

Rekenen aan Vezelversterkte Kunststoffen!

*Kees van IJselmuiden
Liesbeth Tromp*

Staal vs VVK

onderdeel	staal	VVK
profielen	standaard IPE, HEA, enz	Pultrusie: IPE, box, C-profielen
platen	staalplaat of orthotrope dek	VVK-plaat of sandwich
materiaal	S235;S355; enz.	GVK, CVK, Hybride
E-modulus	isotroop, E in alle richtingen gelijk	anisotroop, E in alle richtingen anders en invloedbaar
uitzetting	in alle richtingen gelijk	in alle richtingen ongelijk, afhankelijk van vezels
verbindingen	bouten en lassen	bouten (indien nodig), lijmen en injecteren

Wat is composiet?

- (Kunststof) Composiet = vezelversterkte kunststof
= vezel + hars (matrix)
- VVK, GVK, FRP, GFRP, CFRP, etc.



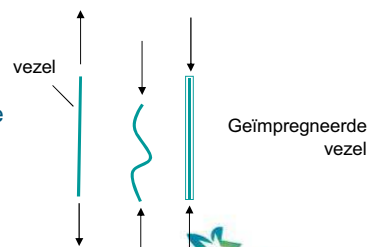
Vezel en hars

Wat is de rol van de vezel?

- Mechanische eigenschappen: stijfheid, sterkte (Trek en druk)

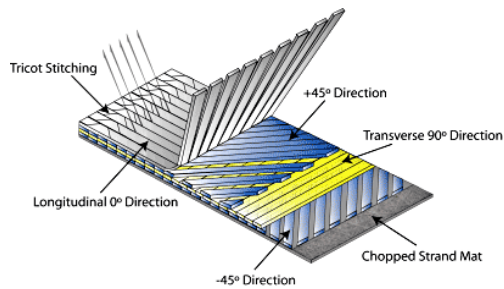
Wat is de rol van de hars?

- Drukondersteuning vezel
- Verlijming tot laminaat
- Chemische eigenschappen (UV, vocht, chemicaliën, brandeigenschappen, etc)
- Productieproces parameters (viscositeit, cure condities, etc).

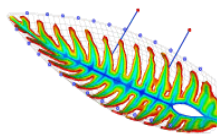


Vezeloriëntatie / Laminaat

Types	Description
Unidirectional (0° or 90°)	425 - 2400g/m ²
Biaxial (± 45°)	250 - 1200g/m ² Combination & tape available
Biaxial (0° / 90°)	300 - 1700g/m ² Combination available
Triaxial (0° / ±45°) (-45° / 90° / +45°)	600 - 1800g/m ² Combination available
Quadriaxial (0° / -45° / 90° / +45°)	600 - 2400g/m ² Combination available



Vacuüminjectie

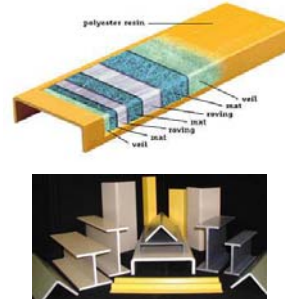
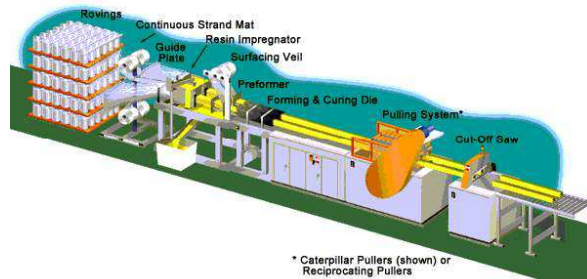


simulation



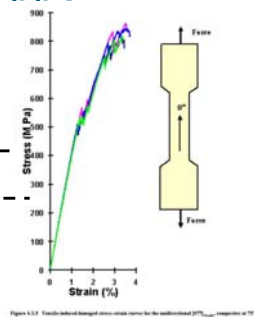
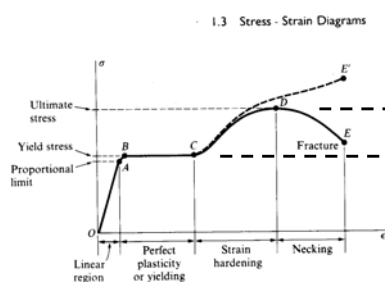
- Injectie van hars onder folie met 1 bar drukverschil.
- Geen beperkingen in afmetingen doorsnede (dikte is bepalend)
- Grote vormvrijheid en materiaalcombinaties materialen zijn mogelijk

Pultrusie



- Continue geautomatiseerd proces voor productie prismatische profielen
- Beperkte afmetingen doorsnede
- Vezels vooral in lengterichting

