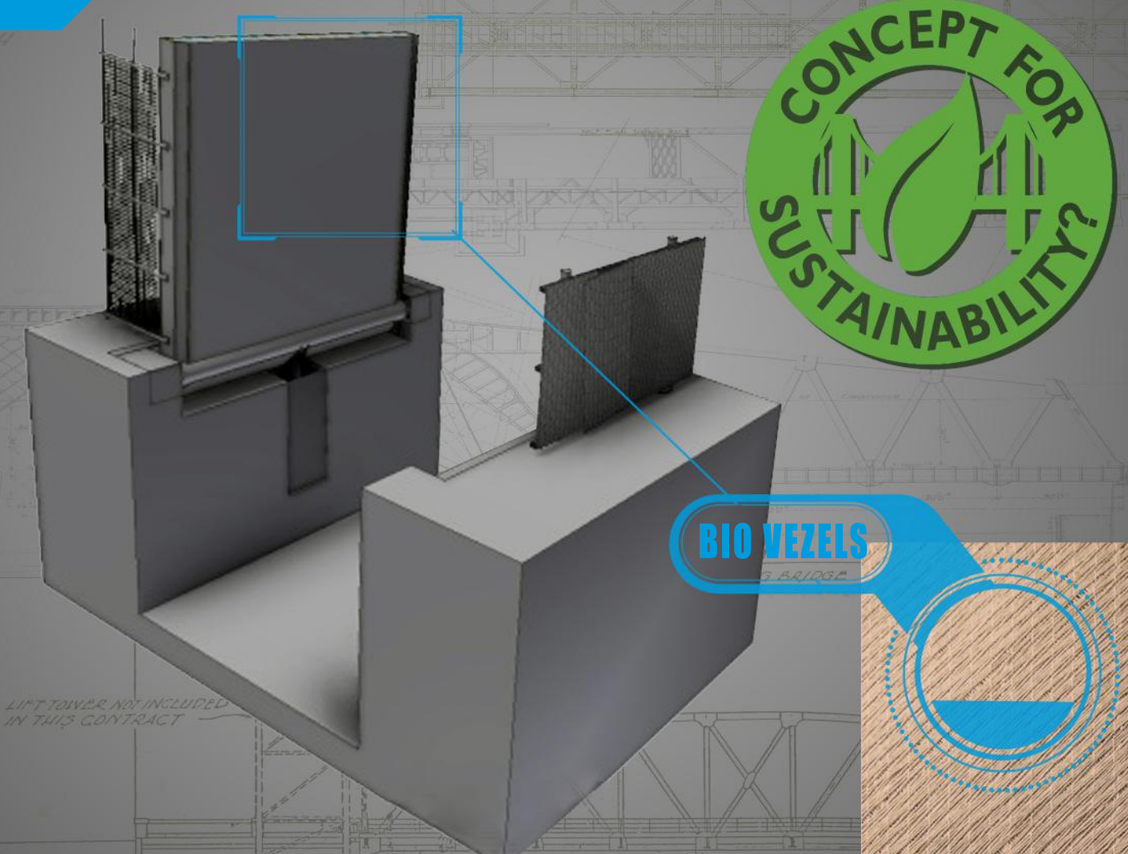
Windesheim zet kennis in werking

Onderzoek

Biocomposiet brugdek

Onderzoeks rapport naar milieu-impact

Lectoraat Kunststoftechnologie



Maart 2016

LKT-COMH-105070-1601

Windesheim

Green PAC
Polymer Application Centre

Windesheim

Lectoraat
Kunststoftechnologie

C O L O F O N
Titel: Biocomposiet brugdek, onderzoeksrapport naar milieu-impact
Publicatienummer: LKT-COMH-105070-1601
Datum: Maart 2016
Auteurs: Ir. Peter Bosman, B. eng. Pieter Schreuder
Subsidieverstrekker: Green PAC
Met medewerking van:
Hogeschool Stenden (penvoerder), Emmen
Christelijke Hogeschool Windesheim, Zwolle
CTC group, Hengelo
Machinefabriek Emmen, Emmen

Fotografie: Windesheim Zwolle

Dit is een uitgave van Christelijke Hogeschool Windesheim.

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

Voorwoord

Er wordt steeds meer aandacht besteed aan bio-based materialen. Ook bij draagconstructies kunnen dit alternatieven worden voor staal en beton. Dit onderzoek beschouwd de milieu-impact van het eerste vlasvezel versterkt beweegbare brugdek dat is gerealiseerd.

Het bouwt voort op een onderzoek van het lectoraat Kunststoftechnologie naar de lange duur eigenschappen van dit vlasvezel versterkt brugdek, te weten teruglopen van mechanische eigenschappen en aantasting van de oppervlakte. Het betreft een eerste kwantificering van de invloedfactoren bij een projectcombinatie van vezels en hars. Hierbij is bijvoorbeeld voorzichtigheidshalve geadviseerd om een onderhoudsregime toe te passen als bij staalconstructies, hetgeen invloed heeft op de milieu-impact.

Het lectoraat Kunststoftechnologie heeft in dit onderzoek geprobeerd vier brugdekvarianten met dezelfde functie zo objectief mogelijk te dimensioneren en te vergelijken. Onder de varianten als referentie een stalen brug en 3 sandwiches: met glasvezel, vlasvezel en stalen huid. Het vergelijken is gebeurd aan de hand van milieu impact uitgedrukt in kosten én aan de hand van totale kosten. Uitgangspunt voor de case zijn de afmetingen van het brugdek zoals gerealiseerd in Emmen.

De resultaten kunnen bij andere projectcases anders uitvallen. Bovendien kan er aan veel knoppen worden gedraaid die invloed hebben op de hoeveelheden, de eenheidskosten en de milieukosten. De resultaten moeten dan ook met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. De resultaten kunnen evenwel gebruikt worden om de grootste (milieu-)kostendragers te signaleren en om deze gunstig te beïnvloeden.

Samenvatting

Om te bezien hoe een vlasvezel versterkte kunststof (VVVK) sandwich brugdek uitvalt ten opzichte van gebruikelijke constructies, is het vergeleken met een glasvezel versterkte kunststof (GVVK) sandwich en een traditionele stalen lasconstructie. Voorts is het vergeleken met een stalen sandwich brugdek, zijnde een andere innovatieve draagconstructie.
Voor de vier varianten is uitgegaan van dezelfde functionele eenheid met een identiek eisenpakket voor een kleine beweegbare voetgangersbrug. Er is een vergelijking gedaan voor milieu-impact uitgedrukt in kosten en voor life cycle costs (LCC).

Ten aanzien van milieukosten is het gunstiger om voor de kunststof kern van sandwich draagconstructies gerecycled kunststof schuimkern materiaal te gebruiken. Daarvoor leent r-PET zich.

Voor de composiet huiden is vlasvezel kunststof vooralsnog ongunstiger dan glasvezel kunststof ten aanzien van milieukosten en LCC. Dit komt omdat voor VVVK:

a) meer hars nodig is	vanwege lager haalbaar vezelvolumegehalte
b) de composietstijfheid lager is	lagere vlasstijfheid, holtes en hars scheurt
c) de kosten/kg vezel zeer hoog zijn	mogelijk daalt dit i/d toekomst bij grotere vraag
d) de kosten voor re-coaten hoog zijn	mogelijk daalt dit n.a.v. aanvullend onderzoek
e) de milieukosten/kg vezel gelijk zijn	door warmteprocessen en vezelselectie

Aanbevolen wordt aanvullend te onderzoeken hoe het vezelvolume gehalte verhoogd kan worden.

Voor de sandwich varianten met dunne dekplaat wordt vervolgonderzoek aanbevolen naar impact van vallende objecten op een brugdek. Dit om naast toepassing in voet/fietsroutes ook in wegverkeersroutes mogelijk te maken voor sandwiches zonder lijven.

Een stalen sandwich zonder lijven lijkt een interessante variant wat betreft milieu- en totale kosten. Hiervoor wordt (technisch) vervolgonderzoek aanbevolen.

Summary

In order to find out how a flax fiber reinforced polymer (FFRP) sandwich bridge deck performs In comparison with usual structures, it is compared to a glass fiber reinforced polymer (GFRP) sandwich and a conventional steel welded structure. Furthermore it is compared with a steel sandwich bridge deck, being another innovative structure.
For the four variants the same functional unit with an identical program of requirements for a small movable pedestrian bridge is adopted. A comparison has been carried out for environmental impact expressed in costs and for life cycle costs (LCC).

Regarding the environmental costs it is favorable to select as polymer foam core a material that is recycled. Recycled PET foam core is available on the market.

For the composite faces a FFRP is less favorable than a GFRP in both environmental costs and LCC. This is because with FFRP:

a) more resin is needed	because of lower feasible fiber volume content
b) the composite modulus is lower	lower flax modulus, lumen and resin cracks
c) the costs/kg fiber are very high	possible decrease i/t future at larger demand
d) the costs for re-coating are high	possible decrease after additional research
e) the envir. costs/kg fiber are not low	because of warmth processes and fiber selection

It is recommended to do additional research how to increase the fiber volume content.

For the sandwich variants with thin deck plate additional research is recommended to the impact of falling objects on the bridge deck. This to make sandwich applications without internal webs possible for traffic roads next to applications for pedestrian roads.

A steel sandwich without webs seems an interesting variant regarding environmental and total costs. For this (technical) follow-up research is recommended.

Contents

Voorwoord **1**
Samenvatting **2**
Summary **3**
Contents **5**
1 Inleiding **7**
2 Functionele eenheid **9**
3. Uitgangspunten varianten **11**
3.1 Uitgangspunten variant Stalen lasconstructie 11
3.2 Uitgangspunten variant Glas VVK sandwich 12
3.3 Uitgangspunten variant Vlas VVK sandwich 13
3.4 Uitgangspunten variant Staal sandwich 14
3.5 Uitgangspunten schuimkern 15
4. Dimensionering brugdekvarianten **17**
4.1 Engineeringsresultaten 17
4.2 Ontwerp vergelijking van de varianten 18
5 Milieu-impactmethoden, effectcategorieën en milieu-kentallen **19**
6 Uitgangspunten (milieu)kosten materialen en processen **21**
7 Resultaten **27**
7.1 €co-costs 27
7.2 Life Cycle Costs 30
8 Conclusies en aanbevelingen **33**
Bibliografie **35**
Dankwoord **36**
Bijlage 1 VVK metingen – stijfheid, rek en vezelgehalte **37**
Bijlage 2 Plooicapaciteit sandwich huidplaat **41**

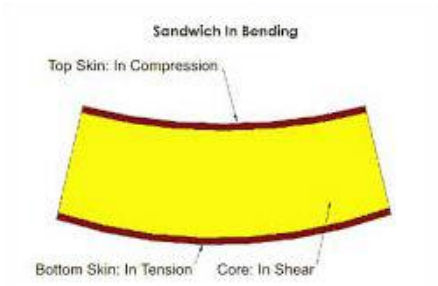
1 Inleiding

Dit onderzoek behelst de milieu impact (sustainability) van een vlasvezel versterkte kunststof (VVVK) in een beweegbaar brugdek. Het onderzoek is naar aanleiding van de beweegbare voetgangersbrug zoals gerealiseerd in de Wildlife adventure park Emmen. Deze brug is uitgevoerd met een sandwich brugdek met VVVK huiden.
Om te bezien hoe het VVVK sandwich brugdek uitvalt ten opzichte van gebruikelijke constructies, wordt het vergeleken met een glasvezel versterkte kunststof (GVVK) sandwich en de traditionele stalen lasconstructie. Ook wordt het vergeleken met de variant stalen sandwich brugdek, die gedurende dit onderzoek boven kwam drijven als mogelijk interessante tussenvorm van kunststof (kern) en staal (huiden).
Voor de vier varianten is uitgegaan van dezelfde functionele eenheid met een identiek eisenpakket.

Lasconstructie

De stalen lasconstructie bestaat uit een dekplaat die is voorzien van trogvormige verstijvingen. De trogvormige verstijvingen worden koud gezet en vervolgens aan de dekplaat gelast met een lasautomaat.
De plaatdiktes zijn overgenomen uit Eurocode aanbevelingen, zodat lokale wiel / puntlasten gedragen kunnen worden.

Sandwiches



Er wordt uitgegaan van een monoliet sandwich brugdek. De sandwich constructie bestaat uit een kunststof schuimkern omkleed met onder- en bovenplaat. Met infusie worden de vezelhuiden met hars gevuld en omringd. Door dit omringen wordt de vezelhuid tevens aan de kern verbonden. Door een dunne laag vezels tussen staal en kern toe te passen, kan met infusie ook de verbinding tussen stalen plaat en kern worden gevormd. Alternatief hiervoor is lijmen. Bij geen van de sandwich constructies worden tussenribben toegepast tussen onder- en bovenplaat. Het betreft daarmee een zuivere sandwich met buigvervorming van de huiden en afschuifvervorming van de kern. De dekplaat dikte is afgestemd op lokale wiel / puntlast. Bij vermoeiing belaste VVK sandwich brugdekken worden normaliter wel tussenribben toegepast, dit tevens om de eventuele delaminatie tussen dekplaat en kern te kunnen compartimenteren. Een begin van delaminatie kan optreden na een onbedoelde impactbelasting op het dek.

Kosten

De milieu impact is uitgedrukt in geld: ecologische kosten. Deze worden opgeteld bij de economische kosten, gesommeerd over alle levensfasen leidt dit tot de Life Cycle Costs (LCC).

