - 0,062. F20 en F50, beide vlas-composieten (Flax) hebben 40% verschillende statische sterkte, maar gelijkwaardige waarden van vermoeiingssterkte degradatie. Vermoeiingssterkte degradatie blijkt onafhankelijk van het type plantaardige stamvezels. De manier van bezwijken die is waargenomen bij vermoeiingsproeven komt overeen met die van statische trekproeven. Dit past bij de constatering dat stamvezels met hogere statische sterkte eveneens een hogere vermoeiingssterkte hebben. (Shah D, 2012)

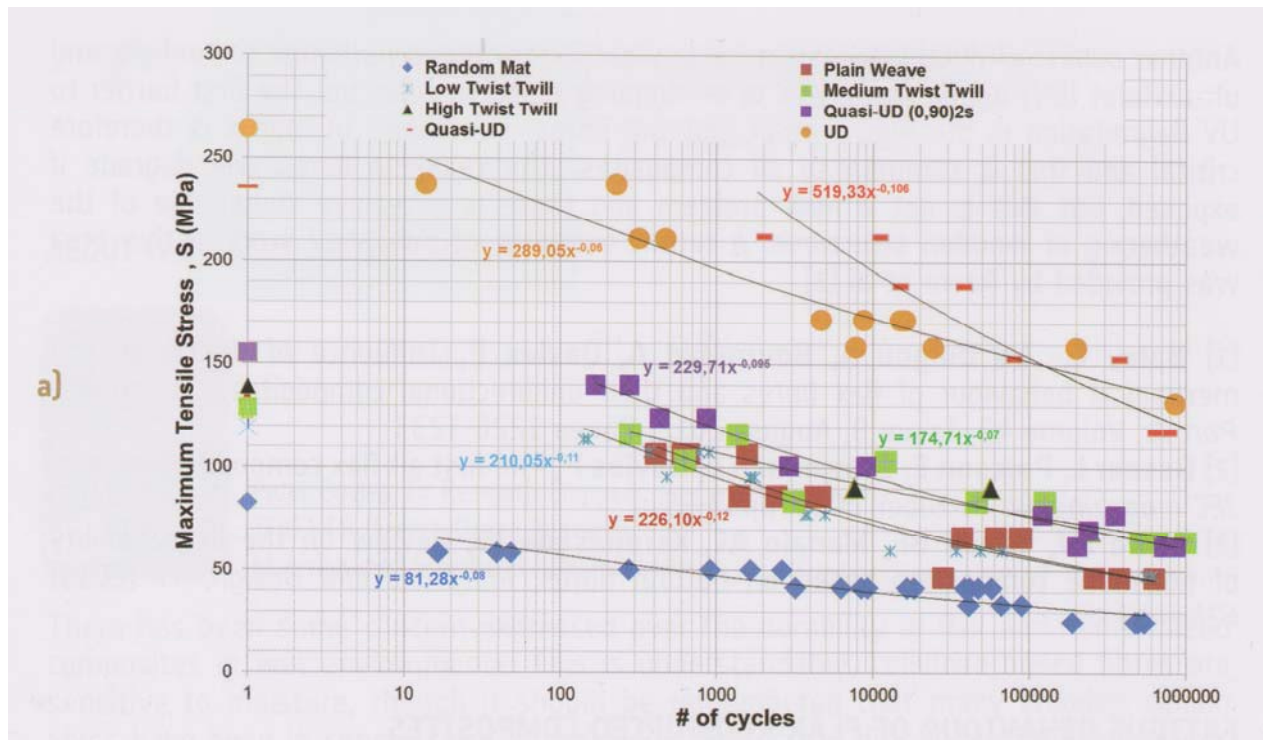


Figuur 4.8.2 σ -n diagram voor polyester composieten met verschillende natuurlijke vezels.



Figuur 4.8.3 Genormaliseerde σ -n diagram spanning-spanning vermoeiing prestatie van UD composieten met natuurlijke, glas en carbon vezels.

Bio-composieten vertonen zeer vergelijkbare progressieve schade propagatie met glas- en koolstofcomposieten.
(Gassan J, 2002)



Figuur 4.8.4 σ -n curves van diverse vlas-epoxy composieten.

(Flex and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry, pp. 2014: 35-36)

Figuur 4.8.4. is ontleend uit recent onderzoek naar vlas-epoxy. Hieruit blijken grote verschillen tussen mat, weefsel, UD-laminaat (Quasi-UD) en UD-lamel (UD). Alle genormaliseerde σ -n curves van vlasvezels blijken een bi-lineaire vorm te hebben, die overall boven de lineaire vorm van glasvezels blijft. Bij vlasvezels kan ook de statische sterkte als vertrekpunt voor vermoeiing worden gebruikt en is het een veilige benadering om eenvoudigheds-halve met dezelfde helling als bij glasvezels worden gewerkt.

Geïnterviewde specialist A. W. van Vuure bevestigt dat de te verwachten invloed van vermoeiing van composieten met UD vlasvezels globaal hetzelfde als bij glasvezels.

De CUR 96 methodiek gebruikt voor vermoeiing de statische sterkte en beveelt aan om de helling van de S-N curve te bepalen met metingen. Er wordt wel een indicatie gegeven voor de helling van glasvezels in polyester en glasvezels in epoxy.

5. Resultaten experimenteel onderzoek

In dit hoofdstuk is eerst het experiment kort beschreven. Daarna zijn de resultaten weergegeven. In bijlagen C en D is achtergrond informatie over de proefnemingen opgenomen en in bijlage E zijn alle resultaten weergegeven zowel grafisch als ruwe data.

5.1 Materialen

De laminaten zijn gemaakt met twee verschillende harsen: Beyone ZW7964-01(bio) en Atlac 430©. Beiden uitgehard met AKZO Nobels kobaltvrije, Blucure versneller system Nouryact® CF 12 N. Aangezien de uitharding van vinyl en polyester harsen met standaard kobalt-peroxide niet werkt, zijn de door DSM en AKZO Nobel nieuw ontwikkelde kobalt-vrije Blucure™ uithardingssystemen toegepast.

Beide harsen waren een mogelijke optie voor CTC. De gebruikte vezels zijn de AmpliTex 5009 UD vlasvezels van Bcomp®. Zie bijlage F voor data sheets van de materialen.

Resin	Beyone ZW7964-01	Atlac 430
Nouryact 13	1,0	
Nouryact 12		1,0
Nlc-10		1,0
Butanox M 59	2,0	2,0

Tabel 5.1.1 Samenstelling van de harsen

5.2 Voorbereiding proefstukken

In bijlage C en D is uitgebreid beschreven hoe de laminaten zijn gemaakt en hoe de proefstukken hieruit zijn voorbereid.

De laminaten zijn opgebouwd uit 6 lagen UD vlasvezels. De vlasvezels zijn niet vooraf gedroogd en hebben geen andere voorbehandelingen ondergaan. De productie van zowel kamerdroge proefstukken als proefstukken in water heeft plaatsgevonden met kamerdroge vezels. De laminaten zijn gemaakt met vacuüm infusie. Na de infusie is het laminaat bij 40°C gepostcured.

Bij glaslaminaat wordt om de vezelvolumefractie te bepalen het laminaat verbrand en worden de resterende glasvezels gewogen. Dit is echter niet mogelijk bij vlasvezels. Omdat het vezelgewicht en de afmetingen van de plaatjes bekend waren, kan met behulp van de bekende dichtheid van de hars het vezelvolumepercentage berekend worden. Dit is gedaan voor 2 Beyone en 2 Atlac plaatjes. Hieruit volgde een vezelvolumepercentage van $45 \pm 5\%$.

Uit het laminaat zijn plaatjes van 100 x 150mm gezaagd en gecodeerd volgens tabel D1 t/m D4. De zijkanten van de plaatjes die in een waterbad gelegd worden, zijn gecoat met Atlac 580ACT.

Er zijn 6 droge Beyone plaatjes weggelegd en 6 Beyone plaatjes weggelegd in een waterbad bij -20°C(vriezer), 5°C(koelkast), 20°C(lab), 40°C(oven), 60°C(oven) en 80°C(oven). De droge plaatjes waren oven droog ($RV = 10 \pm 5\%$) met 40°C, 60°C en 80°C, en kamer droog ($RV = 40 \pm 10\%$) met -20°C, 5°C en 20°C. Om de circa 200 uur zijn monsters beproefd, waarbij tevens de vochtgehaltes zijn bepaald en is vastgesteld of er al een vochtevenwicht verkregen was. Bij $RV = 80\%$ met 20°C is alleen het tussentijdse

vochtgehalte gemeten, en bij vochtevenwicht de mechanische eigenschappen in vezelrichting bepaald.

Dit is ook voor de Atlac plaatjes gedaan.

5.3 Experimentele procedure

De plaatjes die in water lagen zijn eerst met een doekje droog gemaakt, voordat het gewicht is bepaald. Na het bepalen van het gewicht zijn de plaatjes teruggelegd in het waterbad.

Het vochtgehalte van de proefstukken is bepaald door de gewichtstoename te bepalen van de proefstukken en deze te vergelijken met het gewicht van de proefstukken vlak na postcuren. Bij aanvang waren er 6 proefstukken per serie. Na elke tijdmeting resteerde er een proefstuk minder (vanwege de destructieve buigproef), waardoor voor de vochtgehaltenes statistisch steeds minder informatie overbleef.

Zodra de toename van vochtpercentage ruwweg 0,01% is, wordt verwacht dat het vochtopname-evenwicht is bereikt (Wang W, 2006).

Buigproeven

Voor het bepalen van de buigeigenschappen, buigsterkte en buigmodulus, is de driepuntsbuigproef uitgevoerd. De buigproeven zijn gedaan volgens de ISO-14125 *“Met vezel versterkte kunststofcomposieten – Bepaling van de buigeigenschappen”*.

Er zijn buigproeven gedaan na 0, 24, 300, 750 en 1200 uur voor proefstukken in de vezelrichting en 0, 24 en 300 uur voor proefstukken loodrecht op de vezelrichting.

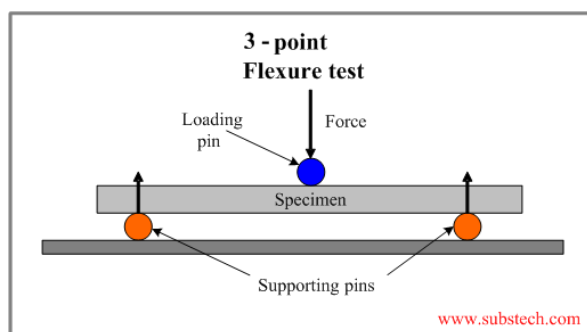


Fig. 5.3.1 Schematisering van de buigproef.

Om buigproeven uit te voeren, is na elk tijdinterval één plaatje uit beide series in 6 proefstukken gezaagd, waarvan 3 evenwijdig aan de vezelrichting en als extra indicatie voor de hechting tussen hars en vezel 3 haaks op de vezelrichting. Om de uitwisseling van vocht met de omgeving minimaal te houden, zijn de proefstukken tussen zagen en testen bewaard in afsluitbare plastic zakken.

Fig. 5.3.1 geven een schematische weergave van de proef aan. De ondersteuningen hebben een diameter van 9,9mm en de “loading pin” heeft een diameter van 9,6mm. De overspanning bedraagt 50mm. De monsters hebben een afmeting van 75x15mm.

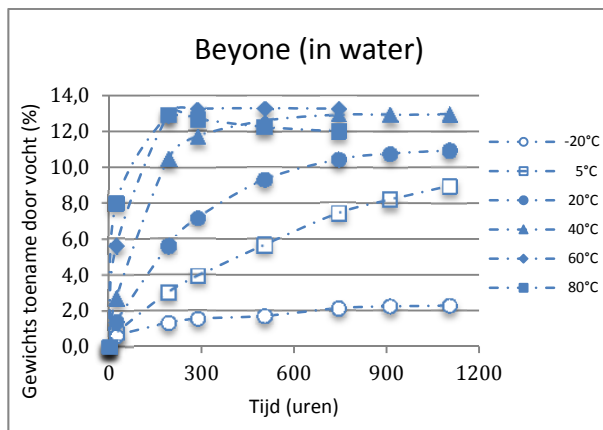
De dikte van elk proefstuk is gemeten en ingevoerd in de software van de drukbank, waarmee automatisch de buigsterkte en de buigmodulus zijn bepaald bij de buigproef.

5.4 Resultaten

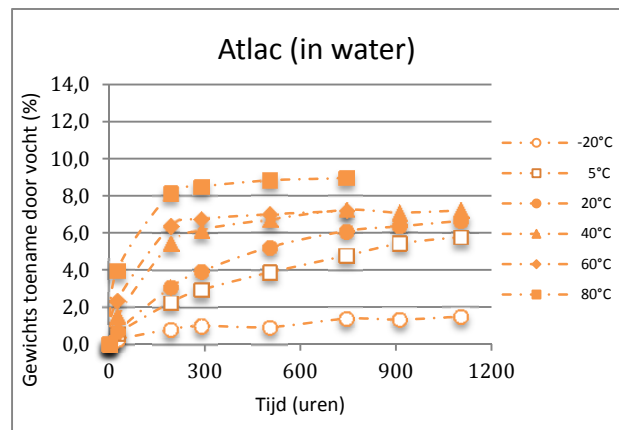
Voor de grafische resultaten van alle metingen, aan UD composieten bestaande uit vlasvezels in zowel bio-hars Beyone als in referentiehars Atlac zowel voor (kamer)droge proefstukken als voor proefstukken in water, wordt verwezen naar bijlage E.

Vochtopname resultaten

In de grafieken 5.4.1 en 5.4.2 is de vochtopname van de proefstukken weergegeven in procenten ten opzichte van het proefstukgewicht na postcuren.



Grafiek 5.4.1, vochtopname Beyone in water



Grafiek 5.4.2, vochtopname Atlac in water

Duidelijk is te zien dat de temperatuur van invloed is op de snelheid waarmee het evenwicht wordt bereikt. Ook blijkt uit de grafieken dat de matrix invloed heeft op de evenwichtstoestand. De Atlac proefstukken bereiken een evenwicht bij 7 – 9% gewichtstoename. De Beyone proefstukken bij 11 – 13%.