Mechanische eigenschappen



UD Glas

	tensile modulus GPa	ultimate strength MPa	strain at failure (%)	specific density
▪ Staal 36:	210	400	0.2	7.85
▪ UD glas, Vf 50%	37.7	565	1.5	1.88
▪ QI glas Vf 50%	18.6	222	1.2	1.88
▪ UD Koolstof Vf 60%	135	1500	1.05	1.56
▪ 0/90 Koolstof Vf 50%	70	600	0.85	1.5

Voetgangersbrug (profielen en boutverbinding)



- Lleida , 38 m , Pedelta, Fiberline, Spain, 2001

Voetgangersbrug (injecteren en lijmen)

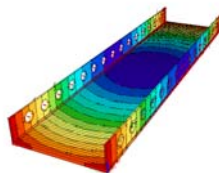


- 60m long bascule bridge Fredrikstad, Norway
(Designed by Griff/Fireco),
- Span 56m, Opened 17. May 2003

Rekenen aan VVK

- CUR96 en CUR96+
- Handberekeningen
- Schematiseren in SCIA
- Schematiseren in iDIANA vereenvoudigd
- Schematiseren in iDIANA gelaagde opbouw

Ontwerpen met vezelversterkte kunststoffen



- CUR-richtlijn 96 (2003)
Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies
- Rijkswaterstaat en Royal HaskoningDHV werken met markt aan verbeterde versie CUR96
- Eurocode VVK in ontwikkeling (2018)

CUR: Materiaaleigenschappen (I)

6.2 Veiligheidsfilosofie

De betrouwbaarheid van het ontwerp van een GVK-constructie moet zijn gebaseerd op de principes vastgelegd in NEN 6700, waarbij de materiaalfactor moet worden vermenigvuldigd met een voor vezelversterkte kunststoffen specifieke conversiefactor. Dit betekent dat een constructie of een onderdeel daarvan, moet voldoen aan:

$$S \cdot \gamma_f \leq R / (\gamma_m \cdot \gamma_c)$$

waarin:

S is het effect van de representatieve (= karakteristieke of nominale) belasting;
 R is het representatieve (= karakteristieke of nominale) draagvermogen c.q. sterkte van de constructie;

γ_f is een belastingfactor;
 γ_m is een materiaalfactor;
 γ_c is een conversiefactor.

6.3 Materiaalfactoren

Voor de materiaalfactor γ_m voor een laminaat of constructie geldt:

$$\gamma_m = \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2}$$

Waarin:

$\gamma_{m,1}$ is de partiële materiaalfactor vanwege onzekerheden in het verkrijgen van de juiste materiaaleigenschappen en gelijk aan 1,35;

$\gamma_{m,2}$ is de partiële materiaalfactor vanwege onzekerheden in materiaaleigenschappen door de aard van de samenstellende delen en afhankelijk van de productiemethode, overeenkomstig tabel 1.

Tabel 1: Partiele materiaalfactoren $\gamma_{m,2}$ afhankelijk van de productiemethode.

Productiemethode	Partiële materiaalfactor $\gamma_{m,2}$	
	Nagehard laminaat	Niet-nagehard laminaat
Vezelspuiten	1,6	1,9
Handlamineren (hand lay-up)	1,4	1,7
Vacuum- of droginjectie (VA-RTM of RTM)	1,2	1,4
Filamentwekken	1,2	1,3
Prepreggen	1,2	1,3
Pultrusie	1,1	1,3

Bij bepaling van de uiterste grenstoestand sterkte moet de materiaalfactor γ_m ten minste 1,5 bedragen.



CUR: Materiaaleigenschappen (II)

Tabel 2: In rekening te brengen conversiefactoren (x = in rekening brengen)

	Uiterste grenstoestand			Bruikbaarheidsgrenstoestand		
	Sterkte	Stabiliteit	Vermoeiing	Vervorming	Trillingen	Eerste scheurvorming
Conversiefactor temperatuur	x	x	x	x	x ⁽¹⁾	x
Conversiefactor vocht	x	x	x	x	x ⁽¹⁾	x
Conversiefactor kruip ⁽²⁾	x	x	-	x	-	x
Conversiefactor vermoeiing ⁽³⁾	-	x	-	x	x ⁽¹⁾	x

⁽¹⁾ De conversiefactor voor kruip effecten hoeft alleen voor het langdurig gedeelte van de belastingen te worden toegepast.

⁽²⁾ De conversiefactor voor vermoeiingseffecten hoeft alleen voor stijfheidgerelateerde grenstoelstanden te worden toegepast.

⁽³⁾ De bruikbaarheidsgrenstoelstand trillingen moet zowel met als zonder de conversiefactoren voor temperatuureffecten, vochteffecten en vermoeiingseffecten getoetst worden.