De ecologische kosten zijn bepaald met de ECO 2012 methode. Als gevoeligheidsanalyse zijn daarbij:

- de ecologische kosten met de MKI methode bepaald: de gevoeligheid voor methode is afgetast;
- meerdere databronnen gebruikt: de gevoeligheid voor databronnen is daarbij afgetast;
- de Netto Contante Waarde (NCW) is bepaald: de gevoeligheid voor toekomstige kosten is afgetast (met 2% verschil tussen rente en inflatie);
- de ecologische kosten ook voor een toekomstscenario van VVVK is bepaald, waarbij de gevoeligheid voor ontwikkelingsaspecten is afgetast.

2 Functionele eenheid

De functionele eenheid betreft een beweegbaar brugdek voor voetgangers en hulpdiensten met een toepassingsduur van 100 jaar. De afmetingen van het brugdek bedragen: breedte 4,0m; lengte L= 5,6m, overspanning l= 5,0m; dagmaat 4,3m. De functionele eenheid is geïnspireerd op de VVVK voetgangersbrug zoals gemaakt voor Dierentuin Emmen.

Varianten
De volgende brugdek draagconstructies met een levensduur van 100 jaar zijn vergeleken:

- **Stalen** lasconstructie
- **GVVK** sandwich
- **VVVK** sandwich $_{2015\,/\,2025}$ huidige resp. mogelijk toekomstige stand der techniek
- **Staal** sandwich

Productsysteem
Bij alle varianten zijn de volgende voorzieningen buiten beschouwing gelaten:

- aan de achterhar: stalen as, draaipunten, oplegstoelen, bevestiging cilinder en voegovergang
- aan de voorhar: opleggingen en voegovergang
- op het dek: slijtlaag[1] en leuningen aan weerszijden
- onder het dek: stalen mal (herbruikbaar)
- schoonhouden (verwijderen van graffiti of eventuele preventieve maatregelen)
- hemelwaterafvoer (dwarsverkanting naar beide zijkanten waar water v/h dek valt)

Dit omdat deze identiek (kunnen) zijn voor alle varianten.

Belastingen

Brugdek gebruik		conform (NEN-EN1991-2, 2011)
- voetgangers	5kN/m^2 (globaal) of 7 kN (lokaal) op 0,10m x 0,10m òf	
- dienstvoertuig	12,5kN/wiel op 0,25m x 0,25m, b=1,75m, 2 assen h.o.h. 3,0m,	
- doorbuiging	L/250 (esthetisch)	conform (NEN-EN1990, 2011) A.1.4.3 NB / NL
- comfort criterium	bij f > 5Hz geen toets	conform (NEN-EN1990, 2011) A2.4.3.2

Windbelasting bij stilstaande beweegbare brug conform (NEN6786, 2001) gebied III, Emmen

- gesloten brug	±0,51 kN/m^2 ↕ h<5m + maaiveld (C_t=0,4), brugdek niet openwaaien
- geopende brug	±1,74 kN/m^2 ↔ h<9m + maaiveld (C_t=1,2), brugdek langdurig vastgezet

Bewegingsbelasting / energie
Alleen de belasting door ongebalanceerde valgewicht wordt meegenomen. Deze verschillen significant per variant. Belasting door wind, wrijving en traagheid wordt bij geen van de brugdekvarianten meegenomen. Dit omdat deze (nagenoeg) identiek kan zijn voor alle varianten.

Openingen:	5 x / dag × 365d/j × 100 jaar (in Emmen ca. 3 x/dag).
Efficiency:	70% (hydraulische aandrijving).

[1] De slijtlaag bestaat bijvoorbeeld uit primer, membraan (EP/UP/AC) en 3mm instrooimateriaal. De rode primer signaleert onderhoud en kan helpen de hoofdconstructie te respecteren.

Bijzondere belastingen
Belasting door brand, aanrijding, aanvaring, impact op dek en vermoeiing: geen eisen.

Systeemgrenzen / fasen
De bepaling van de systeemgrenzen is gebaseerd onderstaande levenscyclusfasen:

- Engineering
- Materiaal productie
- Productie halffabricaat (brugdek incl. coating)
- Transport naar bouwplaats en montage (autolaadkraan)
- Gebruik (openen)
- Onderhoud (vervangen coating)
- Sloop (verkleinen en transport naar verwerkingslocatie)
- Afdanken (hergebruik brugdek, recycling, verbranden of storten materiaal).

Projectonafhankelijk
Er is gebruik gemaakt van de volgende forfaitaire afstanden:

- 150 km afstand tussen materiaalproducent en fabrikant (vrachtwagen)
- 50 km afstand tussen fabrikant en bouwplaats (autolaadkraan)
- 25 km afstand tussen schilder en bouwplaats (bestelwagen)

Juist om brugdekken in het algemeen te kunnen vergelijken is niet uitgegaan v/d project specifieke situatie in Emmen.
Voorts is gebruik gemaakt van forfaitaire methode van energieopwekking: een mix van gas/olie- en kolencentrales. Om brugdekken in het algemeen te kunnen vergelijken is bijvoorbeeld niet uitgegaan van de eventuele projectmogelijkheid tot opwekken van energie met zonnepanelen.

3. Uitgangspunten varianten

3.1 UITGANGSPUNTEN VARIANT STALEN LASCONSTRUCTIE

Samengestelde, S355 constructie bestaande uit:

- Dekplaat t= 10mm (eis t ≥ 10mm EN 1993-2 C.1.2.2)
- 5 trogvormige verstijvingen h.o.h. 0,72m (eis ≤2x0,4= 0,8m EN 1993-2 C.1.2.2)
  t= 6mm (eis t ≥ 6mm EN 1993-2 C.1.2.2)
- 2 L-vormige randliggers t= 6mm
- E-modulus E= 210.000N/mm^2

Engineering: conform (NEN-EN1993-2, 2006)

Materialen: productie, kopen en vervoeren naar productiewerkplaats

Samenstellen:

- Snijden dekplaat ———, trogplaten —, randliggerplaten — en harplaten – –
- Zetten platen — tot V-troggen, en tot L-randligger
- Lassen troggen, randliggers en harren met dekplaat en achteras tot val
- Stralen, Ontvetten, Coaten dek

Transport per as en montage tezamen (autolaadkraan):

- 3,0 ton in L=5,6m, dek diagonaal=4,0m.
  Wagen b=2,5m h=3,1m l=5,6m V=45m^3
- Autolaadkraan 50ton/meter
  laadvloer h=1,5m: 1,5+ 3,1= 4,6m: ontheffing
  hijscapaciteit: 3 ton op 4,5m achter laadbak
  laadvloer l=5,5m ≈ 5,6m

Onderhoud na 0,35mm basis coating, 1375kg/m^3 in shop:

- Elk 25 jaar in shop 100% vervangen 0,35mm dik, 1375kg/m^3
- Halverwege steeds in situ 2% bijcoaten 0,35 mm dik.

(dikte, vervangingsfrequentie en reparatie% komen overeen met LCA bruggen Beco 2013)

Slopen (100%):

- Transport naar verwerkingsplaats 50km
- Afstralen slijtlaag
- Verschroten

Afdanken:

- Transport naar recyclelocatie 150km (IJmuiden)
- Recyclen staal

3.2 UITGANGSPUNTEN VARIANT GLAS VVK SANDWICH

Samengestelde sandwich constructie bestaande uit:

- Composiet dekplaat 5,0mm (nodig voor puntlast)
- Kern: zie §3.5
- Composiet onderplaat 2,5mm (onderlaag 0°: minst scheurgevoelig bij langs buiging)
- Composieten: vezelfractie= 50% vol.; 0°:62,5%, 45°:12,5%, 90°:12,5%, -45°:12,5%
- E-moduli: glas E= 72.000 N/mm^2 (trek, druk en buiging), hars E= 3.500 N/mm^2

Engineering: conform (CUR96, 2015) met daarin materiaaleigenschappen en conversiefactoren

Materialen: productie, kopen en vervoeren naar productiewerkplaats

Samenstellen:

- Plaatsen vezelmatten dekplaat
- Plaatsen kerndelen en insert achteras
- Plaatsen vezelmatten onderplaat en zijkanten
- Afdekken met vacuüm folie, plaatsen infusieslangen e.d.
- Vacuum bagging infusion met hars (additieven verharder, vertrager, versneller verwaarloosd)
- Wapperen (licht stralen), ontvetten, en coaten dek (zelfde als bij staal)

Transport per as en montage tezamen (autolaadkraan):

- 1,50 ton in L=5,6m, dek diagonaal=4,0m.
- Wagen b=2,5m h=3,1m l=5,6m V=45m^3
- Autolaadkraan 44ton/meter
  laadvloer h=1,5m: 1,35+ 3,1= 4,35m: ontheffing
  hijscapaciteit: 2 ton op 8m achter laadbak
  laadvloer l=6,6m: > 5,6m

Onderhoud (naast 0,35mm overall basiscoating in shop), 1375 kg/m^3, slechts zijkanten (esthetisch):

- elke 25 jaar in situ 100% overlagen 0,10mm dik, 1375 kg/m^3
- elke half duur in situ 2% bijcoaten 0,10mm dik, 1375 kg/m^3

Slopen (100%):

- Transport naar verwerkingsplaats 50km
- Scheiden: GVVK huid en PET-schuim kern (én stalen as)
- Voor verkleinen huid < 0,3m, en vermalen schuimkern

Afdanken:

- Transport huid naar cementoven en kern naar recyclebedrijf: beiden 150km
- Recyclen PET schuimkern; Verbranden huid met kJ winning
- Storten as & glasresten

3.3 UITGANGSPUNTEN VARIANT VLAS VVK SANDWICH

Samengestelde, sandwich constructie bestaande uit:

- composiet dekplaat 12,0mm (nodig voor puntlast)
- kern: zie §3.5
- composiet onder plaat 6,0mm
- composieten: vezelfractie= 35% vol.[2]; 0°:62,5%, 45°:12,5%, 90°:12,5%, -45°:12,5%
- E-moduli: vlasvezels E= 54.500 N/mm2 (trek) & E= 32.500 N/mm2 (druk en buiging); bij >1-ax UD langsvezels meenemen en gescheurd hars E= 350 N/mm2 **zie bijlage 1**

Engineering: conform (CUR96, 2015), echter met 10% grotere vocht-conversiefactor (Bosman, 2015) & experimenteel bepaalde projectmateriaaleigenschappen: **zie bijlage 1**

Materialen: productie, (stoom)behandelen, kopen en vervoeren naar productiewerkplaats

Samenstellen: conform GVVK

Transport en montage: conform GVVK

Onderhoud: naast 0,35mm basis coating, 1375kg/m^3 in shop

- elke 25 jaar in shop 100% vervangen 0,35mm dik, 1375kg/m^3
- elke half duur in situ 2% bijcoaten 0,35 mm dik

Om onthechting tussen vezels en matrix door vochtfluctuaties te voorkomen wordt voorzichtigheidshalve een coating geadviseerd.
Omdat VVVK een nieuw composiet materiaalcombinatie betreft, wordt de coating elke 25 jaar geheel vervangen:

- na stralen kan een visuele inspectie van constructiemateriaal plaatsvinden (zoals staal)
- eventuele onzichtbare onthechting van coating wordt aangepakt

Slopen (100%):

- Transport naar verwerkingsplaats 50km
- Scheiden: VVVK huid en PET-schuim kern (én stalen as)
- Voor verkleinen huid < 0,3m; vermalen schuimkern

Afdanken:

- Transport huid naar cementoven en kern naar recyclebedrijf: beiden 150km
- Verbranden huid met kJ winning / recyclen PET schuim kern
- Storten as

[2] - **35%** is afgeleid uit de metingen van mechanische eigenschappen t.b.v. de brug Emmen uitgevoerd door Stenden gemaakt van **bi-axiaal vlaslegsel** en vacuüm infusie (**VI**) (mal onder folie boven) door CTC (zie bijlage 1).
- Fabrikant Composite Evolution geeft **30%** aan bij **VI** met **UD & bi-axiaal vlaslegsel** (zie bijlage 1).
- Bij **VI**$^+$ (mal onder **+ boven**) met **UD-vlastape** wordt **40%** gehaald. (Vuure, 2015).
- Bij resin transfer moulding (RTM, mal onder + boven) met **UD-vlaslegsel** wordt **32%** gehaald en met UD-ArticFlax legsel 21% tot 47% met 1 tot 2 bar buitendruk. N.B.: ArticFlax: E=90 GPa! (Oksman, 1999)

3.4 UITGANGSPUNTEN VARIANT STAAL SANDWICH

Samengestelde, sandwich constructie bestaande uit:

- dekplaat t= 3,0mm (nodig voor puntlast)
- kern: zie §3.5
- bodemplaat t= 1,0 mm (straalbaar; dak sandwichplaten vanaf 0,5mm)

Engineering: conform (NEN-EN1993-2, 2006)

Materialen: productie, kopen en vervoeren naar productiewerkplaats

Samenstellen:

- Snijden dekplaat, stroken bodemplaat en kern
- Infuseren/lijmen platen, kern incl. achteras tot monoliet val
- Licht stralen, Ontvetten en Coaten dek

Transport en montage: conform GVVK

Onderhoud[3] naast 0,35mm basis coating, 1375kg/m^3 in shop:

- elk 25 jaar in shop 100% vervangen 0,35mm dik, 1375kg/m^3
- halverwege in situ 2% bijcoaten 0,35mm dik

(Conform staal)

Slopen (100%):

- Transport naar verwerkingsplaats 50km
- Afstralen slijtlaag
- Scheiden: stalen huid en PET-schuim kern (én stalen as)
- Verschroten staalplaten; vermalen schuimkern

Afdanken:

- Transport staal naar recyclelocatie (IJmuiden) en kern naar recyclebedrijf: beiden 150km
- Recyclen: staal en PET schuim kern

[3] De dunne, stalen bodemplaat kan worden gemaakt van Sendzimir verzinkt (ca. 20µm) / ZMA / Galflan stalen stroken (treksterkte ca. 400N/mm^2) in de lengterichting. De stroken kunnen wellicht aan elkaar gelijmd bij met het infuseren. Voor de in de shop gecoate bodem is her-coaten gedurende lange tijd wellicht onnodig. Hiertoe wordt nader onderzoek aanbevolen.