Bij de proefstukken in het waterbad zijn tijdens de uitvoering een aantal opvallende waarnemingen gedaan. Zowel het water als de proefstukken verkleurden in de loop van tijd. De verkleuring was zichtbaar vanaf 40°C, bij zowel Atlac als Beyone. De Atlac proefstukken waren bij 40°C, 60°C en 80°C bijna evenveel verkleurd, terwijl de Beyone proefstukken bij 40°C de meeste verkleuring gaven.

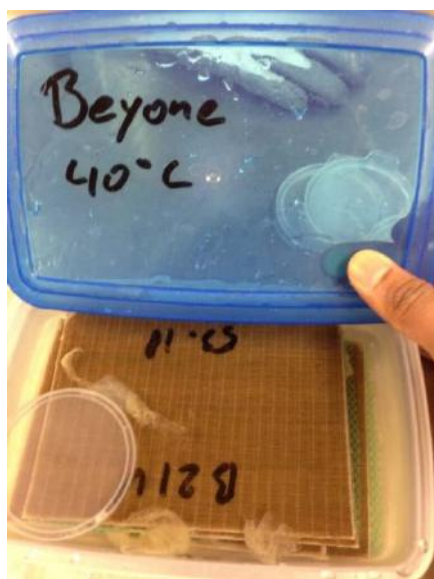
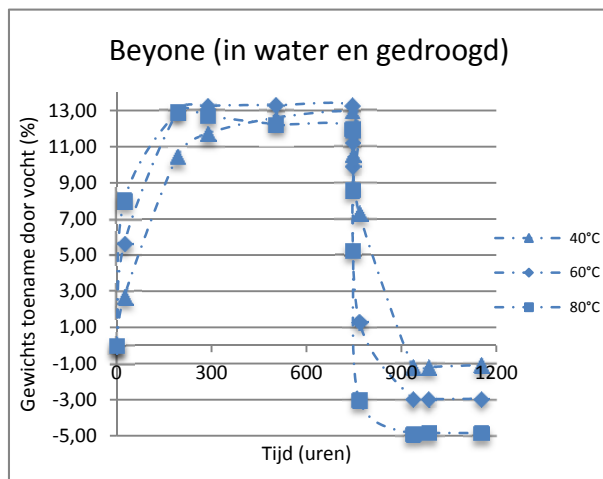


Fig. 5.4.3, Verkleuring + witte substantie

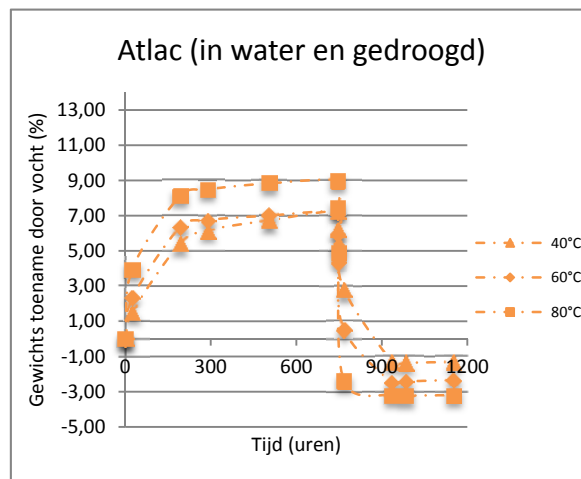


Fig. 5.4.4, Verbleking van proefstukken

De proefstukken bij 40°C, 60°C en 80°C bleken na 750 uur evenwicht te hebben bereikt. Er is besloten om de overgebleven proefstukken te drogen bij de respectievelijke temperaturen totdat ze weer een gewichts- en dus vochteevenwicht hadden bereikt, om vervolgens weer de buigproef uit te voeren. De grafieken van de vochtopname, grafiek 5.4.5 en 5.4.6 staan hieronder weergegeven.

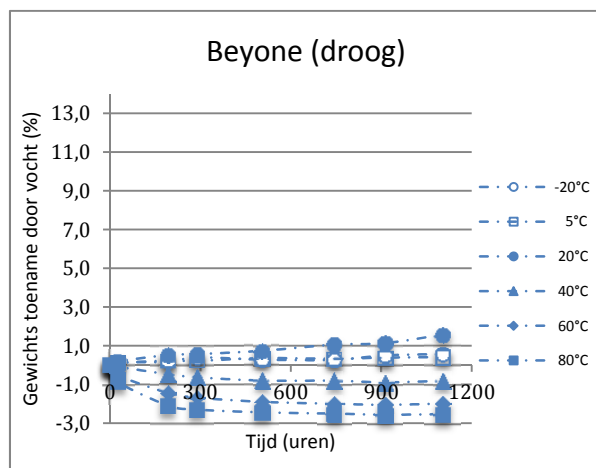


Grafiek 5.4.5, vochtopname Beyone (nat en gedroogd) Grafiek 5.4.6, vochtopname Atlac (nat en gedroogd)

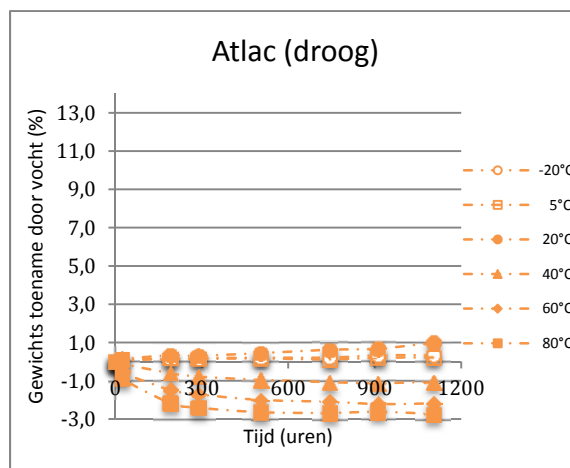


Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat voor elke droogtemperatuur, 40°C, 60°C en 80°C, een nieuw evenwicht bereikt wordt. Er gaat meer vocht uit dan er in eerste instantie in is gegaan. Dit komt omdat er vocht, wat in de vezels zat bij de productie, is verdampt.

Het evenwicht wat bereikt wordt is nagenoeg hetzelfde als het evenwicht wat bereikt wordt bij de droge proefstukken die bij de respectievelijke temperaturen zijn getest. Die resultaten staan hieronder weergegeven in de grafieken 5.4.7 en 5.4.8.

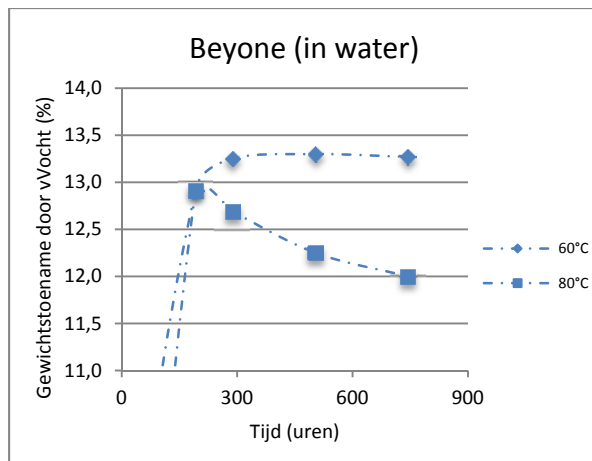


Grafiek 5.4.7, vochtopname Beyone(droog)



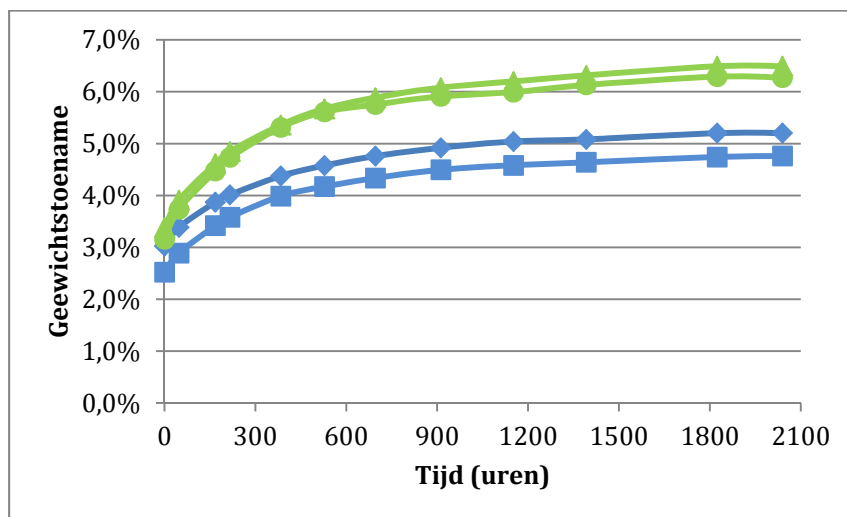
Grafiek 5.4.8, vochtopname Atlac(droog)

De vochtopname grafiek van de Beyone proefstukken bij 80°C vertoont een opmerkelijke knik, vlak na het bereiken van de maximale vochtopname. In figuur 5.4.9 is ingezoomd op dit deel van de grafiek. Het gewicht neemt af gedurende de tijd dat het proefstuk in het waterbad ligt. Dit duidt hoogstwaarschijnlijk op degradatie van het proefstuk.



Grafiek 5.4.9, vochtopname Beyone bij 60°C en 80°C

Bij RH=80% is gewacht tot er geen relevante gewichtstoename meer optrad voordat mechanische proeven zijn uitgevoerd. De vochtopname is getoond in grafiek 5.4.10.

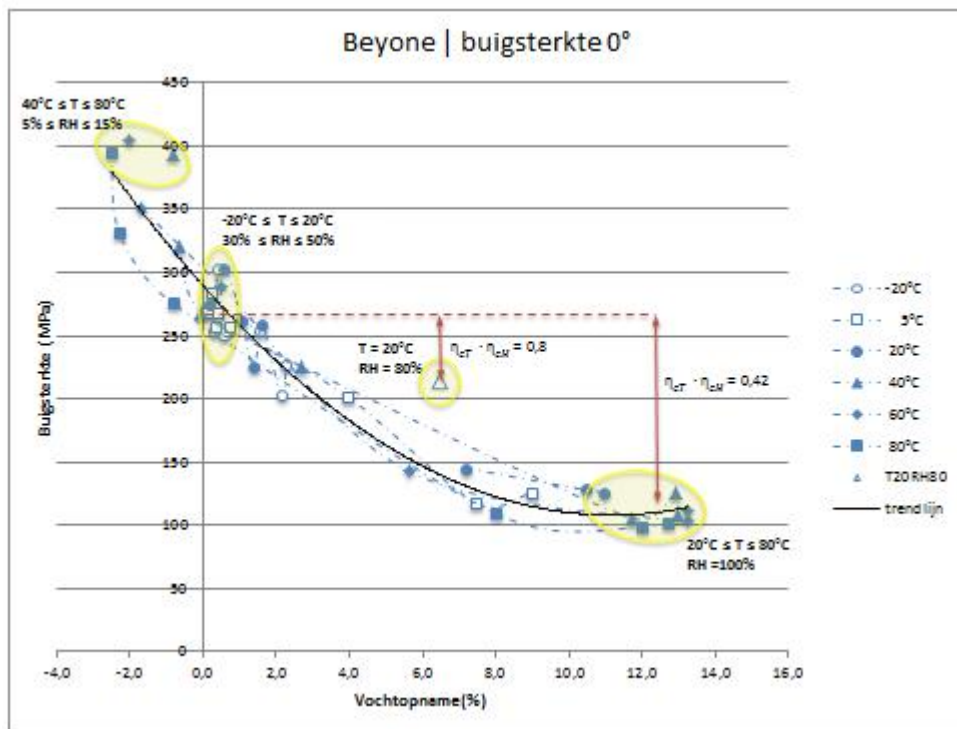


Grafiek 5.4.10, vochtopname Beyone (groen) en Atlac (blauw) voor RH=80% bij 20°C

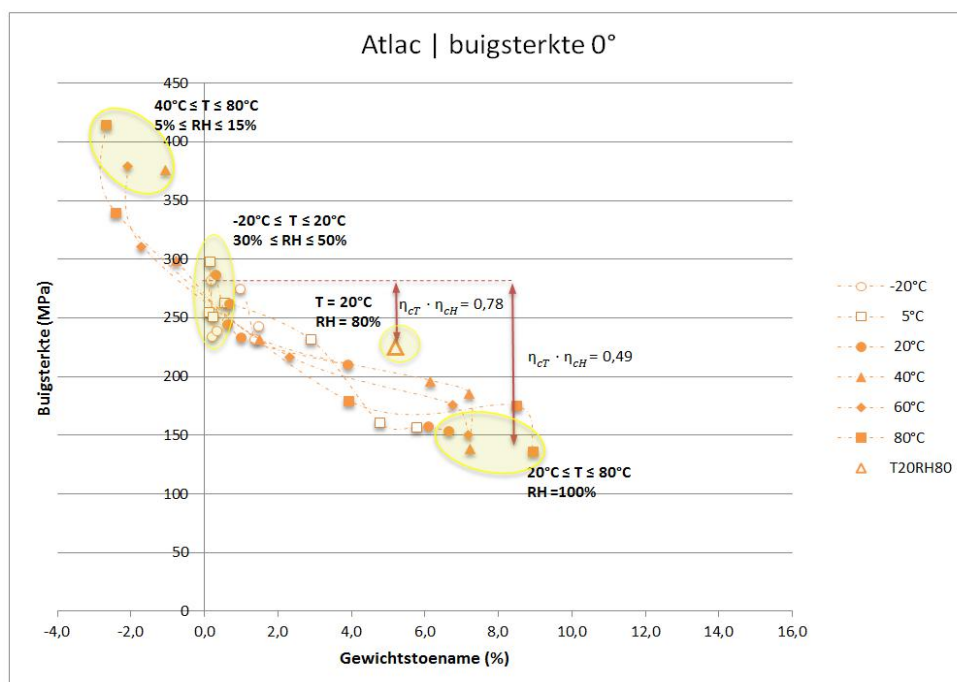
Buigproef resultaten

De resultaten van de buigproeven staan weergegeven in grafieken 5.4.11 t/m 5.4.14. Hierin zijn de sterkte- en stijfheidsverandering van de proefstukken uitgezet tegen de hoeveelheid opgenomen vocht.

