

Omslag

De eigenschappen van Koolstofvezelcomposiet demonstreren

Auteur: Onno Puts

Afstudeerder Fontys Hogeschool Engineering Werktuigbouwkunde

**Namens: Kennis Centrum Mechatronica Fontys Hogeschool Engineering
Eindhoven**

30-Mei-2011

Samenvatting

Door het missen van kennis over koolstofvezelcomposiet, maar vooral door het missen van ervaring met het materiaal, heerst onder de constructeurs van Philips Innovation Services een “koudwatervrees” om koolstofvezelcomposiet-onderdelen te ontwerpen. Om de drempel tot het construeren met koolstofvezelcomposieten te verlagen, is het besluit genomen een aantal demonstrators te ontwerpen. Die de constructeurs overtuigen van de mogelijkheden van koolstofvezelcomposiet. Naar aanleiding van een gesprek met de constructeurs van Philips Innovation Services zijn er demonstrators ontworpen.

De eerste demonstrator die is ontworpen toont aan dat er betrouwbaar met inserts geconstrueerd kan worden. Dit wordt aangetoond door een M5 draadeind uit een aluminiumplaat te trekken terwijl, het met zijn andere uiteinde in een insert in een koolstofvezelcomposiet-plaat is bevestigd. In het ontwerpproces zijn een trekbank opstelling en de koolstofvezelcomposiet-plaat met insert ontworpen. Om de structurele integriteit van de koolstofvezelcomposiet-plaat met insert te bevestigen is een FEM analyse gemaakt. Gebaseerd op de FEM analyse en handberekeningen zal de koolstofvezelcomposiet-plaat de aangebrachte belasting weerstaan.

De tweede demonstrator die is ontworpen dient de lage thermische uitzettingscoëfficiënt, die bereikt kan worden wanneer men een koolstofvezelcomposiet op de juiste wijze samenstelt, te demonstreren. Deze demonstratie wordt gegeven door een koolstofvezelcomposiet en aluminiumstaaf te verwarmen, de uitzetting van deze staven wordt vervolgens mechanisch versterkt. Bij de koolstofvezelcomposiet-staaf zal geen verplaatsing zichtbaar zijn en bij de aluminiumstaaf wel.

De laatste demonstrator toont de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van een composiet aan. De opstelling bestaat uit een xylofoon met koolstofvezelcomposiet-plaatjes. De plaatjes hebben identieke afmetingen, maar door de vezelrichting in de plaatjes te variëren, ergo de stijfheid van de plaatjes te variëren, hebben de plaatjes toch andere tonen.

De ontwerpen van de demonstrators zijn gemaakt, maar om de eigenschappen van koolstofvezelcomposiet aan onder andere de constructeurs van Philips Innovation Services te demonstreren, zullen de demonstrators geproduceerd moeten worden. Bovendien kunnen op deze manier de uitkomsten van de FEM analyses van de composieten bevestigd worden en kunnen de constructeurs ervan overtuigd worden dat composieten zich voorspelbaar gedragen.

Voorwoord

Koolstofvezelcomposiet wordt al veelvuldig toegepast in de luchtvaartindustrie, ruimtevaart en de racerij. Composieten worden echter slechts sporadisch toegepast in de machinebouw en mechatronica. Een van de hoofdredenen voor het niet toepassen van composieten is het ontbreken van de benodigde kennis. Door het ontbreken van deze kennis hebben veel constructeurs een “koudwatervrees” om met het materiaal aan de slag te gaan. De constructeurs bij Philips Innovation Services zien vooral op tegen de praktische verwerkingsaspecten van composieten, denk hierbij bijvoorbeeld aan de bevestiging met inserts.

Om de constructeurs over de streep te trekken, om toch met composieten aan de slag te gaan, is er bij Philips Innovation Services besloten dat er een aantal demonstrators ontworpen moeten worden. Deze demonstrators dienen de positieve aspecten van koolstofvezelcomposiet aan te tonen, of de eventuele vooroordelen van de constructeurs tegen het materiaal te ontkrachten. In het kader van het RAAK project over koolstofvezelcomposiet, is er bij Philips Innovation Services besloten, dit onderzoek door het Kenniscentrum Mechatronica van de Fontys Hogeschool Engineering te Eindhoven uit te laten voeren.

De ontwerpprocessen van deze demonstrators zijn in dit rapport beschreven. Ik, Onno Puts, heb in het kader van mijn afstuderen aan de Fontys Hogeschool Werktuigbouwkunde te Eindhoven, deze ontwerpprocessen uitgevoerd voor het Kenniscentrum Mechatronica van Fontys Eindhoven.

Graag wil ik alle mensen die mij tijdens deze laatste fase van mijn studie hebben bijgestaan bedanken. In het specifiek wil ik graag Hans Soetens van Philips Innovation Services voor zijn technische ondersteuning bedanken, Bart Bastings van het Kenniscentrum Mechatronica voor al zijn hulp en de heer Peter Leijten van de Fontys Hogeschool Engineering voor zijn grootte betrokkenheid en begeleiding.

Inhoudsopgave

1	Achtergronden.....	1
1.1	Achtergrond Project RAAK.....	1
1.2	Achtergrond Demonstrator Project.....	1
2	Inleiding.....	2
2.1	Opdracht beschrijving	2
2.2	De project doelstelling	2
2.3	Verwijsvormen in het verslag	2
2.4	De opzet van het verslag.....	2
3	Beschrijving van de project aanpak.....	3
4	Eisen aan de demonstrator.....	4
4.1	Directe eisen aan de demonstrator:.....	4
4.2	Zaken die in het verslag terug zullen komen:.....	4
4.3	Zaken die elders in het Raak project behandeld worden:	4
5	Definitieve keuze uit de concepten.....	5
6	De trekbank.....	6
6.1	De eisen aan de trekbank.....	7
6.2	Het ontwerp van de trekbank.....	8
6.2.1	De spindel	9
6.2.2	Overbepaaldheid	10
6.3	Berekeningen aan de trekbank.....	11
6.3.1	De maximale belasting.....	12
6.3.2	De afschuifspanningen in de aluminium schroefdraden	13
6.3.3	De doorbuiging van en buigspanning in de aluminium plaat	14
6.3.4	Spindel berekeningen	16
6.3.5	De equivalente spanning in het zeskantige deel van de spindel	18
6.4	De insert in de koolstofvezelcomposiet plaat.....	20
6.4.1	De afmetingen van de insert	21
6.4.2	Het ontwerp van de insert.....	23
6.4.3	FEM analyse van de insert	25
6.4.4	Materiaal keuze voor de insert.....	26
6.4.5	Overwegingen bij het construeren van de koolstofvezelplaat	27
6.4.6	De samenstelling van het composiet.....	28
6.4.7	FEM analyse van de koolstofvezelcomposiet plaat	29
6.5	Conclusie.....	34
6.6	Aanbevelingen.....	35

7	De “Thermometer”	37
7.1	Eisen aan de demonstrator opstelling.....	39
7.2	De weerstandloze uitzetting van de staven	40
7.3	De uitzettingskracht van de aluminium staaf	41
7.4	Het ontwerp van de versterker.....	42
7.4.1	Het principe van de versterker	43
7.4.2	Een handmatige berekening van de verplaatsing op de wand.....	44
7.4.3	Vertaling van het concept naar een 3-d model	45
7.4.4	Handmatige berekening van de aandrijfkraft	46
7.4.5	FEM analyse	52
7.4.6	De uitwijking op de muur a.d.h.v. de FEM analyse resultaten	57
7.4.7	Materiaal keuze voor versterker	58
7.5	Het ontwerp van de bevestigingsdelen.....	59
7.5.1	De versterker houder.....	60
7.5.2	Een FEM analyse van de versterkerhouder	61
7.5.3	De verbindingsskap	62
7.5.4	Een FEM analyse van de verbindingsskap.....	63
7.6	Het ontwerp van de koolstofvezelcomposiet balk	64
7.7	Conclusie.....	66
7.8	Aanbevelingen.....	66
8	De xylofoon.....	68
8.1	Eisen aan de xylofoon opstelling	69
8.2	Het berekenen van de gewenste stijfheden.....	70
8.3	FEM analyses van de plaatjes	72
8.3.1	De FEM analyse van het aluminium plaatje	72
8.3.2	FEM analyses van de koolstofvezelcomposiet plaatjes	73
8.4	De opbouw van de composieten	76
8.4.1	De opbouw van het composiet met een stijfheid van $6.64 \cdot 10^9$ Pa.....	77
8.5	De versterking van de tonen.....	78
8.6	Conclusie.....	81
8.7	Aanbevelingen.....	81
9	Conclusie.....	83
10	Aanbevelingen.....	85
11	Bronnen	86

1	<i>Bijlagen</i>	<i>1</i>
1.1	Vragen Philips Innovation Services	2
1.2	Concepten aan de hand van de eisen	4
1.2.1	Eis: De vermoeiingseigenschappen van koolstofvezelcomposiet demonstreren	5
1.2.2	Eis: De relatie tussen FEM en realiteit demonstreren	7
1.2.3	Eis: De invloed van temperatuur demonstreren	11
1.2.4	Eis: De te halen toleranties demonstreren	14
1.2.5	Eis: Het gebruik van insert bussen demonstreren	16
1.2.6	Eis: Het demonstreren van functionaliteit na een botsing	18
1.2.7	Eis: De verbinding van koolstofvezel onderdelen aan de vaste wereld demonstreren	18
1.2.8	Eis: Het demonstreren van de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van het materiaal	19
1.3	De morfologische kaart	20
1.4	De schroefdraad diameters	25
1.5	De eigenschappen van een composiet	26
1.6	Validatie mesh-methode versterker	30
1.7	Controle koolstofvezelcomposiet eigenschappen in Ansys	32
1.8	De eigenschappen van de Xylofoon composieten	33
1.8.1	Het composiet met de stijfheid van 42GPa	33
1.8.2	Het composiet met de stijfheid van 51.8 Gpa	35
1.8.3	Het composiet met de stijfheid van 66.44 GPa	37
1.9	De afmetingen van de versterkingsbuisjes	39
2	<i>Digitale bijlagen</i>	<i>40</i>

1 Achtergronden

1.1 Achtergrond Project RAAK

Aluminium en staal zijn voor constructeurs, die actief zijn in de machinebouw, vertrouwde materialen met bekende eigenschappen. Het gebruik van hoogwaardige composieten is in de luchtvaart en racewereld al langere tijd de standaard, echter de toepassing van deze materialen is in de machinebouw minimaal.

Dit wordt veroorzaakt door het ontbreken en niet toegankelijk zijn van de juiste kennis over composieten. De kennis over composieten wordt in de huidige engineeringopleidingen onvoldoende bijgebracht. Grote bedrijven vergaren de benodigde kennis zelfstandig en geven deze niet prijs. Door deze ontwikkelingen blijkt het gebruik van composieten vaak te hoogdrempelig voor het MKB.

Het RAAK project richt zich op het opzetten van een netwerk van constructeurs (machinebouwers), toeleveranciers en kennisinstellingen, waarin de kennis over het construeren met composieten verspreid kan worden. Hierdoor moet het gebruik van composieten toegankelijker worden voor constructeurs in het MKB. Tevens kunnen er betere onderwijsmodulen, toegespitst op composieten, onderricht gaan worden op engineeringopleidingen.

1.2 Achtergrond Demonstrator Project

Een van de hoofdactiviteiten van de Mechatronica afdeling van Philips Innovation Services is snel en nauwkeurig positioneren. Koolstofvezelcomposiet zou het ideale materiaal voor deze toepassing kunnen zijn omdat koolstofvezelcomposiet-

onderdelen een hoge soortelijke stijfheid $\left(\frac{E}{\rho}\right)$ ergo een hoge eigenfrequentie

kunnen hebben. Er heerst echter onder ingenieurs nog te veel twijfel over bepaalde eigenschappen van koolstofvezelcomposieten om het veelvuldig toe te passen.

Bovendien is er ook weinig ervaring met praktische aspecten zoals de bevestiging van koolstofvezelcomposiet-onderdelen aan aluminium onderdelen.

2 Inleiding

2.1 Opdracht beschrijving

Constructeurs/designers zijn vaak onbekend met composiet materialen. Vanwege deze onbekendheid zijn er (voor-)oordelen en is er een zekere schroom om dit materiaal toe te passen. Een methode om de mogelijkheden van composiet te verduidelijken is het maken van een demonstrator. Deze demonstrator moet op een doeltreffende en ludieke manier de mogelijkheden van koolstofvezelcomposiet aangeven en mogelijke vooroordelen wegnemen. Vanzelfsprekend is er voor het uitvoeren van deze opdracht veel creativiteit gevraagd en zal het gehele ontwerpproces doorlopen worden. Van ideegeneratie tot realisatie. De opdracht wordt in samenwerking met het Kenniscentrum Mechatronica van Fontys uitgevoerd.

2.2 De project doelstelling

De doelstelling van het project is om de kennis over koolstofvezelcomposieten bij de ingenieurs van Philips Innovation Services te vergroten. Zodat zij het in de toekomst makkelijker kunnen toepassen in hun ontwerpen. Om dit te bereiken zullen demonstrators ontworpen worden waarmee de mogelijkheden van koolstofvezelcomposieten aangegeven worden.

2.3 Verwijsvormen in het verslag

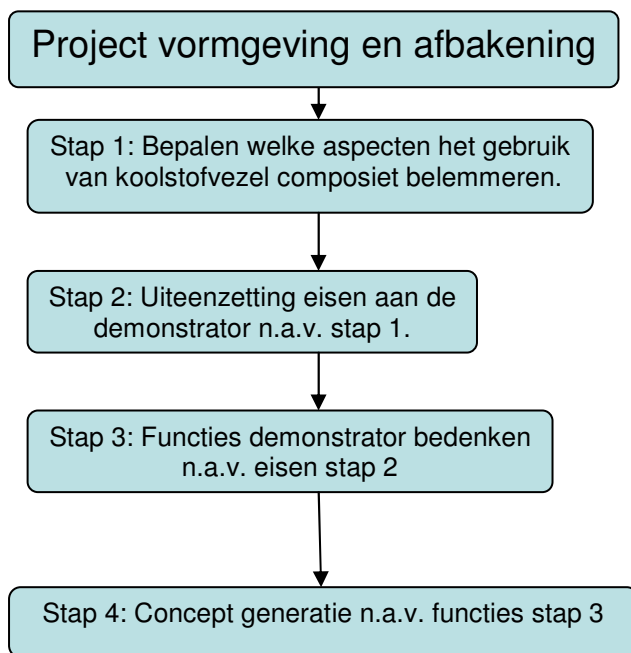
De verwijzing naar hoofdstukken en paragrafen zal geschieden door de hoofdstuk en paragraaf nummering tussen haakjes in te voegen, zo verwijst (2.3) bijvoorbeeld naar de huidige paragraaf. Wanneer er een verwijzing naar een bijlage wordt gemaakt zal dit specifiek vernoemd worden. De verwijzing naar onderdeelnummers uit afbeeldingen zal geschieden door de onderdeelnummers tussen driehoekige haakjes te plaatsen, bijvoorbeeld: <7>. De verwijzing naar bronnummers wordt gegeven door het nummer tussen rechthoekige haakjes te plaatsen, bijvoorbeeld [1].

2.4 De opzet van het verslag

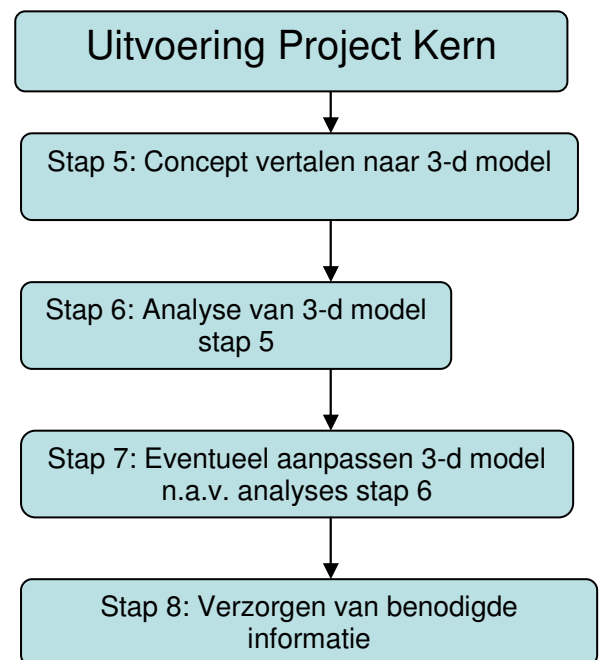
De aanloop naar het ontwerpproces zal in de hoofdstukken 3, 4 en 5 behandeld worden. In hoofdstuk 6, 7, en 8 worden de ontwerpprocessen van de demonstrators behandeld. De paragrafen 6.4, 7.6, 8.3.2 en 8.4 behandelen het ontwerp van de koolstofvezelcomposiet onderdelen in de demonstrators.

3 Beschrijving van de project aanpak

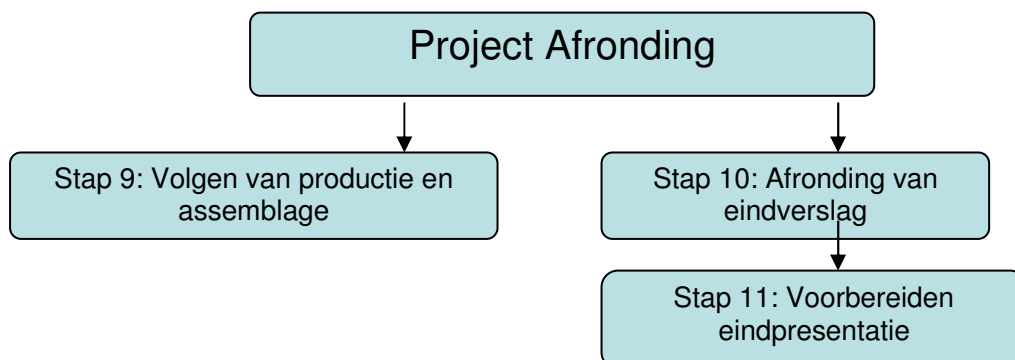
Om de aanpak van het project gestructureerd te laten verlopen is het belangrijk om uiteen te zetten volgens welke methodiek er gewerkt gaat worden. Het project is onderverdeeld in drie hoofdfasen: de project vormgeving en afbakening (figuur 1), de uitvoering van de kern van het project (figuur 2) en de afrondende fase van het project (figuur 3). In de hieronder volgende flowcharts kan men de hoofdstappen van iedere hoofdfase zien.