3.5 UITGANGSPUNTEN SCHUIMKERN

Gesloten cellen en dichtheid
Voor de schuimkern wordt gebruikt gemaakt van schuim met gesloten celstructuur, zodat er bij infusie geen hars in de kern wordt gezogen, dit kan met PUR, PVC en PET schuim. Uitgegaan is van een dichtheid van 115 kg/m^3 om te voldoen aan de capaciteit voor lokale oppervlaktebelasting op voetgangersbrugdekken.
Balsa (300 kg/m^3) is niet overwogen omdat deze zwaarder is en er (naast vlas) extra vochtproblemen worden geïntroduceerd. (Vernin, 2016 March)

Hergebruik
De mechanische en milieu-impact eigenschappen van deze materialen (PUR, PVC en PET) zijn ruwweg hetzelfde bij dezelfde dichtheid. Alleen bij PET schuim wordt reeds volop gemaakt van gerecycled materiaal (r-PET), dit vanwege verplicht inzamelen van PET flessen. Bovendien is r-PET niet of nauwelijks duurder dan PET. Daarom is uitgegaan van r-PET en is er bezien wat het verschil in milieu-impact is ten opzichte van maagdelijk PET.

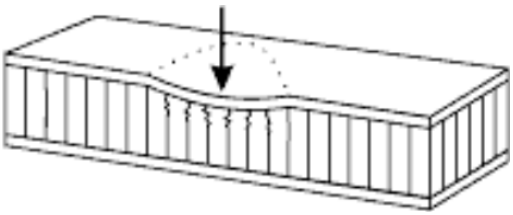
Afdanken
Bij gebruikte rechthoekige sandwiches met een volledige kern wordt de composiet huid na afdanken mechanisch verwijderd. Daarna wordt de kern ten behoeve van een volgende cyclus vermalen.

Mechanische eigenschappen
Voor de schuimkern zijn de mechanische eigenschappen aangehouden voor gerecycled PET (r-PET) zoals opgegeven door de producent voor de brug in Emmen (ter referentie voor PET weergegeven):

r-PET: 115kg/m^3 ; E = 76 N/mm^2; G =27 N/mm^2; σ_{druk} = 1,7 N/mm^2; τ_{druk} = 0,9 N/mm^2 &
PET: 115kg/m^3 ; E = 80 N/mm^2; G =30 N/mm^2; σ_{druk} = 1,8 N/mm^2; τ_{druk} = 1,0 N/mm^2. [4]

Voor de lange duur effecten zijn de factoren van EPS aangehouden omdat die voor r-PET ontbraken. Deze waarden zijn aangehouden voor de schuimkernen van sandwiches met GVVK, VVVK en staal.
EPS: vochtig/buiten (RV = 65 à 85%) $\sigma_{reductie}$: k_{mod} = 0,35, $E_{reductie}$: 1/(1+k_{def})= 1/(1+4,0)= 0,20. (SKH90-01, 2009)

Controle geconcentreerde belasting



De maatgevende geconcentreerde belasting (krik) bedraagt 7 kN op 0,10m x 0,10m, dit geeft een maximale oppervlaktedruk op het dek van 700 kN/m^2. Met een belastingsfactor van 1,5 geeft dat een ontwerpbelasting van 1,05 N/mm^2. De gemiddelde drukcapaciteit bedraagt 1,7 N/mm^2. Met een aangehouden maximaal acceptabele variatiecoëfficiënt van 0,1 volgt een standaard deviatie van 0,17 N/mm^2 en daarmee een karakteristieke druksterkte van 1,7 – 1,64•0,17 = 1,36N/mm^2. Een r-PET kern met dichtheid van 115 kg/m3 volstaat derhalve.

[4] Productblad Armacell, zie bijlage 2

Plooisteun aan dekplaat

Voor **staal**, met E= 210.000 N/mm^2 bedraagt de plooispanning:

$-0{,}5\times(210.000\ N/mm^2\times76N/mm^2\times27N/mm^2)^{1/3} = -377\ N/mm^2 <\approx$ **-355** N/mm^2

Voor **GVVK**, met E_f= 21.856 N/mm^2 leidt dit tot:

$-0{,}7\times(21.850\times76\times27)^{1/3} = -249\ N/mm^2 \equiv$ **-1,1%** $>\approx -1{,}3\% \equiv -284\ N/mm^2$

Voor **VVVK**, met E_f= 5.775 N/mm^2 leidt dit tot:

$-0{,}7\times(5.775\times76\times27)^{1/3} = -160\ N/mm^2 \equiv -2{,}8\% << -1{,}7$ / **0,9%** $\equiv -52\ N/mm^2$

Zie bijlage 2 voor de herkomst van de gebuikte formules voor plooi en de gebruikte E-moduli voor VVK.

Voor staal en VVVK is plooi dus niet maatgevend, voor GVVK net.

4. Dimensionering brugdekvarianten

4.1 ENGINEERINGSRESULTATEN

Onderstaand zijn de engineeringsresultaten samengevat. Van de doorbuigingen en de spanningen zijn Unity Checks (UC / uitnuttingsgraad) vermeld van gesloten brug en van langdurig geopende brug, beiden onder een gelijkmatige belasting. De dekplaatdikte is op voorhand bepaald m.b.v. de puntlast.

	Stalen lasconstructie			GlasVVK sandwich			VlasVVK sandwich			Staalplaat sandwich		
Algemeen			referentie			vergelijk			vergelijk			vergelijk
t_{dek}	10,0 mm		*100%*	5,0 mm		50%	12,0 mm		120%	3,0 mm		30%
$t_{onderflens}$	6,0 mm		*100%*	2,5 mm		42%	6,0 mm		100%	1,0 mm		17%
H_{totaal}	96 mm	L/52	*100%*	259 mm	L/19	271%	281 mm	L/18	294%	137 mm	L/36	144%
p.b.	121kg/m2		*100%*	59kg/m2		49%	69kg/m2		57%	63kg/m2		52%
Brug gesloten, voetgangers belast			UC			UC			UC			UC
δ_{vb}	19 mm	L/265	94%	20 mm	L/250	**100%**	20 mm	L/250	**100%**	20 mm	L/250	**100%**
σ_d	208 N/mm2		59%	110 N/mm2		15%	63 N/mm2		24%	192 N/mm2		54%
25% belast	5,0 Hz		**100%**	7,9 Hz		63%	8,4 Hz		59%	7,8 Hz		64%
Brug lang geopend, wind belast			UC			UC			UC			UC
$\delta_{wind,rep}$	79 mm	L/67		78 mm	L/68		78 mm	L/67		66 mm	L/80	
σ_d	±272 N/mm2		76%	±154 N/mm2		20%	±87 N/mm2		32%	±271 N/mm2		76%
	2,6 Hz			5,0 Hz			5,1 Hz			4,8 Hz		

4.2 ONTWERP VERGELIJKING VAN DE VARIANTEN

Dekplaat
De kosten en milieukosten van elke variant blijken het laagst bij een minimale dekplaatdikte. Voor de benodigde dekplaatdikte is een lokale wiellast maatgevend. Bij de dimensionering van de dekplaat zijn langs- en dwarsmomenten gecontroleerd (sterkte); bij de sandwich varianten is hierbij de steun van de schuimkern meegenomen. De lokale krachtsverdeling in de dekplaat, belast door wiel/punt last en verend ondersteund door de schuimkern, is bepaald met behulp van een SKH publicatie. (SKH90-01, 2009)
Met de voor het dragen van de lokale last benodigde dekplaatdikte, is het dek in hoofdrichting verder gedimensioneerd onder een gelijkmatige belasting.
Met de ondersteunende werking van een kern kan de dekplaat aanmerkelijk worden verdunt: van 10,0 mm bij stalen lasconstructie tot 3,0 mm staalplaat sandwich. Bij toepassing van VVVK is een veel dikkere dekplaat nodig dan bij een GVVK: 12,0 mm resp. 5 mm. Dit laat zich verklaren door veel lager aandeel van vezels en door lagere stijfheid van vlas- in vergelijking met glascomposiet.

Doorbuiging dek
Bij alle sandwich varianten is doorbuiging in gesloten toestand onder voetgangersbelasting maatgevend. De doorbuiging in geopende toestand is voor alle varianten zeer groot en niet beoordeeld.

Trilling (en geluid) dek
Ten aanzien van trilling (eis >5Hz) is de slanke stalen lasconstructie het ongunstigst en maatgevend, en hebben de sandwich varianten een ruime marge. Ten aanzien van geluid zijn de sandwich varianten eveneens gunstig: absorberend schuim in plaats van holle klankkasten. Vlas heeft daarbij de gunstigste materiaaldemping van dekplaat materialen.

Sterkte dek
De GVVK variant is 5x sterker dan noodzakelijk, de VVVK variant 3x en de stalen varianten 1,3x. Bij alle varianten is hierbij langdurig geopende stand maatgevend boven de gesloten toestand.

Slankheid dek
De stalen lasconstructie variant geeft de slankste ontwerpmogelijkheden, de VVK sandwiches bijna 3x zo gedrongen. De staalplaat sandwich zit hier tussenin met 1½x zo gedrongen.

Gewicht dek
De sandwich varianten kennen ruwweg 50% van het gewicht van de stalen lasconstructie.
Vlas kent een lagere dichtheid dan glas, toch kent de VVVK sandwich variant een iets groter gewicht dan de GVVK sandwich variant. Dit laat zich verklaren door een lager haalbaar vezelvolumefractie bij vacuüm infusie en een wat lagere vezelstijfheid.

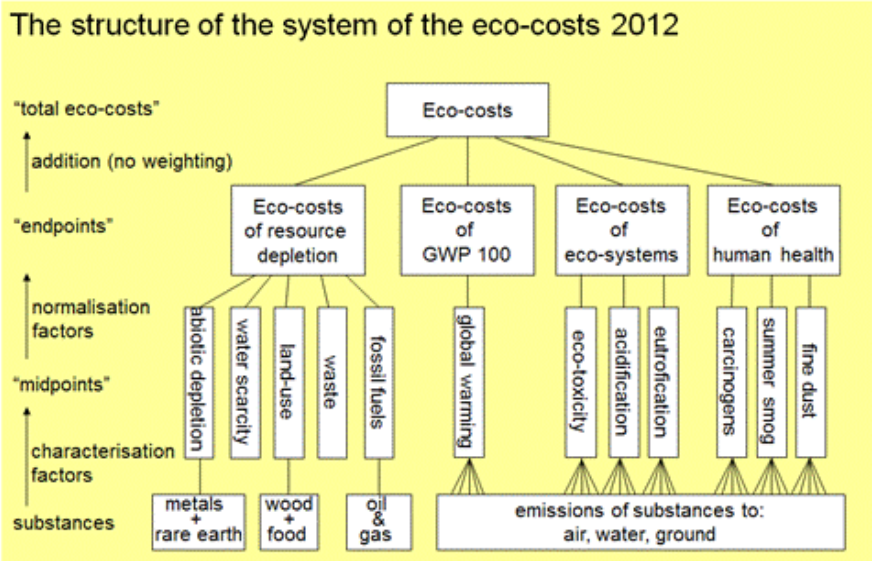
5 Milieu-impactmethoden, effectcategorieën en milieu-kentallen

Oorspronkelijke, schade-gebaseerde milieu-impact methodieken zijn zeer genuanceerd naar alle milieueffecten, maar de variantresultaten zijn moeilijk te vergelijken. Anderzijds zijn er single issue methoden zoals de carbon footprint, welke als te eenzijdig worden gezien.
In dit rapport worden twee preventie gebaseerde methoden gebruikt: de Ecocost EU 2012 en de MKI-2014. Deze preventie gebaseerde methodieken zijn vrij recent en vooral geschikt voor afwegingen door architecten, zakenmensen, ontwerpers en ingenieurs om van producten met de zelfde functionaliteit de milieu impact af te wegen, uitgedrukt in één bekend kengetal: geld. Het betreft een fast track LCA methode van TUDelft (http://www.ecocostsvalue.com) (Vögtlander, 2015) waarbij aan alle materialen en processen eco-kosten worden gehangen. Hiermee is snel een eerste indruk te krijgen welke delen de grootste milieu-impact hebben of welke variant de laagste milieu-impact heeft.
De MKI-2014 wordt voorgeschreven in de SBK-Bepalingsmethode voor gebouwen en GWW werken. Het milieuprofiel bestaat uit 11 milieu effectcategorieën, die niet genormaliseerd zijn. De berekening van de effectcategorieën is gebaseerd op de veel gebruikte methodiek in LCA studies: Centrum Milieuwetenschappen Leiden impact analyse methodiek (CML-IA) en aangepast naar de SBK-Bepalingsmethode. De bij MKI-2014 gebruikt schaduwprijzen:

> Schaduwprijzen zijn kunstmatige prijzen die de Milieu Kosten Indicator-waarde (MKI-waarde) aangeven. De schaduwprijs omvat de preventiekosten voor de **Nederlandse overheid** per eenheid emissiebestrijding. Preventiekosten gaan uit van de kosten die gemaakt moeten worden om de **milieubeleidsdoelstellingen te halen**.