De conversiefactor voor temperatuureffecten bedraagt: $\gamma_{t1} = 1,1$

De conversiefactor voor vochteffecten γ_{v1} bedraagt:

- voor een GVK-constructie die zich vrijwel voortdurend in droge omstandigheden bevindt: $\gamma_{v1} = 1,0$;
- voor een GVK-constructie die is blootgesteld aan wisselende vochtomstandigheden, waarbij droge en natte periodes elkaar afwisselen $\gamma_{v1} = 1,1$;
- voor een GVK-constructie die vrijwel voortdurend is blootgesteld aan vochtige omstandigheden (oppervlaktewater, grondwater, zeewater, vloeistoflaks) $\gamma_{v1} = 1,3$

De conversiefactor voor vermoeiingseffecten bedraagt: $\gamma_{f1} = 1,1$



CUR: Materiaaleigenschappen (III)

Toelichting:

Voor laminaten kunnen op basis van de stijfheidseigenschappen en de nominale rekgrens van 1,2 %, de sterkte-eigenschappen worden bepaald in de vorm van nominale spanningen. Voor twee laminaten wordt dit toegelicht: een quasi-isotroop laminaat van UD-lamellen met 25 % vezels in iedere richting en een anisotroop laminaat van UD-lamellen met 55 % vezels in de 0-richting en 15 % vezels elk in de drie andere richtingen. Het vezelvolumepercentage is 50 %. Uitgaande van de hiervoor vermelde stijfheden van UD-lamellen en het toepassen van de klassieke laminaten theorie resulteert dit in de volgende stijfheidseigenschappen:

Stijfheidseigenschappen	Quasi-isotroop laminaat 50 vol%	Anisotroop laminaat 50 vol%
E_1 [GPa]	18,6	25,8
E_2 [GPa]	18,6	15,9
G_{12} [GPa]	7,0	5,6
ν_{12}	0,33	0,32

Het hanteren van de 1,2 % rekgrens resulteert voor deze laminaten in de volgende nominale sterkten:

Sterkte-eigenschappen	Quasi-isotroop laminaat 50 vol%	Anisotroop laminaat 50 vol %
σ_{1R} [MPa]	223	310
σ_{1C} [MPa]	223	310
σ_{2R} [MPa]	223	191
σ_{2C} [MPa]	223	191
τ_{12R} [MPa]	168	134

CUR: Materiaaleigenschappen (IV)

Laminate lay-up

i	ϕ °	t mm	Ply
1	0	1.1	E-Glas 50%
2	90	0.75	E-Glas 50%
3	0	1.1	E-Glas 50%
4	45	0.75	E-Glas 50%
5	-45	0.75	E-Glas 50%
6	0	1.1	E-Glas 50%
7	-45	0.75	E-Glas 50%
8	45	0.75	E-Glas 50%
9	0	1.1	E-Glas 50%
10	90	0.75	E-Glas 50%
11	0	1.1	E-Glas 50%

Tabel 3 Nominale waarden voor de stijfheidseigenschappen van een UD-lamel.

V_f	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}
40 %	30,8	8,9	2,8	0,30
45 %	34,3	10,0	3,1	0,29
50 %	37,7	11,3	3,5	0,29
55 %	41,1	12,8	3,9	0,28
60 %	44,6	14,6	4,5	0,27
65 %	48,0	16,7	5,1	0,27
70 %	51,4	19,3	6,0	0,26

Reductiefactor UD-stijfheidswaarden (behalve ν_{12}): 0,97

Ply Stiffness Summary

E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}	ν_{21}	Ply name
N/m ²	N/m ²	N/m ²			
3.6569 · 10 ¹⁰	1.0924 · 10 ¹⁰	3.3960 · 10 ⁹	0.285	0.08514	E-Glas 50%

CUR: Materiaaleigenschappen (V)

Laminate properties

n	=	11
h	=	10 mm
ρ	=	# kg/m ³
m_A	=	# kg/m ²
Classification	=	symmetric;

Engineering Constants 2D

E_x	=	$2.5753 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
E_y	=	$1.5887 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
G_{xy}	=	$5.5491 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

ν_{xy}	=	0.3157
ν_{yx}	=	0.19475

buiging

E_x^f	=	$2.9424 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
E_y^f	=	$1.7041 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
G_{xy}^f	=	$3.8769 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

ν_{xy}^f	=	0.20944
ν_{yx}^f	=	0.1213

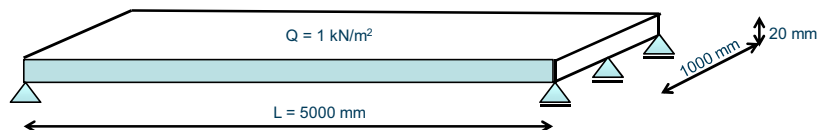
trek

$E_x^{k=0}$	=	$2.5753 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
$E_y^{k=0}$	=	$1.5887 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
$G_{xy}^{k=0}$	=	$5.5491 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