Figuur 1 Project vormgeving en afbakening.



Figuur 2 Uitvoering van de project kern.



Figuur 3 Project afronding.

4 Eisen aan de demonstrator

Naar aanleiding van het interview met een aantal ingenieurs van Philips Innovation Services (bijlage 1.1) zijn er een aantal eisen aan de demonstrator tot stand gekomen (4.1). Niet alle uit het gesprek naar voren gekomen punten kunnen met een demonstrator worden verduidelijkt. Denk hierbij aan hoe onderdelen in een FEM module ingevoerd kunnen worden, wel zullen een aantal van deze belangrijke aspecten in het verslag terug te vinden zijn (4.2). Tevens zijn er in het interview een aantal zaken aan bod gekomen die reeds elders in het RAAK project behandeld worden (4.3).

4.1 Directe eisen aan de demonstrator:

- Het gebruik van inserts in koolstofvezelcomposiet onderdelen demonstreren.
- Het demonstreren van het vermoeiingsgedrag van koolstofvezelcomposiet onderdelen.
- De invloed van temperatuur op een koolstofvezelcomposiet demonstreren (expansie).
- De verbinding van koolstofvezelcomposiet onderdelen aan de vaste wereld (aluminium of staal) demonstreren.
- Het demonstreren van de functionaliteit van een koolstofvezelcomposiet onderdeel na een botsing.
- Het demonstreren van de relatie tussen een FEM analyse en een echte belasting van een koolstofvezelcomposiet onderdeel.
- Het demonstreren van de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van koolstofvezelcomposiet.

4.2 Zaken die in het verslag terug zullen komen:

- Hoe de ontworpen koolstofvezelcomposiet onderdelen door middel van FEM geanalyseerd zijn.

4.3 Zaken die elders in het Raak project behandeld worden:

- Er wordt gewerkt aan een opstelling waarmee de demping van koolstofvezel onderdelen gemeten kan worden.
- Er wordt gewerkt aan een programma om laminaten als een “black box” in FEM modulen in te kunnen voeren.

5 Definitieve keuze uit de concepten

Aan de hand van de gestelde eisen aan de demonstrator zijn er een aantal concepten tot stand gekomen die in de demonstrator terug kunnen komen (bijlage 1.2). In overleg met de opdrachtgever is bepaald welke concepten als demonstrators terug moeten komen (bijlage 1.3). Tevens is in het gesprek met de opdrachtgever besloten dat het verschil in eigenschappen tussen koolstofvezelcomposiet en traditionele materialen zoals aluminium en staal beter gekwantificeerd kan worden in separate demonstrators.

De opdrachtgever heeft tevens besloten dat een aantal eisen genoemd in paragraaf 4.1 niet verwerkt hoeft te worden in de demonstrator. De nieuwe eisen aan de demonstrators zijn als volgt:

- Het gebruik van inserts in koolstofvezelcomposiet onderdelen demonstreren.
- De invloed van temperatuur op een koolstofvezelcomposiet demonstreren (expansie).
- De verbinding van koolstofvezel onderdelen aan de vaste wereld (aluminium of staal) demonstreren.
- Het demonstreren van een relatie tussen FEM analyse en een echte belasting van een koolstofvezel onderdeel.
- Het demonstreren van de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van het materiaal.

De concepten die terug moeten komen in de demonstratie modellen zijn:

- De demonstratie proef waarin een draadeind uit een stuk aluminium wordt getrokken, terwijl het draadeind op zijn plek wordt gehouden door een insert in een koolstofvezelcomposieten plaat (6).
- Een demonstratie waarin de thermische uitzettingscoëfficiënt van koolstofvezelcomposiet wordt vergeleken met die van aluminium (7).
- De xylofoon waarmee de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van het koolstofvezelcomposiet gedemonstreerd wordt (8).

6 De trekbank

Het doel van de trekbank is om een draadeind, met een maximale maat van M5, uit een aluminium plaat te trekken. Het draadeind zal met zijn andere zijde in een koolstofvezelcomposieten plaat met insert bevestigd zijn. Het dient aangetoond te worden dat de inserts krachtafhankelijk geconstrueerd kunnen worden, de kracht wordt gevarieerd door verschillende draadlengtes in de aluminium platen te kiezen. Verder moet het mogelijk zijn om de aluminium plaat te vervangen door een stalen plaat zodat het draadeind kapot getrokken kan worden. Dit zal aantonen dat inserts betrouwbaar en hoog belastbaar geconstrueerd kunnen worden.

In dit hoofdstuk worden de volgende aspecten van het ontwerpproces van de trekbank behandeld:

- Het uiteenzetten van de eisen aan de trekbank (6.2).
- Het ontwerp van de trekbank (6.2).
- De constructieve berekeningen aan de trekbank (6.3).
- Het ontwerp van de koolstofvezelcomposiet plaat met insert (6.4).

Aan de hand van het ontwerp proces zal er geconcludeerd worden of de ontworpen opstelling aan de gestelde eisen voldoet (6.5). Er zullen ook eventuele verbeterpunten worden aangedragen (6.6).

6.1 De eisen aan de trekbank

In overleg met de opdrachtgever zijn de volgende eisen gesteld waaraan de trekbank opstelling moet voldoen:

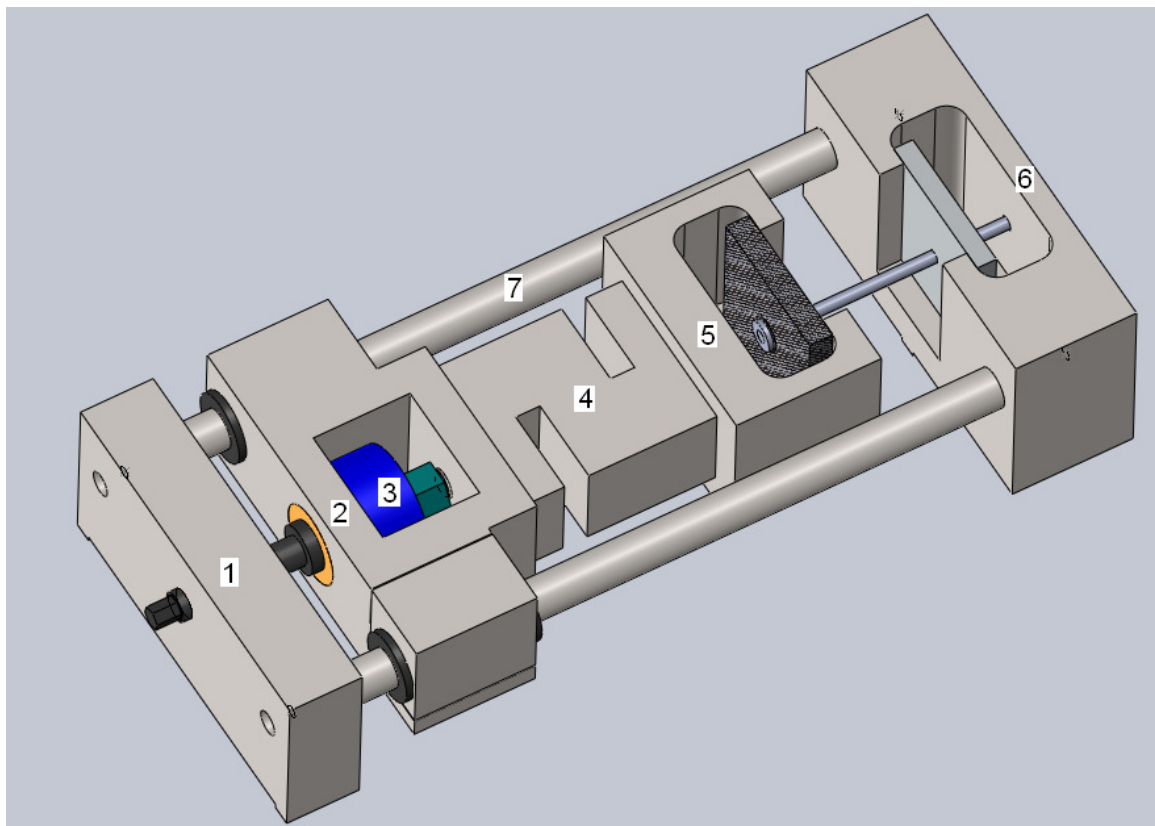
- De aluminium en koolstofvezelcomposiet plaat moeten goed zichtbaar zijn. Zo kan er duidelijk gezien worden wat er gebeurt op het moment van bezwijken.
- De maximaal toe te passen draadeindmaat is M5, zo hoeft de trekbank niet te zwaar te worden, maar laat het wel duidelijk de kracht van de gebruikte inserts zien.
- De trekbank moet naar demonstraties meegenomen kunnen worden. Hij mag daarom niet meer dan 15 kg wegen en zijn maximale afmetingen zijn beperkt tot 450*200*100mm.
- De aangebrachte kracht moet afgelezen kunnen worden. Maar de opstelling moet ook zonder krachtmeter gebruikt kunnen worden.

6.2 Het ontwerp van de trekbank.

Het ontwerp van de trekbank is in Afbeelding 1 zichtbaar. De aluminium plaat ligt tegen een aanslag in een blok <6> en wordt door een draadeind verbonden met een koolstofvezelcomposieten plaat die tegen een aanslag in blok 5 ligt. Het blok 6 is gefixeerd doordat het met twee stangen <7> verbonden is met blok 1, de blokken 1 en 6 vormen dus de vaste wereld. Blok 2 is met een schroefspindel <3> verbonden aan blok 1. Door de spindel te roteren zal blok 2 een lineaire beweging gaan maken, het blok wordt in de rotatie richting op zijn plek gehouden door de stangen 7. Wanneer blok 2 beweegt zal het blok 5 meetrokken m.b.v. een krachtsensor <4>. De kracht waarmee aan het draadeind getrokken wordt kan gemeten worden met de krachtsensor <4>, deze sensor en de benodigde uitleesapparatuur zijn bij Philips Innovation Services beschikbaar.

De afmetingen van de trekbank zijn 350x150x70 mm en de massa is 11,3 kg.

In paragraaf 6.2.1 wordt er verder ingegaan op het ontwerp van de spindel en in paragraaf 6.2.2 wordt er verder ingegaan op het wegwerken van de statische overbepaaldheid van de constructie.



Afbeelding 1 Ontwerp van de trekbank.

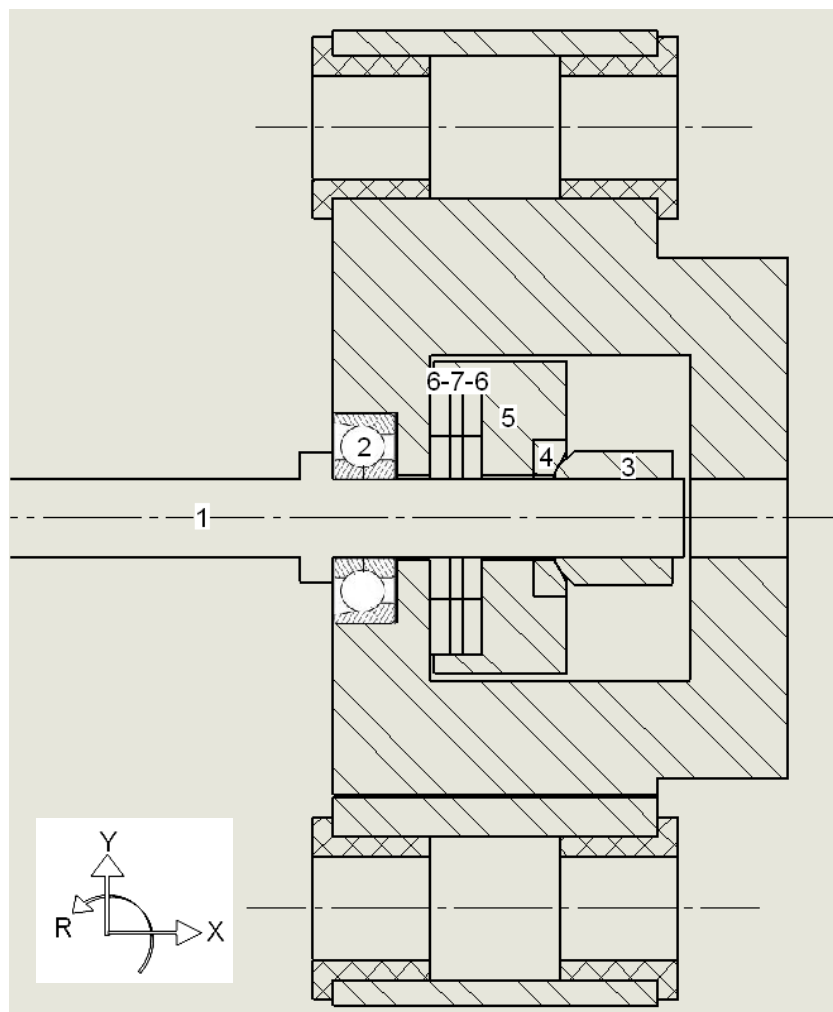
6.2.1 De spindel

In Afbeelding 2 is een doorsnede van de schroefspindel en zijn bevestiging in blok 2 (Afbeelding 1) te zien. De schroefspindel <1> wordt in de Y – *richting* gepositioneerd door een hoekcontact- kogellager <2>. De schroefdraadverbinding tussen blok 1 en de spindel (Afbeelding 1) heeft speling, hierdoor is de Y – *richting* bepaald gepositioneerd door het hoekcontact- kogellager.

In de X^+ – *richting* wordt de spindel <1> gepositioneerd doordat zijn borst tegen het hoekcontact- kogellager <2> aanloopt.

In de X^- – *richting* wordt de spindel tegengehouden doordat de kogelvormige zeskantmoer <3>, via een kegelpan- revet <4> en een bus <5>, de krachten overdraagt op een radiaal naaldlager (met aan zijn beide zijden een looprevet) <6-7-6> dat tegen blok 2 aanligt.

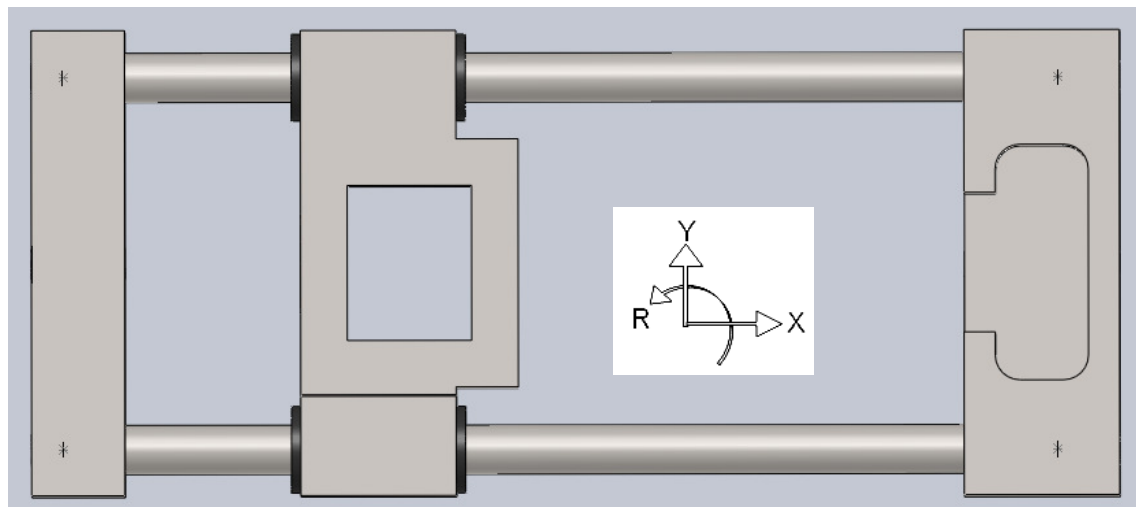
Doordat de kogelvormige zeskantmoer <3> en het kegelpan- revet <4> geen rotatie kunnen overdragen aan het radiaal- naaldlager <6-7-6>, wordt de spindel in de R – *richting* alleen door het hoekcontact- kogellager <2> vastgelegd.



Afbeelding 2 Doorsnede van de schroefspindel

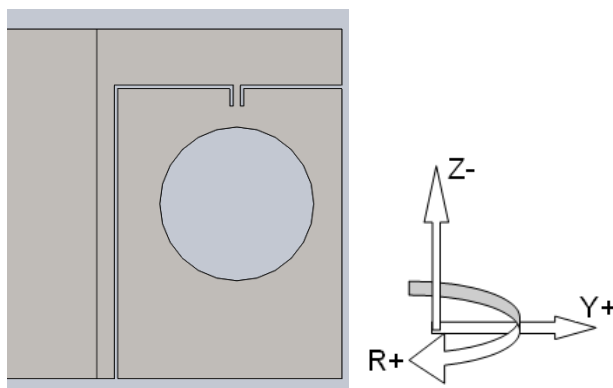
6.2.2 Overbepaaldheid

De verbinding tussen de geleidingsassen en de blokken beschouwend kan er geconcludeerd worden dat er een statische overbepaling in de *Y-richting* is (Afbeelding 3). Voor het goed functioneren van de spindel en om overmatige slijtage in de lineaire lagers te voorkomen dient deze overbepaling weggewerkt te worden. De overbepaling in de *R-richting*, doordat de geleidingsassen niet parallel zouden lopen, wordt verwaarloosd omdat de lagerbusjes spelling hebben ten opzichte van de geleidingsas.



Afbeelding 3 Overbepaaldheid in de constructie.