MKI-2014 wordt gebruikt in het programma Dubocalc van Rijkswaterstaat, wat bijvoorbeeld gebruikt wordt om bij aanbestedingen de milieu-impact uitgedrukt in € mee te wegen middels EMVI (Economisch Meest Voordelige Inschrijving).
Het Ecocost 2012 milieu profiel bestaat uit 12 milieu effectcategorieën. Ten opzicht van MKI deels dezelfde categorieën maar met andere prijzen. De bij Ecocost 2012 gebruikt ecologische kosten:

> Eco-kosten moeten worden gezien als verborgen verplichtingen, ook wel externe kosten genoemd, om de **milieu impact** (**volledig) te kunnen compenseren**. Deze prijzen zijn beschikbaar voor veel meer materialen en processen dan de MKI methode.



Hieronder zijn de kosten per milieu effect categorie weergeven voor beide methoden.

Preventiemethode: **Milieu effect categorie**	**Ecocost 2012** Milieu-impact volledig compenseren prijs/kg eq. of prijs/**##** eq.	**MKI-2014** Overheid doelstelling schaduwprijs/kg eq.
Global warming (GWP100)	€0,135 / CO_2	€0,0500 / CO_2
Ozone layer depletion (ODP)	n.v.t.	€30,0 / CFC-11
Aquatic ecotoxicity, fresh *water*	*€0,00638 / 1,4-DB*= €0,001425 / CTUe= €55,0 / Zn	€0,0300 / 1,4-DB
Aquatic ecotoxcity, marine water	n.v.t.	€0,000100 / 1,4-DB
Terrestrial ecotoxicity	n.v.t.	€0,0600 / 1,4-DB
Acidification	€8,25 / SO_2	€4,00 / SO_2
Eutrophication	€3,90 / PO_4^{3-}	€9,00 / PO_4^{3-}
Human toxicity (*air*)	*€0,127 / 1,4-DB* = €1,032E+6 / CTUe = €36,0 / $C_{20}H_{12}$	€0,0900 / 1,4-DB
Photochemical oxidation (s. smog)	€9,70 / C_2H_4	€2,00 / C_2H_4
Fine dust	€34,0 / PM2.5	n.v.t.
Abiotic depletion, non fuel	€1.120 / Sb variabel / materiaal	€0,160 / Sb €0,0592 / Fe
Abiotic depletion, fuel	€0,01407/Sb = €0,0145/MJ = €0,70 / oil	€0,160 / Sb €0,0323 / oil
Water scarcity, NL {EUR}	***€0,00132 / m³*** *{EUR : €0,440/m³}*	n.v.t.
Land use, NL	***€0à5 / m²*** *[variabel per streek]*	n.v.t.
Waste / land fill	***€0,118 / m³***	n.v.t.

1,4-DB= 1,4-Dichloro-Benzene; $C_{20}H_{12}$=Benzo(a)pyrene; CTUe= Comparative Toxic Units

Bron van data

De bron van de in dit onderzoek gebruikte data met betrekking tot de materialen en processen zijn de TUD excel lijsten -versie 12-02-2015- (http://www.ecocostsvalue.com) (Vögtlander, 2015) die zijn bepaald met:

a) Ecoinvent V3 met Simapro 8.01 berekende waarden
b) Idemat 2015
c) DBI (Dutch Building Industry) zowel Ecocosts als MKI
d) processes & EOL: CES (Cambridge Engineering Selector).

Bij ontbreken aangevuld met andere bronnen, bij twijfel geverifieerd met andere bronnen. Welke andere bronnen dan specifiek genoemd zijn.

6 Uitgangspunten (milieu)kosten materialen en processen

Hars
Voor VVK's is uitgegaan fossil based hars omdat hiermee een goede durability is verkregen (Bosman, 2015) en er milieu-impact gegevens beschikbaar zijn.
De eco-costs voor polyesterhars (€1,39/kg) zijn ontleend aan TUD-lijst met Simapro 8.01 berekende waarden gebaseerd op Ecoinvent V3 (A.030.06.366).
De eco-costs zijn geverifieerd met (EY&Biinc, 2014). De eco-costs van DCPD polyesterhars stemmen (€1,37/kg) goed overeen met Ecoinvent V3. Dit is het gebruikelijke type hars voor monoliet brugdekken gemaakt met vacuüm infusie en heeft tevens de laagste milieu-impact.
Bij de VVVK variant is meer hars nodig dan bij de GVVK variant. Dit komt doordat het vezelvolume gehalte bij vlasvezel lager is. Omdat de vezelstijfheid wat lager is, zijn bovendien meer vlasvezels nodig dan glasvezels, omgeven met extra hars.

De kosten voor polyesterhars bedragen €3,00/kg conform opgave CTC.

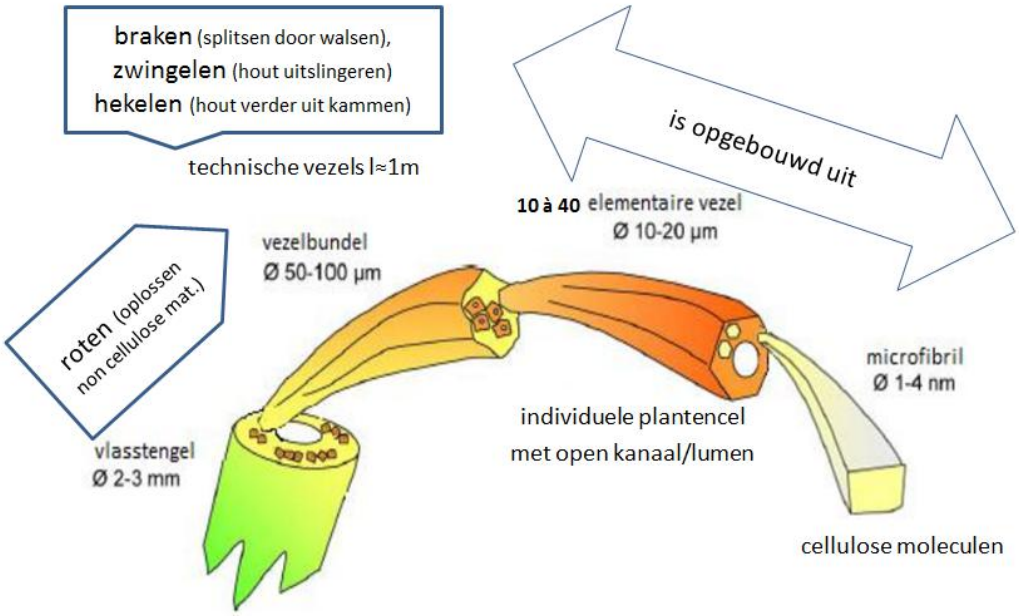
Vezels
De eco-costs voor vlasvezel (€0,67/kg) zijn ontleend aan TUD-lijst voor Dutch Building Industry. De eco-costs voor glasvezels (€0,72/kg) zijn ontleend aan Ecoinvent V3 (A.080.01.203). Hieruit blijkt dat de eco-costs voor vlas bijna het zelfde zijn als die voor glas. Navraag bij TNO (S. de Vos, Biobuild) leert dat de milieu-impact voor vlas een grote spreiding heeft en erg afhankelijk is van welke processen nodig zijn voor het type vezeltoepassing. Er zijn twee aspecten die de milieu-impact van UD-vlas vooral beïnvloeden: vlas wordt geselecteerd (met uitval) en heeft diverse kleine warmte consumerende behandelingsprocessen nodig tegenover glasvezel in één keer veel (productie)warmte. Vlas (1,45 kg/dm^3) heeft wel een lagere dichtheid dan glas (2,54 kg/dm^3).
Ter vergelijking:

- de aangehouden eco-costs voor glasvezel (€0,72/kg) liggen tussen €0,11/kg conform Ecoinvent V3 (A.060.01.103) en €2,08/kg bepaald met de LIMATB / IFREMER milieu data;
- de aangehouden eco-costs voor vlasvezel (0,67/kg) liggen hoger dan €0,28/kg zonder en €0,05/kg met fotosynthese, beiden bepaald m.b.v. milieu data van LIMATB / IFREMER waarbij uitgegaan wordt dat vlas dat niet geschikt is voor UD, een andere toepassing krijgt;
  N.B.: LIMATB Bretagne / IFREMER Centre de Brest (Le Duigou A., 2011).

De €0,28/kg vlas is gebruikt om de gevoeligheid voor de informatiebron na te gaan.

De kosten voor UD-glasvezels bedragen €3,00/kg conform opgave CTC.

De (project)kosten voor UD-vlasvezels bedragen €30,00/kg conform opgave CTC. Naar hun verwachting kunnen deze maximaal zakken tot €5,00/kg indien de UD-vraag toeneemt tot bulk omvang. Indien UD-toepassing een niche blijft ligt €20,00/kg meer in de rede, zijnde de kosten van de goedkoopste koolstofvezels. Vlasvezels worden vaak toegevoegd aan koolstofvezels om meer demping te verkrijgen. Voor toekomstscenario "2025" is een bedrag van €5,00/kg gebruikt.



Behandeling vlasvezels
De ecocosts van vlasvezel behandeling (€0,17/kg) van vlasvezels is ontleend aan Ecoinvent V3 (A.140.01.132 : heat setting and washing synthetic fabrics).

De vlasvezel behandelkosten bedragen nu €2/kg en in de toekomst wellicht €1/kg, Bron: Stex Fibers Arnhem. Dit laatste is voor toekomstscenario “2025” aangehouden.

Schuimkern
De eco-costs voor r-PET (€0,36/kg) en PET schuimkern (€1,24/kg) schuimkern zijn ontleend aan Ecoinvent V3 (A.130.02.111 resp. A.130.04.118).
Bij gedrongen sandwiches (VVVK) is meer kernmateriaal nodig en lopen de eco-costs op.

De kosten voor r-PET schuim bedragen €5,00/kg conform opgave CTC, betrokken bij Armacell.

Staal
De eco-costs voor stalen balk-, buis- en plaatmateriaal (€0,63/kg) en voor afvalverwerking (-€0,36/kg) zijn ontleend aan Idemat (A.100.03.104 resp. F.110.01.108).
De eco-costs voor zwaar constructiestaal (balken en kolommen) (€0,16/kg) en voor afvalverwerking (-€0,08/kg) zijn conform DBI aanzienlijk lager, deze gaan echter volgens Bouwen met Staal, uit van 49% hergebruik + 51% recycling, terwijl brugdekken niet hergebruikt worden. Helaas kan/wil Bouwen met Staal het achtergrondrapport niet beschikbaar stellen om dit om te zetten naar 100% recyling.
Dit wordt slechts gebruikt om de gevoeligheid voor de informatiebron na te gaan.

De kosten voor staal bedragen €1,25/kg conform opgave Machinefabriek Emmen (MFE).

Arbeid
Er is gerekend met 50€/uur arbeid. Dit met instemming van (CTC) en (MFE).

Samenstellen
De eco-costs voor lassen (€0,10/m) is ontleend aan Idemat (D.090.01.102).
De eco-costs voor zetten van troggen (€0,04/kg) is ontleend aan CES: Rough rolling, forging energy;
De eco-costs voor vacuum assisted resin infusion (VARI) energie €0,12/kg VVK is afgeleid uit ecocosts voor RTM energy, echter gecorrigeerd naar energie behoefte : VARI 10,2 Mj/kg vs. RTM 12,8 Mj/kg;
de eco-costs voor RTM energie (€0,15/kg VVK) is ontleend aan CES: RTM energy;

Er is gerekend, conform opgave van producenten (MFE resp. CTC), met:

- 4 minuten arbeid / kg staal (lasconstructie en sandwich huiden)
- 12 minuten arbeid / kg sandwich (VVK's + kern)
  N.B: bij GVVK bruggen van FiberCore lijkt het 9 minuten arbeid / kg te zijn.
  N.B: vlasvezel heeft dichtheid van 50% t.o.v. glasvezel: mogelijke invloed op arbeid/kg.

Transport
De eco-costs voor transport per vrachtwagen (€0,029/tkm; €0,009/m^3km) en autolaadkraan zijn ontleend aan Ecoinvent V3 (C.010.06.104 resp. C.010.06.106).

De kosten voor autolaadkranen bedragen €80/h voor stalen lasconstructie variant en €76/h voor de lichtere sandwich varianten, Bron: kraanverhuur Boekestein. Voor vrachtwagenvervoer is uitgegaan van €0,25/tkm. Bestelwagen transport is voor alle varianten ruwweg gelijk en daarom verwaarloosd.

Bewegen
De ecocosts van elektrische (bewegings)energie (€0,120/kWh) van de brugdekken is (forfaitair) ontleend aan de energiebelasting welke ongeveer in lijn met Idemat waarden (B.030.01.110 en B.030.01.107) voor een olie- en een kolencentrale. Voor projecten is het bijna 5 maal zo gunstig om uit te gaan van energie uit zonnepanelen (€0,120/kWh) (B.030.01.111).

De aangehouden kosten van elektrische (bewegings)energie zijn €0,105/kWh excl. energiebelasting.

De lichtste, niet-gebalanceerde brugdekvarianten resulteren onder eigen gewicht in een oplegkracht aan de voorhar van 9,5 kN in de bruikbaarheidsgrenstoestand. Dit is meer dan de benodigde 5,0 kN om klapperen door fietsverkeer te voorkomen.
Bij de lichtste, niet-gebalanceerde brugdekvarianten waait het dek onder eigen gewicht net niet open in de uiterste grenstoestand. Er is dus geen grendel nodig.
Bij de zwaarste, niet-gebalanceerde brugdekvariant (stalen lasconstructie) wordt verwacht dat de kosten voor een opzetinrichting en betonnen ballast hoger zullen zijn dan de elektrische life cycle (bewegings)energiekosten. Dit geldt te meer indien bij kleine fietsbruggen toch zonnepanelen wordt gekozen.