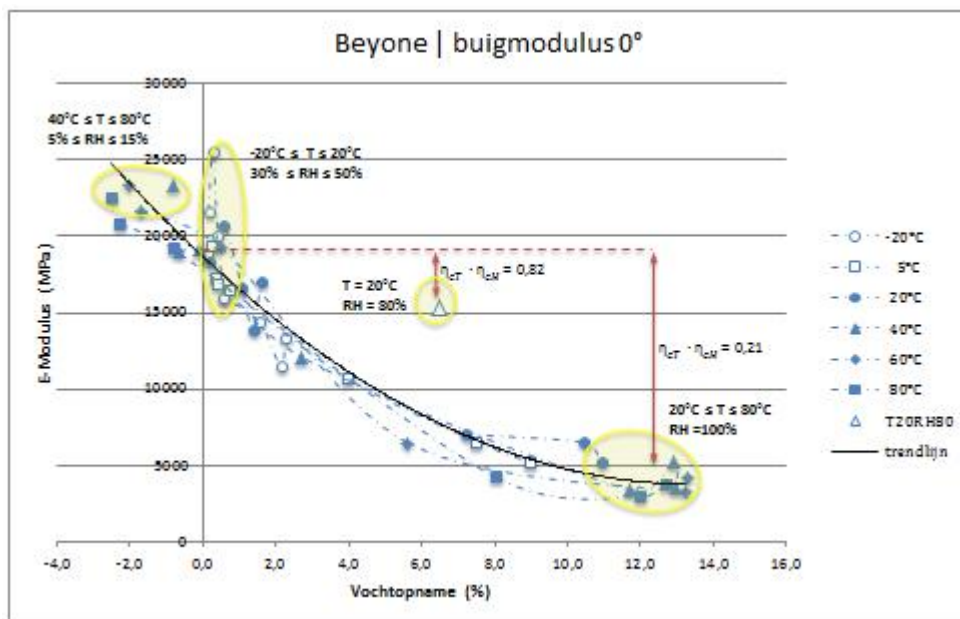
In deze grafieken zijn droge, RH=80% en natte omstandigheden opgenomen. RH= 80% als benadering van de gemiddelde omstandigheden in buiten toepassing met afwisselend nat & droog. De meetwaarden vlak na postcuren bij kamertemperatuur (ca. 20°C) en bij kamervochtomstandigheden (RH= 40±10%) zijn als referentiewaarde gebruikt. Bij omcirkelde waarden is het evenwichtsvochtgehalte bereikt. De niet omcirkelde waarden zijn tussentijdse metingen van onder water proefstukken. Hierbij zullen de buitenste vezels al meer vocht opgenomen hebben (dan de binnenste vezels) en daarmee al meer beïnvloed zijn. Van RH=80% en RH=100% zijn conversiefactoren ten opzichte van droge omstandigheden bijgeschreven (incl. temperatuurvariatie).



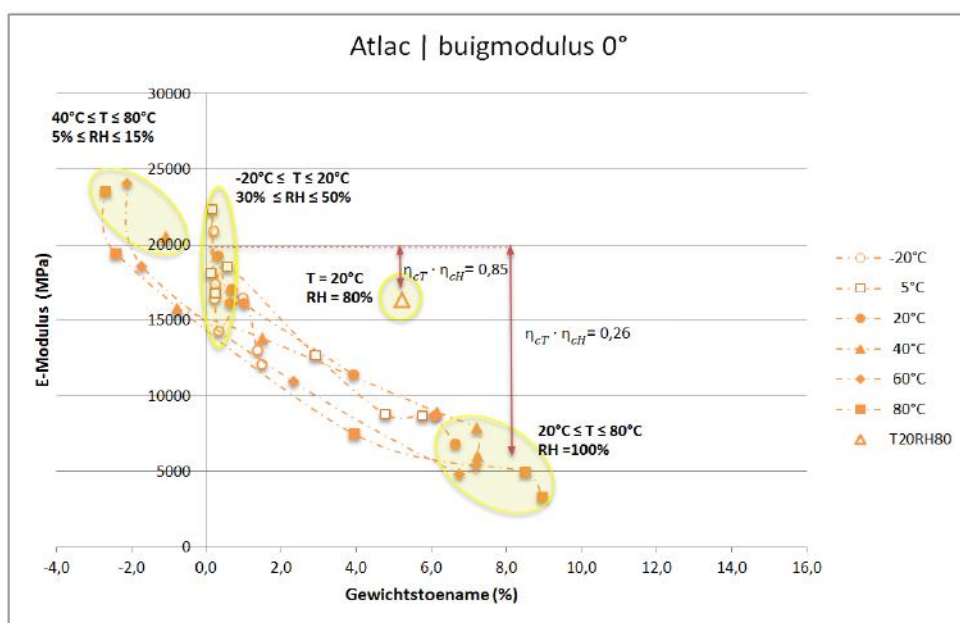
Grafiek 5.4.11, sterkte uitgezet tegen vochtopname Beyone



Grafiek 5.4.12, sterkte uitgezet tegen vochtopname Atlac



Grafiek 5.4.13, stijfheid uitgezet tegen vochtopname Beyone



Grafiek 5.4.14, stijfheid uitgezet tegen vochtopname Atlac

Bij een droge, warme omgeving worden de proefstukken lichter, wat duidt op vochtuittrekking, en de proefstukken worden sterker en stijver. Na mate de omgeving vochtiger wordt, nemen de sterkte en stijfheid af. Voor de Beyone is de sterkte-afname van kamerdroog naar 100% luchtvochtigheid een factor 0,42. Bij Atlac is deze afname een factor 0,49. De stijfheidsafname voor Beyone van kamerdroog naar 100% luchtvochtigheid is een factor 0,21 en voor Atlac 0,26.

Bij proeven met monsters die één maal langdurig onder water zijn gezet en daarna *oven* gedroogd zijn, zijn de mechanische eigenschappen ongeveer gelijk aan monsters in *kamerdroge* omstandigheden. De terugval in mechanische eigenschappen na de eerste nat-droog cyclus, duidt op beginnende onthechting. De resultaten van de mechanische

eigenschappen van de natte proefstukken haaks op de vezelrichting ondersteunen dit inzicht. Voor de exacte meetgegevens zie bijlage E.

6. Conclusies & Discussie

6.1 Degradatie door UV-straling, Slijtage, Chemicaliën en Verrotting

Tijdens het literatuuronderzoek werd al snel duidelijk dat degradatie door UV-straling, slijtage en chemicaliën bij composieten uit vlasvezels (of andere natuurvezels) en hars uit bio-olie niet wezenlijk anders is dan bij composieten uit glas en hars uit aardolie. Er zijn namelijk weinig wezenlijke verschillen tussen beide harsen, en het type vezels doet er niet echt toe. Voor alle drie geldt bovendien dat slijtlaag en/of coating een extra beschermende rol kan spelen en dat deze goed kan hechten aan harsen gemaakt van beide soorten oliën.

Bacteriën en schimmels blijken het enige andere degradatiemechanisme waarmee terdege rekening gehouden moet worden bij vlascomposieten in vochtige omstandigheden. Vanwege de vochtige omgeving kan verrotting ontstaan, waardoor de mechanische eigenschappen van het composiet af kunnen nemen.

6.2 Invloed Temperatuur, Vocht, Kruip en Vermoeiing

Uit de resultaten van literatuuronderzoek en het experimenteel onderzoek zijn conversiefactoren voor de invloeden van temperatuur, vocht, tijd en vermoeiing worden vastgesteld.

6.2.1 Temperatuur

Uit de resultaten van het experimenteel onderzoek blijkt dat temperatuur op zich niet veel invloed heeft op de mechanische eigenschappen van het composiet. De temperatuur is vooral van invloed op de snelheid waarmee vocht het composiet binnendringt. Daarom is de voor vlas dezelfde conversiefactor als voor glas gekozen.

6.2.2 Vocht

Vocht heeft grote invloed op de mechanische eigenschappen van vlasvezelversterkt composiet. Hoe meer vocht er in het composiet treedt, hoe groter de sterkte- en stijfheidsafname. In ovendroge omstandigheden kan er vocht uittreden, waardoor de sterkte en stijfheid toenemen. De conversiefactor voor kamerdroge omstandigheden is per definitie 1,0. Voor wisselend nat/droog en nat zijn de factoren volgend uit het experimenteel onderzoek aangehouden.

6.2.3 Kruip / tijd

Over lange duur effecten voor sterkte en stijfheid van vlasvezels is niets te vinden in de literatuur. Omdat de kortdurende variabele belasting dominant is bij licht gewicht constructies zullen deze ook van beperkt belang zijn.

De conversiefactoren voor hout kunnen als **indicatie voor vlasvezels** worden aangehouden.

6.2.4 Vermoeiing / dynamische modulus

Op basis van literatuur is een conversiefactor voor de dynamische modulus voor UD vlascomposiet gevonden welke overeenkomstig is met glas-composiet (CUR96).

De vermoeiingscurves voor composiet gaan uit van de (statische) sterkte voor 1 cyclus. Deze zijn voor vlasvezels aanmerkelijk lager dan voor glasvezels. Op basis van literatuur met verkennend vermoeiingsonderzoek blijkt het een veilige benadering te zijn om de helling van de vermoeiingscurves voor composieten met vlasvezels gelijk aan te houden als die van composieten met glasvezels.

De in de CUR 96 aanbevolen helling voor $R=-1$ bij ontbreken van specifieke meetgegevens is $k=-9$ voor glas-polyestercomposiet en $k=-10$ voor glas-epoxycomposiet.

6.3 Conversiefactoren

De conversiefactoren voor temperatuur, vocht, tijd en dynamische modulus zijn samengevat in de onderstaande tabel. Ter referentie zijn de conversiefactoren voor glasvezelversterkt kunststof opgenomen.

Factor		...vezel-VVK		Toelichting
Voor effect van	symbool	Glas referentie	Vlas	
Temperatuur	η_{cT}	0,9	0,9	Afwijkende sterkte (σ) & stijfheid (E) voor $T < T_{test}$. T_{range} : -25°C tot +50°C aangehouden, droge vasttestwaarden aangehouden
droog Vocht d/n nat	η_{cH}	1,0 0,9 0,8	1,0 0,9 * 0,5 0,25 $\sigma_{//}$ $E_{//}$	Afwijkende σ & E t.o.v. droog. d/n: vasttestwaarden RH=80% T=20°C aangehouden nat: vasttestwaarden onderwater, zonder oppervlakte coating aangehouden
droog Kruip d/n nat	η_{cC}	0,9	0,6 0,60 0,6 0,55 0,5 0,33 $\sigma_{//}$ $E_{//}$	Teruglopen σ & E onder blijvende belasting. t=50-100j aangehouden, vlas ontleend aan hout glas: $t^{-0,01}$ t in h; droog, droog/nat & nat vlas: $t^{-0,04}$ t in h; droog & droog/nat (suggestie)
Vermoeiing E	η_{cF}	0,9	0,9	Teruglopen E-modulus na meerdere belastingcycli. 1 tot 10.000 wisselingen aangehouden

Tabel 6.3.1, Conversiefactoren VVVK (en ter referentie GVVK)

Bij de invulling van bovenstaande tabel is uitgegaan van:

- vinyl esterhars Atlac® 430 of onverzadigde bio-polyester Beyone zonder styreen, uitgehard met een kobaltvrije Nouryact®, of gelijkwaardig;
- niet geconditioneerde, onbehandelde vlasvezels AmpliTex of gelijkwaardig;
- UD-legsels in laminaten (geen weefsels of matten).

* : Voor droog/nat is uitgegaan van een coating/slijtlaag rondom de gehele VVK-constructie wat vochttransport zodanig vertraagt, dat de relatieve vochtigheid (RV Eng.: RH) van de vlasvezels na instelling vanaf kamer-droge realisatieomstandigheden uiteindelijk weinig afwijkt rondom het jaargemiddelde van 80%.

6.4 Discussie

Alles wijst erop dat vocht de belangrijkste factor is bij natuurvezel composieten en dat vocht het grootste negatieve effect heeft op de mechanische eigenschappen van composiet. Om de vochtopname van de vezels tegen te gaan zijn er tal van

behandelingen. Maar de vraag is hoe goedkoop en milieuvriendelijke deze (chemische) behandelingen zijn. Vooral gezien het feit dat natuurvezels juist worden toegepast omdat ze milieuvriendelijker zouden zijn dan glasvezels.

7. Aanbevelingen

Voor de toepassing van niet geconditioneerde, onbehandelde UD vlasvezels in composiet draagconstructies die blijvend in gemiddelde vochtigheid staan van $RH = 80\%$ (buiten), wordt aanbevolen om:

- a) een kobaltvrije uitgeharde hars toe te passen;
- b) de vlasvezels een Duralin voorbehandeling te geven;
- c) de vlasvezels in niet gedroogde omstandigheden te verwerken in het composiet. De ideale verwerkingsomstandigheid bedraagt $RH = 80\%$ zijnde het jaargemiddelde van vocht buiten;
- d) een hars te selecteren (/ontwikkelen) die een goede hechting heeft (/compatibel is) met vlasvezels, al dan niet door tussenkomst van een (nog te ontwikkelen) sizing;
- e) het vlascomposiet rondom te voorzien van een waterdichte coating / slijtlaag en een goede hemelwaterafvoer (forse dwarsafschot en bij opsluiten van water tevens langsafschot);
- f) brandbloomstelling te beperken;
- g) aanvullend onderzoek te doen naar degradatie van Beyone bij $RH = 80\%$ in warme omstandigheden, alvorens het toe te passen in vochtige omstandigheden. Bijvoorbeeld door een Duralin voorbehandeling te geven.

De redenen hiervoor zijn achtereenvolgens:

- a) dit omdat kobalt versnellers inactief worden in aanwezigheid van water wat is de ongedroogde vlasvezels zit;
- b) Duralin temperatuur voorbehandeling is bedoeld om bacterie- en schimmelkiemen te doden en daarmee verrotting te voorkomen, bovendien beperkt het de neiging om vocht op te nemen;
- c) gedroogde vlasvezels nemen later alsnog vocht op waarbij ze fors uitzetten;
- d) bij de beproefde (non bio / referentie) Atlac® wordt reeds een acceptabele hechting bij $RH = 80\%$ verkregen; matiger hechting kan zich uiten in de vochtconversiefactor;
- e) bij goed beschermen wordt de natuurlijke vochtfluctuatie die buiten plaatsvindt zo veel mogelijk gedempt in het vlascomposiet. Grote vochtfluctuaties in het composiet leidt tot mechanische degradatie. Bovendien wordt met beschermen degradatie door UV, slijtage en chemicaliën voorkomen voorkomen;
- f) vanaf 180°C vindt vezeldegradatie plaats; matrixdegradatie kan evenals bij GVVK (afhankelijk van de matrix) al bij lagere temperaturen plaatsvinden;
- g) Beyone proefstukken degradeerden in droge omstandigheden geen van allen, evenmin de 6 proefstukken bij $RH = 80\%$ en $T = 20^{\circ}\text{C}$. Beyone proefstukken onder water degradeerden bij hogere temperaturen degradeerden echter wel.