Aangezien beide verbindingen van het middelste blok aan de geleidingsassen een stijfheid uit het vlak dienen te bezitten en maar één verbinding een stijfheid in de *Y-richting* (Afbeelding 3), kan hier een oplossing voor de overbepaaldheid worden gezocht. Door een van de lagerbussen in het middelste blok via een bladveer te verbinden aan de geleidingsassen, kunnen de overbepalingen weggewerkt worden (Afbeelding 4). De veer geeft vrijheid in de *X-richting* terwijl de stijfheid in de *Y-richting* behouden blijft.



Afbeelding 4 Bladveer tegen overbepaaldheid.

6.3 Berekeningen aan de trekbank

Voor het functioneren van de trekbank is het vitaal om de volgende zaken te bepalen:

- De maximaal optredende belasting in de opstelling (6.3.1).
- De afschuifspanningen van de schroefdraden in de aluminium platen (6.3.2).
- De doorbuiging van en buigspanning in de aluminium plaat (6.3.3).
- Het benodigde aandrijfmoment voor het aandrijven van de schroefspindel en de spanningen in de schroefspindel (6.3.4).
- De equivalente spanning in het zeskantige deel van de spindel (6.3.5).

6.3.1 De maximale belasting

Om het ontwerp te dimensioneren zal er een maximaal op te nemen kracht bepaald moeten worden. De maximale kracht in het systeem zal nooit hoger zijn dan de breukkracht van het M5 draadeind. Een afbeelding van de schroefdraaddiameters is in bijlage 1.4 gegeven.

De breukspanning van een M5 12.9 klasse draadeind bedraagt $1200 \cdot 10^6 \frac{N}{mm^2}$. De spanningsdoorsnede van M5 kan berekend worden met behulp van de schroefdraad diameters (Vergelijking 1) [6].

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2$$

$$A_s = 1.42 \cdot 10^{-5} m$$

Vergelijking 1 De spanningsdoorsnede van M5.

Waar d_0 te berekenen is met $D_0 = \frac{d_2 + d_3}{2}$.

De breukkracht van het draadeind van is een vermenigvuldiging van de breukspanning (R_m) en de spanningsdoorsnede (A_s) (Vergelijking 2).

$$F_{breuk} = A_s \cdot R_m$$

$$F_{breuk} = 17 \cdot 10^3 N$$

Vergelijking 2 De breukkracht van het draadeind.

De plastische vervormingskracht van het draadeind is een vermenigvuldiging van de 0,2 rekgrens ($R_{p0,2}$) en de spanningsdoorsnede (Vergelijking 3).

$$F_{0,2} = A_s \cdot R_{p0,2}$$

$$F_{0,2} = 15 \cdot 10^3 N$$

Vergelijking 3 De vloeispanning van het draadeind.

Conclusie

De maximale belasting in de opstelling zal optreden wanneer het draadeind kapot getrokken wordt, deze belasting zal 17kN bedragen (Vergelijking 1). Verder dient er rekening mee gehouden te worden dat de krachten benodigd voor het afschuiven van het draad in de aluminium platen niet de vloeikracht van het draadeind overschrijden (15kN).

6.3.2 De afschuifspanningen in de aluminium schroefdraden

Om het draadeind uit de aluminium platen te trekken zal het schroefdraad in deze platen moeten afschuiven. Er wordt gerekend met twee verschillende draadlengtes in de aluminium platen. Door twee draadlengtes te kiezen wordt de op de inserts aangebrachte belasting gevarieerd. Hierdoor zal het mogelijk zijn de inserts krachtafhankelijk te construeren.

De twee draadlengtes (L_1 en L_2) worden als de effectieve draadlengte beschouwd. Dit resulteert in twee afschuifoppervlakken van de aluminium draden; A_{th1} en A_{th2} (Vergelijking 4).

$$A_{th1} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D_0 \cdot L_1 \quad A_{th2} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D_0 \cdot L_2$$
$$A_{th1} = 2 \cdot 10^{-5} m^2 \quad A_{th2} = 4 \cdot 10^{-5} m^2$$

Vergelijking 4 De afschuifoppervlakken van de aluminium draden.

De voor L_1 en L_2 gekozen afmetingen zijn 3 en 6 mm.

De maximale afschuifspanning ($\tau_{\max}$) van AlZn6MgCu kan berekend worden met behulp van de maximale trekspanning (R_m) (Vergelijking 5)[6].

$$\tau_{\max} = 0.65 \cdot R_m$$
$$\tau_{\max} = 351 \frac{N}{mm^2}$$

Vergelijking 5 De maximale afschuifspanning van AlZn6MgCu.

In Vergelijking 6 zijn de maximaal benodigde krachten voor de afschuiving van de aluminium draden berekend.

$$F_{afschuif1} = \tau_{\max} \cdot A_{th1} \quad F_{afschuif2} = \tau_{\max} \cdot A_{th2}$$
$$F_{afschuif1} = 7 \cdot 10^3 N \quad F_{afschuif2} = 14 \cdot 10^3 N$$

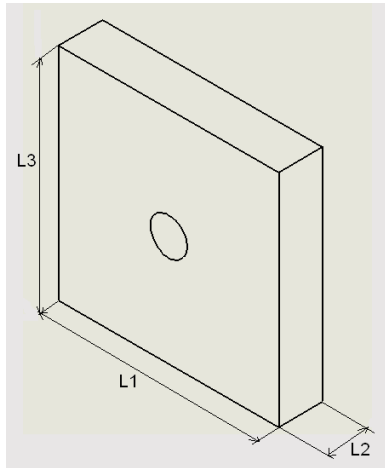
Vergelijking 6 De benodigde krachten voor het afschuiven van het aluminium draad.

Conclusie

De maximaal benodigde krachten voor het afschuiven van de aluminium schroefdraden overschrijden de vloeikracht van het draadeind niet (Vergelijking 6 en Vergelijking 3).

6.3.3 De doorbuiging van en buigspanning in de aluminium plaat

De aluminium plaat zal doorbuigen en spanningen ondervinden ten gevolge van de aangebrachte trekkracht. In Afbeelding 5 is een schets van de aluminium plaat zichtbaar.



Afbeelding 5 Aluminium plaat.

$$L_1 = 60mm$$

$$L_2 = 12mm$$

$$L_3 = 60mm$$

De maximale doorbuiging ($V_{\max}$) van en de buigspanning (σ_{buiig}) in de plaat zijn in Vergelijking 7 terug te vinden. Bij de buigspanning dient er rekening mee gehouden te worden dat de invloed van het schroefgat in de plaat niet is meegenomen.

$$V_{\max} = \frac{F_{\text{breuk}} \cdot L_1^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

$$V_{\max} = 1.26 \cdot 10^{-1} mm$$

$$\sigma_{\text{buiig}} = \frac{M \cdot c}{I}$$

$$\sigma_{\text{buiig}} = 177 \frac{N}{mm^2}$$

Vergelijking 7 De maximale doorbuiging van en spanning in de plaat.

$$\text{De waarde van } c = \frac{L_2}{2} \text{ en de waarde van } I = \frac{L_3 \cdot L_2^3}{12}.$$

Conclusie

Door de hoge spanning in de aluminium plaat (Vergelijking 7) zal er een hoogwaardige aluminium soort gebruikt moeten worden. Wanneer we van een aluminium legering eisen dat de vloeispanning hoger is dan

$265 \frac{N}{mm^2}$ (veiligheidsfactor 1.5), komen we uit op AlZn6MgCu (in Philips codering

T1054/ 80). De mechanische eigenschappen van dit materiaal zijn in Tabel 1 terug te vinden [7].

Tabel 1 De mechanische eigenschappen van AlZn6MgCu.

Rm (breukspanning)	540 MPa
Rp0,2 (rekgrens)	460 MPa
Breukrek	6 %
Vermoeiingsspanning (wisselend)	165 MPa
E-modulus	71 GPa
Soortelijke massa	2.8 kg/l

6.3.4 Spindel berekeningen

De schroefspindel bestaat uit een M12 draadeind met de onderstaande eigenschappen:

$$E = 210 \cdot 10^3 \frac{N}{mm^2}$$

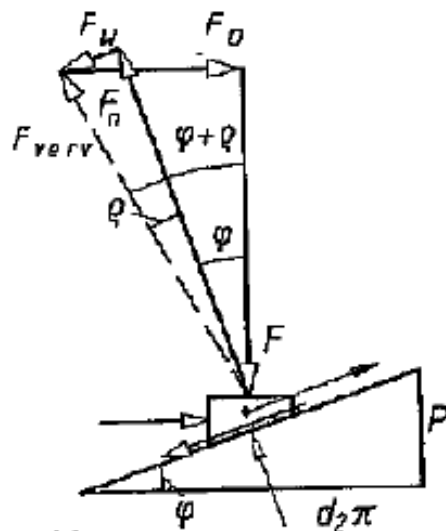
$$d_2 = 10.86mm$$

$$d_3 = 9.85mm$$

$$P = 1.75mm$$

Een afbeelding van de schroefdraaddiameters is in bijlage 1.4 gegeven.

Het krachterspel in de schroefdraad van de aandrijfspindel is in Afbeelding 6 Vergelijking 6 zichtbaar.



Afbeelding 6 Het krachterspel in een schroefdraad bij het heffen van een last [6].

Het maximale aandrijfmoment valt te berekenen met de hoek van het schroefdraad φ , de wrijvingscoëfficiënt in het schroefdraad μ_g en de axiale kracht

F_{axiaal} (Vergelijking 8) [6]. Voor F_{axiaal} is de maximaal optredende belasting in de opstelling gekozen (17kN (Vergelijking 2)).

$$M_g = F_{axiaal} \cdot \tan(\varphi + \rho) \cdot \frac{d_2}{2}$$

$$M_g = 21.1Nm$$

Vergelijking 8 Het maximale aandrijfmoment van de schroefspindel [6].

De waarde van $\varphi = \frac{P}{d_2 \cdot \pi}$ en de waarde van $\rho = 1.155 \cdot \mu_g$ [6].

De te zetten kracht (F_z) bij aanhalen van de schroefspinden met een sleutel met een lengte l_s is in Vergelijking 9 terug te vinden. De waarde van 70N is makkelijk handmatig aan te brengen op een sleutel.

$$F_z = \frac{M_g}{L_{sleutel}}$$

$$F_z = 70.4N$$

Vergelijking 9 De te zetten kracht voor het aanhalen van de schroefspindel.

De vergelijkspanning in de spindel is in Vergelijking 10 berekend. Door de relatief hoge vergelijkspanning ($296 \frac{N}{mm^2}$) zal er met een hoogwaardige staalsoort geconstrueerd moeten worden.

$$\sigma_{vergelijk} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

$$\sigma_{vergelijk} = 296 \frac{N}{mm^2}$$

Vergelijking 10 De vergelijkspanning in de spindel.

De waarden voor σ en τ zijn als volgt te berekenen:

$$\sigma = \frac{F_{breuk}}{A_s}$$

$$\tau = \frac{M_g}{W}$$

$$A_s = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4}$$

$$W = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16}$$

Hier is F_{breuk} de breukkracht zoals berekend in Vergelijking 2 en M_g het aandrijfmoment zoals berekend in Vergelijking 8.

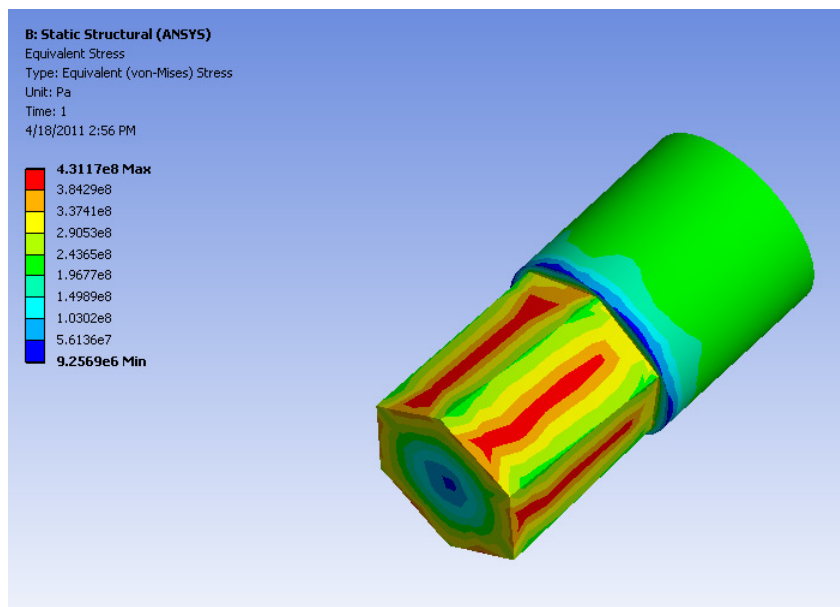
6.3.5 De equivalente spanning in het zeskantige deel van de spindel

De schroefspindel kan aangehaald worden met een dopsleutel, ringsleutel of een steeksleutel. De zeskant op het uiteinde van de as heeft een steek van 8mm. Om te bepalen wat de equivalente spanning in dit zeskantige deel van de as wordt is er een FEM analyse gemaakt. De spindel is vereenvoudigd tot een as met de kerndiameter van het M12 schroefdraad dat is verbonden aan de zeskant.

De as is gefixeerd aan het radiale eindvlak van de ronde staaf, verder zijn er een moment van 22Nm en een dwarskracht van 71N op het radiale eindvlak van de zeskant aangebracht. Aangezien er in dit deel van de as geen trekkracht aanwezig is komt de vergelijkspanning in het vereenvoudigde draadeind niet overeen met de berekende spanning in Vergelijking 10.

Uit de FEM analyse blijkt dat de maximale equivalente spanning in de zeskant

$431 \frac{N}{mm^2}$ bedraagt (Afbeelding 7).



Afbeelding 7 De equivalente spanning in de zeskant.

Het is belangrijk dat de spindel een hoge corrosiebestendigheid heeft aangezien de trekbank vervoerd moet worden en het lakken van de spindel niet gewenst is. Verder is het belangrijk dat het materiaal een hoge $Rp_{0,2}$ heeft zodat het de spanning

van $431 \frac{N}{mm^2}$ (Afbeelding 7) kan weerstaan. Het is tevens mogelijk dat de spanning

aanzienlijk oploopt wanneer het schroefdraad vervuult en hierdoor de wrijvingscoëfficiënt ergo het aandrijfmoment toeneemt.

Een geschikt materiaal is X90CrMoV18 1 (AISI 440C of N401 in Philips notatie). De eigenschappen van het materiaal staan in tabel 2 [7].

Tabel 2 De mechanische eigenschappen van X90CrMoV18 1 [7].

Rm (breukspanning)	1900 MPa
Rp0,2 (rekgrens)	1800 MPa
Breukrek	3 %
Vermoeiingsspanning (wisselend)	800 MPa
E-modulus	200 GPa
Soortelijke massa	7,8 kg/l

6.4 De insert in de koolstofvezelcomposiet plaat.

Het ontwerpen van de insert in de koolstofvezelcomposiet plaat is op te delen in twee hoofddelen; het ontwerpen van de insert en het ontwerpen van de koolstofvezelcomposiet plaat.

Het construeren van de insert is gebeurd aan de hand van de volgende stappen:

- Het vaststellen van de afmetingen van de insert (6.4.1).
- Het ontwerpen van de insert (6.4.2).
- Een FEM analyse van de insert (6.4.3).
- De materiaalkeuze voor de insert (6.4.4)

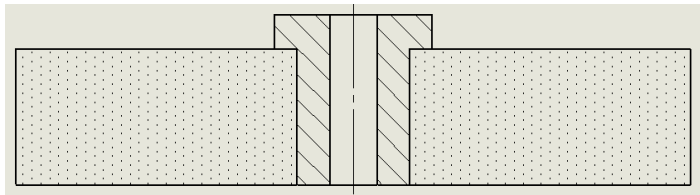
Voordat de koolstofvezelcomposiet plaat geconstrueerd kan worden is het belangrijk om uiteen te zetten wat de algemene overwegingen zijn wanneer met een composiet construeert (6.4.5). Verder is het belangrijk om te begrijpen hoe een composiet is opgebouwd (bijlage 1.4).

Het daadwerkelijk construeren van de koolstofvezelcomposiet plaat is gebeurd aan de hand van de onderstaande stappen:

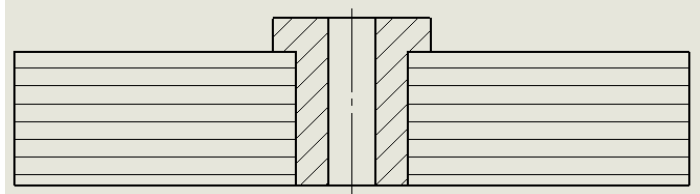
- Het samenstellen van een composiet (6.4.6).
- Een FEM analyse van de koolstofvezelcomposiet plaat (6.4.7).

6.4.1 De afmetingen van de insert

Omdat de insert op trek wordt belast is ervoor gekozen om een geflensde insert te gebruiken. Voor volledige bezwijking bij een dergelijke insert zal de flens door het koolstofvezelcomposiet getrokken moeten worden. Voor het bepalen van de afmetingen van de insert dient de maximaal toelaatbare transversale schuifspanning van het composiet bepaald te worden. De doorsneden in de 0 en 90 graden richting, van een insert in een unidirectioneel weefsel, zullen eruit zien als in Afbeelding 8 en Afbeelding 9.



Afbeelding 8 Doorsnede van een insert in een koolstofvezelcomposiet.



Afbeelding 9 Doorsnede van een insert in een koolstofvezelcomposiet.

Wanneer we Afbeelding 8 beschouwen zien we dat de vezels (puntjes) niet veel zullen bijdragen aan de afschuifsterkte van het materiaal. Hun onderlinge verbindingen worden namelijk gevormd door de matrix. Wanneer we de doorsnede Afbeelding 9 zouden beschouwen zou de vezel wel onder de insert doorlopen en zou de maximale afschuifspanning dus hoger liggen. De toegestane belasting loodrecht op een vezel is echter vergelijkbaar met de toegestane belasting van de matrix. Het is dus aannemelijk dat de maximaal toelaatbare transversale afschuifspanning van het koolstofvezelcomposiet ongeveer gelijk is aan de maximaal toelaatbare afschuifspanning van de matrix.