Onderhoud
De eco-costs voor coaten (€1,13/kg) van 350μm zijn ontleend aan DBI, in lijn met MRPI (Milieu Relevante Product Informatie) blad van Bouwen met Staal. Deze waarden zijn ook in lijn met Idemat en worden gebruikt voor alle varianten.

De eco-costs voor ontvetten (€0,01/kg) zijn ontleend aan Ecoinvent V3 (D.080.01.201).
De eco-costs voor stralen (€0,10/kg) zijn niet te vinden in de TUD lijsten en zijn afgeleid uit literatuur (L.R. Millman, 2012).

Voor toekomstscenario "2025" is aangehouden dat het VVVK brugdek niet om de 25 jaar gestraald en hercoat hoeft te worden, maar slechts bijgecoat zoals het GVVK brugdek. Hiervoor wordt eerst nader onderzoek aanbevolen.

De kosten voor stralen en conserveren bedragen €35/m^2. Er is vanuit gegaan dat het onderhoud (stralen en coaten) in de fabriek gebeurt. In de praktijk blijkt het bij een stalen brugdek veelal ruwweg net zo duur om in situ een tijdelijke tent te plaatsen als om het brugdek naar de fabriek te vervoeren, bron: (MFE & Bouman Hoogeveen).

Slopen
Het scheiden van slijtlaag en dekplaat maakt een deel uit van de eco-costs bij sloop bij de stalen varianten. Dit is nodig om het staal te kunnen recyclen.
Volgens Bouman Hoogeveen is afstralen van de slijtlaag is circa zes maal zo duur per vierkante meter als afstralen van een coating. Dit omdat het zes keer zo veel tijd kost. Daarom wordt ook voor de eco-costs deze factor 6 aangehouden voor afstralen van slijtlaag t.o.v. afstralen van coating.
Bij de varianten GVVK en VVVK wordt de slijtlaag met de composiet dekplaat mee verbrand, en is afstralen niet nodig.
Als vermalingsenergie t.b.v. recyclen is aangehouden €0,11/kg staal en schuimkern €0,061/kg. Als energie voor voorverkleinen t.b.v. verbranden is aangehouden €0,03/kg polyestermatrix, glasvezel €0,17/kg en vlasvezel €0,02/kg, zijnde 10% van de vermalingsenergie t.b.v. recyclen. Alle vermalingsenergie eco-costs zijn ontleend aan de TUD-lijst voor processen gebaseerd op Cambridge Engineering Selector (CES). Ter vergelijk: Bouwen met Staal geeft €0,09/kg zwaar constructie staal aan voor slopen, hetgeen redelijk goed overeenkomt met CES.
Voor de energiekosten van vermalen is de zelfde verhouding van kosten t.o.v. eco-costs aangehouden als bij bewegingsenergie.

Voor scheiden van kern en omhulling is gerekend op 0,1h/m^2 en eco-costs van €0,08/m^2 ontleend aan Idemat voor al. zagen (D.100.10.123).

Afdanken
De afvalwerking van staal is reeds toegelicht onder staal.

Vezelversterkt kunststof wordt verbrand ("thermisch gerecycled"), bij de eco-costs voor hars (€0,13/kg) (F.040.01.103) en vlas (€-0,16/kg) (F.050.01.104) is de opbrengst van warmte meegenomen.
Voor afvalverwerking van schuimkern is uitgegaan van ecocosts van €0,00/kg, omdat r-PET weer gerecycled kunnen worden, en de credits al in de materiaal eco-costs verwerkt zijn.

Bij (niet gerecycled) PET wordt vermalen van schuim niet aangehouden, en is voor verbranden €0,15/kg aangehouden (F.030.01.108) voor de Eco-costs.

Aangehouden is dat schroot (vermalen staal) -€0,19/kg kost (bron: http://oudijzer-prijs.nl), vermalen r-PET -€0,10/kg kost (bron: 4PET) en verbranden incl. storten van VVK €0,09/kg kost, (bron: van Gansewinkel).

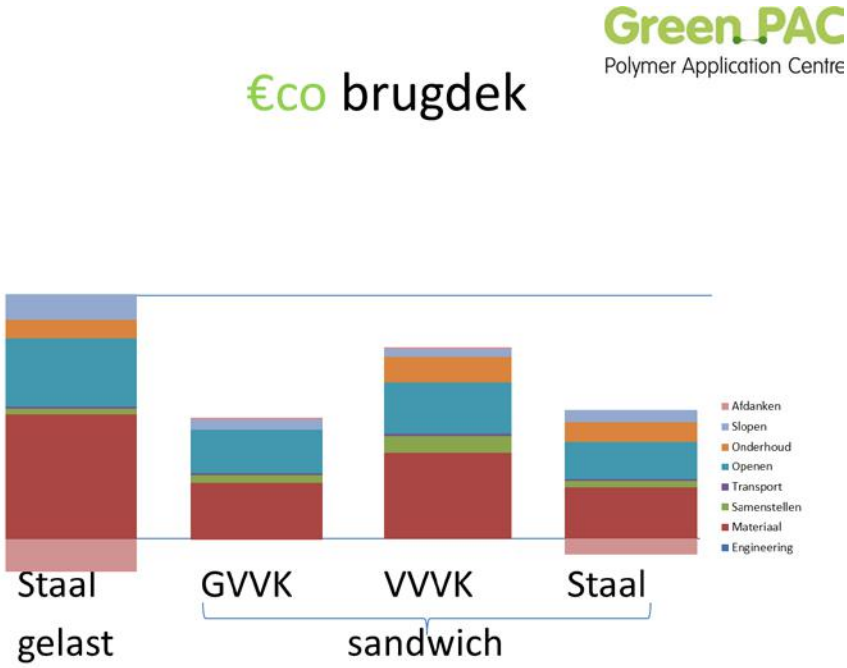
Engineering

Voor engineering is bij alle varianten dezelfde kostenpost en eco-costs aangehouden. Dit alleen maar om het totaal hoger te verkrijgen.

Dit zou om dezelfde redenen ook met alle generieke brugdek voorzieningen kunnen die nu buiten beschouwing zijn gelaten, zie §Functionele eenheid: systeemgrenzen.

7 Resultaten

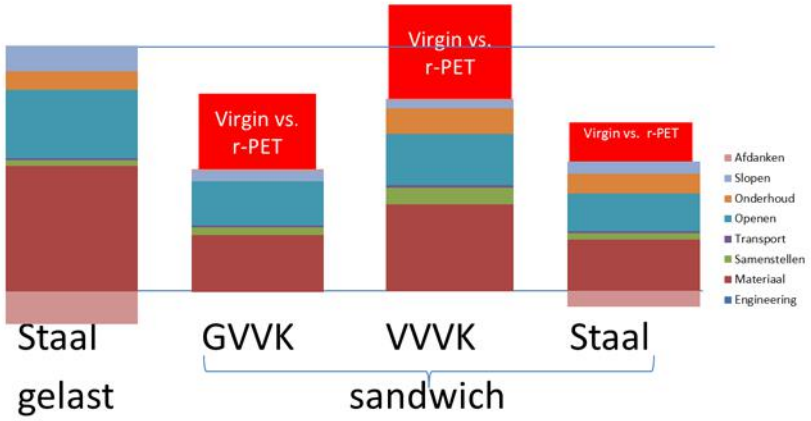
7.1 €CO-COSTS



Figuur 7.1 €co-costs

Bij figuur 7.1 kan worden opgemerkt dat:

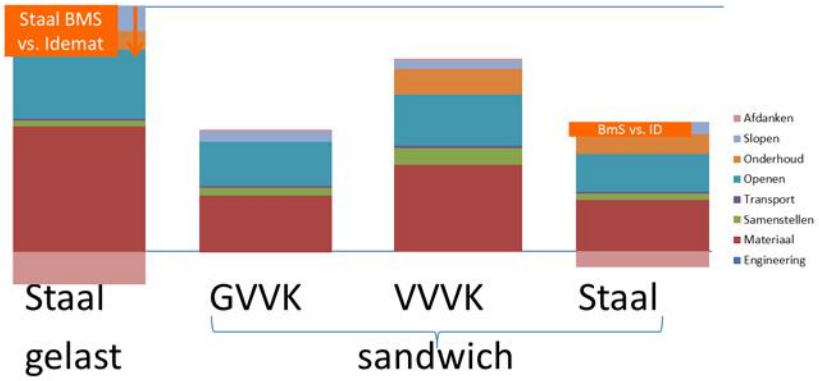
- de €co-costs van de vezels slechts een beperkt aandeel van de materialen van de VVK sandwich varianten uitmaakt (hars en kern bepalen dit voornamelijk);
- de GVVK en stalen sandwich varianten zijn gunstig ten aanzien van materiaal;
- GVVK is gunstig ten aanzien van onderhoud;
- het openen heeft bij de zware -stalen lasconstructie- variant een groot aandeel, openen is niet van toepassing voor niet beweegbare bruggen: vaste bruggen;
- met openen met energie uit zonnepanelen kan 80% worden bespaard (alle varianten);
- het aandeel van slopen bij stalen lasconstructie is hoog is omdat de slijtlaag er dan afgestraald wordt en vanwege het verschroten. Bij de VVK varianten wordt platen slechts verkleind om daarna incl. slijtlaag te kunnen verbranden.



Figuur 7.2 €co-costs, invloed van PET t.o.v. gerecycled PET

Bij figuur 7.2 kan worden opgemerkt dat:

- het verschil tussen PET en r-PET significant groot is.



Figuur 7.3 €co-costs, de invloed van bron voor staaldata DBI/BmS i.p.v. Idemat-2015.

Bij figuur 7.3 kan worden opgemerkt dat:

- DBI (gebaseerd op Bouwen met Staal BmS) gaat uit van 50% hergebruik en 50% recycling (van balken), en Idemat van 100% recycling.

Gevoeligheid databronnen

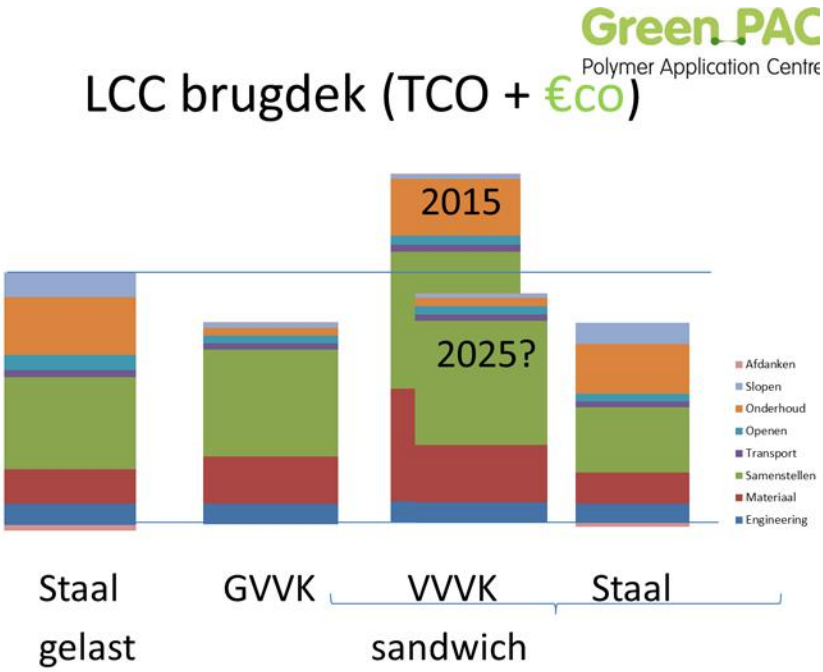
Gezien figuur 7.3 is het is van groot belang kritisch met databronnen om te gaan. Dit lukt echter niet altijd. Zo kan Bouwen met Staal haar MRPI datablad voor zwaar constructiestaal niet aanpassen naar de situatie 100% recycling (voor bruggen), nog kan/wil zij het rapport waarop huidige DBI data gebaseerd zijn ter beschikking stellen. Aanbevolen wordt daarom om de oranje vlakken vooralsnog voorzichtigheidshalve mee te nemen in de variantvergelijkingen.

De gevoeligheid voor de databron van vlasvezel beperkt zich enkele procenten van de totale milieukosten, dit omdat de milieukosten voor hars en schuimkern binnen VVVK sandwich een veel groter aandeel hebben.

7.2 LIFE CYCLE COSTS

Gehanteerd is: LCC= TCO + €co met daarin:

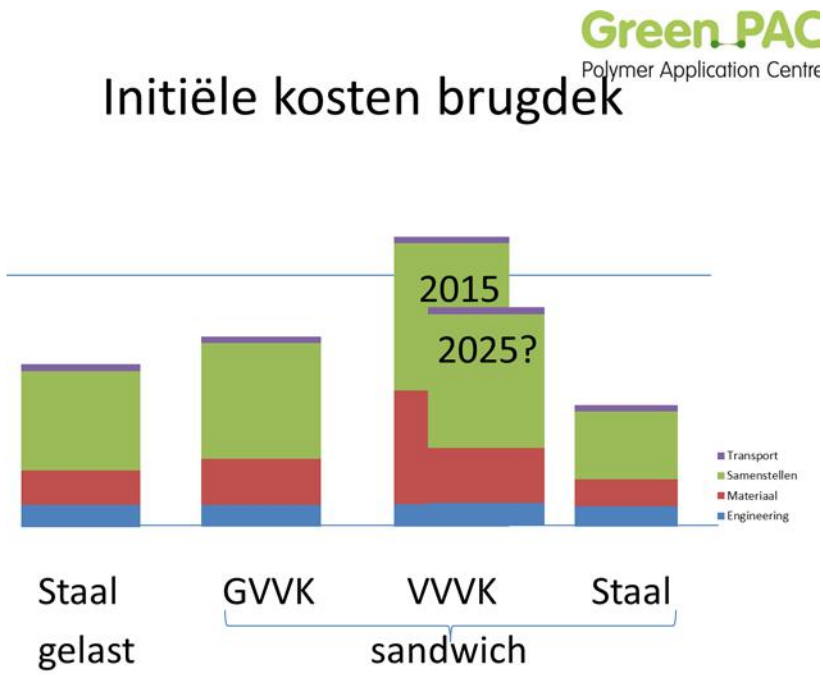
TCO	Total Cost of Ownership	Σ-fasen economische kosten
€co	Ecological costs (virtual / real)	Σ-fasen ecologische kosten
LCC	Life Cycle Costs	Σ-fasen beide kosten



Figuur 7.4 Life-Cycle-Costs.