Aanbevolen wordt om de lange duur beproevingen voor VVVK naar reductie van de mechanische eigenschappen uit te breiden tot 10 jaar in combinatie met diverse bewaartemperaturen voor $RH = 60\%$, 80% en $99,9\%$. Daarnaast wordt monitoring van deze eerste VVVK brug aanbevolen.

De toepassing van VVVK draagconstructies die blijvend onder water (of $RH = 100\%$) staan, wordt vooralsnog afgeraden. Hiervoor is eerst verder onderzoek / ontwikkeling nodig.

Voordat VVVK draagconstructies worden toegepast met een groot aandeel aan permanente belasting, wordt aanbevolen om onderzoek te verrichten naar de lange duur effecten van VVVK.

8. Samenwerkende partijen

Machinefabriek Emmen gaat samen met composietbouwer/ingenieursbureau CTCgroup uit Hengelo in opdracht van Volker Wessels / Dierenpark Emmen een klapbrug bouwen, met een brugdek in de vorm van een bio-composiet sandwichconstructie. Gemeente en provincie ondersteunen dit innovatieve en duurzame project.

Aangezien bio-composiet niet eerder in een dergelijke toepassing is gebruikt heeft CTC samen met DSM en AKZO gezocht naar een geschikte bio-hars in combinatie met niet gedroogde vlasvezels. Vervolgens is door CTC een ontwerp gemaakt van de brugdek.

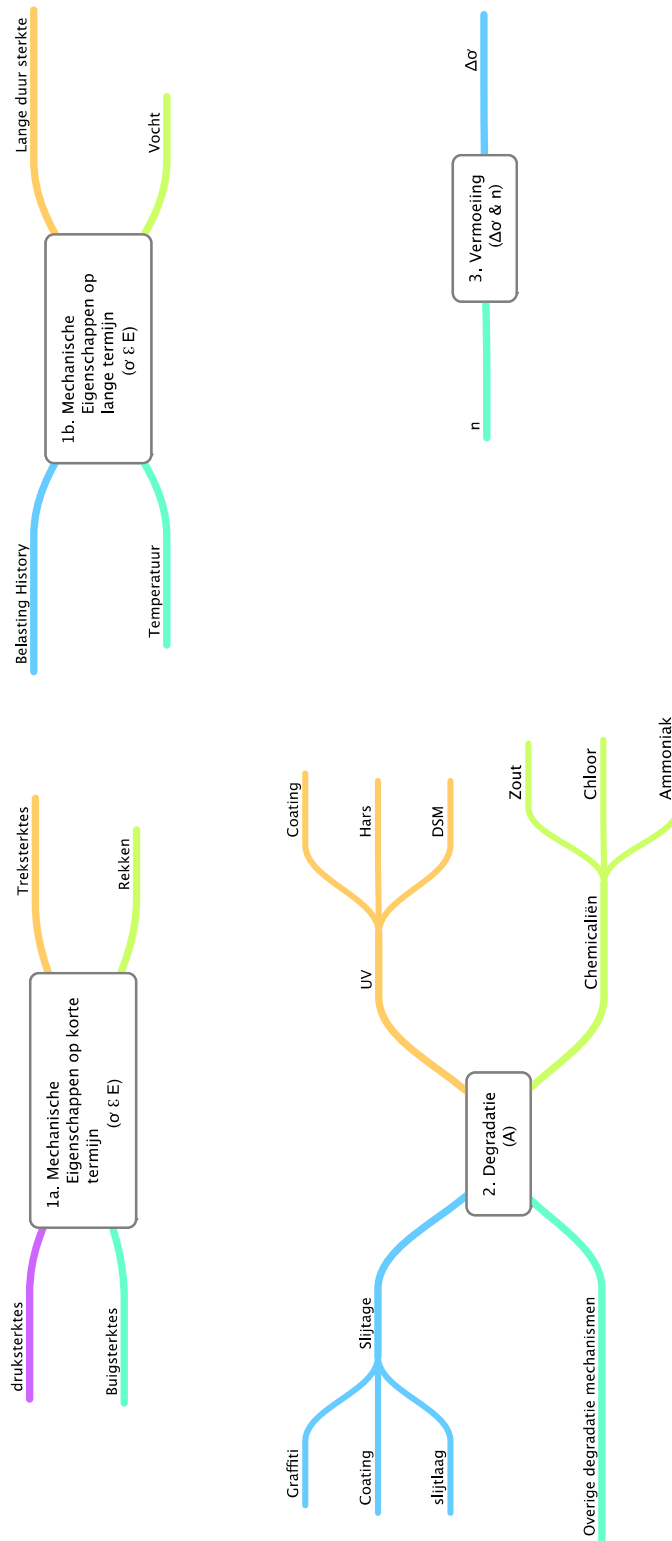
Omdat er geen gestandaardiseerde mechanische eigenschappen voor dit materiaal beschikbaar zijn moeten deze voor het ontwerp nog bepaald worden. Het onderzoeken van de korte duur sterktes, lange duur sterktes en degradatie is door Hogeschool Stenden en Windesheim, als een onafhankelijke partij worden uitgevoerd. Bovendien onderzoeken deze de milieubelasting van dit nieuwe materiaal.

Bibliografie

- Assarar M, S. D. (2011). *Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres*. Materials and Design, Vol. 32, p. 788-795.
- Azwa ZN, Y. B. (2013). Review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials and Design* 47, (pp. 424-442).
- Baley C, B. F. (2006). *Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre-polyester resin*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 37, P. 1626-1637.
- Baley C, L. B. (2012). Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their composites. *Composites Part A*, (pp. 1226-1233).
- Bismarck, A., Aranberri-Askargorta, I., & Springer, J. (2002). *Surface characterization of flax, hemp and cellulose fibers; Surface properties and water uptake behavior*.
- Bledzki A.K & Sperber V.E. (2002). *Natural Wood And Fibre Reinforcement In Polymers*. Ismithers Rapra Publishing.
- Bledzki A.K, G. J. (1999). *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Progress in Polymer Science, Vol. 24, p. 221-274.
- Boshove T. (2014). *Natuurvezels in een Structureel Composiet*. Windesheim.
- Brandenburg N.B., H. J. (sd). Equilibrium moisture content of fiber flax.
- Cerchiara T. (2009). *Use of spanish broom (Spartium junceum L.) canvas as a painting support: Evaluation of the effects of environmental conditions*.
- CUR-Comissie C124. (2003). *CUR 96 Achtergrondrapport*.
- CUR-Commissie C 124. (2003). *CUR 96 VVK in civiele draagconstructies*.
- Dicker M.P.M. (2013). *Characterization of composites based on natural and glass fibers obtained by vacuum infusion*.
- Dicker M.P.M. (2013). *Green composites: A review of material attributes and complementary Applications*.
- DSM. (sd). *DSM Brochure Boyone 1*.
- EN1995-1. (2005). *'Eurocode 5: Ontwerp en berekening Houtconstructies'*.
- Fiore V, V. A. (2012). *Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications*. Journal of Composite Materials, p. 1-8.
- Gassan J. (2002). *A study of fibre and interface parameter affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, p. 369-374.
- Gassan j, B. A. (1997). *Effect of Moisture Content on the Properties of Silanized Jute-Epoxy Composites*. Polymer Composites, Vol. 18, p. 179-184.
- Goodman S.H, D.-K. H. (2013). *Handbook of Thermoset Plastics (Third Edition)*. William Andrew.
- Ignas, V., van Acker, J., Lilholt, H., Hughes, M., Balye, C., Davies, P., et al. (2012). *Flex and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry*. Paris: JEC.
- Ignas, V., van Acker, J., Lilholt, H., Hughes, M., Balye, C., Davies, P., et al. (2014). *Flex and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry*. Paris: JEC.
- Islam N. (2013). *Chemical Properties of Flax Fiber*. Daffodil International University.
- J.Gassan, I. M. (1000). Influence of fiber structure modification on the mechanical properties of flax fiber-epoxy composites. *Mechanics of composite Materials vol 35, No 5*, (pp. 435-440).
- Loos A.C, S. G. (1981). *Moisture Absorption of Polyester-E Glas Composites*. University of Michigan.
- Lubin G. (sd). *Handbook of Composites*. Van Nostrand Reinhold Company.

- Manfredi L.B. (2006). *Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composites with natural fibres*.
- Meyers M.A, C. K. (1998). *Mechanical Behavior of Materials*.
- Najafi S.K, S. H. (2008). *Effects of Water Absorption on Creep Behavior of Wood*. Journal of Composite Materials, Vol 42, p. 993-1002.
- Nano-polymer composites: Green composites*. (sd).
- Newman R.H. (2009). *Auto-accelerative water damage in an epoxy composite reinforced with plain-weave flax fabric*. Composites: Part A 40, 1615-1620.
- Nijhof, A. (2003). *Vezelversterkte kunststoffen - Mechanica en ontwerpen*. VSSD.
- Nijssen, R. (2013). *Composieten - basiskennis*. Hogeschool InHolland.
- Normcommissie 310 061 "Kunststoffen". (2003). *NEN-EN-ISO-899-1*.
- Nunez A.J, M. M. (2004). *Analysis of the Creep Behavior of Polypropylene-Woodflour Composites*. Polymer Engineering And Science, Vol 44, p.1594-1603.
- Rao R, C. M. (1983). *A Fickian Diffusion Model for Permeable Fibre Polymer Composites*. Reinforced Plastics and Composites Vol. 2, 289-299.
- Semsazadeh M.A. (1986). *Fiber matrix interactions in jute reinforced polyester resin*. Polymer Composites, Vol.7, 23-25.
- Shah D, S. P. (2012). *Surface treatment of Natural fibres: the new 'twist' in yarn preparation and optimization for composites applicability*. Journal of Material Science, Vol. 47, p. 2700-2711.
- Stamboulis A. (2000). *Environmental Durability of Flax Fibres and their Composites based on Polypropylene Matrix*.
- Technologies and Products of Natural Fibre Composites*. (2008).
- Verleg, R. (sd). DSM.
- Wang W, S. M. (2006). *Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites*. Composites Science and Technology, Vol.66, p. 379-386.
- Wingerde, Delft, & e.a. (2002). *Bladeco eindrapport - Windturbinebladen van ecologische materialen*. TUDelft.
- Wong S., S. R. (2007). *Creep behaviour of biopolymers and modified flax fibre*, (pp. 131-146).
- Zafeiropoulos N.E. (2011). *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance*. Woodhead Publishing.

Bijlage A: Mindmap



Bijlage B: Conversiefactor kruip: experimenteel onderzoek?

De mechanische eigenschappen zijn eigenschappen die betrekking hebben op de sterkte, rekken en elasticiteit. Deze eigenschappen kunnen verder onderverdeeld worden in de korte en lange termijn eigenschappen. De korte termijn eigenschappen zijn onder anderen treksterktes, druksterkte, buigsterktes en rekken. Deze zijn niet in dit onderzoek behandeld.

Bij de lange duur aspecten kijkt men naar de verschillende factoren die in de loop van de tijd invloed hebben op de sterktes, rekken en elasticiteit. Deze factoren worden in de CUR 96 ook wel de conversiefactoren genoemd. Deze factoren zijn te onderscheiden in temperatuur, vocht, kruip (lange duur vervorming én sterkte) en vermoeiing (lees dynamische modulus). Volgens de CUR96 hebben deze factoren invloed op composiet bestaande uit glasvezels. In hoeverre dit ook het geval is voor vlasvezels is onderwerp van dit onderzoek.

Omdat de vermoeiing zoals beschreven bij de conversiefactoren handelt over materiaalstijfheid en niet over sterkte, wordt het hier als dynamische modulus omschreven. Voorts wordt onderscheid gemaakt tussen kruip in de betekenis van lange duur vervorming en lange duur sterkte.

Er is experimenteel onderzoek gedaan naar de conversiefactoren voor vocht en temperatuur. Voor de dynamische modulus ("vermoeiing") voor vlascomposieten is reeds onderzoek aanwezig in de literatuur.

Er is geen relevante literatuur gevonden over kruip van vlascomposieten. Vanwege het beperkte belang (weinig permanente belasting) is voor de conversiefactor voor kruip nog geen experimenteel onderzoek verricht. Er is voornamelijk gebruik gemaakt van literatuur van een ander cellulose materiaal te weten hout. Onderstaand is al kort omschreven hoe men experimenteel onderzoek zou kunnen doen naar conversiefactor voor kruip onderverdeeld naar kruip vervorming en kruip breuk.

Kruip vervorming

Proefstukken tot 50% belasten (belasting gestuurd) van de maximale capaciteit. Daarbij vervormingsmetingen doen na 0, 1, 10, 100 & 1.000 uren.

De conversiefactor kan dan voor 1.000 uur (41 dagen) bepaald worden, en voor langere uren geëxtrapoleerd.

De 50% is gebaseerd op de gebruikelijke maximale belasting in de bruikbaarheidsgrenstoestand ten opzichte van de uiterste grenstoestand.

De belastingfactor is volgens EN 1990 $\gamma_c = 1,35$ voor (maatgevende) variabele belasting. CUR 96 geeft als materiaalfactor $\gamma_m = \gamma_{m,1} * \gamma_{m,2} = 1,35 * 1,2 = 1,62$ voor nagehard glascomposiet dat met vacuüm infusie is geproduceerd.

Daarmee volgt $\frac{1}{\gamma_c * \gamma_m} = \frac{1}{1,35 * 1,62} = 50\%$.

Lange duur sterkte / kruip breuk

20 proefstukken op gemiddelde waarde van de verwachte korte duur capaciteit belasten (belasting gestuurd) en wachten tot deze bezwijken. Van 10 proefstukken (50%) mag verwacht worden dat deze onmiddellijk bezwijken. De andere proefstukken geven informatie over de lange duur sterkte.