Aangenomen wordt dat voor volledige bezwijking de grootste diameter van de insert door het composiet getrokken moet worden. Met deze randvoorwaarden kan de buitendiameter van de flens van de insert bepaald worden (Vergelijking 11).

$$\bar{\tau}_m = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi * d_{insert} * h_{plaat}}$$

$$d_{insert} = \frac{F}{\pi * h_{plaat} * \bar{\tau}_m}$$

Vergelijking 11 De buitendiameter van de flens van de insert.

Hier is $\bar{\tau}_m$ de maximaal toelaatbare schuifspanning van de matrix, h_{plaat} de dikte van de composieten plaat en d_{insert} de buitendiameter van de flens.

Wanneer we Vergelijking 11 invullen met $\bar{\tau}_m = 50 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right]$, $h_{plaat} = 12 \cdot 10^{-3} [m]$ en de krachten zoals berekend in Vergelijking 2 en Vergelijking 6, vinden we de afmetingen in Tabel 3 voor de buitendiameter van de flens.

Tabel 3 De buitendiameter van de flens a.d.h.v. de optredende krachten.

F	d_{insert}
7kN	4 mm
14kN	7.5 mm
17kN	9 mm

Een kanttekening bij de waarden uit Tabel 3 is dat het draadeind een doorsnede van 5mm heeft en dat schacht van de insert hierdoor een minimale maat heeft die groter is dan de eerste twee waarden uit de tabel. De minimale buitendiameter van de schacht ($D_{schacht \text{ buiten}}$) is beschreven in Vergelijking 12.

$$D_{schacht \text{ buiten}} = \sqrt{\frac{A_{schacht} + A_{M5}}{\frac{\pi}{4}}}$$

Vergelijking 12 De minimale buitendiameter van de schacht van de insert.

$A_{M5} = \frac{\pi}{4} \cdot 5^2$ (de oppervlakte van het M5 draadeind) en $A_{schacht} = \frac{F}{\sigma_{toelaatbaar}}$ (de oppervlakte van de schacht van de insert). Hier is F de optredende belasting zoals berekend in Vergelijking 2 en Vergelijking 6.

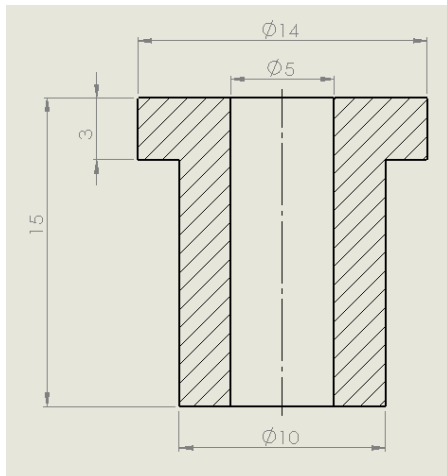
Wanneer we Vergelijking 12 invullen met $\sigma_{toelaatbaar} = 800 \frac{N}{mm^2}$ vinden we de schacht diameters uit Tabel 4.

Tabel 4 Minimale buitendiameters van de schacht van de insert a.d.h.v. de optredende belasting.

F	$d_{schacht}$
7kN	6.8 mm
14kN	7.8 mm
17kN	8.2 mm

6.4.2 Het ontwerp van de insert

Zoals blijkt uit Tabel 3 en Tabel 4 is het mogelijk om verschillende inserts bij de belastingen te construeren. Wanneer we een insert construeren voor de belasting van 17kN met een veiligheidsfactor van 1.5 op de flens krijgen we een insert zoals die uit Afbeelding 10. Deze insert zal tevens voor de belasting van 14kN gebruikt worden.



Afbeelding 10 De insert voor de belastingen van 14 en 17kN.

Omdat de flens een grotere buitendiameter heeft dan aangegeven in Tabel 3 zal de afschuifspanning in het koolstofvezelcomposiet lager worden. De afschuifspanning in het composiet zal $32 \frac{N}{mm^2}$ bedragen bij een belasting van 17kN (Vergelijking 13).

$$\tau_m = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi * d_{insert} * h_{plaat}}$$

$$\tau_m = 32 \frac{N}{mm^2}$$

Vergelijking 13 De daadwerkelijke afschuifspanning in het composiet.

Hier is h_{plaat} de dikte van de composieten plaat en d_{insert} de buitendiameter van de flens.

De insert voor de belasting van 7 kN heeft geen flens nodig omdat de lijmverbinding voldoende kracht kan opnemen. Wanneer we rekenen met een toelaatbare spanning van $20 \frac{N}{mm^2}$ in de lijmlaag vinden we dat een buiten diameter van 10mm voldoende is (Vergelijking 14).

$$d_{insert} = \frac{A}{h_{plaat} * \pi}$$

$$d_{insert} = 9.3mm \rightarrow 10mm$$

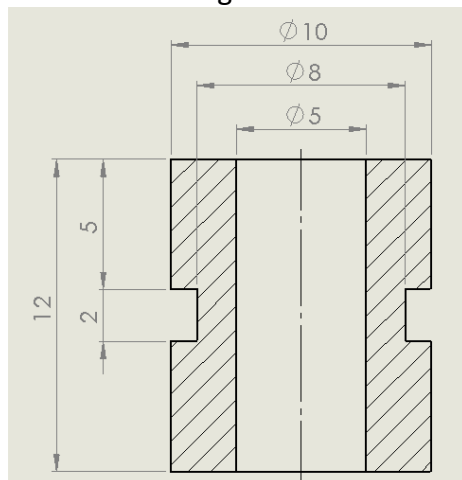
Vergelijking 14 De buitendiameter van de ongeflenste insert.

A valt als volgt te berekenen:

$$A = \frac{F}{\sigma}$$

$$A = 350mm^2$$

Om te garanderen dat de insert voldoende hecht met de lijmlaag zit er een inkeping in die hem ook vormvast in de lijmlaag positioneert. In Afbeelding 11 is de insert voor de belasting van 7kN te zien.

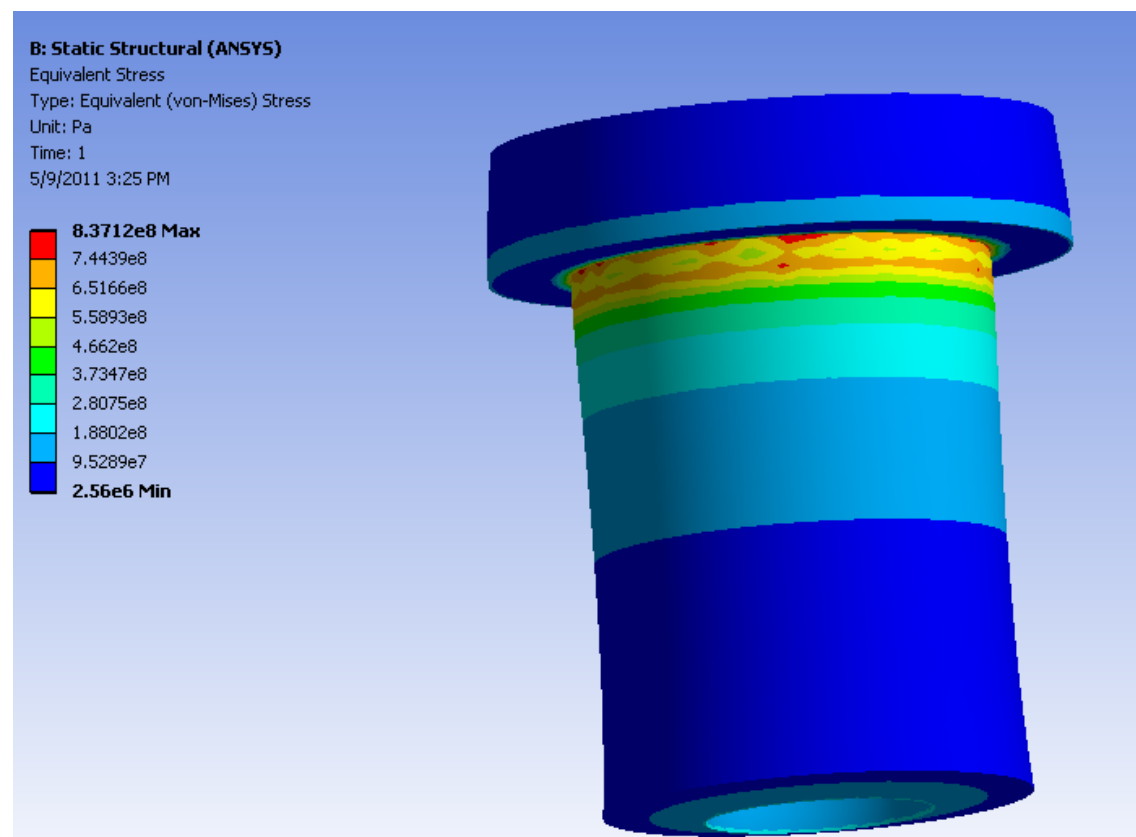


Afbeelding 11 De insert geschikt voor een belasting van 7kN.

6.4.3 FEM analyse van de insert

De toelaatbare spanning in de lijmlaag is dusdanig laag dat de spanning in de insert niet hoog kan oplopen, daarom is ervoor gekozen de insert voor de belasting van 7kN niet te analyseren.

Om te valideren dat de insert voor de belastingen van 14 en 17kN bestand is tegen deze krachten is er een FEM analyse uitgevoerd. In de analyse is de insert gefixeerd op de onderzijde van zijn flens en is er een axiale kracht van 17kN op het draad aangebracht. De gebruikte Mesh Setting is Automatic met een Mesh Body Size van 0.5mm. Uit de analyse blijkt dat de maximale spanning optreedt in de overgang van schacht naar flens. De maximale spanning zou hier $840 \frac{N}{mm^2}$ bedragen (Afbeelding 12).



Afbeelding 12 FEM analyse van de insert voor de belastingen van 14 en 17kN.

6.4.4 Materiaal keuze voor de insert

Het is belangrijk dat het materiaal van de insert een hoge corrosiebestendigheid heeft. Dit is nodig omdat de koolstofvezels kathodisch zijn en de insert de anode zou vormen. Verder is het belangrijk dat het materiaal een hoge $Rp_{0,2}$ heeft zodat het de spanning van $840 \frac{N}{mm^2}$ kan weerstaan. Een geschikt materiaal is X90CrMoV18 1 (AISI 440C of N401 in Philips notatie). De eigenschappen van het materiaal staan in Tabel 5 [7].

Tabel 5 De mechanische eigenschappen van X90CrMoV18 1 [7].

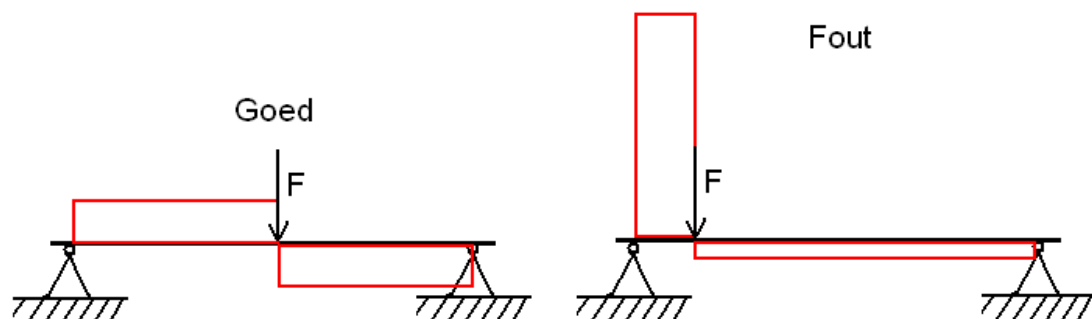
Rm (breukspanning)	1900 MPa
Rp0,2 (rekgrens)	1800 MPa
Breukrek	3 %
Vermoeiingsspanning (wisselend)	800 MPa
E- modulus	200 GPa
Soortelijke massa	7,8 kg/l

6.4.5 Overwegingen bij het construeren van de koolstofvezelplaat

In het ontwerp van de koolstofvezelcomposieten plaat met insert dient rekening te worden gehouden met het feit dat het materiaal anisotroop en inhomogeen is. De trekkracht aan de geflensde insert zal niet alleen een schuifspanning in het materiaal veroorzaken maar ook een buigspanning. Om de invloeden van beide spanningen te bepalen dient enig inzicht in composieten verworven te worden. Het koolstofvezelcomposiet bestaat uit een stapeling van lamellen. De wijze van stapeling en de mechanische eigenschappen van ieder lamel bepalen de uiteindelijke mechanische eigenschappen van het composiet.

Wanneer men een bout in een stalen balk bevestigt, heeft de positie van de bout in de balk nauwelijks effect op de maximale spanning in de balk. De plaatsing van de insert in de koolstofvezel plaat is wel van belang voor het wel of niet bezwijken van de constructie.

De vezels kunnen vrijwel alleen krachten absorberen in hun lengte richting, dit geeft onderdelen een zeer hoge buig- en treksterkte. De toelaatbare transversale afschuifspanning in het materiaal is echter vele malen lager. Bij de plaatsing van de insert dient de afschuifspanning in het composiet dus berekend te worden (zie Afbeelding 13).



Afbeelding 13 Balken met dwarskrachten t.g.v. de aangrijpingspositie van de kracht.

6.4.6 De samenstelling van het composiet

Door middel van het laminatenprogramma [4] kunnen de eigenschappen van het composiet berekend worden met behulp van de lamel eigenschappen en de lay-up van de lamellen. De lamel eigenschappen van de Torayca T300J prepegs zijn in Afbeelding 14 zichtbaar [1].

Het laminaat is voornamelijk in de 0 graden richting opgelegd, met enkele lamellen in de 90 graden richting. Hierdoor heeft het composiet een hoge stijfheid in de 0 graden richting en een lagere stijfheid in de 90 graden richting. De stijfheid in de 0 graden richting is gunstig omdat de composieten plaat slechts aan twee zijden is opgelegd.

Verder zijn de gehele B-matrix, A16, A26, D16 en D26 gelijk aan nul (zie bijlage 1.5 voor de invloed hiervan). De eigenschappen van het composiet zijn in Afbeelding 15 zichtbaar en de stijfheidsmatrix van het composiet in Afbeelding 16 [4].

	Thickness:	0.2 mm	ρ : 1528.0 Kg/m ³
Et:	139.24 GPa	Et:	10.87 GPa
Gtt:	4.39 GPa	Gtt:	3.81 GPa
vtt:	0.29	vtt:	0.43
α :	0.0	α :	0.0

Afbeelding 14 De eigenschappen van een Torayca T300J lamel.

E1:	114.04 GPa	Thickness:	11.999999999999999 mm
E2:	36.7 GPa	ρ :	1528.0 Kg/m ³
E3:	10.87 GPa		
G12:	4.39 GPa		
G23:	4.39 GPa		
G31:	4.39 GPa		
v12:	0.09		
v23:	0.29		
v31:	0.29		

Afbeelding 15 De mechanische eigenschappen van het composiet.

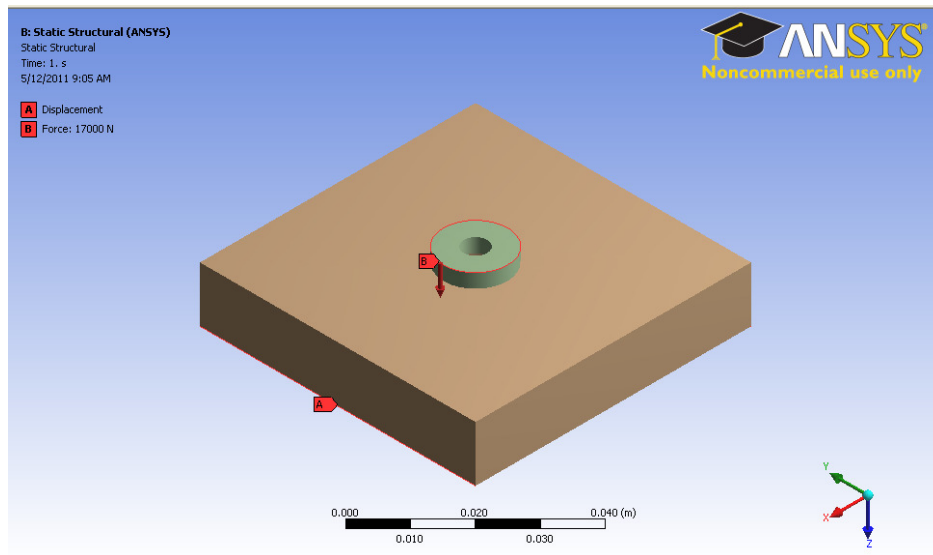
A			B			D		
1.37E3	3.81E1	0	0	0	0	1.51E4	4.57E2	0
3.81E1	4.41E2	0	0	0	0	4.57E2	6.71E3	0
0	0	5.26E1	0	0	0	0	0	6.32E2

Afbeelding 16 De koppelmatrix van het composiet.

6.4.7 FEM analyse van de koolstofvezelcomposiet plaat

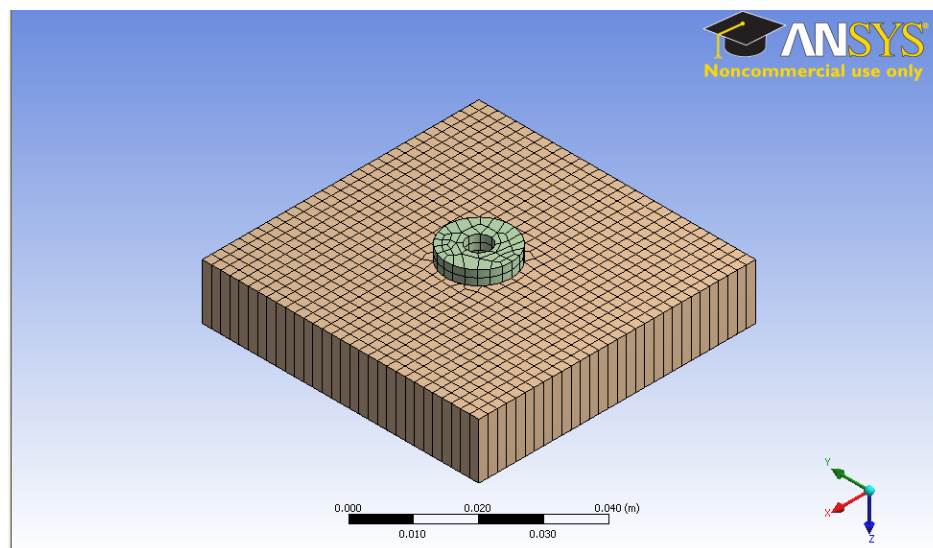
Om de uitkomsten van Vergelijking 11 te valideren is er een FEM-analyse van de insert in de koolstofvezelplaat gemaakt. In bijlage 1.7 is een validatie van de hieronder gebruikte instellingen te vinden.