Bij figuur 7.4 kan worden opgemerkt dat:

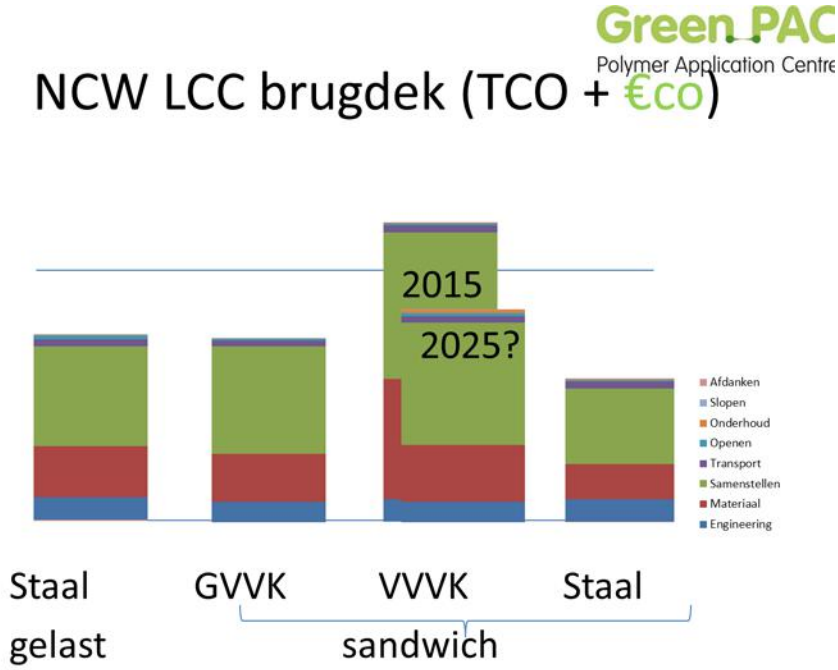
- het verschil VVVK en GVVK zit vooral in onderhoud en dat VVVK meer hars en meer kernmateriaal heeft, voorts dat UD-vlas veel duurder is dan UD-glas;
- de stalen varianten zijn gunstig ten aanzien van materiaal;
- GVVK is gunstig ten aanzien van onderhoud;
- samenstellen bij sandwiches kost veel uren t.o.v. lasconstructie; meer materiaal bij sandwiches betekent ook meer samenstellingsuren;
- de kosten voor energie van openen een betrekkelijk klein onderdeel in het geheel is bij kleine bruggen, zelfs voor de zwaarste variant zijnde gelast stalen brugdek. De kosten voor het bewegingswerk vallen buiten de scope;
- het aandeel van slopen van de staal hoog is omdat de slijtlaag er afgestraald wordt en vanwege het verschroten. Bij de VVK varianten wordt platen niet vermalen maar verkleind om daarna incl. slijtlaag te kunnen verbranden.
- het verschil in $VVVK_{2015}$ en toekomstscenario $VVVK_{2025}$ zit in:
    - mogelijk toekomstige vlas aankoopprijs: €5/kg i.p.v. €30/kg
    - mogelijk toekomstige vlas behandelprijs: €1/kg i.p.v. €2/kg
    - mogelijk toekomstig vezelvolume gehalte: 42,5% i.p.v. 35,0%
    - mogelijk toekomstig hercoaten: als GVVK



Figuur 7.5 Initiële kosten (excl. €co).

Bij figuur 7.5 kan worden opgemerkt dat:

- dit de traditionele aanbestedingskosten voor alleen realisatie (zonder EMVI) betreft;
- de kosten voor engineering voor alle varianten gelijk aangehouden zijn;
- de kosten voor transport onderling bijna gelijk zijn (omvang gelijk, gewichtsverschil beperkt);
- de hoge materiaal kosten voor vlas zijn hiervoor al toegelicht;
- de hoge kosten voor samenstellen sandwiches komen zowel uit kilo's VVK als uit kilo's kern voort, maar vooral uit grote benodigde uren per kilogram materiaal.



Figuur 7.6 Netto Contante Waarde v/d LCC.

Bij figuur 7.6 kan worden opgemerkt dat:

- de lange termijn kosten zijn middels NCW bepaald met 2% verschil tussen rente en inflatie;
- hierbij niet alleen wordt gekeken naar kosten op korte termijn (zoals in figuur 7.5), en hierbij kosten op lange termijn niet volledig worden meegenomen (zoals in figuur 7.4).

Gevoeligheid aandeel toekomstige kosten

Uit vergelijking van de resultaten van figuren 7.4 t/m 7.6 blijkt dat de resultaten gevoelig kunnen zijn voor het aandeel van de toekomstige kosten. Het is van belang meerdere scenario's te bekijken.

Gevoeligheid voor milieu-impact kosten methode

Naast de eco-costs methode is de milieu-impact ook bepaald met de MKI methode: zie tabel 7.1. Dit resulteert in gelijksoortige onderlinge resultaten. De MKI kosten blijken steeds ruwweg twee-derde van de eco-costs te bedragen.

Variant: Milieu€ methode	Stalen lasconstructie	GVVK sandwich	VVVK sandwich	Staalplaat sandwich
Eco-costs %	9,4%	6,1%	5,4%	6,3%
MKI-kosten%	5,9%	4,6%	4,0%	4,2%

Tabel 7.1 percentage milieukosten van TCO

De milieukosten die Rijkswaterstaat gebruikt bij ENVI aanbestedingen worden veelal met Dubocalc bepaald dat is gebaseerd op MKI-kosten. De MKI-kosten bedragen ruwweg 4 a 6 % van de totale kosten, en zijn het laagst bij VVVK en het hoogst voor de stalen lasconstructie.

8 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies
Door r-PET schuimkern toe te passen i.p.v. maagdelijk schuim kan de milieu-impact van monoliet sandwich constructies significant ingeperkt worden.

De bestaande varianten stalen lasconstructie en GVVK sandwich ontlopen elkaar niet significant in de LCC beschouwingen.
Van de nieuwe varianten springt in de LCC staalplaat sandwich er steeds gunstig uit, en VVVK sandwich er vooralsnog ongunstig uit. De reden dat VVVK sandwich tegenvalt vindt zijn oorzaak voornamelijk in het lage te behalen vezel volume percentage bij vacuüm infusie. Daarnaast zijn de wat lagere stijfheid en lage sterkte daar ook deels debet aan.

Alleen als bij monoliete sandwich constructies dezelfde vezel volume gehaltes bij vlasvezel gehaald kunnen worden als bij glasvezels, kunnen deze competitief worden.

Uitgangspunten van MRPI databladen, kunnen grote invloed hebben op de milieu-impact. Deze invloed werkt overigens in de LCC beschouwingen zeer beperkt door omdat de milieu-impact kosten slechts een beperkt aandeel vormen in de totale kosten.

Aanbevelingen
Aanbevolen wordt om te onderzoeken of hoge vezelvolume percentage haalbaar zijn voor biobased monoliet draagconstructies, middels:

- VlasVVK met andere/aangepaste productieprocessen;
- met andere bio-vezels / harsen in VVK's.

Aanbevolen wordt om te onderzoeken of staalplaat sandwiches technisch haalbaar zijn t.a.v.:

- hechting van de kern aan staalplaten;
- verbinden in dwarsrichting van verzinkte stalen, bodemplaat stroken;
- hoe kern en huiden gescheiden kunnen worden en wat de milieukosten en totale kosten hiervan bedragen.

Aanbevolen wordt voor alle sandwich varianten met dunne dekplaat vervolgonderzoek te doen naar impact van vallende objecten op een dek. Dit om naast toepassing in voet/fietsroutes ook in wegverkeersroutes mogelijk te maken voor sandwiches zonder (compartimenterende) lijven.

Ten slotte wordt aanbevolen om de milieu-impact van durable bio-based harsen te onderzoeken om deze beschikbaar te krijgen in milieu databases.

Adviezen
Geadviseerd wordt om het gebruik van gerecycled-PET-schuim te propageren als kernmateriaal voor sandwich draagconstructies.

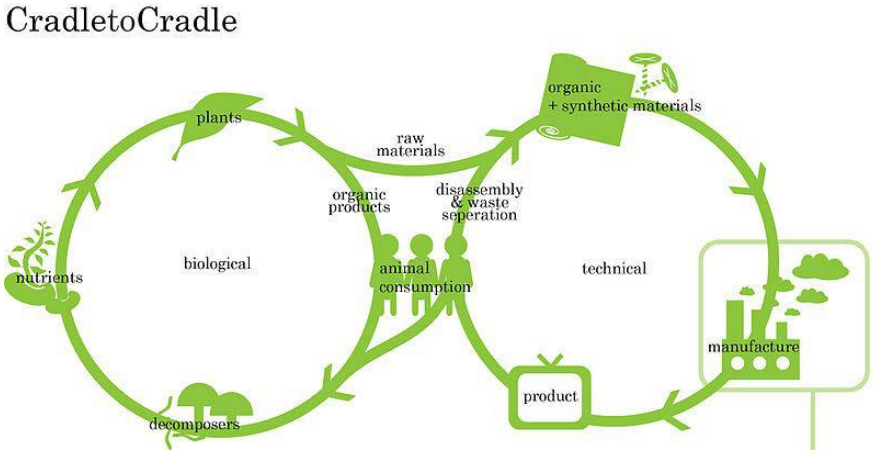
Geadviseerd wordt om in het kader van duurzaam ontwerpen van draagconstructies in zijn algemeenheid te streven naar:

- makkelijk te scheiden en te recycleren materialen;
- weinig manuren => eenvoudige constructies;
- weinig onderhoud;
- laag gewicht (bij bewegen).

Een staalplaat sandwich lijkt aan al deze criteria te kunnen voldoen.

Discussie

Ten aanzien van milieu-impact is het een misverstand om te denken dat biobased materialen per definitie gunstiger zijn dan niet-biobased materialen. Bij het streven naar lage milieu-impact kunnen zowel materialen in de biologische als in de technische cyclus de gunstigste blijken, dan wel een hybride combinatie.



Een aspect dat naast milieu-impact tevens mee kan wegen is dat door verbouwen van natuurvezels voor bijv. draagconstructietoepassingen minder areaal beschikbaar is om voedsel op te verbouwen.

Bibliografie

Bosman. (2015). *Biocomposiet brugdek - onderzoek naar lange duur gedrag.* Zwolle: Windesheim.

Cichocki J.L., T. F. (2001). Thermoelastic anisotropy of a natural fiber. *Composites Sciences and Technology 62* (pp. 669-678). Elsevier.

CUR96, C.-c. 1. (2015). *Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies CUR aanbeveling 096.* Gouda.

EY&Biinc. (2014). *LCA of four generic UP resins and onde VE resin.* Rotterdam: AVK Industrie Vereinigung Faserverstaerkte Kunststoffen.

Fagerberg, L. (2003). *Wrinkling for sandwich panels.* Stockholm.

L.R. Millman, J. G. (2012). Environmental Evaluation of Abrasive Blasting with Sand, Water, and Dry Ice;. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction Vol 1, No 3,*, (pp. 174-182).

Le Duigou A., e. a. (2011). Environmental Impact Analysis of the Production of Flax Fibres to be Used as Composite Material Reinforcement. *Journal of biobased materials and bioenergy Vol 5 1-3.*

NEN6786. (2001). *Voorschriften voor het ontwerpen van beweegbare bruggen (VOBB).* Delft: NEN.

NEN-EN1990. (2011). *Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp.* Delft: NEN.

NEN-EN1991-2. (2011). *Eurocode 1-2: Verkeersbelasting op Bruggen.* Delft: NEN.

NEN-EN1993-1-1. (2011). *Ontwerp en berekening van staalconstructies.* Delft: NEN.

NEN-EN1993-2. (2006). *Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 2: Stalen bruggen.* Delft: NEN.

Oksman. (1999). High Quality Flax Fibre Composites Manufactured by the Resin Transfer Moulding Process. *57th Annual Technical Conference (ANTEC '99).* New York City: Society of Plastic Engineers.

SKH90-01. (2009). *SKH Publicatie 90-01 Praktische rekenmethode voor sandwich en sandwich rib elementen 6-10-2009.* SKH.

Vernin, N. (2016 March). Alternatives to balsa wood in wind turbine blades. *JEC Composites Magazine, 103* , 86-87.

Vögtlander, J. (2015). *http://www.ecocostsvalue.com*. Opgeroepen op 2015, van http://www.ecocostsvalue.com

Vuure, A. v. (2015). Compressivepropertiesofnatural fibrecomposites. *Material Letters 149*, 138-140.

Dankwoord

Wij zijn de studenten Olmo Asmussen en Harlod Rog dank verschuldigd voor het opzetten van dit onderzoek. Wij zijn de heer Ter Laak van de CTC groep Hengelo dank verschuldigd voor het begeleiden van de studenten.

Wij zijn de heer Ter Laak van de CTC groep Hengelo en de heer Weeke van Machinefabriek Emmen dank verschuldigd voor het aanleveren van kostengegevens voor de varianten.