Deze proef ook uitvoeren bij de karakteristieke waarde van de verwachte korte duur capaciteit. Van 1 proefstuk (5%) mag verwacht worden dat deze onmiddellijk bezwijkt. De anderen geven eveneens informatie over de lange duur sterkte.

Bijlage C: Stappenplan laminaat maken

Voorbereiding

Stap	Activiteit
1.	Tafel klaarzetten
2.	Tafel schoonmaken met aceton
3.	Vacuümnetje op de tafel leggen
4.	Tape op de rand van de tafel bevestigen
5.	Kraantje op de hoek bevestigen voor het vacuüm zuigen
6.	Aan de andere kant van het kraantje een oog door middel van tape maken om vouwen te voorkomen bij het vacuümzuigen.
7.	Doorzichtige folie eroverheen (zo strak mogelijk)
8.	Pomp aanzetten
9.	Pomp weer uitzetten
10.	Vouwen wegwerken
11.	Pomp weer aan (Dit alles hierboven is bedoeld om het laminaat makkelijk van de tafel te krijgen. Hierdoor ben je geen wax nodig)

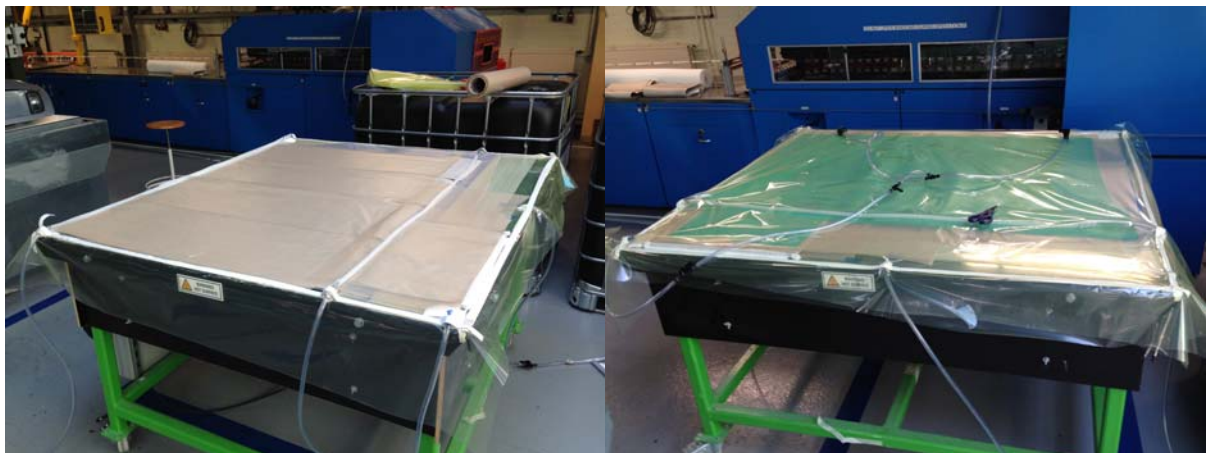
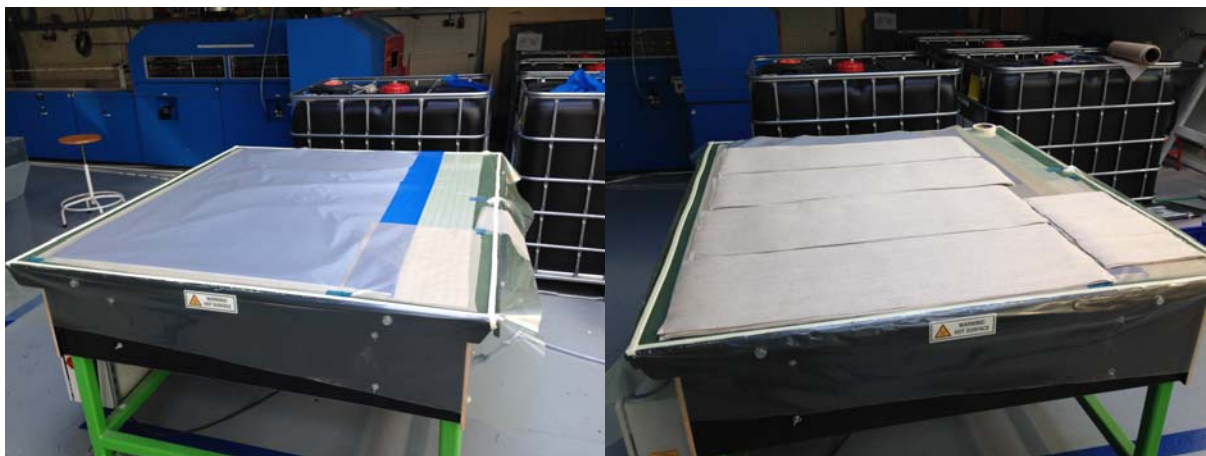
Uitvoering

Stap	Activiteit
12.	Gaas op maat knippen
13.	Gaas op de tafel positioneren (dit bevordert de stroming van de hars)
14.	Kartonfolie bovenop het netje positioneren (bedoeld om het laminaat niet te laten hechten aan het gaas, het gaas wil je namelijk niet meenemen in de mechanische eigenschappen)
15.	Kartonfolie vast plakken
16.	Glasvezel positioneren
17.	Kartonfolie eroverheen en vastplakken
18.	Gaas op maat knippen en erop leggen
19.	Verdeelslang op maat knippen
20.	Verdeelslang aan gewone slangen koppelen
21.	Verdeelslang vast maken doormiddel van plakband rondom de gewone slangen
22.	Gewone slangen dicht knippen doormiddel van tangen
23.	Op alle hoekpunten van de tafel een slang bevestigen
24.	Gaas in de hoekslangen ((dit is ervoor bedoeld om de hars af te laten remmen)
25.	Schuim in de hoeken (dit is ervoor bedoeld om de hars af te laten remmen)
26.	Doorzichtige folie eroverheen
27.	Hoekslangen aan elkaar bevestigen
28.	Hoekslangen koppelen aan vacuüm
29.	Vacuüm erop
30.	Vouwen wegwerken
31.	Controleren of het folie luchtdicht is

Injectie

Stap	Activiteit
32.	Emmers klaarzetten voor de mengsels
33.	Verhouding bepalen verschillende componenten (hars/peroxide/accelerator/inhibitor)
34.	Klaarzetten verschillende componenten
35.	Bij elkaar voegen van de hars, inhibitor en accelerator in de emmers
36.	3 minuten roeren
37.	Peroxide bijvoegen
38.	Tijd noteren (peroxide)
39.	5 min roeren
40.	Indien de hars schuimt 5 min wachten
41.	Emmers klaarzetten
42.	Slangen in emmers vastzetten doormiddel van tangen
43.	Dicht geknepen slangen loslaten (injectie begint)

Fig. C.1 Stappenplan laminaat maken
(Boshove T, 2014)



Bijlage D: Voorbereiding van proefstukken

Nadat het laminaat gedurende een nacht bij omgevingsomstandigheden (18°C) zijn uitgehard, zijn er proefstukken van 100 x 150mm gesneden. Vervolgens zijn de proefstukken gecodeerd, waarbij de A voor Atlac 430 staat en B voor Beyone en het 'v' geeft aan of ze wel of niet in een waterbad liggen.

Beyone						
Tijd (dagen)	1	8	12	21	28	60
Temperatuur (°C)						
-20	B1	B2	B3	B4	B5	B6
5	B7	B8	B9	B10	B11	B12
20	B13	B14	B15	B16	B17	B18
40	B19	B20	B21	B22	B23	B24
60	B25	B26	B27	B28	B29	B30
80	B31	B32	B33	B34	B35	B36

Tabel D.1 Overzicht droge Beyone proefstukken

Atlac 430						
Tijd (dagen)	1	8	12	21	28	60
Temperatuur (°C)						
-20		A1	A2	A3	A4	A5
5		A6	A7	A8	A9	A10
20		A11	A12	A13	A14	A15
40		A16	A17	A18	A19	A20
60		A21	A22	A23	A24	A25
80		A26	A27	A28	A29	A30

Tabel D.2 Overzicht droge Atlac proefstukken

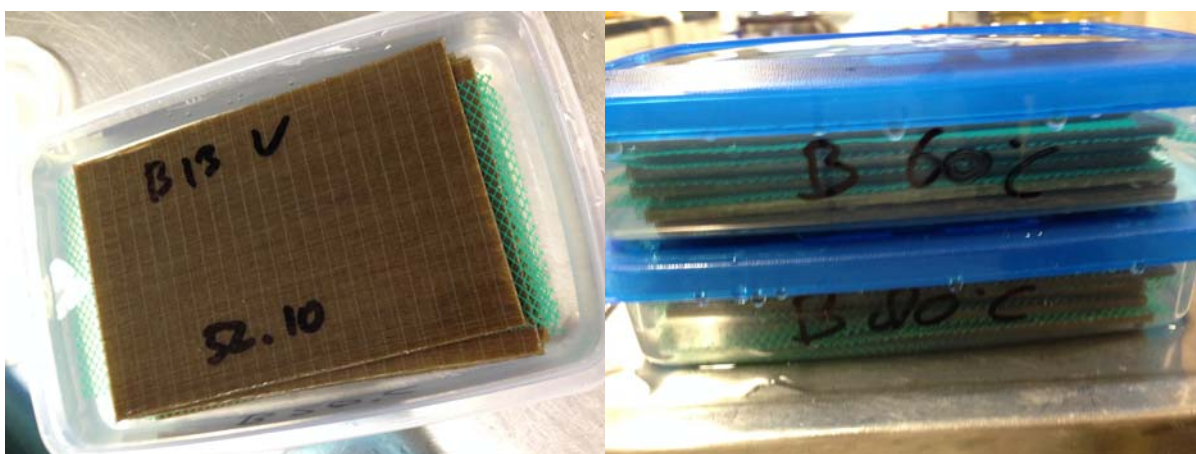
Beyone						
Tijd (dagen)	1	8	12	21	28	60
Temperatuur (°C)						
-20	B1v	B2v	B3v	B4v	B5v	B6v
5	B7v	B8v	B9v	B10v	B11v	B12v
20	B13v	B14v	B15v	B16v	B17v	B18v
40	B19v	B20v	B21v	B22v	B23v	B24v
60	B25v	B26v	B27v	B28v	B29v	B30v
80	B31v	B32v	B33v	B34v	B35v	B36v

Tabel D.3 Overzicht natte Beyone proefstukken

Atlac 430						
Tijd (dagen)	1	8	12	21	28	60
Temperatuur (°C)						
-20	A1v	A2v	A3v	A4v	A5v	A6v
5	A7v	A8v	A9v	A10v	A11v	A12v
20	A13v	A14v	A15v	A16v	A17v	A18v
40	A19v	A20v	A21v	A22v	A23v	A24v
60	A25v	A26v	A27v	A28v	A29v	A30v
80	A31v	A32v	A33v	A34v	A35v	A36v

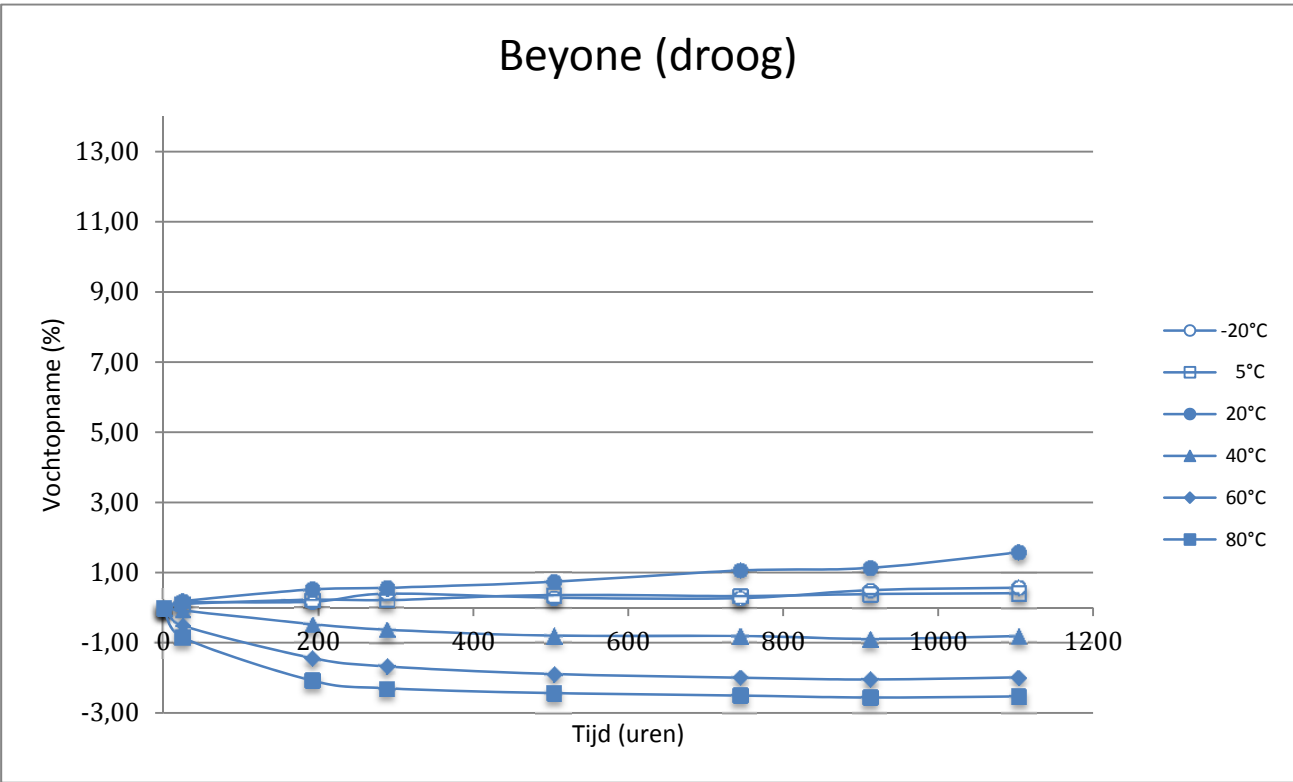
Tabel D.4 Overzicht natte Atlac proefstukken

De proefstukken die in een waterbad gelegd waren, zijn langs de zijkanten gecoat met Atlac 580 ACT, zodat er langs de snijvlakken geen water direct bij de vezels kan. Vervolgens zijn de proefstukken in een set van 6 in een waterbad of droog gelegd bij verschillende temperaturen. Alleen bij de droge Atlac proefstukken ontbrak een proefstuk, waardoor er geen proefstuk was om de eigenschappen na 1 dag te meten.