Het model bestaat uit de koolstofvezelplaat waarop de flens van de insert ligt. Op deze flens is een kracht aangebracht van 17kN (Afbeelding 17).



Afbeelding 17 De insert met de kracht aangebracht op de flens.

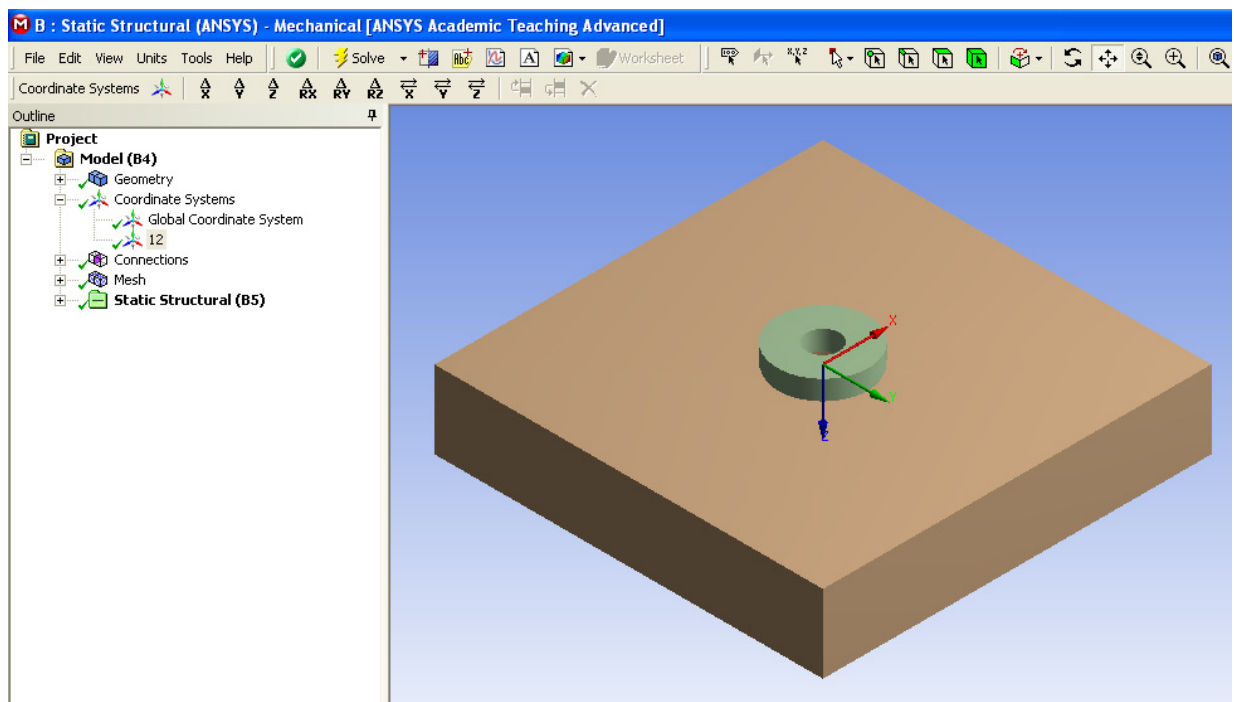
De koolstofvezelcomposiet plaat is als volgt gemeshd: Sweep Method, Automatic Thin, Solid Shell en een Mesh Body Size van 2mm (Afbeelding 18). De insert is volgens de Automatic Mesh Method gemeshd.



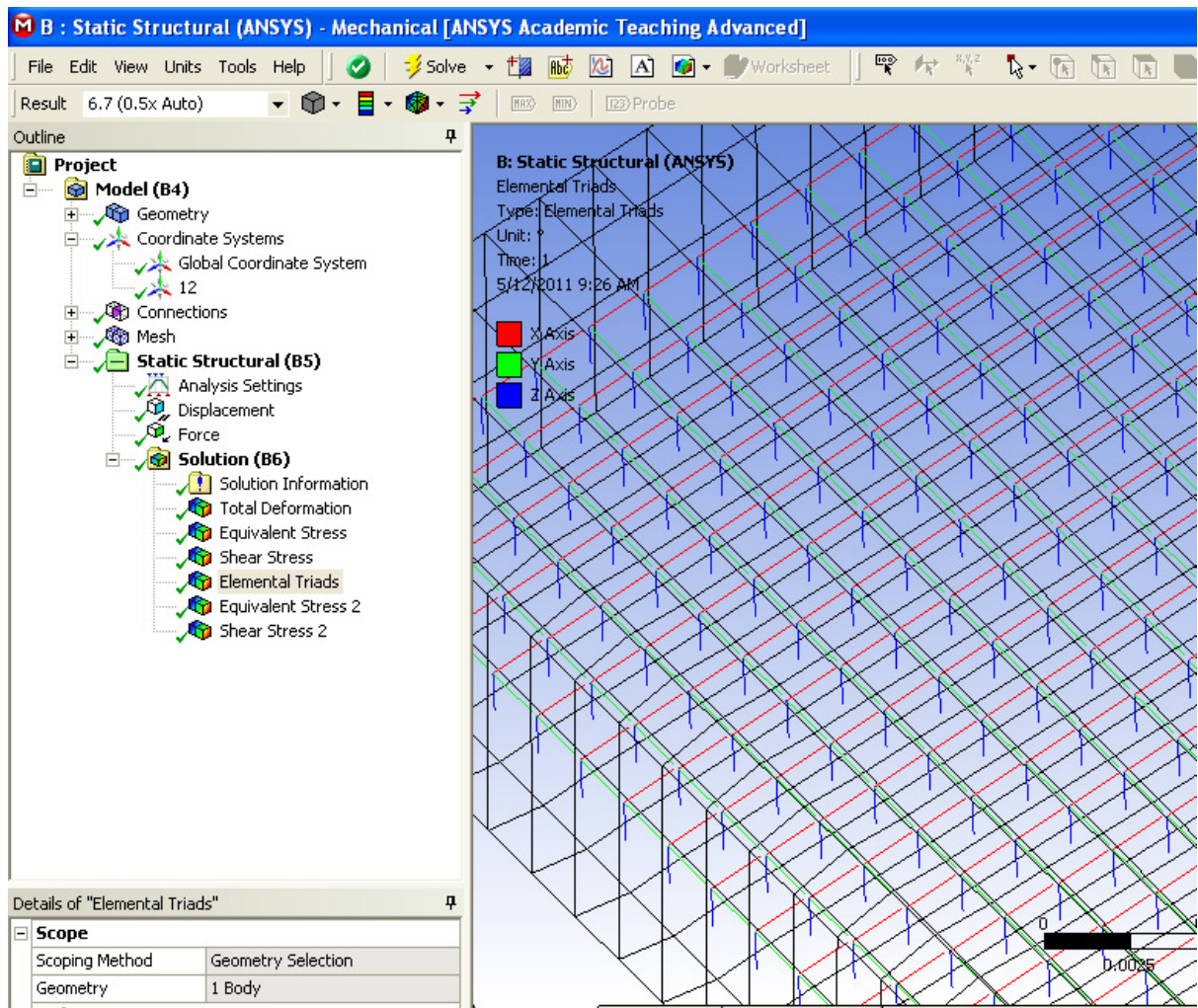
Afbeelding 18 De gemeshde koolstofvezelcomposiet plaat met insert.

Vervolgens is het zaak om alle elementen te richten. Dit is noodzakelijk omdat de eigenschappen van het composiet anisotroop zijn en de stijfheids hoofdrichting van het laminaat dus in lijn moet liggen met de benodigde stijfheids hoofdrichting in de plaat. Om dit te bereiken dienen eerst alle assenstelsels van de elementen uitgelijnd in de plaat te liggen. Dit moet omdat aan ieder Solid Shell element de composiet eigenschappen worden toegekend. Om de elementen te richten dient er eerst een apart Coordinate System op de plaat gelegd te worden (Afbeelding 19). Het laminaten programma zal bij het invoegen van de Command automatisch de elementen volgens het nieuw aangemaakte assenstelsel richten. Het is wel belangrijk dat de benaming van het assenstelsel in Ansys overeenkomt met die in het laminaten programma (de standaard benaming is 12).

Om te controleren of de elementen daadwerkelijk uitgelijnd zijn kan men bij Solution, Coordinate Systems de Elemental Triads optie invoegen. Na de analyse kan men de richting van de elementen bekijken door de View op Wireframe te zetten (Afbeelding 20).

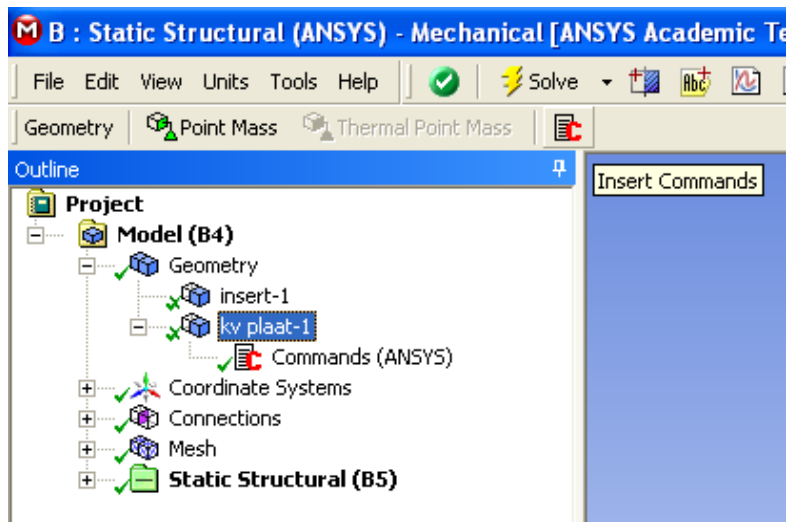


Afbeelding 19 Het aanmaken van een Coordinate System om de elementen te richten.

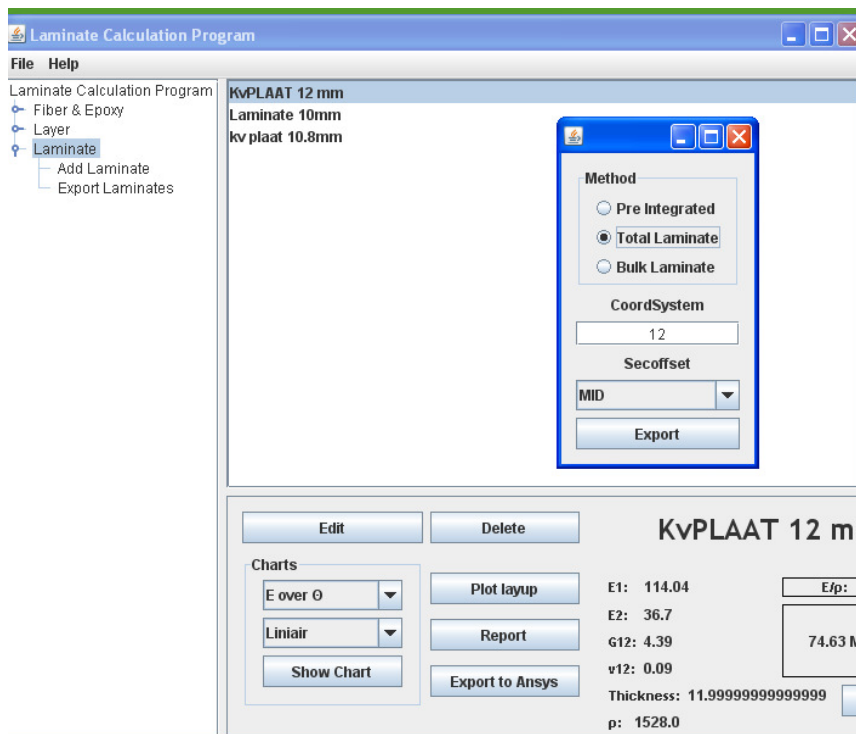


Afbeelding 20 Het zichtbaar maken van de uitlijning van de elementen.

Nadat de bovenstaande stappen zijn doorlopen, kunnen de composiet eigenschappen aan de plaat toegekend worden door middel van het invoegen van een Command bij de geometrie van de plaat (Afbeelding 21). De data die in deze Command gezet wordt kan in het laminaten programma gecreëerd worden door het gewenste laminaat te selecteren en “export to Ansys” te selecteren (Afbeelding 22). In het daarop volgende scherm dient de optie “Total Laminate” geselecteerd te worden. In dit scherm is het tevens mogelijk de benaming van het extra Coordinate System in te geven.



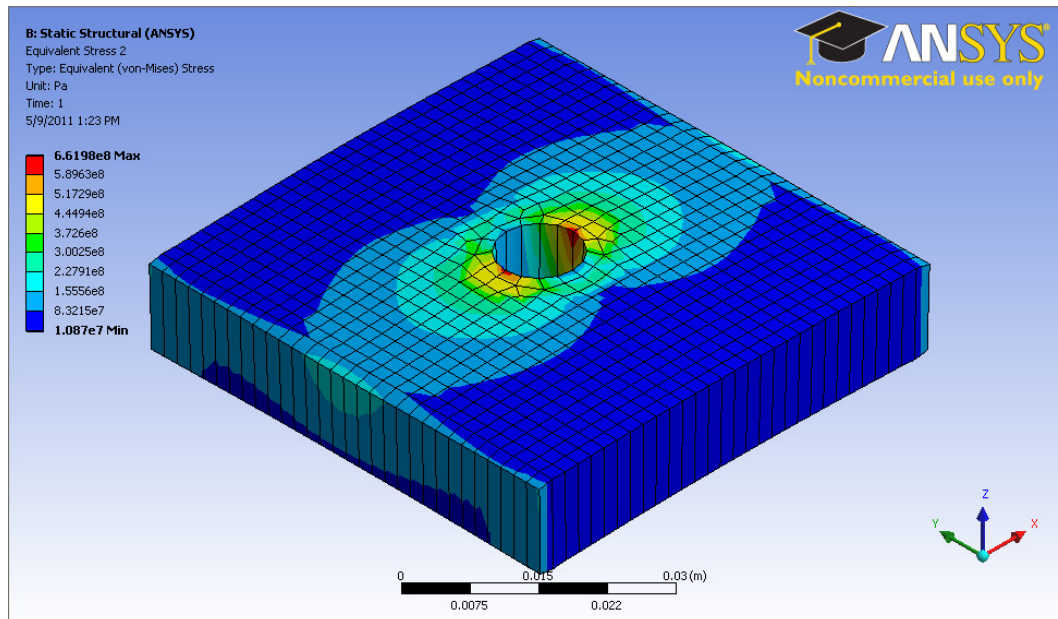
Afbeelding 21 Het invoegen van een command om de composiet eigenschappen aan de plaat toe te kennen.



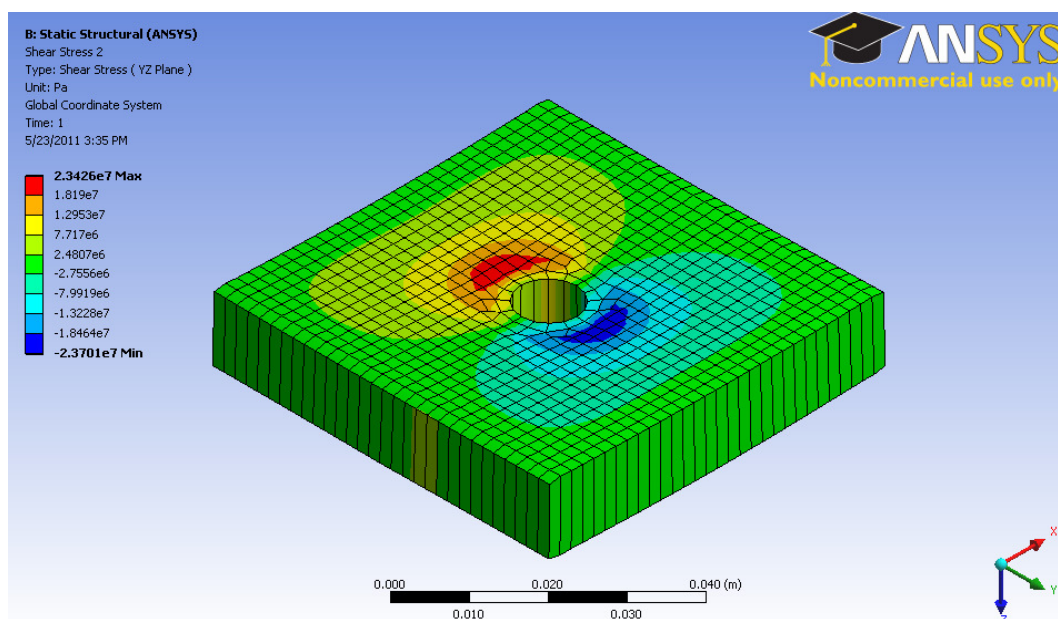
Afbeelding 22 De te doorlopen stappen in het laminaten programma.

Uit de analyse resultaten blijkt dat de maximale spanning in de plaat 660MPa bedraagt (Afbeelding 23), dit ligt ver onder de toelaatbare spanning van 2000MPa voor Torayca T300J. Deze waarde zegt echter niets over het wel of niet bezwijken van het composiet. Dit komt omdat men niet weet of deze spanning in de hoofd-vezelrichting van het laminaat loopt en wat de rekken in het composiet zijn. Vanwege de te besteden tijd is ervoor gekozen om geen bezwijkanalyse van de plaat uit te voeren.