$\nu_{xy}^{k=0}$	=	0.3157
$\nu_{yx}^{k=0}$	=	0.19475

Handsom

- Berekening doorbuiging plaat.



$$I = 1/12 \cdot 1000 \cdot 20^3 = 66.67 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$E_{vbk} = 29.424 \text{ GPa}$$

$$w_{vbk} = 5/384 \cdot Q \cdot L^4 / E \cdot I = 414.8 \text{ mm}$$

$$E_{vbk} = 210 \text{ GPa}$$

$$w_{staal} = 29.424 / 210 \cdot 414.8 = 58.1 \text{ mm}$$

Invoer in SCIA

Anisotropie als orthotrope plaat

DEK

Tplaat := 20mm

h := Tplaat = 20 mm

$E1 := E_{1g55} = 2.942 \times 10^4 \text{ MPa}$

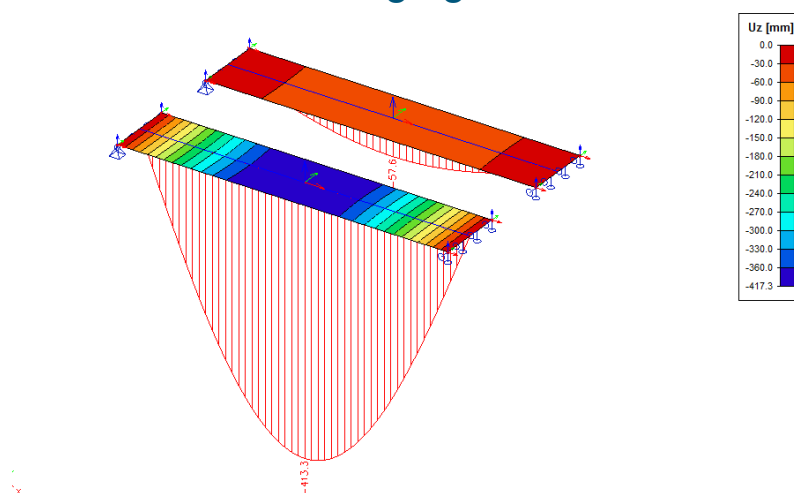
$G12 := G_{g1255} = 3.877 \times 10^3 \text{ MPa}$

$E2 := E_{2g55} = 1.704 \times 10^4 \text{ MPa}$

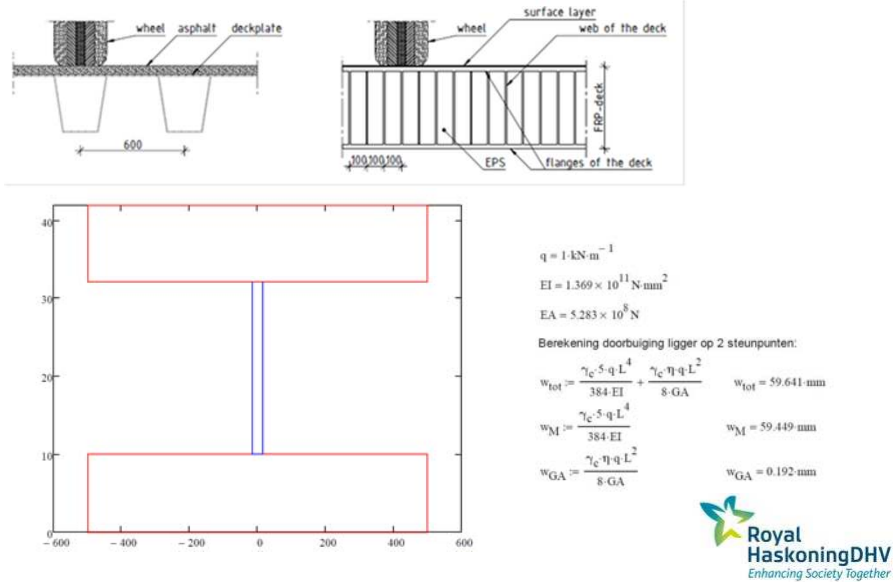
$G13 := G_{13} = 3 \times 10^9 \text{ Pa}$