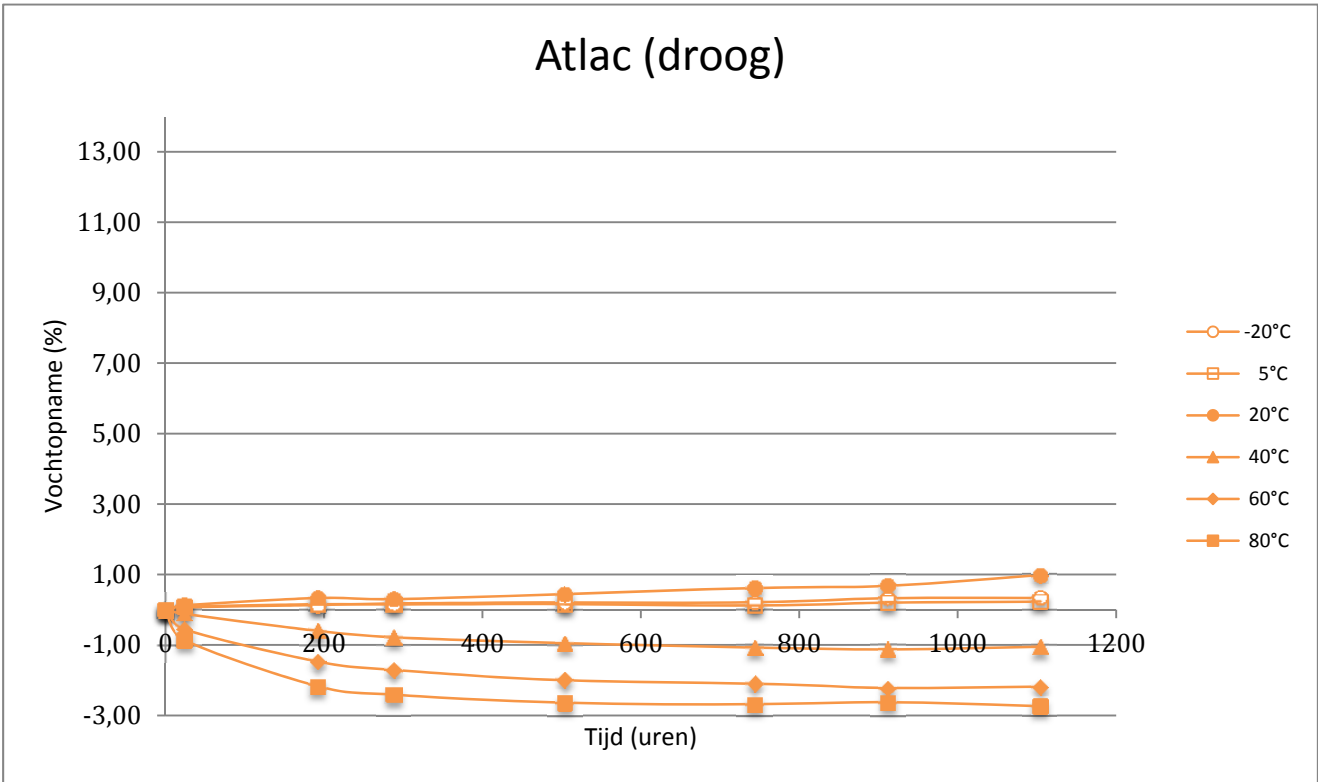


Bijlage E: Resultaten experimenteel onderzoek

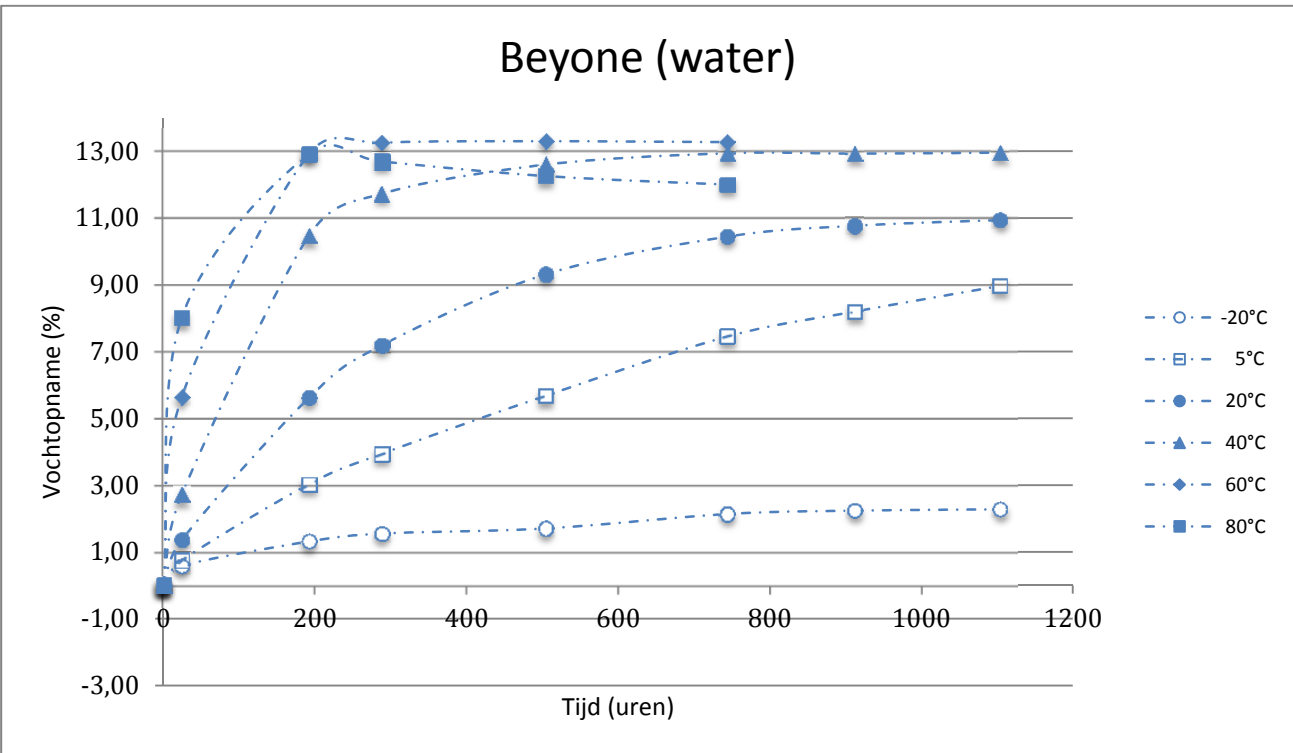
Vochtopname door de tijd



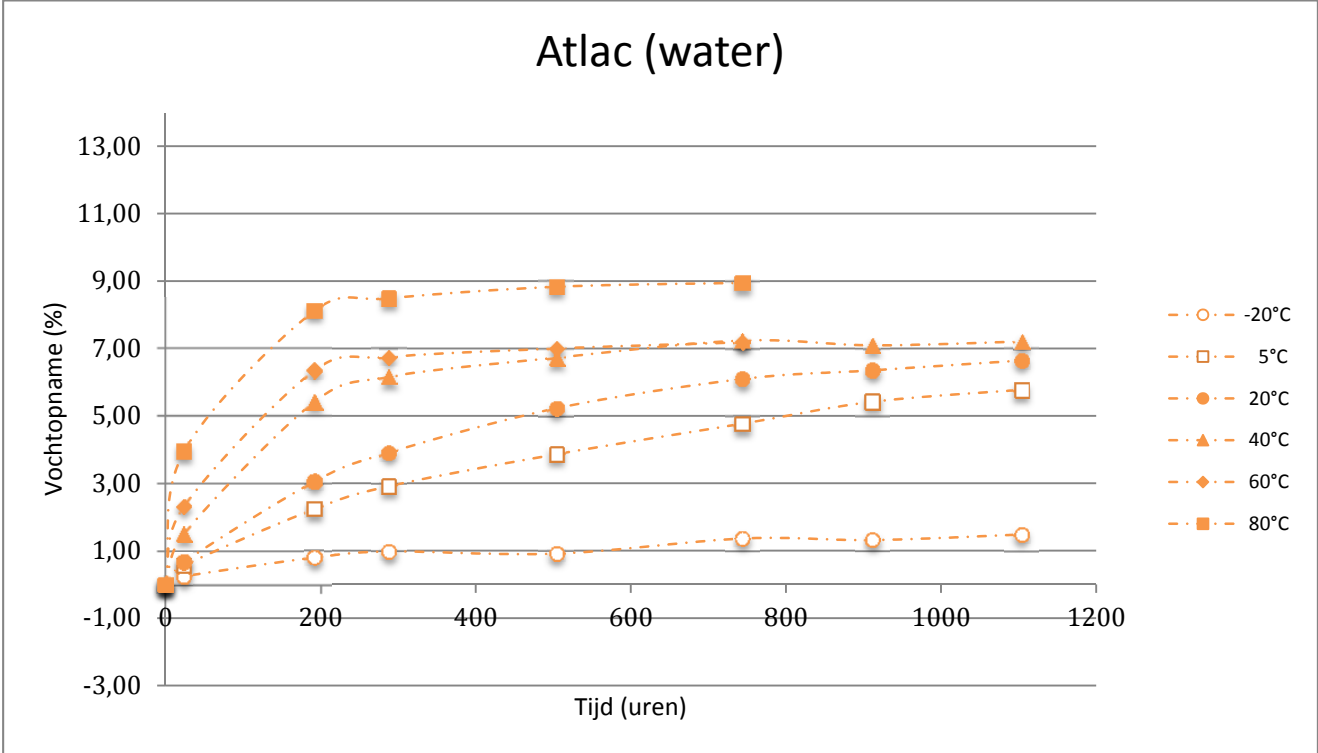
Grafiek E.1 Beyond vochtopname bij droge proefstukken bij verschillende temperaturen



Grafiek E.2 Atlac vochtopname bij droge proefstukken bij verschillende temperaturen

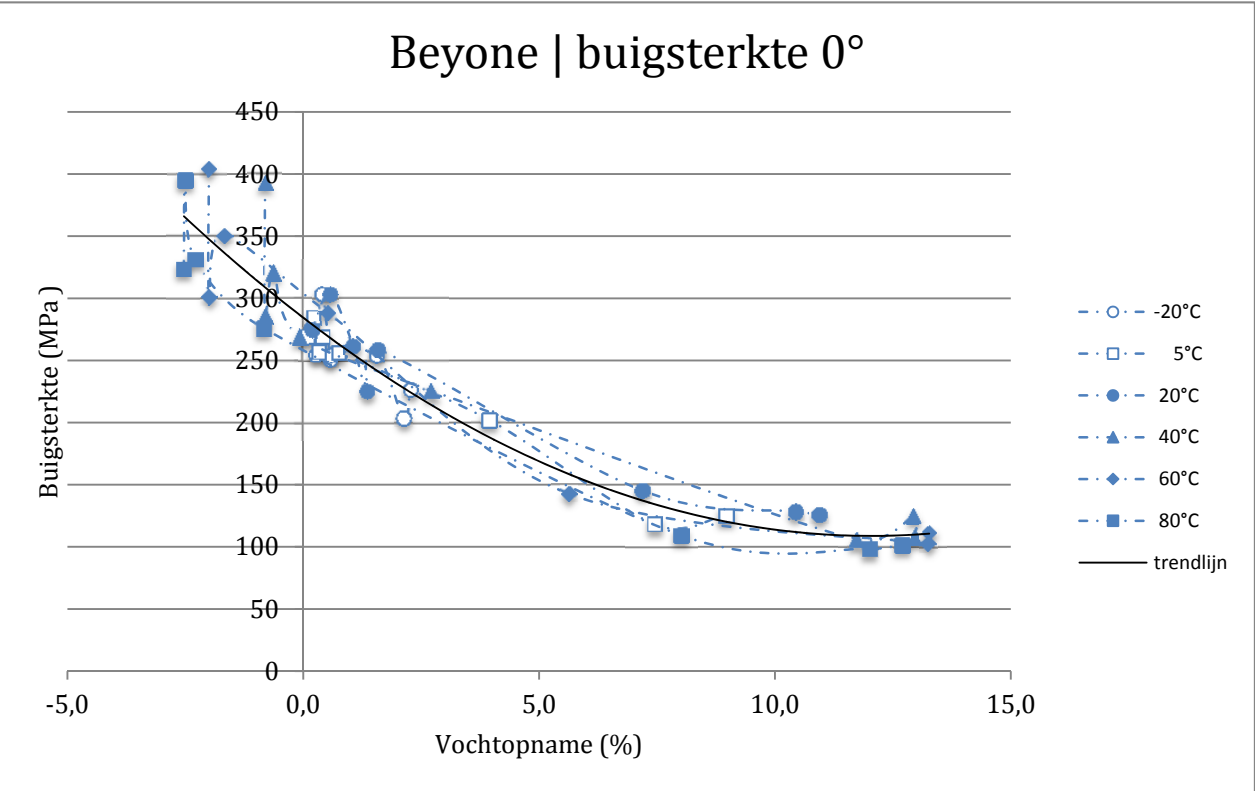


Grafiek E.3 Beyond vochtopname bij natte proefstukken bij verschillende temperaturen