Wat wel bepaald kan worden is de maximale transversale afschuifspanning in het materiaal, uit de analyse blijkt dat deze 23MPa bedraagt (Afbeelding 24).



Afbeelding 23 De equivalente spanning in de koolstofvezelcomposiet plaat.



Afbeelding 24 De schuifspanning in de koolstofvezelcomposiet plaat.

6.5 Conclusie

De ontworpen trekbank opstelling voldoet aan alle eisen die gesteld zijn in paragraaf 6.1. Het is een mobiele opstelling geworden die slechts 350x150x70mm meet en 11,3 kg weegt. Toch is het mogelijk om met de opstelling een M5 draadeind met een sterkteklasse 12.9 kapot te trekken. Wanneer dit draadeind bezwijkt terwijl de insert in de koolstofcomposiet plaat heel blijft, zal dit een duidelijke visualisatie geven van de kracht van een dergelijke verbinding. Tevens kan de kracht met een krachtsensor geregistreerd worden zodat er ook kwantitatieve data verzameld kan worden.

Er zijn een insert en een koolstofvezelcomposiet plaat ontworpen die volgens FEM analyses de optredende belastingen weerstaan (6.4.3 en 6.4.7). Er is tevens een vuistregel opgesteld waarmee de buitendiameter van de flens van een geflensde insert berekend kan worden (Vergelijking 11). Met deze vuistformule wordt een afschuifspanning van 32MPa in het composiet berekend (Vergelijking 13), in de FEM analyse wordt een afschuifspanning van 23MPa bij de buiten diameter van de insert gevonden.

Tevens is het duidelijk gemaakt dat het analyseren van koolstofvezel onderdelen met behulp van een FEM module relatief makkelijk is (6.4.7). Het analyseren van composieten mag weliswaar meer tijd kosten dan het analyseren van isotrope materialen, maar men moet niet vergeten dat koolstofvezel composieten gebruikt zullen worden wanneer conventionele materialen tekortschieten. Hierdoor zal men ook bereid zijn extra werk te verzetten.

Wanneer de opstelling is gebouwd zal blijken of Vergelijking 11 en de FEM analyses, betrouwbare resultaten leveren.

Gebaseerd op de resultaten van het ontwerpproces moet het mogelijk zijn een opstelling te bouwen die de constructeurs bij Philips Innovation Services meer kan overtuigen van de mogelijkheid tot construeren met koolstofvezelcomposiet. Het moeten werken met inserts is voor de constructeurs een hoge drempel om aan de slag te gaan met composieten. Wanneer de trekbank opstelling is gebouwd en de resultaten uit de analyses bevestigd worden zal deze drempel waarschijnlijk een stuk lager worden.

6.6 Aanbevelingen

De doelstelling van het project is om de kennis over koolstofvezelcomposieten bij de ingenieurs van Philips Innovation Services te vergroten, zodat zij het in de toekomst makkelijker zullen toepassen in hun ontwerpen. De trekbank opstelling moet demonstreren dat er betrouwbaar met inserts in composieten geconstrueerd kan worden. In het ontwerpproces is de theoretische kant van het construeren behandeld. Om te demonstreren dat de praktijk overeenkomt met de theorie wordt aanbevolen de opstelling te produceren en de resultaten uit de FEM analyses en handberekeningen te bevestigen. Wanneer de in het ontwerpproces gemaakte berekeningen bevestigd worden, kan er minder problematisch tegen het werken met inserts aangekeken worden.

Er is weinig informatie beschikbaar over de toelaatbare belasting van inserts. Dit is natuurlijk afhankelijk van het composiet waarin de insert geplaatst wordt. Toch zou het voor constructeurs prettig zijn, als er een standaard werk beschikbaar zou zijn, waarmee zij, met geverifieerde vuistformules, de toelaatbare belasting van een insert kunnen berekenen. Hier zouden ook een aantal insert varianten met belastingsvoorbeelden in afgebeeld kunnen worden. Dit maakt het kiezen van een insert minder gecompliceerd.

Bewust leeg gelaten pagina.

7 De “Thermometer”

Het doel van de “thermometer” opstelling is om te demonstreren dat er een zeer lage thermische uitzettingscoëfficiënt bereikt kan worden wanneer men een koolstofvezelcomposiet op de juiste manier samenstelt. Een koolstofvezelcomposiet en een aluminium staaf zullen verwarmd worden en uitzetten. Deze uitzetting zal mechanisch versterkt worden en zichtbaar zijn door het bewegen van een laserpunt op een wand.

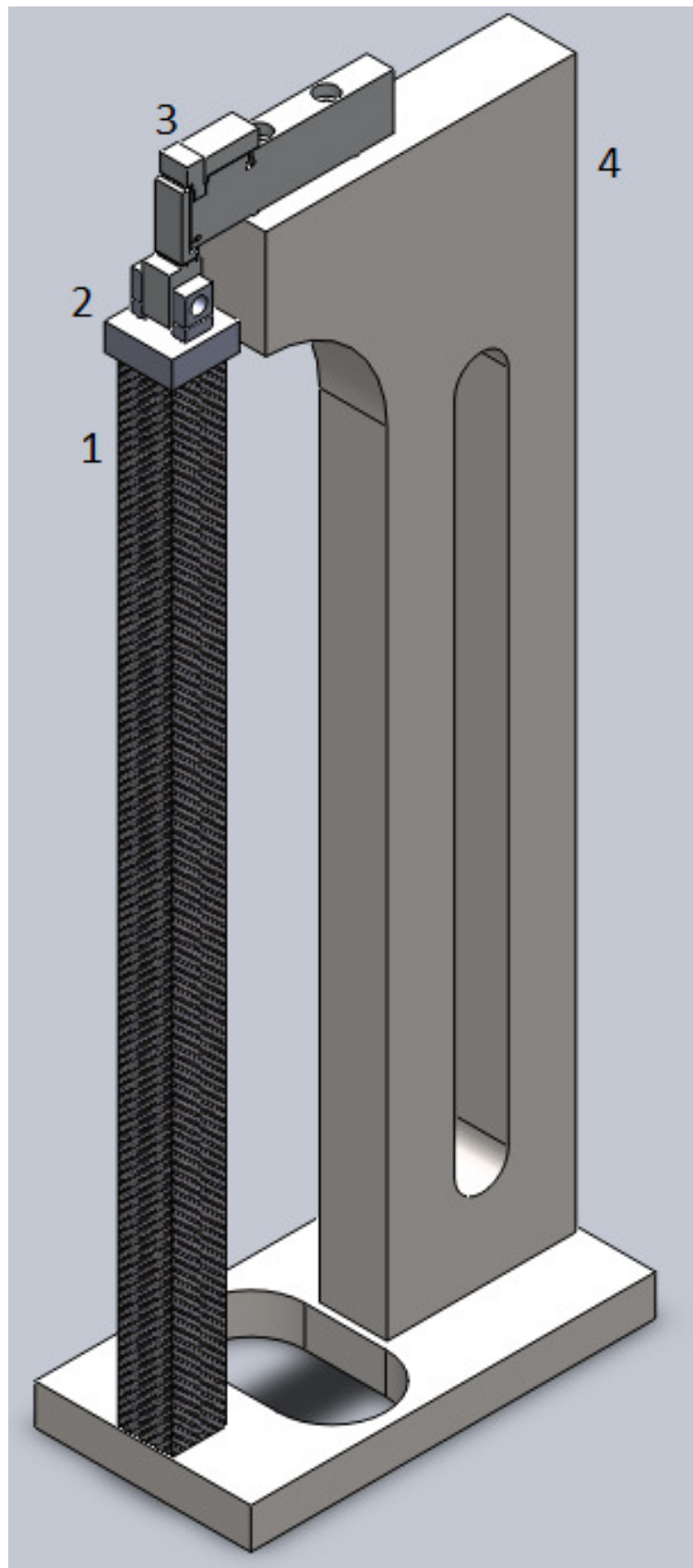
Het ontwerpproces van de thermometer valt als volgt op te delen:

- Het uiteenzetten van de eisen aan de “thermometer” (7.1).
- Het berekenen van de uitzetting van de staven (7.2).
- Het berekenen van de uitzettingskracht van de aluminium staaf. (7.3)
- Het ontwerpen van de versterker (7.4).
- Het ontwerp van de bevestigingsdelen (7.5).
- Het ontwerp van de koolstofvezelcomposiet balk (7.6).

Aan de hand van het ontwerpproces zal er geconcludeerd worden of het ontworpen opstelling aan de gestelde eisen voldoet (7.7). Er zullen ook eventuele verbeterpunten worden aangedragen (7.8).

De ontworpen opstelling is in Afbeelding 25 zichtbaar. De opstelling bestaat uit een koolstofvezelcomposiet of een aluminiumstaaf <1> die verwarmd wordt. De uitzetting van de staven wordt via een verbindingsstuk <2> doorgegeven aan een mechanische versterker <3>. De versterker is verbonden aan de vaste wereld met een buigstijve houder <4>. De totale opstelling meet 420x150x80mm en weegt 6 kg.

Voor de demonstratie zullen twee opstellingen naast elkaar worden gezet. Een met een aluminium staaf en een met een koolstofvezelcomposiet staaf. Door de staven vast te houden zullen ze opwarmen. Lasers die op de mechanische versterkers zijn bevestigd zullen op een wand schijnen. Wanneer de staven opwarmen zal de laser op de opstelling met de aluminiumstaaf gaan verplaatsen op de wand. Die op de opstelling met de koolstofvezelcomposiet staaf zal nauwelijks bewegen.



Afbeelding 25 De "thermometer".

7.1 Eisen aan de demonstrator opstelling

In overleg met de opdrachtgever zijn de volgende eisen opgesteld waaraan de thermometer opstelling moet voldoen:

- Er moet een duidelijk zichtbaar vergelijk gegeven worden tussen de thermische uitzettingseigenschappen van aluminium en koolstofvezelcomposiet. Hiervoor zal er verplaatsing van minstens 10 cm op de wand bij de aluminium staaf en maximaal 1 cm op de wand bij de koolstofvezelstaaf waarneembaar moeten zijn.
- De koolstofvezelcomposiet en aluminium staaf dienen aan dezelfde hoeveelheid warmte blootgesteld te worden.
- De opstelling moet mobiel zijn; de maximale afmetingen zijn beperkt tot 500x300x300mm en het maximale gewicht tot 10 kilo.
- Er dient met corrosie bestendige materialen gewerkt te worden, lakbewerkingen zijn ongewenst.

7.2 De weerstandloze uitzetting van de staven

Omdat de demonstrators compact moeten blijven zijn de lengtes van de staven beperkt tot ongeveer 300 mm.

De weerstandloze uitzetting van de koolstofvezelcomposiet en aluminium staaf zijn berekend bij een temperatuursverandering van $1K$ (Vergelijking 15).

Met weerstandloos wordt bedoeld dat de staven geen reactiekracht ondervinden vanuit de versterker.

$$\Delta L_{\text{aluminium staaf}} = L_{\text{staaf}} \cdot \alpha_{\text{aluminium}} \cdot \Delta T \qquad \Delta L_{\text{composiet}} = L_{\text{staaf}} \cdot \alpha_{\text{composiet}} \cdot \Delta T$$

$$\Delta L_{\text{aluminium staaf}} = 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \qquad \Delta L_{\text{composiet}} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

$$\alpha_{\text{aluminium}} = 26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}} \qquad \alpha_{\text{composiet}} = 0.2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T = 1K$$

$$\Delta T = 1K$$

Vergelijking 15 De uitzettingen van de staven.

Hier is α de thermische uitzettingscoëfficiënt van het materiaal, ΔT de verwarming van de staaf en ΔL de uitzetting van de staaf.

Conclusie

Aangezien de uitzetting van de aluminium staaf vele malen groter is dan die van de koolstofvezelcomposieten staaf wordt er uitsluitend verder gerekend met de uitzetting van de aluminium staaf.

Wel moet hier in beschouwing worden genomen dat de thermische uitzettingscoëfficiënt van het koolstofvezelcomposiet een afgeschatte waarde is. De waarde van de thermische uitzettingscoëfficiënt is afhankelijk van de lay-up van het composiet en de samenstelling van de lamellen. Wanneer deze configuraties bekend zijn zal de in Vergelijking 15 uitgerekenende uitzetting eventueel gecorrigeerd kunnen worden.

7.3 De uitzettingskracht van de aluminium staaf

De uitzetting van de aluminium staaf moet niet alleen genoeg kracht leveren om de versterker aan te drijven, er moet een veelvoud aan kracht overblijven. De reden hiervoor is dat er bij een krachtenevenwicht geen verplaatsing zichtbaar zou zijn; de uitzetting van de balk wordt dan tegengehouden door de reactiekracht vanuit de versterker. De uitzettingskracht van de aluminium balk (F_{staaf}) valt te berekenen met zijn stijfheid en uitzetting (Vergelijking 16).

$$F_{\text{staaf}} = C_{\text{staaf}} \cdot \Delta L_{\text{aluminium staaf}}$$

$$F_{\text{staaf}} = 728 \text{ N}$$

Vergelijking 16 De uitzettingskracht van de aluminium staaf.

Hier geldt dat $C_{\text{staaf}} = \frac{E \cdot A}{L} \cdot \Delta L_{\text{aluminium staaf}}$ staat voor de thermische uitzetting van de aluminium staaf zoals berekend in Vergelijking 15.

Conclusie

Er wordt gesteld dat de versterker niet meer dan 10% (70 N) van de uitzettingskracht van de staaf op mag nemen zodat er voldoende verplaatsing zichtbaar blijft.

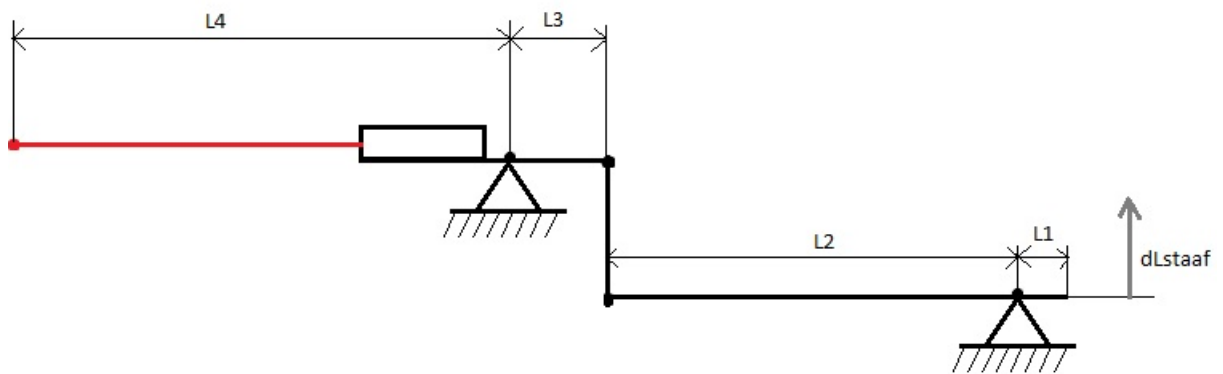
7.4 Het ontwerp van de versterker

Het ontwerpproces van de versterker valt als volgt op te delen:

- Het principe van versterking bepalen (7.4.1).
- Handmatig berekenen of deze versterkingswijze het gewenste resultaat levert (7.4.2).
- Het principe van versterking omzetten naar een 3-D model (7.4.3).
- Handmatig berekenen wat de benodigde aandrijfkracht voor de versterker is (7.4.4).
- Een FEM analyse van de versterker (7.4.5).
- Het berekenen van de verplaatsing op de wand naar aanleiding van de FEM resultaten (7.4.6).
- Een materiaalkeuze voor de versterker (7.4.7).

7.4.1 Het principe van de versterker

De versterker bestaat uit twee seriële hefboomen met twee verschillende overbrengverhoudingen (Afbeelding 26). De eerste hefboom bevat de overbrengverhouding $i_1 = \frac{L_2}{L_1}$ en de tweede hefboom, met een laser bevat die op een muur schijnt, heeft de overbrengverhouding $i_2 = \frac{L_4}{L_3}$. De totale overbrengverhouding van het systeem $i_{tot} = i_1 * i_2$.



Afbeelding 26 Het principe van de versterker.

7.4.2 Een handmatige berekening van de verplaatsing op de wand

Wanneer we aannemen dat de “thermometers” op een afstand van 5 meter van de te beschijnen wand staan, kunnen we de overige dimensies zo bepalen, dat er een verplaatsing van ongeveer 18 cm op de wand zichtbaar wordt (Vergelijking 17).

$$\text{Verplaatsing}_{wand} = \text{Verplaatsing}_1 \cdot \frac{L_4}{L_3}$$

$$\text{Verplaatsing}_{wand} = 0.187m$$

$$\text{Verplaatsing}_1 = \Delta L_{staaf} \cdot \frac{L_2}{L_1}$$

$$\text{Verplaatsing}_1 = 3 \cdot 10^{-2} mm$$

Vergelijking 17 Een handmatige berekening van de verplaatsing op de wand.