$\nu12 := \nu_{g1255} = 0.209$

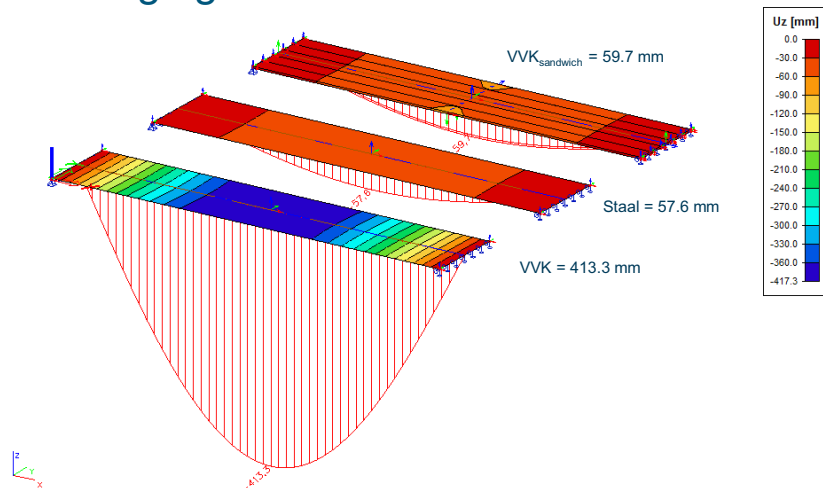
Som SCIA, doorbuiging VVK en staal



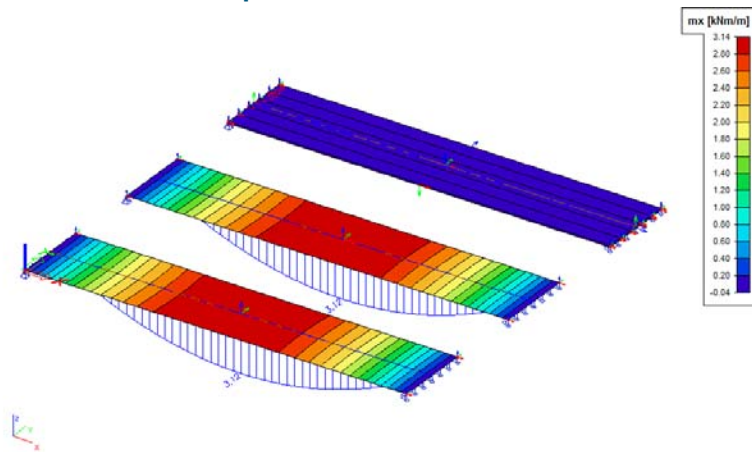
VVK aangepast op doorbuiging



Doorbuiging

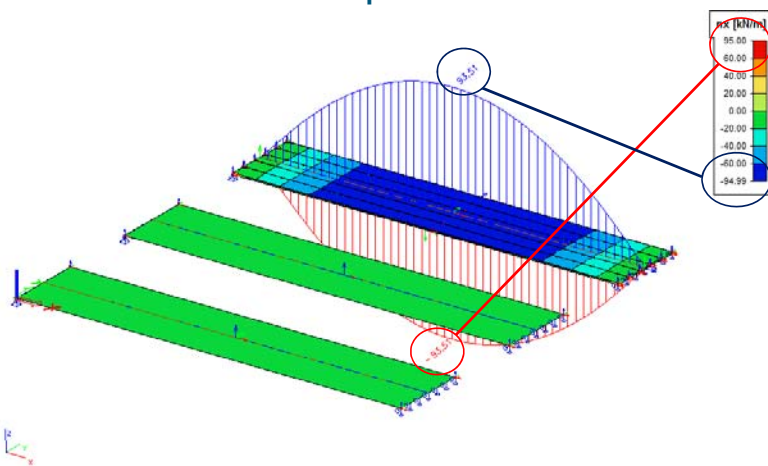


Momenten in plaat



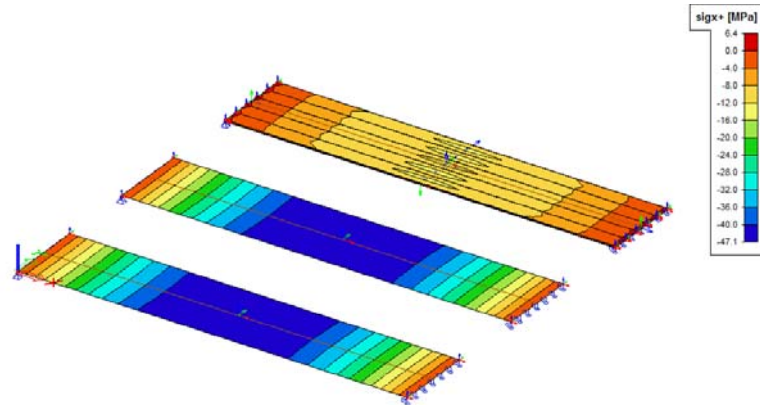
$$M = 1/8 * 1 * 5^2 = 3.1 \text{ kNm}$$

Normaalkrachten in plaat



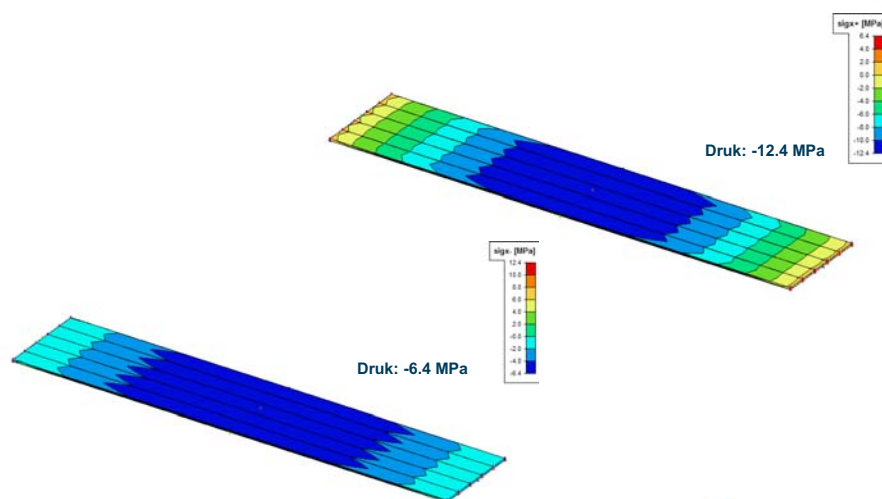
$$M = 93.51 \text{ kN} * 0.032 \text{ m} = 2.99 \text{ kNm} \approx 3.12 \text{ kNm}$$

Spanningen in plaat



$$\sigma = 3.12 \cdot 10^3 / (1/6 \cdot 1000 \cdot 20^2) = 46.8 \text{ MPa}$$

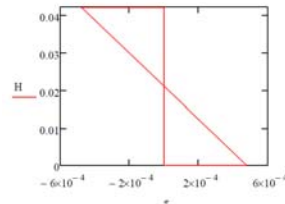
Spanningen in samengestelde VVK plaat



Druk: -6.4 MPa

Handsom spanningen