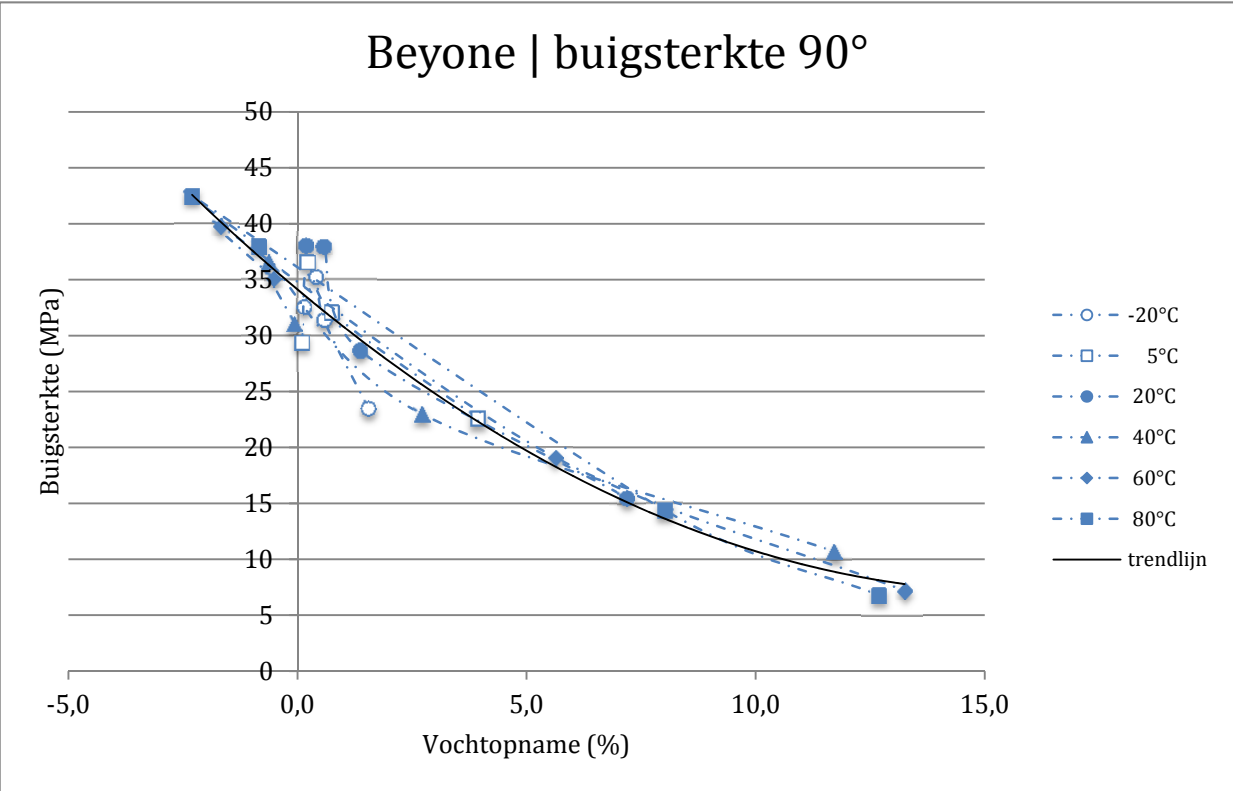


Grafiek E.4 Atlac vochtopname bij natte proefstukken bij verschillende temperaturen

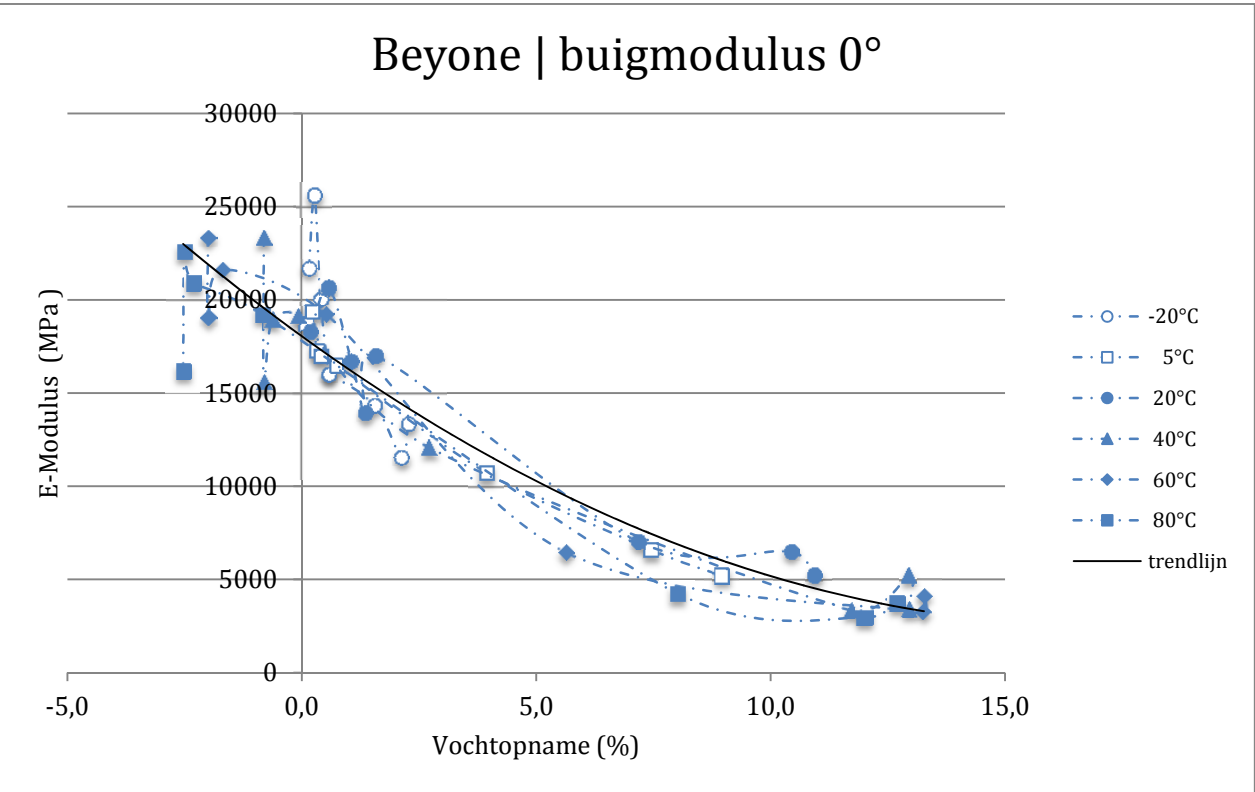
Invloed vocht op sterkte en stijfheid Beyone



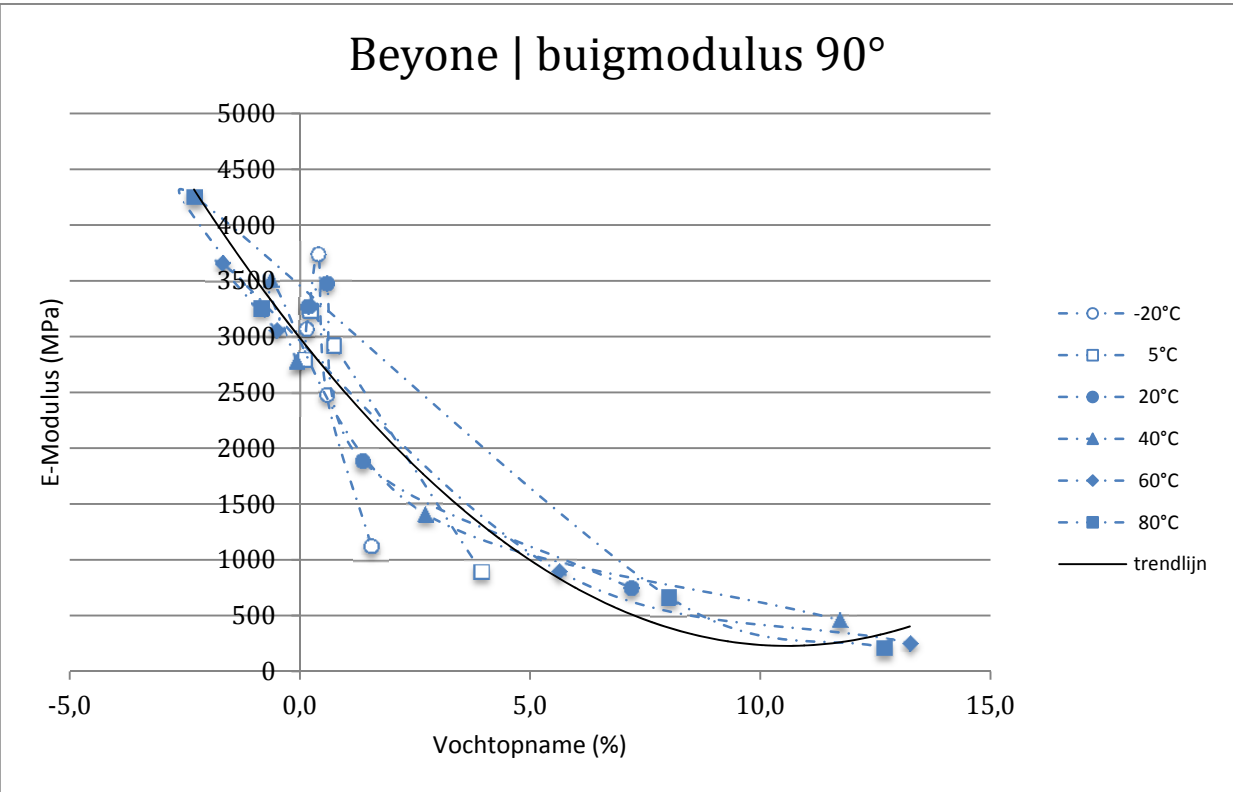
Grafiek E.5 Beyone buigsterkte 0° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen



Grafiek E.6 Beyone buigsterkte 90° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen

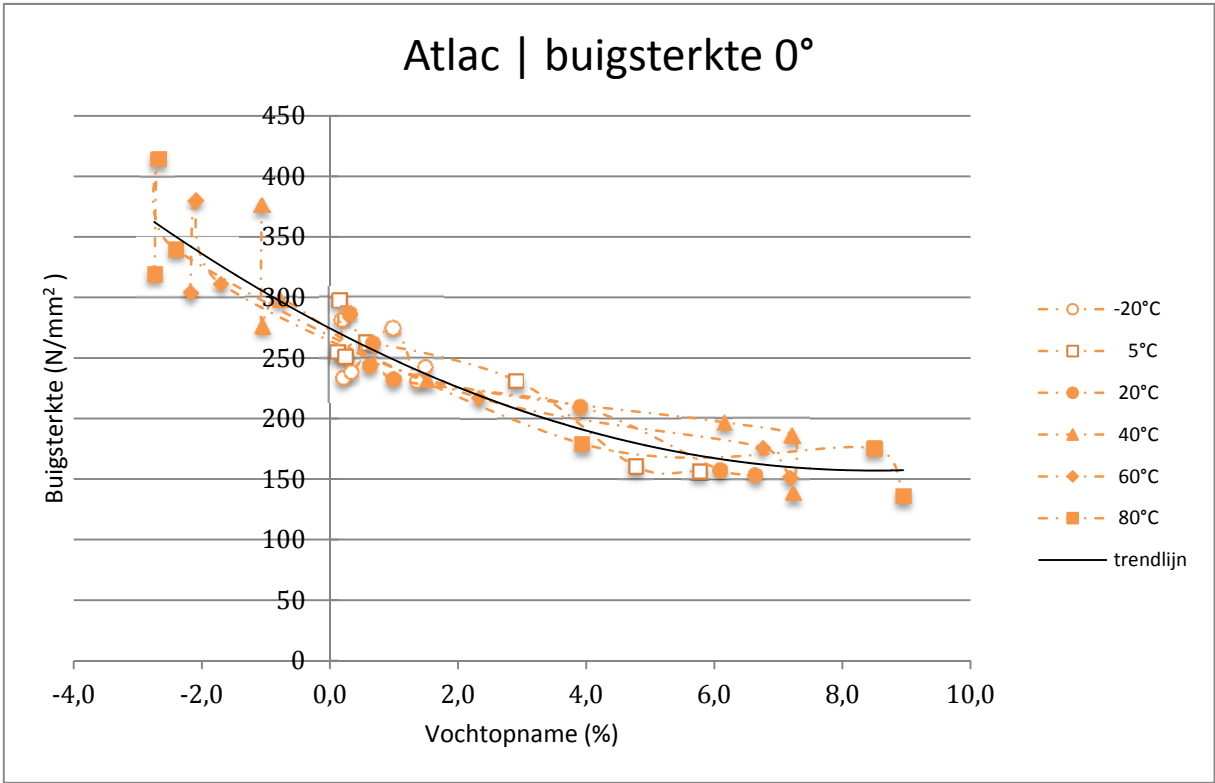


Grafiek E.7 Beyone buigmodulus 0° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen

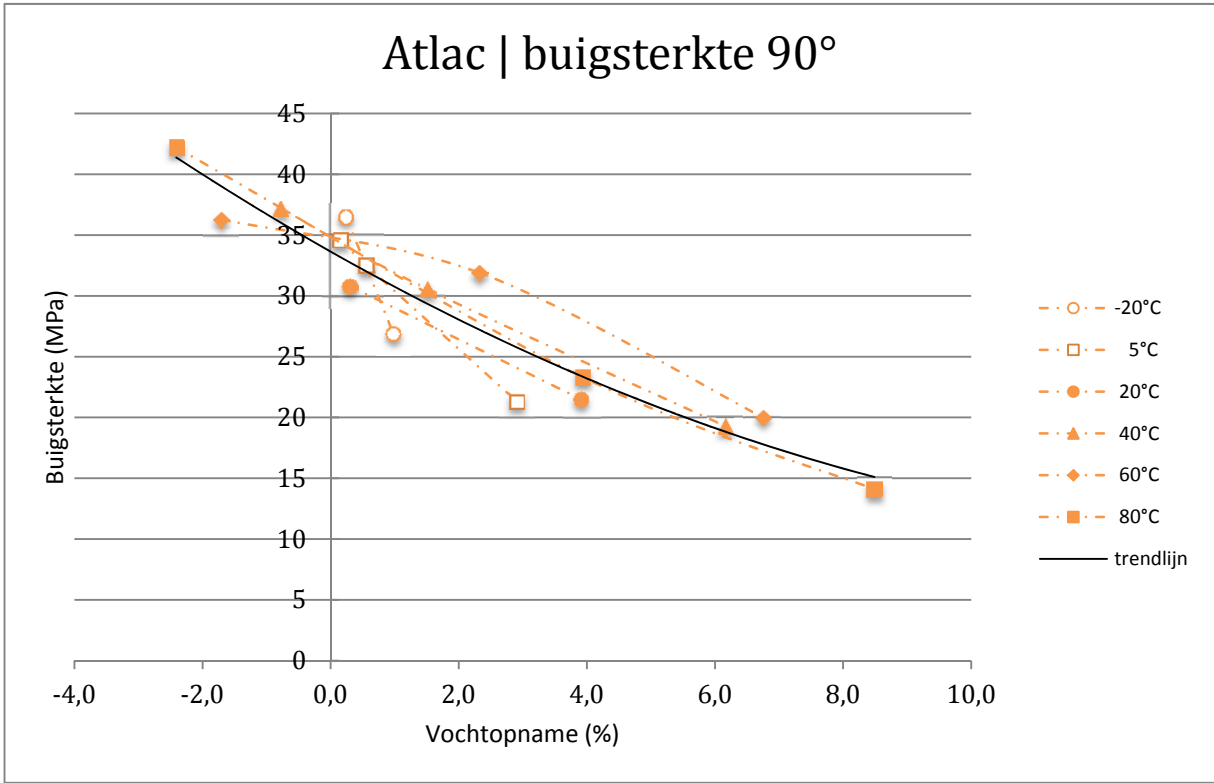


Grafiek E.8 Beyone buigmodulus 90° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen

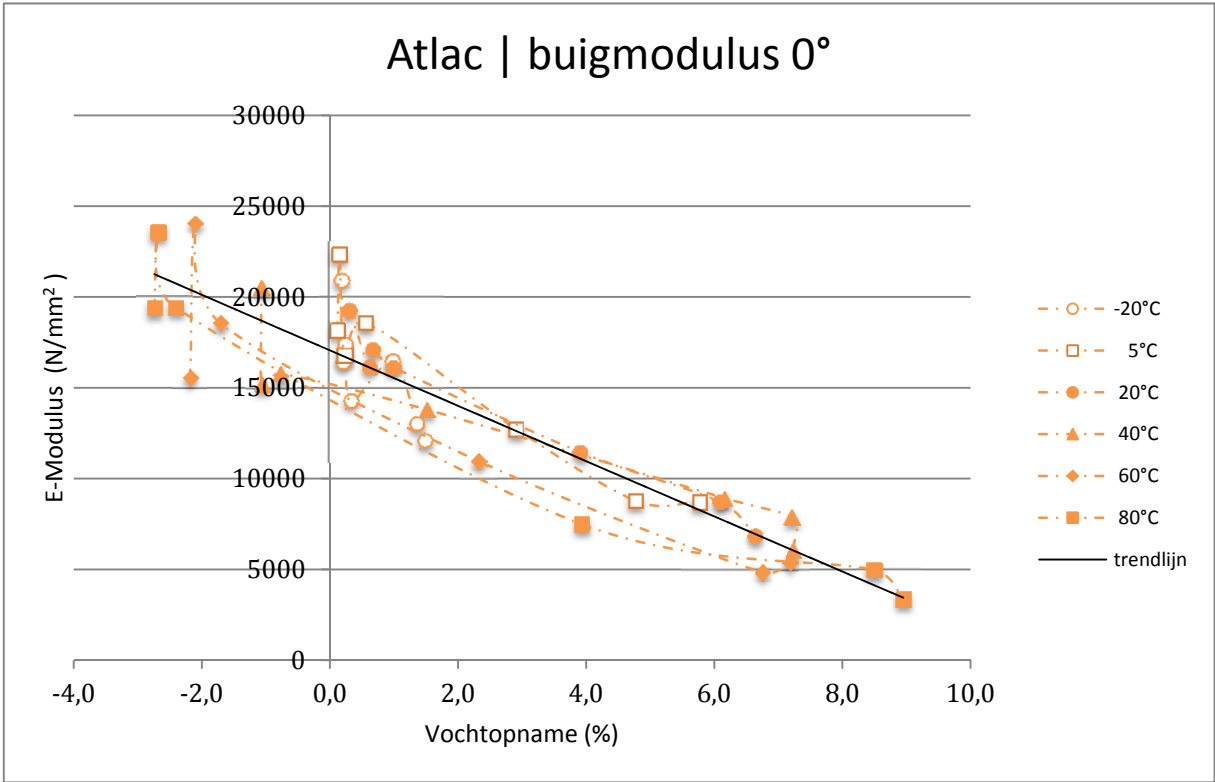
Invloed vocht sterkte en stijfheid Atlac 430



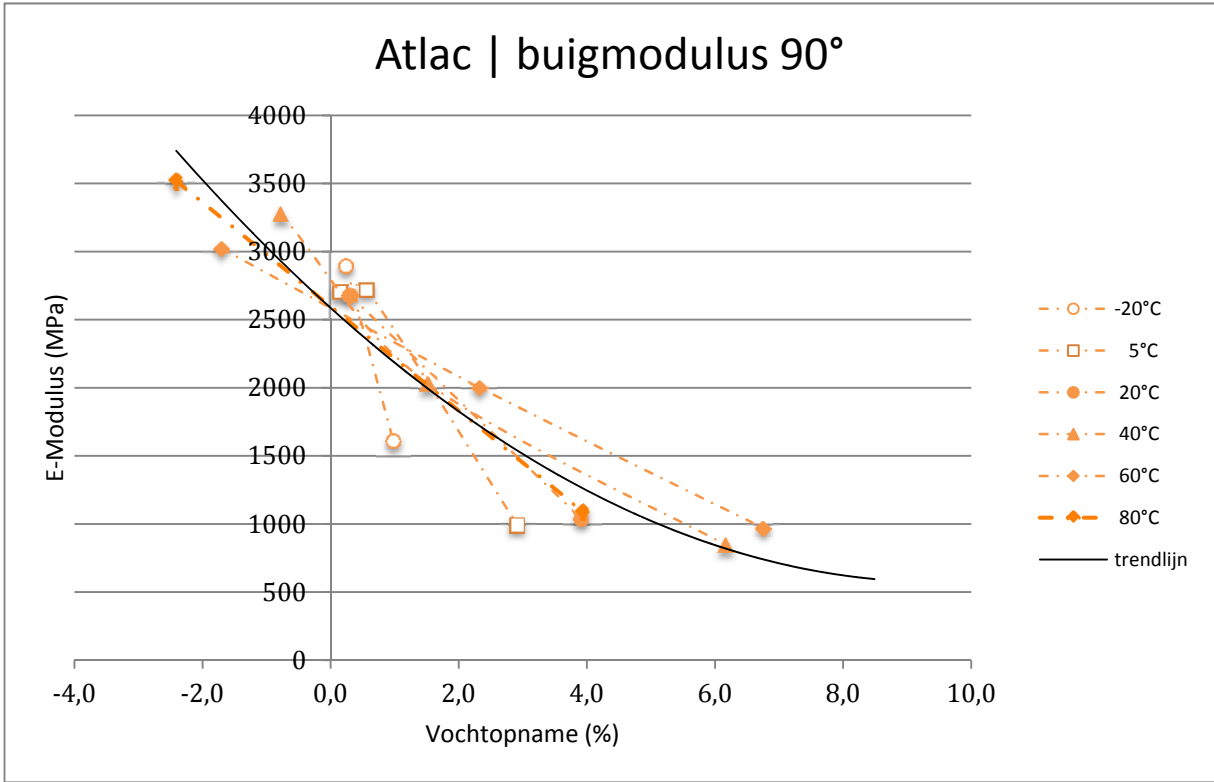
Grafiek E.9 Atlac buigsterkte 0° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen



Grafiek E.10 Atlac buigsterkte 90° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen



Grafiek E.11 Atlac buigmodulus 90° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen



Grafiek E.12 Atlac buigmodulus 90° vs. vochtopname bij verschillende temperaturen

Ruwe data

Atlas in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
-20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,24	0,03	253,9	17394	36,5	2893
	192	0,80	0,12				
	288	0,98	0,13	275,0	16475	26,9	1609
	504	0,91	0,05				
	744	1,36	0,07	231,4	13010		
	912	1,32	0,05				
	1104	1,48	0,03	242,8	12109		
Beyone in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
-20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,58	0,04	254,5	16023	31,4	2482
	192	1,31	0,03				
	288	1,55	0,08	254,4	14362	23,5	1128
	504	1,70	0,09				
	744	2,13	0,08	203,7	11553		
	912	2,23	0,05				
	1104	2,27	0,13	226,8	13351		
Atlas							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
-20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,07	0,05				
	192	0,13	0,06				
	288	0,18	0,04	281,70	20912	33,3	2825
	504	0,21	0,09				
	744	0,21	0,02	234,00	16423		
	912	0,33	0,02				
	1104	0,33	0,06	238,50	14322		
Beyone							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
-20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,15	0,05	275,0	21685	32,6	3070
	192	0,17	0,05				
	288	0,40	0,34	303,6	20021	35,3	3739
	504	0,28	0,14				
	744	0,27	0,15	254,8	15618		
	912	0,50	0,13				
	1104	0,57	0,03	250,9	16021		
Atlas in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
5°C	0	0,00	0,00				
	24	0,56	0,12	262,8	18598	32,5	2724
	192	2,24	0,32				
	288	2,91	0,35	231,3	12723	21,3	994
	504	3,86	0,52				
	744	4,77	0,49	160,6	8796		
	912	5,42	0,57				
	1104	5,77	0,53	156,4	8702		
Beyone in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
5°C	0	0,00	0,00				
	24	0,74	0,09	256,6	16484	32,1	2923
	192	3,03	0,21				
	288	3,94	0,26	202,1	10727	22,6	894
	504	5,67	0,34				
	744	7,45	0,33	118,1	6597		
	912	8,20	0,26				
	1104	8,96	0,24	125,2	5195		
Atlas							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
5°C	0	0,00	0,00				
	24	0,08	0,03				
	192	0,15	0,07				
	288	0,15	0,05	298,20	22363	34,6	2705
	504	0,16	0,05				
	744	0,12	0,05	255,00	18151		
	912	0,20	0,06				
	1104	0,23	0,04	251,10	16792		
Beyone							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
5°C	0	0,00	0,00				
	24	0,10	0,04	269,0	18728	29,4	2798
	192	0,23	0,10				
	288	0,22	0,05	284,4	19363	36,6	3238
	504	0,36	0,15				
	744	0,33	0,12	257,3	17266		
	912	0,39	0,09				
	1104	0,41	0,08	268,8	16969		
Atlas in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,67	0,03	262,2	17085		
	192	3,05	0,14				
	288	3,91	0,17	209,8	11454	21,5	1041
	504	5,23	0,22				
	744	6,09	0,25	157,5	8719		
	912	6,35	0,20				
	1104	6,64	0,19	153,7	6830		
Beyone in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
20°C	0	0,00	0,00				
	24	1,36	0,05	225,5	13922	28,7	1886
	192	5,62	0,15				
	288	7,19	0,20	145,3	7016	15,5	747
	504	9,31	0,23				
	744	10,44	0,18	128,3	6492		
	912	10,77	0,16				
	1104	10,94	0,10	126,3	5235		
Atlas							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,12	0,04				
	192	0,33	0,03				
	288	0,30	0,02	286,80	19272	30,8	2679
	504	0,44	0,09				
	744	0,62	0,07	244,10	16177		
	912	0,68	0,04				
	1104	0,99	0,04	233,00	16133		
Beyone							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
20°C	0	0,00	0,00				
	24	0,18	0,05	274,4	18294	38,1	3277
	192	0,52	0,05				
	288	0,57	0,04	302,5	20664	38,0	3479
	504	0,74	0,01				
	744	1,06	0,03	261,5	16713		
	912	1,13	0,03				
	1104	1,58	0,05	258,6	17034		
Atlas in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
40°C	0	0,00	0,00				
	24	1,51	0,12	232,2	13804	30,5	2035
	192	5,41	0,20				
	288	6,16	0,15	196,9	8926	19,3	850
	504	6,73	0,10				
	744	7,23	0,21	138,9	6041		
	745	6,21	0,00				
	747	5,47	0,00	186,2	7892		
	767	2,80	0,00				
	936	-1,31	0,00				
	984	-1,35	0,00				
	1152	-1,31	0,00	231,1	13554		
Beyone in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
40°C	0	0,00	0,00				
	24	2,71	0,14	225,8	12090	23,0	1415
	192	10,47	0,25				
	288	11,72	0,26	105,8	3379	10,7	460
	504	12,60	0,12				
	744	12,94	0,11	125,1	5234		
	745	11,87	0,00				
	747	10,55	0,00	107,8	3447		
	767	7,30	0,00				
	936	-1,19	0,00				
	984	-1,19	0,00				
	1152	-1,08	0,00	233,3	14756		
Atlas							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
40°C	0	0,00	0,00				
	24	-0,12	0,01				
	192	-0,60	0,03				
	288	-0,78	0,03	299,10	15777	37,2	3278
	504	-0,95	0,02				
	744	-1,07	0,04	376,80	20559		
	745						
	747			277,00	15227		
	767						
	936						
	984						
	1152						
Beyone							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
40°C	0	0,00	0,00				
	24	-0,08	0,03	269,1	19144	31,1	2778
	192	-0,47	0,03				
	288	-0,63	0,02	320,6	18961	36,6	3513
	504	-0,80	0,04				
	744	-0,81	0,02	393,5	23202		
	745						
	747			285,6	15589		
	767						
	936						
	984						
	1152						
Atlas in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
60°C	0	0,00	0,00				
	24	2,32	0,05	217,3	10961	31,9	2004
	192	6,35	0,14				
	288	6,75	0,13	176,3	4835	20,0	972
	504	7,00	0,13				
	744	7,18	0,13	151,5	5390		
	745	5,95	0,08				
	747	4,36	1,01				
	767	0,51	0,20				
	936	-2,48	0,00				
	984	-2,42	0,03				
	1152	-2,33	0,10	244,6	15771		
Beyone in vocht							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
60°C	0	0,00	0,00				
	24	5,63	0,19	142,7	6462	19,1	897
	192	12,91	0,13				
	288	13,25	0,08	103,2	3301	7,2	255
	504	13,30	0,07				
	744	13,27	0,10	111,5	4128		
	745	11,24	0,27				
	747	9,94	0,37				
	767	1,31	0,40				
	936	-2,96	0,09				
	984	-2,97	0,06				
	1152	-2,95	0,05	269,8	16638		
Atlas							
Temp	Tijd (uren)	Gewichts toename (%)	Standaard afwijking	Buigsterkte 0° (MPa)	E-modulus 0° (MPa)	Buigsterkte 90° (MPa)	E-modulus 90° (MPa)
60°C	0	0,00	0,00				
	24	-0,56	0,020				

Bijlage F: Data Sheets

- AmpliTex 5009
- Atlac 430
- Beyone ZW7964-01