Verplaatsing 1 staat voor de verticale verplaatsing op het einde van lengte L2. De positie van de lengtes L1-L4 zijn in Afbeelding 26 terug te vinden, de gekozen waarden zijn als volgt:

$$L_1 = 1.3mm$$

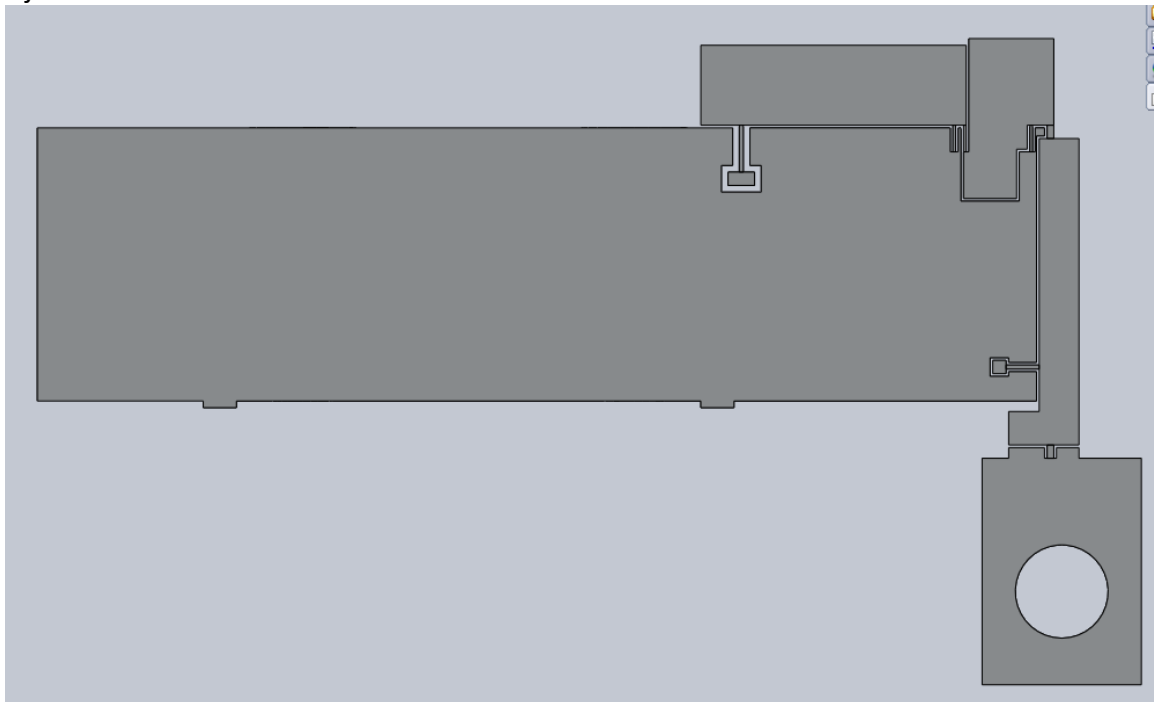
$$L_2 = 5mm$$

$$L_3 = 0.8mm$$

$$L_4 = 5 \cdot 10^3 mm$$

7.4.3 Vertaling van het concept naar een 3-d model

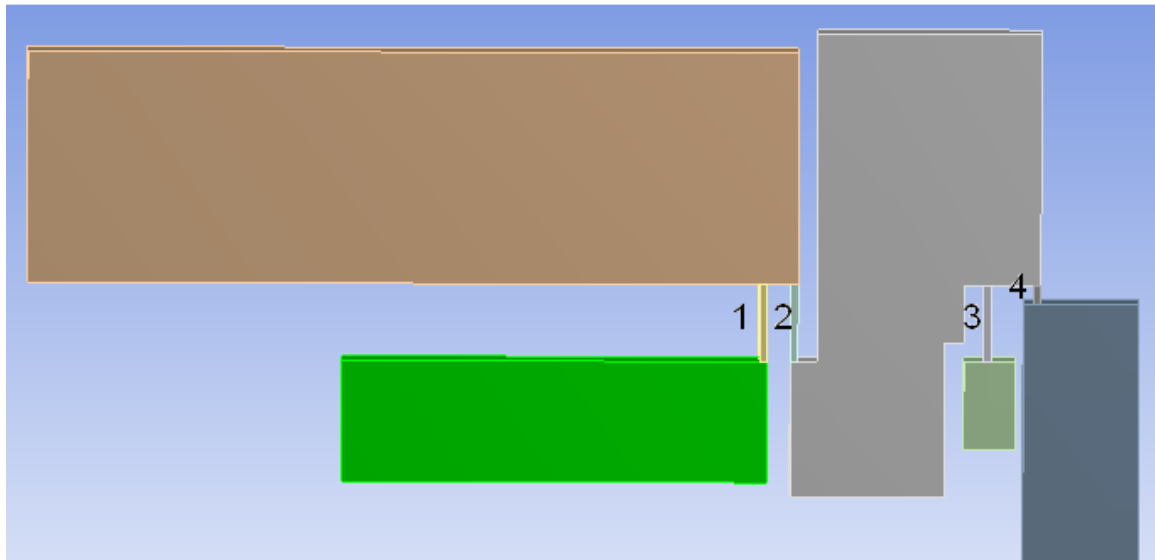
De versterker (Afbeelding 27) is als een monoliet ontworpen zodat er geen hysteresis-effecten optreden. Er is voor gekozen om met bladveren te werken omdat de eigenschappen hiervan beter te definiëren zijn dan die van gatscharnieren. Er worden in deze configuratie wel meerdere veren op druk belast, dit is redelijkerwijs niet te voorkomen i.v.m. later aan te brengen bevestigingen. Wel zal er dus rekening gehouden moeten worden met eventuele stuik-effecten van de veren. De versterker is dusdanig ontworpen dat hij geproduceerd kan worden met draadvonk techniek. Verder zijn de bewegende delen zo veel mogelijk ingesloten zodat het geheel minder fragiel is, omdat de bewegingen van de onderdelen beperkt zijn.



Afbeelding 27 De versterker.

7.4.4 Handmatige berekening van de aandrijfkracht

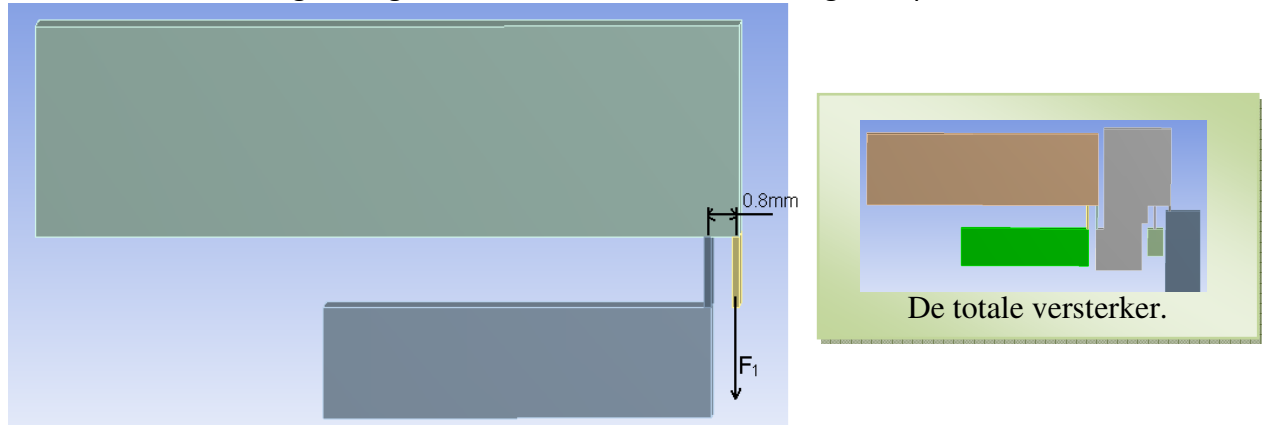
Om te evalueren of de uitzetting van de balk genoeg kracht levert voor de aandrijving van de versterker is een krachtenberekening gemaakt. Dit is gedaan door de aandrijfkrachten per veer te analyseren en deze later te combineren tot een totaal benodigde aandrijfkracht. De nummering van de veren is in Afbeelding 28 aangegeven.



Afbeelding 28 De nummering van de veren.

Veer 1

Om het koppel te creëren dat zorgt voor de hoekverdraaiing van veer 1, is er een aandrijfkraft via veer 2 nodig (Afbeelding 29). Deze kracht kan berekend worden door eerst het benodigde buigmoment voor de hoekverdraaiing te bepalen.



Afbeelding 29 Het koppel voor het aandrijven van veer 1.

Wanneer we de aandrijfkraft berekenen vinden we een waarde van 9.5N (Vergelijking 18).

$$F_1 = \frac{M_1}{0.8 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_1 = 9.48N$$

$$M_1 = K_1 \cdot \varphi_1$$

$$M_1 = 7.58 \cdot 10^{-3} Nm$$

$$\sigma_1 = \frac{\varphi_1 \cdot E \cdot S_1}{2L_1}$$

$$\sigma_1 = 113.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$K_1 = \frac{E \cdot I_1}{L_1}$$

$$K_1 = 0.23 Nm$$

Vergelijking 18 De benodigde kracht voor het aandrijven van veer 1.

Hier is L_1 de lengte van veer 1, B_1 de breedte van veer 1, S_1 de dikte van veer 1, φ_1 is de door veer 1 gemaakte hoek en K_1 de buigstijfheid van de veer. De waarden van de lengte, dikte en breedte van de veer zijn:

$$L_1 = 2mm$$

$$B_1 = 10mm$$

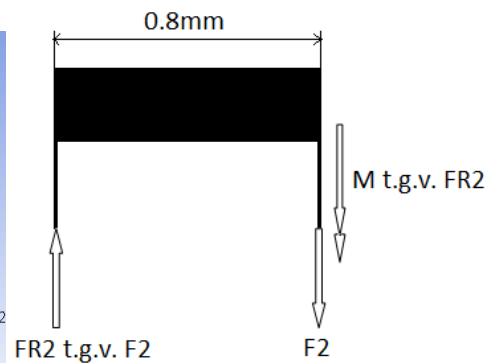
$$S_1 = 0.2mm$$

Veer 2

Het buigmoment, benodigd voor de hoekverdraaiing van de tweede veer (Afbeelding 30), ontstaat vanuit de reactie kracht in veer 1 t.g.v. de aandrijfkracht F_2 (Afbeelding 301). De hoekverdraaiing van de tweede veer is de som van die van de balken aan zijn boven en onderkant.



Afbeelding 30 De kracht op de tweede veer.



Afbeelding 31 Het buigmoment op veer 2.

Wanneer we de benodigde aandrijfkracht voor veer 2 berekenen vinden we een waarde van 11 N (Vergelijking 19).

$$F_2 = \frac{M_2}{0.8 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_2 = 11N$$

$$M_2 = K_2 \cdot \varphi_2$$

$$M_2 = 8.8 \cdot 10^{-3} Nm$$

$$\sigma_2 = \frac{\varphi_2 \cdot E \cdot S_2}{2L_2}$$

$$\sigma_2 = 132 \frac{N}{mm^2}$$

$$K_2 = \frac{E \cdot I_2}{L_2}$$

$$K_2 = 0.23 Nm$$

Vergelijking 19 De benodigde kracht voor het aandrijven van veer 2.

Hier is L_2 de lengte van veer 2, B_2 de breedte van veer 2, S_2 de dikte van veer 2, φ_2 is de door veer 2 gemaakte hoek en K_2 de buigstijfheid van de veer. De waarden van de lengte, dikte en breedte van de veer zijn:

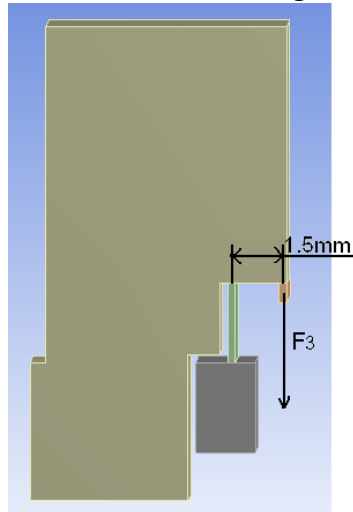
$$L_2 = 2mm$$

$$B_2 = 10mm$$

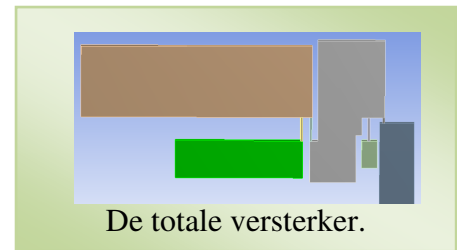
$$S_2 = 0.2mm$$

Veer 3

Om het koppel te creëren dat zorgt voor de hoekverdraaiing van veer 3, is er een aandrijfkraft via veer 4 nodig (Afbeelding 32). Deze kracht kan berekend worden door eerst het benodigde buigmoment voor de hoekverdraaiing te bepalen.



Afbeelding 32 Het koppel voor het aandrijven van veer 3.



Wanneer we de kracht benodigd voor het aandrijven van veer 3 berekenen vinden we een waarde van 1N (Vergelijking 20).

$$F_3 = \frac{M_3}{1.5 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_3 = 0.81N$$

$$M_3 = K_3 \cdot \varphi_3$$

$$M_3 = 1.21 \cdot 10^{-3} Nm$$

$$\sigma_3 = \frac{\varphi_3 \cdot E \cdot S_3}{2L_3}$$

$$\sigma_3 = 18.2 \frac{N}{mm^2}$$

$$K_3 = \frac{E \cdot I_3}{L_3}$$

$$K_3 = 0.23 Nm$$

Vergelijking 20 De kracht benodigd voor het aandrijven van veer 3.

Hier is L_3 de lengte van veer 3, B_3 de breedte van veer 3, S_3 de dikte van veer 3, φ_3 is de door veer 3 gemaakte hoek en K_3 de buigstijfheid van de veer. De waarden van de lengte, dikte en breedte van de veer zijn:

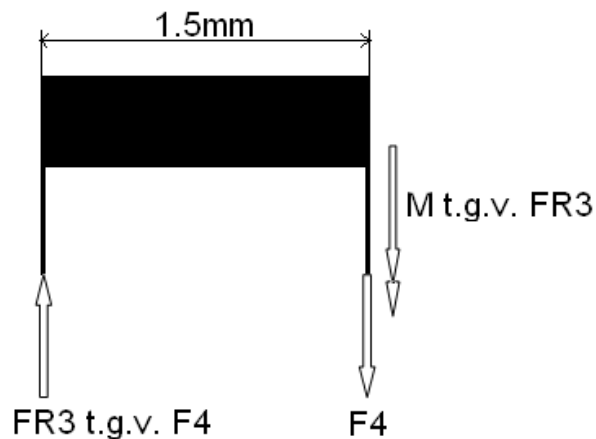
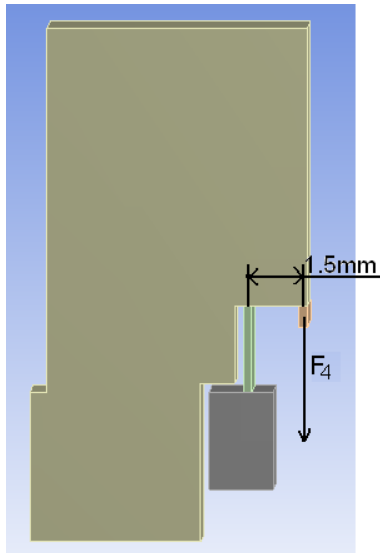
$$L_3 = 2mm$$

$$B_3 = 10mm$$

$$S_3 = 0.2mm$$

Veer 4

Het buigmoment, benodigd voor de hoekverdraaiing van de vierde veer (Afbeelding 33), ontstaat vanuit de reactie kracht in veer 3 t.g.v. de aandrijfkracht F_4 (Afbeelding 334). De hoekverdraaiing van de vierde veer is de som van die van de balken aan zijn boven en onderkant.



Afbeelding 33 De kracht op de vierde veer. Afbeelding 34 Het buigmoment op veer 4.

Wanneer we de kracht benodigd voor het aandrijven van veer 3 berekenen vinden we een waarde van 3N (Vergelijking 21).

$$F_4 = \frac{M_4}{1.5 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_4 = 3.24N$$

$$M_4 = K_4 \cdot \varphi_4$$

$$M_4 = 4.85 \cdot 10^{-3} Nm$$

$$\sigma_4 = \frac{\varphi_4 \cdot E \cdot S_4}{2L_4}$$

$$\sigma_4 = 7.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$K_4 = \frac{E \cdot I_4}{L_4}$$

$$K_4 = 0.93 Nm$$

Vergelijking 21 De kracht benodigd voor het aandrijven van veer 4.

Hier is L_4 de lengte van veer 4, B_4 de breedte van veer 4, S_4 de dikte van veer 4, φ_4 de door veer 4 gemaakte hoek en K_4 de buigstijfheid van de veer. De waarden van de lengte, dikte en breedte van de veer zijn:

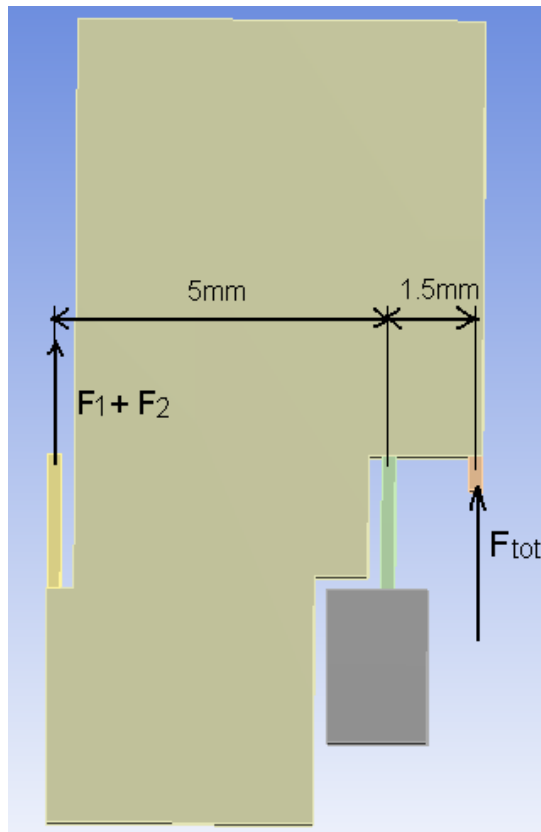
$$L_4 = 0.5mm$$

$$B_4 = 10mm$$

$$S_4 = 0.2mm$$

De totale kracht benodigd voor het aandrijven van de versterker

De totale kracht benodigd voor het aandrijven van de versterker (F_{totaal}), kan berekend worden door de krachten benodigd voor het buigen van veer 1 en 2 te vermenigvuldigen met de overbrengingsverhouding en hier de benodigde krachten voor het verbuigen van veer 3 en 4 bij op te tellen. Zie Afbeelding 35 voor verduidelijking.