Rekenen bij VVK met rekken i.p.v. spanningen.

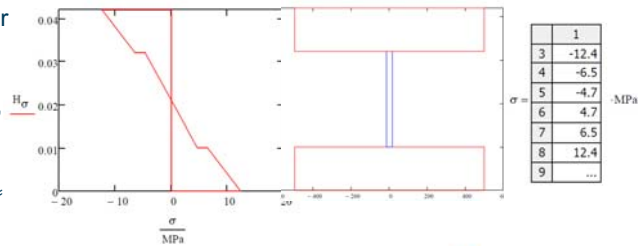


$$\epsilon_{10} := \frac{z_0 M}{EI} = 0.4794 \cdot 10^{-3}$$

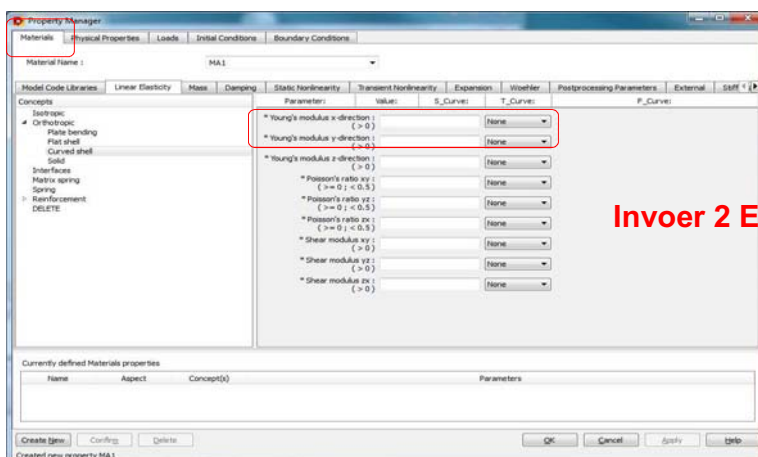
$$\epsilon_{30} := \frac{(z_0 - h_1 - h_2 - h_3) M}{EI} = 0.25111 \cdot 10^{-3}$$

Rekken omrekenen naar spanningen.

Spanning bovenkant
bovenplaat is 12.4 MPa,
klopt.
Spanning onderkant
bovenplaat is 6.5 MPa ≈
6.4 MPa.

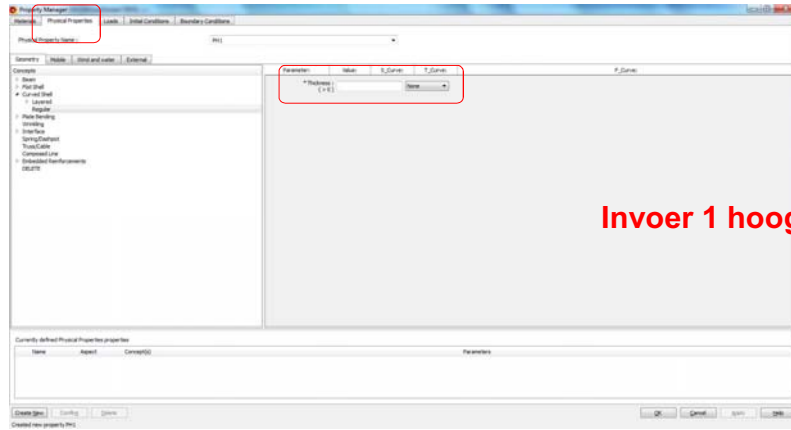


Rekenen met iDIANA (I)



Invoer 2 E-moduli

Rekenen met iDIANA (II)



Rekenen met iDIANA (III)

- 3 invoer waarden (E_x , E_y , h)
- 4 onbekende (E_{Ax} , E_{Ay} , E_{Ix} , E_{Iy})
- Omrekenen, waarbij er altijd 1 waarde niet volledig benaderd wordt. Kies hiervoor de minst dominante benodigde eigenschap.