Verder is kosten-informatie ingewonnen bij van Gansewinkel, 4PET, Bouwman, Stex Fibers en Boekestein. Ook deze bedrijven worden bedankt voor hun medewerking.

Bijlage 1 VVK metingen – stijfheid, rek en vezelgehalte

Metingen

(nieuwe) meting gepland zodra klimaatkamer 24+h op orde. | aanvullende meting lopend API | n= aantal valide metingen

	meting lopend							problematisch						
	Glas Biaxiaal	std. dev	n	rapport	Glas Triaxiaal	std. dev	n	rapport	Vlas	std. dev	n	rapport	unit	norm
Shore D	92,4	1,34	5		90,6	2,07	5		86,2	0,84	5			
E-modulus 0°	13400	279	8	2015-99	28800	2310	9	2015-102	5470	288	11	2015-172	MPa	ISO 527-4
E-modulus 90°	13200	152	9	2015-100	13200	216	9	2015-103	5530	333	8	2015-173	MPa	ISO 527-4
E-modulus 45°	24800	340	6	2015-101	18400	608	6	2015-104	9450	599	8	2015-093	MPa	ISO 527-4
Krachtmaximaal 0°	118	2,9	8	2015-99	587	30	9	2015-102	63,1	2,84	11	2015-172	MPa	ISO 527-4
Krachtmaximaal 90°	122	1,8	9	2015-100	85,7	2,2	9	2015-103	58	3,54	8	2015-173	MPa	ISO 527-4
Krachtmaximaal 45°	394	16,6	6	2015-101	225	7,0	6	2015-104	114	8,9	8	2015-093	MPa	ISO 527-4
Buig modulus 0°									4246	438	8	2015-094	MPa	ISO 178
Buig modulus 90°					12092	1035,42	8	2015-183	3823	261	5	2015-095	MPa	ISO 178
Buig max kracht 0°									95,9	4	8	2015-094	MPa	ISO 178
Buig max kracht 90°					165	6,04	8	2015-183	91,3	5	5	2015-095	MPa	ISO 178
Dichtheid	1954	9	6	ER-15.003D	1922	18	5	ER-15.003D	1238	5	5	ER-15.003D	Kg/m3	ISO 1183-1
Wateropname													%	ISO 63
Tg midpoint	79,8	2,215	2	J2514lengte+ J2514dwars	90,3	2,325	2	J2514lengte+ J2514dwars	79,6	0,815	2	J2514lengte+ J2514dwars	°C	ISO 11359-2
Lineaire uitzettingscoefficient (ISO 11359-2) 0°	0,016115	0,001205	2	O114701	0,019045	0,002725	2	O114703	0,0098	0,002145	2	O114705	mm/m/K	ISO 11359-2
Lineaire uitzettingscoefficient (ISO 11359-2) 90°	0,01469	0,00038	2	O114702	0,01501	0,00035	2	O114704	0,0332	0,00161	2	O114706	mm/m/K	ISO 11359-2
Compressie modulus 0°													MPa	ISO 604
Compressie sterkte 0°														
Compressie modulus 90°													MPa	ISO 604
Compressie sterkte 90°														
Vf% -afbrand	72,8	0,25	3	ER-15.003A	69,9	0,08	3	ER-15.003A	0,49	0,007	3	ER-15.003A	%	ISO 1172
ILSS 0°	29,99	0,78	5	2015-136	46,1	3,47	6	2015-174	15,34	0,74	10	2015-134	N/mm^2	
ILSS 90°	31,55	1,91	6	2015-137	20,4	0,04	2	2015-175	15,52	0,82	10	2015-135	N/mm^2	
ILSS 0° - faalmodel	breukvezel compressie			2015-136					trekbreuk van vezel			2015-134		
ILSS 90° - faalmodel	breukvezel compressie			2015-137					trekbreuk van vezel			2015-135		

Interpretatie

dichtheid	vol.%	massa	mas.%	std.dev	v.c.	
2,56	55,6%	1,423	72,8%	0,78%	1,07%	glasvezel
1,20	44,4%	0,533	27,2%			matrix
		1,956				

dichtheid	vol.%	massa	mas.%	
2,56	52,1%	1,334	69,9%	
1,20	47,9%	0,575	30,1%	
		1,909		

dichtheid	vol.%	massa	mas.%	
1,35	35,0%	0,473	38,2%	vlasvezel
1,00	1,9%	0,019	1,5%	water
0,00	0,9%	0,000	0,0%	lucht
1,20	62,2%	0,747	60,3%	matrix
		1,238		

73% buigmodulus t.o.v. trekmodulus

	E	σ		
gemiddelde, vezel //	72.000	1.417		
gemiddelde, vezel ⊥	72.000			
E_{matrix}	3.500			
vvf	55,6%	55,6%		
Ec// UD lamel	41.586			
Ec⊥ UD lamel	7.431			
lagen	1/2	1/2		
berekend, 0/90 laminaat	24.508	394		
gemeten, 0/90 laminaat	24.800	394		
	98,8%	100,0%		
variatiecoëfficient v.c.	1,37%	4,21%	<<	10%
karakeristieke waarde spanning		1.287		
karakeristieke waarde rek		1,8%	≈	1,9%
		n=6		CUR UD

	E	σ		
	54.500	652		
	350			
	350			
	35,0%	35,0%		
	19.303			
	350			
	1/2	1/2		
	9.826	114		
	9.450	114		
	104,0%	100,0%		
	6,34%	7,81%	<	10%
		550		
		1,0%	plastisch:	1,7%
		n=8		Productinfoblad UD

Het verschil tussen vezelvolume gehalte van GVVK en VVVK bedraagt 55,6% - 35,0% ≈ 20% voor 2-axiaal proefstukken. Bij 3-axiaal is het gehalte enkele procenten lager. In LCA wordt voor 4-axiaal 50% voor GVVK & 35% voor VVVK aangehouden.

Interpretatie E-moduli vezel en matrix op basis van metingen composiet

Voor de stijfheid van een **UD lamel** geldt evenwijdig a/d vezel de mengregel / parallelle model:

$$E_{c\parallel} = \mathrm{vv} \cdot E_{f\parallel} + (1 - \mathrm{vv}) \cdot E_m$$

Ingevuld voor 55,6% glasvezelvolume gehalte, $E_{glas\parallel}$ = *72.000N/mm²* & E_{matrix} = *3.500 N/mm²*:

$$E_{c\parallel} = 0{,}556 \cdot 72.000 + (1 - 0{,}556) \cdot 3.500 = 41.586\ N/mm^2$$

Ingevuld voor 35% vlasvolume, $E_{vlas\parallel}$ = *54.500N/mm²* & E_{matrix} = *3.500N/mm²(on-gescheurd)*:

$$E_{c\parallel} = 0{,}350 \cdot 54.500 + (1 - 0{,}350) \cdot 3.500 = 21.350\ N/mm^2$$

Ingevuld voor 35,0% vlasvolume, $E_{vlas\parallel}$ = *54.500N/mm²* & E_{matrix} = *350 N/mm² (gescheurd)*:

$$E_{c\parallel} = 0{,}350 \cdot 54.500 + (1 - 0{,}350) \cdot 350 = 19.303\ N/mm^2$$

Voor de stijfheid van UD lamel geldt loodrecht op de vezel het seriële model:

$$E_{c\odot} = \frac{1}{\frac{\mathrm{vv}}{E_{f\odot}} + \frac{(1 - \mathrm{vv})}{E_m}}$$

Ingevuld voor 55,6% glasvezelvolume, $E_{glas\odot}$ = *72000N/mm²* & E_{matrix} = *3.500 N/mm²*:

$$E_{c\odot} = \frac{1}{\frac{0{,}556}{72.000} + \frac{(1 - 0{,}556)}{3.500}} = 7.431\ N/mm^2$$

Ingevuld voor 35% vlasvolume, $E_{vlas\odot}$ = *350 N/mm² (hol)* & E_{matrix} = *350 N/mm²* (gescheurd):[5]

$$E_{c\odot} = \frac{1}{\frac{0{,}350}{350} + \frac{(1 - 0{,}350)}{350}} = 350\ N/mm^2$$

Voor de stijfheid van **(0°/90°)$_s$** ***laminaat*** geldt:

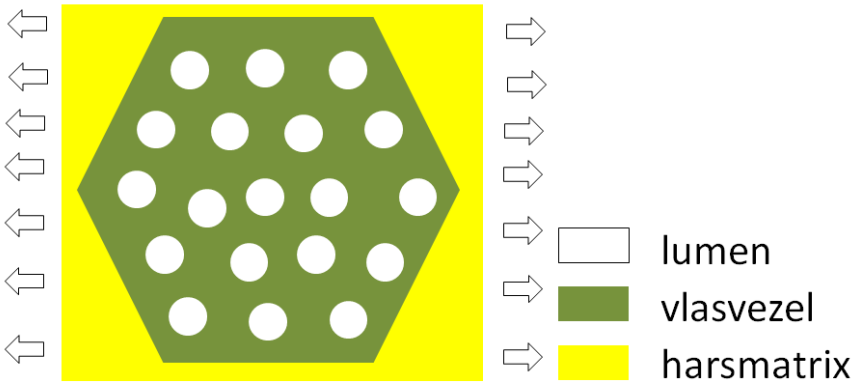
$$E_c = 0{,}5 \cdot E_{c\parallel} + 0{,}5 \cdot E_{c\odot}$$

Ingevuld voor **glas** met on-gescheurde matrix:

$$E_c = 0{,}5 \cdot 41.586 + 0{,}5 \cdot 7.431 = 24.508\ N/mm^2 \approx 24.800\ meting$$

Ingevuld voor **vlas** met gescheurde matrix:

$$E_c = 0{,}5 \cdot 19.303 + 0{,}5 \cdot 350 = 9.826\ N/mm^2 \approx 9.450\ meting$$



Figuur 1-1 Visualisatie doorsnede technische vlasvezelbundel bestaande uit elementaire vezels, elk met een holte (lumen). Eventuele lege holtes verlagen stijfheid en sterkte loodrecht op de vezel.

[5] Ingevulde waarden (350 N/mm²) voor stijfheid in dwarsrichting van de vlasvezel en gescheurde stijfheid van matrix zijn volledig arbitrair. Wel komt berekende laminaatwaarde dan redelijk overeen met gemeten waarde. N.B.: van natuurlijke vezels is bekend dat stijfheid in dwarsrichting een tiende kunnen zijn van langsrichting, en dat holtes bij sommige productiemethoden worden gevuld met hars (Cichocki J.L., 2001)

Controle E-moduli vezel en matrix op basis van gegevens van vlas productleverancier

Voor de stijfheid van een **UD lamel** geldt evenwijdig a/d vezel de mengregel / parallelle model:

$$E_{c\parallel} = \mathrm{vv} \cdot E_{f\parallel} + (1 - \mathrm{vv}) \cdot E_m$$

Ingevuld voor 30% vlasvolume, $E_{vlas\parallel}$ *= 54.500N/mm²* & E_{matrix} *= 3.500N/mm²(on-gescheurd)*:

$$E_{c\parallel} = 0{,}3 \cdot 54.500 + (1 - 0{,}3) \cdot 3.500 = 18.800\ N/mm^2 \approx 18.800\ z.o.z.$$

Ingevuld voor 30% vlasvolume, $E_{vlas\parallel}$ *= 54.500N/mm²* & E_{matrix} *= 350 N/mm² (gescheurd)*:

$$E_{c\parallel} = 0{,}3 \cdot 54.500 + (1 - 0{,}3) \cdot 350 = 16.600\ N/mm^2$$

Voor de stijfheid van UD lamel geldt loodrecht op de vezel het seriële model:

$$E_{c\odot} = \frac{1}{\frac{\mathrm{vv}}{E_{f\odot}} + \frac{(1 - \mathrm{vv})}{E_m}}$$

Ingevuld voor 30% vlasvolume, $E_{vlas\odot}$ *= 350 N/mm² (hol)* & E_{matrix} *= 350 N/mm²* (gescheurd):[5]

$$E_{c\odot} = \frac{1}{\frac{0{,}3}{350} + \frac{(1 - 0{,}3)}{350}} = 350\ N/mm^2$$

Voor de stijfheid van **$(0°/90°)_s$ laminaat** geldt:

$$E_c = 0{,}5 \cdot E_{c\parallel} + 0{,}5 \cdot E_{c\odot}$$

Ingevuld voor vlas met gescheurde matrix:

$$E_c = 0{,}5 \cdot 16.600 + 0{,}5 \cdot 350 = 8.475\ N/mm^2 \approx 8.700\ z.o.z.$$

Biotex Flax Unidirectional Fabric
Technical Data Sheet
March 2012

Introduction

Biotex Flax fabrics are reinforcement textiles based on natural flax fibre and designed for fibre-reinforced polymer composite applications. The fabrics can be used with a wide variety of resins in processes including wet lay-up, vacuum infusion, resin transfer moulding (RTM), press moulding, pultrusion, prepregging etc. The fabrics can be processed in a similar way to glass or carbon fibre.

Biotex natural reinforcements and intermediates provide the high performance and easy processing normally associated with glass fibre composites but with lower weight and environmental impact. They are suitable for semi-structural and decorative applications in sectors such as automotive, construction, marine, sports and consumer goods. Biotex uses a unique Twistless Technology to ensure a high degree of fibre alignment, impregnation and performance.