Invoer DIANA (eenvoudig)

Axiaal

$$E_{xa} := 25753 \text{ MPa}$$

$$E_{ya} := 15887 \text{ MPa}$$

Buiging

$$E_{xf} := 29424 \text{ MPa}$$

$$E_{yf} := 17041 \text{ MPa}$$

$$t := 20 \text{ mm}$$

Som DIANA (eenvoudig)

buiging

$$E1b1 := \frac{1}{12} \frac{EA1^3}{EI1 \cdot 1000^2} = 24093 \text{ MPa}$$

$$h1b1 := \frac{EA1}{EI1b1 \cdot 1000} = 21.378 \text{ mm}$$

$$E2b1 := \frac{EI2}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot h1b1^3} = 13954 \text{ MPa}$$

$$E2b2 := \frac{1}{12} \frac{EA2^3}{EI2 \cdot 1000^2} = 15340 \text{ MPa}$$

$$h1b2 := \frac{EA2}{E2b2 \cdot 1000} = 20.714 \text{ mm}$$

$$E1b2 := \frac{EI1}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot h1b2^3} = 26486 \text{ MPa}$$

$$E_{xa} = 25753 \text{ MPa}$$

$$E_{ya} = 15887 \text{ MPa}$$

$$E_{xf} = 29424 \text{ MPa}$$

$$E_{yf} = 17041 \text{ MPa}$$

$$t = 20 \text{ mm}$$

afwijkingen

$$\frac{EA1}{EI1b1 \cdot 1000 \cdot h1b1} = 100\%$$

$$\frac{EA2}{E2b1 \cdot 1000 \cdot h1b1} = 106.517\%$$

$$\frac{EI1}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot h1b1^3 \cdot E1b1} = 100\%$$

$$\frac{EI2}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot h1b1^3 \cdot E2b1} = 100\%$$

afwijkingen

$$\frac{EA1}{EIb2 \cdot 1000 \cdot h1b2} = 93.881\%$$

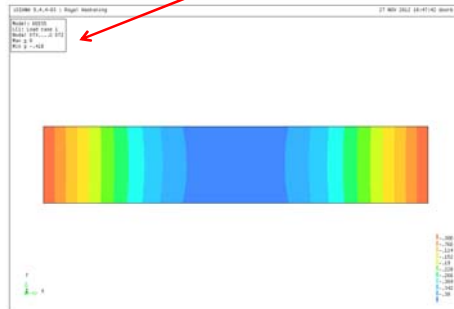
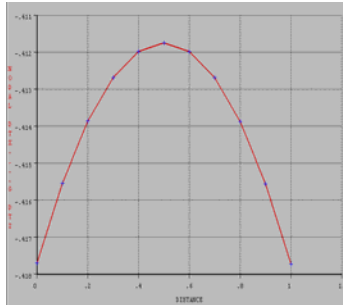
$$\frac{EA2}{E2b2 \cdot 1000 \cdot h1b2} = 100\%$$

$$\frac{EI1}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot h1b2^3 \cdot E1b2} = 100\%$$

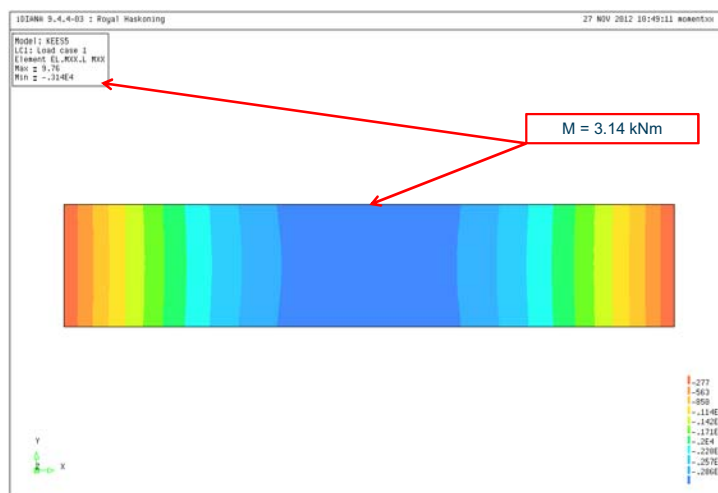
$$\frac{EI2}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot h1b2^3 \cdot E2b2} = 100\%$$