Specification

Specification for standard fabric (other constructions available on request):

Fabric specifications	
Style	Unidirectional
Warp yarn	Biotex Flax 250tex
Weft/carrier yarn	Cotton
Warp count	11 ends/cm
Weft count	1 pick/cm
Weight	275g/m^2
Tolerance on weight	+/-5%
Width	230mm
Tolerance on width	+/-2%

Fibre Properties

Typical average properties for flax fibres:

Flax fibre properties*	
Density	1.5g/cm^3
Diameter**	20µm
Tensile modulus	50GPa
Tensile strength	500MPa
Strain	2%

*Flax fibre is a natural product and a certain amount of variation should be expected.
**Flax fibre has a non-circular cross-section.

Composites Evolution Ltd, 4A Broom Business Park, Bridge Way, Chesterfield, S41 9QG, UK
■ Tel: +44(0)1246 266248 ■ Fax: +44(0)1246 266249 ■ Email: info@compositesevolution.com ■ www.compositesevolution.com
Company Registration No: 07024132

Composite Properties

Property	Unidirectional flax-polyester vacuum infused laminate (0 dir)	Test Method
Fibre content by vol	30%	
Density	1.30g/cm^3	
Tensile modulus	18.8GPa	ISO 527-4
Tensile strength	174MPa	ISO 527-4
Tensile elongation	1.5%	ISO 527-4
Flexural modulus	15.1GPa	ISO 14125
Flexural strength	196MPa	ISO 14125

Sizing

Biotex Flax is supplied unsized as standard. Sizings are possible on request.

Packaging

Standard packaging details (other packaging options are possible on request):

Packaging details	
Roll width	230mm
Roll length	50m
Net weight	3.16kg
Core	Cardboard tube
Wrapping	Polythene film

Orders for multiple rolls are typically packed in a cardboard carton on a standard wooden pallet and covered with stretch wrap.

Storage

Biotex Flax should be stored in a cool dry place away from direct sunlight. Flax fibre can absorb moisture from the atmosphere so drying may be required before use, especially if exposed to excessive humidity.

Safety

Flax fibre is a naturally occurring, non-hazardous material, but typical precautions should be taken when handling the material including using appropriate PPE and adequate ventilation. See MSDS for details.

Disclaimer

The information provided here is believed to be accurate but should be considered indicative only. It is the responsibility of the customer to check the suitability of the product for their specific application prior to use.

Composites Evolution Ltd, 4A Broom Business Park, Bridge Way, Chesterfield, S41 9QG, UK
■ Tel: +44(0)1246 266248 ■ Fax: +44(0)1246 266249 ■ Email: info@compositesevolution.com ■ www.compositesevolution.com
Company Registration No: 07024132

Biotex Flax +/-45 Biaxial Fabric
Technical Data Sheet
March 2012

Introduction

Biotex Flax fabrics are reinforcement textiles based on natural flax fibre and designed for fibre-reinforced polymer composite applications. The fabrics can be used with a wide variety of resins in processes including wet lay-up, vacuum infusion, resin transfer moulding (RTM), press moulding, pultrusion, prepregging etc. The fabrics can be processed in a similar way to glass or carbon fibre.

Biotex natural reinforcements and intermediates provide the high performance and easy processing normally associated with glass fibre composites but with lower weight and environmental impact. They are suitable for semi-structural and decorative applications in sectors such as automotive, construction, marine, sports and consumer goods. Biotex uses a unique Twistless Technology to ensure a high degree of fibre alignment, impregnation and performance.

Specification

Specification for standard fabric (other constructions available on request):

Fabric specifications	
Style	+/-45 biaxial stitched non-crimp fabric
-45° ply	Biotex Flax 250tex, 300g/m^2
+45° ply	Biotex Flax 250tex, 300g/m^2
Stitch thread	Polyester 78dtex
Stitch type	Pillar
Total weight	600g/m^2
Tolerance on weight	+/-5%
Width	1270mm
Tolerance on width	+/-2%

Fibre Properties

Typical average properties for flax fibres:

Flax fibre properties*	
Density	1.5g/cm^3
Diameter**	20µm
Tensile modulus	50GPa
Tensile strength	500MPa
Strain	2%

*Flax fibre is a natural product and a certain amount of variation should be expected.
**Flax fibre has a non-circular cross-section.

Composites Evolution Ltd, 4A Broom Business Park, Bridge Way, Chesterfield, S41 9QG, UK
■ Tel: +44(0)1246 266248 ■ Fax: +44(0)1246 266249 ■ Email: info@compositesevolution.com ■ www.compositesevolution.com
Company Registration No: 07024132

Composite Properties

Property	Biaxial flax-polyester vacuum infused laminate (0/90 layup, 0 dir)	Test Method
Fibre content by vol	30%	
Density	1.30g/cm^3	
Tensile modulus	8.7GPa	ISO 527-4
Tensile strength	85MPa	ISO 527-4
Tensile elongation	1.7%	ISO 527-4
Flexural modulus	6.8GPa	ISO 14125
Flexural strength	135MPa	ISO 14125

Sizing

Biotex Flax is supplied unsized as standard. Sizings are possible on request.

Packaging

Standard packaging details (other packaging options are possible on request):

Packaging details	
Roll width	1270mm
Roll length	50m
Net weight	38kg
Core	Cardboard tube
Wrapping	Polythene film

Orders for multiple rolls are typically packed in a cardboard carton on a standard wooden pallet and covered with stretch wrap.

Storage

Biotex Flax should be stored in a cool dry place away from direct sunlight. Flax fibre can absorb moisture from the atmosphere so drying may be required before use, especially if exposed to excessive humidity.

Safety

Flax fibre is a naturally occurring, non-hazardous material, but typical precautions should be taken when handling the material including using appropriate PPE and adequate ventilation. See MSDS for details.

Disclaimer

The information provided here is believed to be accurate but should be considered indicative only. It is the responsibility of the customer to check the suitability of the product for their specific application prior to use.

Composites Evolution Ltd, 4A Broom Business Park, Bridge Way, Chesterfield, S41 9QG, UK
■ Tel: +44(0)1246 266248 ■ Fax: +44(0)1246 266249 ■ Email: info@compositesevolution.com ■ www.compositesevolution.com
Company Registration No: 07024132

Bijlage 2 Plooicapaciteit sandwich huidplaat

Veelal wordt als plooisteun van kern aan sandwichhuiden Hoffs theoretische bedding-benadering gebruikt, met de formule:

$$\sigma_{Ho} = 0.5\sqrt[3]{E_f E_c G_c}$$ met indices f= flange/flens en c= core/kern

Plantema's exponentiele benadering leidt ook tot dezelfde formule, echter met een coëfficiënt van 0.825 i.p.v. 0,5; Allen's differentiaalvergelijking benadering leidt ook tot dezelfde formule, echter met een coëfficiënt van 0,78 i.p.v. 0,5. De verschillen worden toegeschreven aan belasting onder druk (beide huiden plooien tegelijk) en plooien onder momentbelasting (alleen dekplaat plooit). (Fagerberg, 2003)

Voor stabiliteit (i.c. plooien) moet de totale veiligheidsfactor minimaal 2,5 bedragen. (CUR96, 2015) Daarmee wordt de invloed van geometrische imperfecties (vormafwijkingen) verdisconteerd. Voor de totale veiligheidsfactor wordt het product van materiaalfactor (γ_M) en belastingsfactor (γ_f) aangehouden. De conversiefactor wordt hier buiten gehouden

Indien bij een stalen dekplaat 0,825 als coëfficiënt wordt gebruikt kan de verhouding tussen 0,5 en 0,825 (= 1,65) in geval van buiging worden gebruikt om de 2,5 deels te overbruggen.
De totale veiligheidsfactor voor staal wordt dan: $1,65 \times \gamma_M \times \gamma_f = 1,65 \times 1,0 \times 1,5 \approx 2,5$.
Voor **staal**, met E_f= 210.000 N/mm^2 leidt dit tot[6]:

$-0,5\times(210.000\ N/mm^2\times76N/mm^2\times27N/mm^2)^{1/3} = -377\ N/mm^2 <\approx$ **-355** N/mm^2

Indien bij een VVK dekplaat 0,7 als coëfficiënt wordt gebruikt kan de verhouding tussen 0,6 en 0,825 (= 1,20) in geval van buiging worden gebruikt om de 2,5 deels te overbruggen.
De totale veiligheidsfactor voor VVK wordt dan: $1,20 \times \gamma_M \times \gamma_f = 1,20 \times (1,15\times1,2)^7 \times 1,5 \approx 2,5$.
Voor **GVVK**, met E_f= 21.850 N/mm^2 leidt dit tot[6,8]:

$-0,7\times(21.850\times76\times27)^{1/3} = -249\ N/mm^2 \equiv$ **-1,1%** $>\approx -1,3\% \equiv -284\ N/mm^2$

Voor **VVVK**, met E_f= 5.775 N/mm^2 leidt dit tot[6,8]:

$-0,7\times(5.775\times76\times27)^{1/3} = -160\ N/mm^2 \equiv -2,8\% << -1,7$ / **0,9%** $\equiv -52\ N/mm^2$

[6] De mechanische eigenschappen v/d gekozen r-PET kern van 115kg/m^3: p.t.o.
[7] Geteste VVK mechanische eigenschappen: γ_{Rd}= 1,15; variatiecoëfficiënt <0,1 (zie bijlage 1): γ_m= 1,2 (nagehard).
[8] De afleiding v/d E-moduli van de VVK-huid en de toelaatbare rekken: z.o.z.

E-moduli van de VVK-huid

Voor **GVVK** met 50% vezel (vol.) waarvan 75% in hoofdrichting (ǁ) & 25% in dwarsrichting (Θ), en met E_g= 72.000 N/mm^2; E_m= 3,500 N/mm^2 volgt:

$E_{\parallel}$= 0,5×72.000+0,5×3,500=37.750 N/mm^2; E_{Θ}= 1/(0,5/72.000+0,5/3.500)= 6.775 N/mm^2;

E_c= 0,75×37.750 +0,25×6.775≈ 29.980 N/mm^2;

kort durende verkeersbelasting: η= 1,0; herhaalde belasting: η= 0,9;

in natte omstandigheden: η= 0,9; op andere dan 20°C temperaturen: η= 0,9;

E_c= 1.0×0.9×0.9×0.9×29.980≈ 21.850 N/mm^2.

Voor **VVVK** met 35% vezel (vol.) waarvan 75% in hoofdrichting (ǁ) & 25% in dwarsrichting (Θ), en met $E_{v\parallel}$= 32.500 N/mm^2; $E_{v\Theta}$= 350 N/mm^2 E_m= 3.500 N/mm^2 volgt:

$E_{\parallel}$= 0,35×32.500 + 0,65×350≈ 11.600 N/mm^2; E_{Θ}= 1/(0,35/350 + 0,65/3.500)= 845 N/mm^2;

E_c= 0,75×11.600 +0,25×845≈ 8.900 N/mm^2;

kort durende verkeersbelasting: η= 1,0; herhaalde belasting: η= 0,9;

in natte omstandigheden: η= 0,8; op andere dan 20°C temperaturen: η= 0,9;

E_c= 1.0×0.9×0.8×0.9×8.900≈ 5.775 N/mm^2.

Rekken huid

De rekcapaciteit van **staal** bedraagt:

staal ε = ±355N/mm^2 / 210.000N/mm^2 = ±0,17% elastisch

(staal ε = ±15 x 0,17% =±2,5%plastisch) (NEN-EN1993-1-1, 2011)

De rekken waarbij **GVVK** UD lamellen bezwijken bedragen (CUR96, 2015):

GVVK $\varepsilon = +1{,}9\%$ karakteristieke waarde evenwijdig a/d vezels

GVVK $\varepsilon = -1{,}3\%$ karakteristieke waarde evenwijdig a/d vezels (65% van trek)

GVVK $\varepsilon = +0{,}27\%$ karakteristieke waarde loodrecht o/d vezels*

GVVK $\varepsilon = -0{,}88\%$ karakteristieke waarde loodrecht o/d vezels*

*vanwege spanningsconcentraties in de matrix rond vezels

De rekken waarbij **VVVK** UD lamellen bezwijken bedragen:

VVVK $\varepsilon = +1{,}7\%$[6] karakteristieke waarde evenwijdig a/d vezels

VVVK $\varepsilon << -1{,}7\%$ karakteristieke waarde evenwijdig a/d vezels (incl. plastisch)

sterkte en E-modulus : 60% van trek (Vuure, 2015)

VVK verbonden aan staal zal dus niet scheuren voordat staal vloeit. Door te controleren of de stalen dekplaat niet vloeit, is dus tevens de verbinding naar VVK gecontroleerd. Indien de stalen dekplaat lokaal ingedeukt is, dan kan de interface daaronder ook beschadigd zijn.

Mechanische eigenschappen van gekozen r-PET kern

March 2012

armacell engineered foams

TECHNICAL DATA - preliminary

ArmaFORM PET GR: 'green' structural foam core			Polyethylene Therephthalate (Welded)	
			GR80 (W)	**GR115 (W)**
Density	ISO 845	kg/m³	80[1]	115[1]
Compression Strength	ASTM D 1621 b	MPa	0,95	1,7
Compression Modulus	ASTM D 1621 b ISO 844	MPa MPa	71 57	114 76
Shear Strength	ISO 1922	MPa	0,5	0,9
Shear Modulus	ISO 1922	MPa	18	27
Shear Strain	ISO 1922	%	15	10
Tensile Strength	ASTM C 297	MPa	1,9	2,4
Tensile Modulus	ASTM C 297	MPa	68	108
Thermal Conductivity	DIN EN ISO 12667	W/mK	0.032	0.035

	Thickness	**Length**	**Width**	**Diagonal**
Dimensions (mm) [3]	from 5 to 120	2.440	1.005	depending on length / width
Tolerances (mm) (at room temperature)	≤ 100mm: +/- 0,5 ≥ 100mm: +/- 1	+/- 5	+/- 5	≤ 4