Doorbuiging DIANA hand

q	1000 N	q	1000 N
Ef	2,41E+10 N/m ²	Ef	2,94E+10 N/m ²
h	0,021378	h	0,02
I	8,14179E-07 m ⁴ /m	I	6,67E-07 m ⁴ /m
L	5 m	L	5 m
dz	4,15E-01 m	dz	4,15E-01 m
	414.87 mm		414.87 mm



Moment in Diana (eenvoudig)

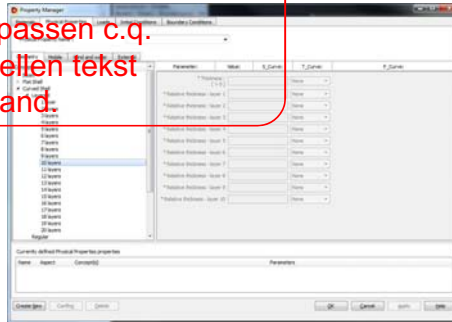


Procedure gelaagde schalen

- Gebruik layer elementen
- Aanmaken fysische eigenschap layer
 - Aantal layers, dikte en relatieve dikte van de layers
- Aanmaken .dat files (beschrijving per laag)
 - Elemententabel
 - Materiaaltabel
 - E1, E2, v, G
 - Xaxis
- Inlezen .dat files via .dcf

iDIANA, kan grafisch

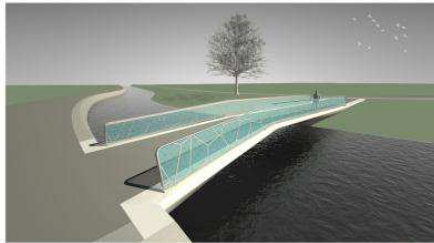
Aanpassen c.q.
opstellen tekst
bestand.



Vragen

Vragen ?

DragonFly bridge, Harderwijk (SCIA)



ROYAL HASKONING | Schetsontwerp

the DRAGONFLY

ROYAL HASKONING | Schetsontwerp

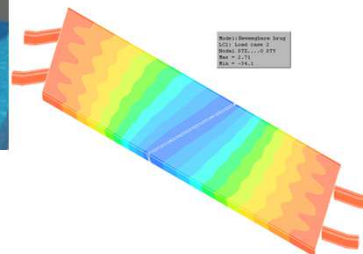
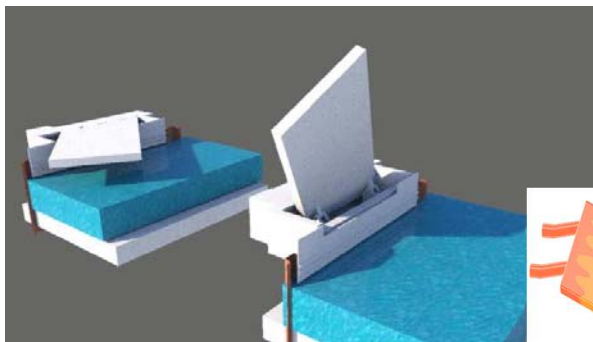
the DRAGONFLY

Ontwerp Jorge Moura, RoyalHaskoningDHV

- Voet-fietsbrug en incidenteel voertuig
- VVK draagconstructie met glas- en koolstofvezelversterking.



Druivenbrug (DIANA eenvoudig + gelaagd)



- Beweegbare voet-fietsbrug en incidenteel voertuig.
- VVK draagconstructie met glasvezelversterking.

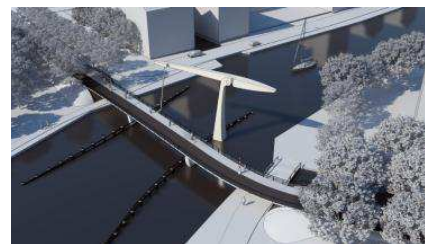


Verkeersbrug Muiden (DIANA gelaagd)



- LM1 verkeersbrug, zelfdragend VVK dek (21 m bij 11m)
- Definitief Ontwerp (2013)

Fietsbrug over de Oude Rijn, Katwijk (volgt?)



Ontwerp Joris Smits, Royal HaskoningDHV

- Definitief ontwerp fase, gepland voor 2013
- VVK brugval en aanbruggen (> 60 m)

Royal HaskoningDHV en vezelversterkte kunststoffen

- Engineering
- Haalbaarheidsevaluaties
- Aanbesteding van VVK
- Duurzame Ontwikkeling
- Life Cycle Evaluatie

- Contact:

Liesbeth.Tromp@rhdhv.com
+31 (0)6 835 303 20

Kees.van.IJselmuiden@rhdhv.com
+31 (0)6 159 630 40