Afbeelding 35 Het berekenen van F_{tot} .

Wanneer we de totale kracht benodigd voor het aandrijven van de versterker berekenen vinden we een waarde van 72N (Vergelijking 22).

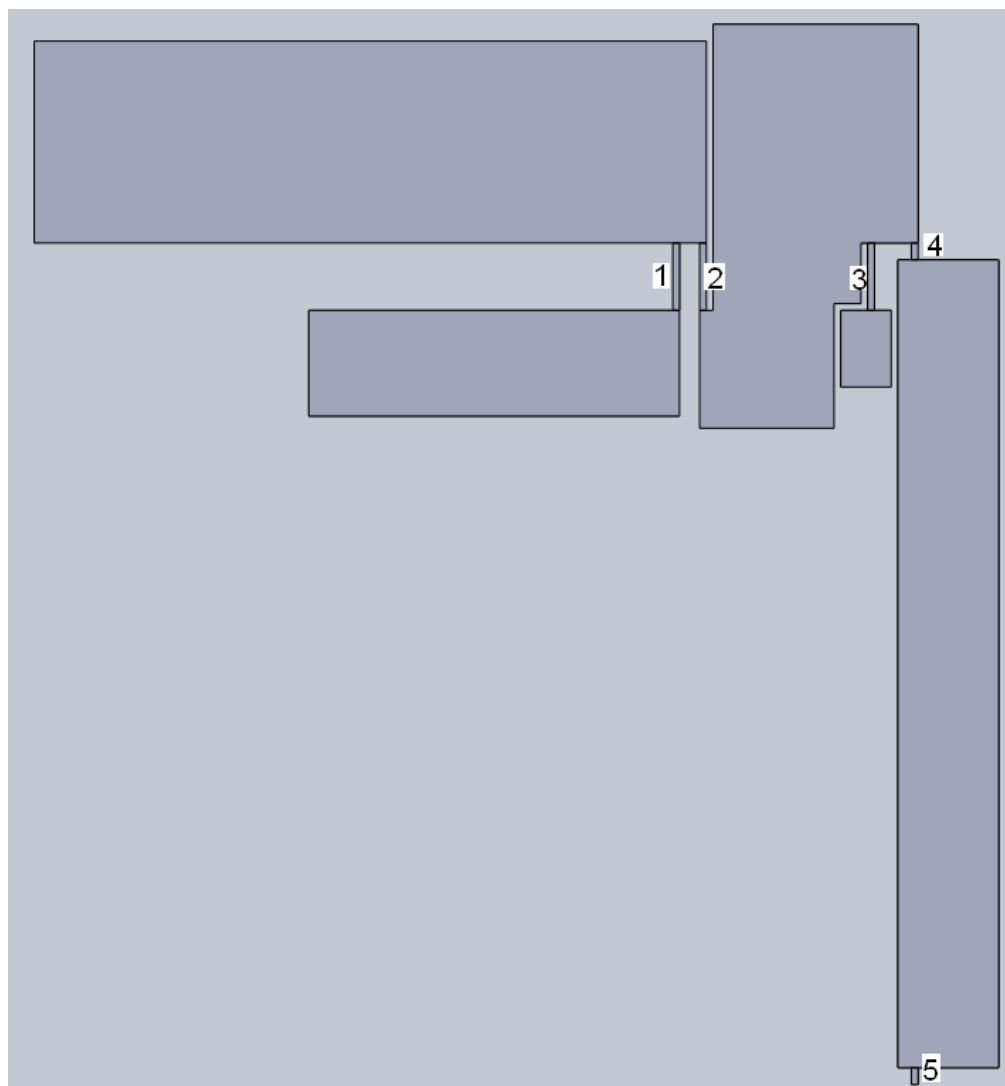
$$F_{\text{totaal}} = (F_1 + F_2) \cdot \frac{5}{1.5} + F_3 + F_4$$

$$F_{\text{totaal}} = 72.3N$$

Vergelijking 22 De totale kracht benodigd voor het aandrijven van de versterker.

7.4.5 FEM analyse

In de versterker zit een groot aantal variabelen (zo gaat veer 3 bijvoorbeeld in een lichte s- vorm staan in plaats van zuiver cirkelvormig te buigen) waardoor het aantrekkelijk is het gedrag te analyseren m.b.v. Ansys. Om de analyse te bespoedigen is er volume uit het bovenstaande ontwerp verwijderd, de invloed van dit volume op de analyse resultaten is verwaarloosbaar. Verder zijn de bladveren als aparte solids gedefinieerd zodat ze fijner gemeshd kunnen worden dan de in verhouding stijve balken. In Afbeelding 36 is de vereenvoudigde geometrie van de versterker zichtbaar. Verder zijn de veren genummerd, deze verwijzingsvorm zal in het verdere verslag aangehouden worden.

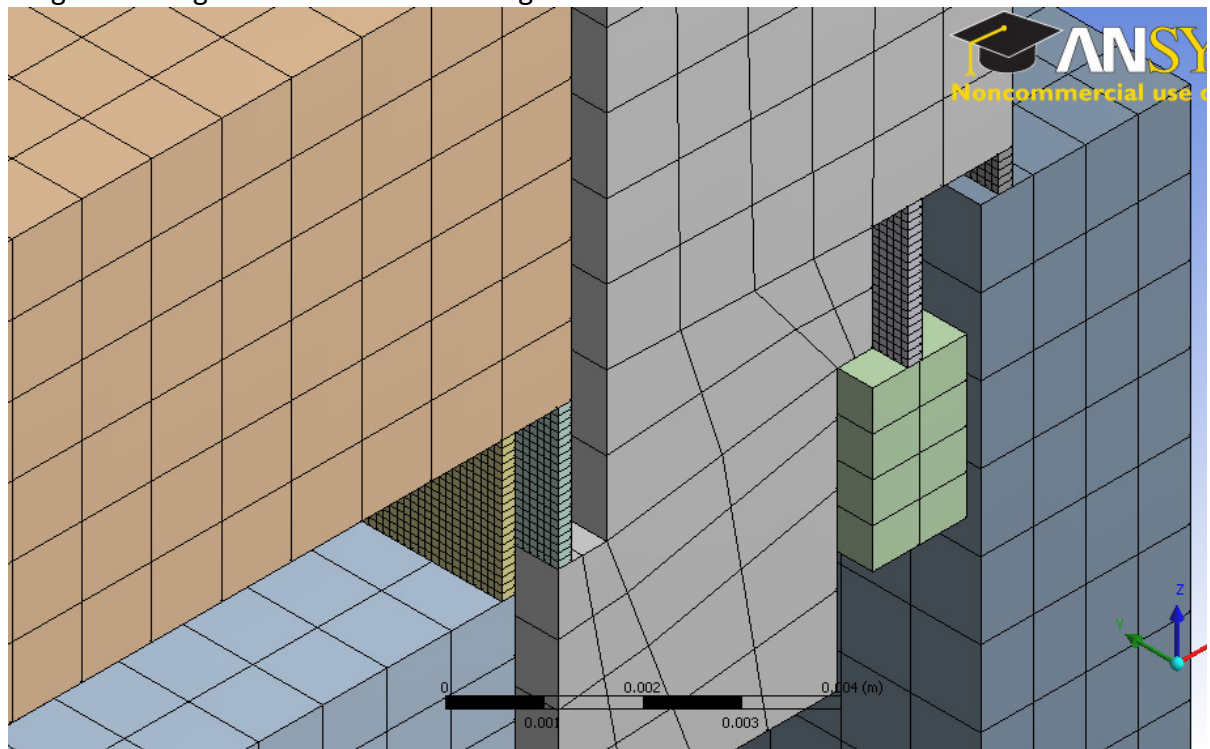


Afbeelding 36 Het vereenvoudigde model van de versterker voor de FEM analyse.

De mesh

Zoals eerder genoemd zijn de veren apart gemesht met de instellingen: Sweep feature, automatic thin, solid shell. Verder is er voor de veren een mesh body size van 0.1 mm toegepast. Voor validatie van de instellingen zie bijlage 1.6.

De gemeshde geometrie is in Afbeelding 37 te zien.

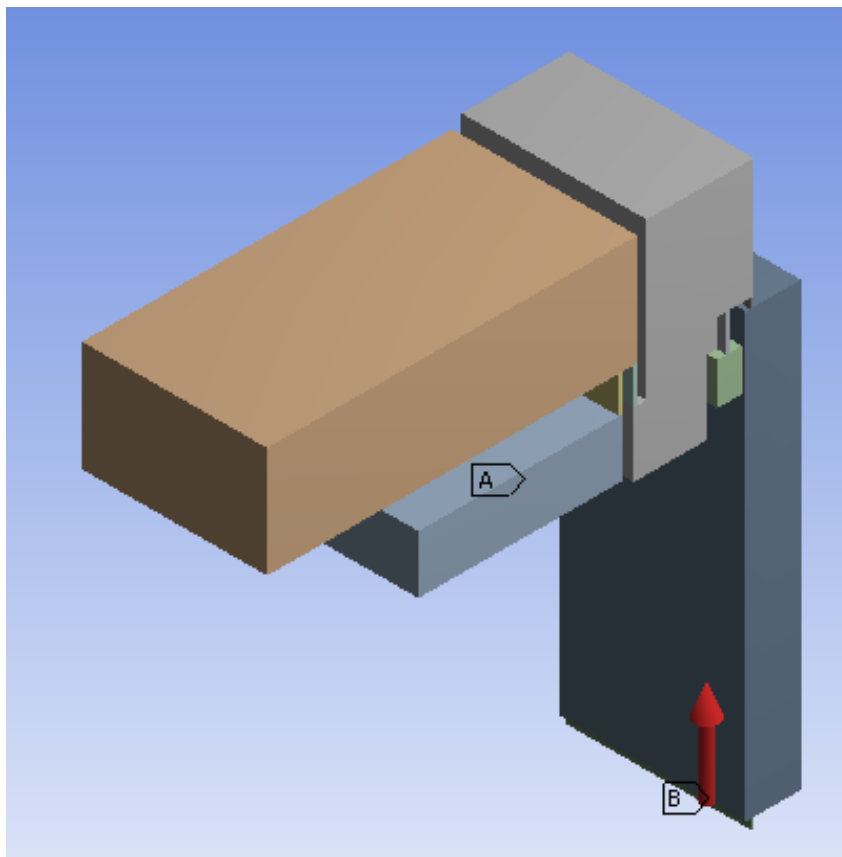


Afbeelding 37 Gemesht model van de versterker.

Analysis settings

De twee balkjes die de vaste wereld representeren zijn gefixeerd d.m.v. een Fixed Constraint. Het is met een iteratief proces vastgesteld dat de verticale verplaatsing bij de rode pijl (Afbeelding 38) gelijk is aan de uitzetting van de aluminium staaf, wanneer de aangebrachte kracht 64N bedraagt.

In de praktijk zal de uitzetting van de aluminium staaf niet gehaald worden doordat de balk weerstand ondervindt vanuit de versterker. De waarden voortkomend uit deze analyse zullen dan ook een fractie te hoog liggen.



Afbeelding 38 De analysis settings.

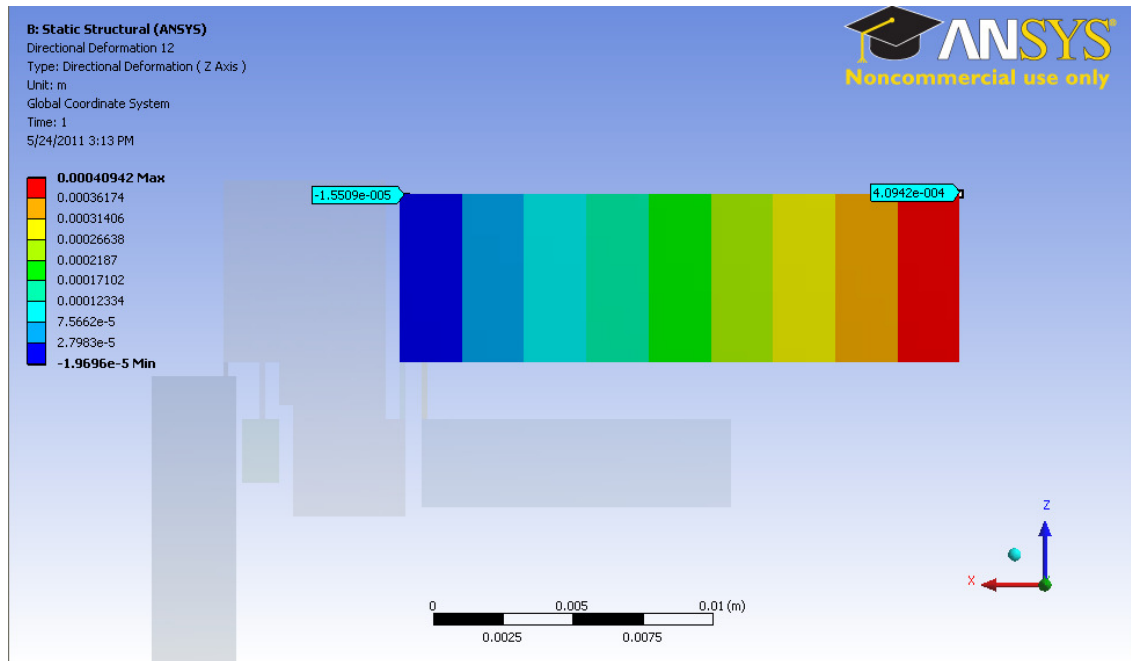
Conclusie

De in Vergelijking 23 berekende aandrijfkracht van 72N komt redelijk dicht in de buurt bij de kracht die Ansys nodig heeft om de versterker aan te drijven (64N), dit maakt de analyse uitkomsten van de versterker aannemelijk.

Analyse uitkomsten

De daadwerkelijke verplaatsingen

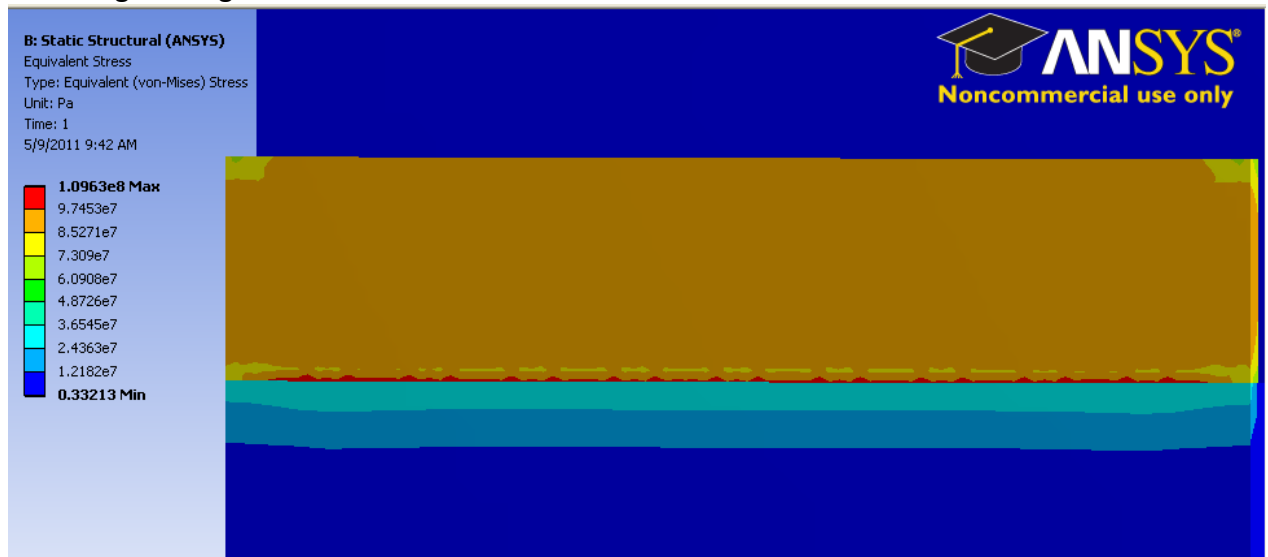
De verplaatsingen die de functionaliteit van het ontwerp leveren zijn de verticale verplaatsingen van het balkje waaraan de laser bevestigd wordt. Deze verplaatsingen zijn zichtbaar in Afbeelding 39.



Afbeelding 39 De verticale verplaatsingen van het balkje waaraan de laser bevestigd wordt.

Spanningen

De interessante spanningen zijn de maximale spanningen in de bladveren. De FEM analyse wijst uit de spanning maximaal is in veer 2. De maximale spanningswaarde in veer 2 bedraagt 110MPa (Afbeelding 40), deze waarde zal geen probleem zijn voor een hoogwaardige aluminium soort.



Afbeelding 40 De maximale spanning in de versterker.

7.4.6 De uitwijking op de muur a.d.h.v. de FEM analyse resultaten

De daadwerkelijke verplaatsing op de wand valt te bepalen door de hoek die het balkje maakt te vermenigvuldigen met de afstand tot de muur (Vergelijking 23).

$$\text{Verplaatsing}_{\text{wand}} = \varphi_{\text{balk}} \cdot L_4$$

$$\text{Verplaatsing}_{\text{wand}} = 107 \text{ mm}$$

$$\varphi_{\text{balk}} = \frac{\text{Verplaatsing}_{\text{balk1}} - \text{Verplaatsing}_{\text{balk2}}}{L_{\text{balk}}}$$

$$\varphi_{\text{balk}} = 0.021$$

Vergelijking 23 De verplaatsing op de wand a.d.h.v. de FEM analyse resultaten.

Conclusie

De handmatige berekening van de uitwijking op de wand (0.187m) (Vergelijking 17) heeft veel deviatie met de berekende uitwijking op de wand aan de hand van de FEM analyse resultaten (0.107m) (Vergelijking 23). Een mogelijke reden hiervoor is dat in de handberekening alle onderdelen van de versterker als niet vervormbaar beschouwd worden. Dit is echter in de praktijk niet het geval en in FEM analyse zullen ook de “stijve” balken iets vervormen. Door de versterking zullen kleine afwijkingen bij de input al snel een grote invloed hebben op de output. Bovendien is het zo dat veer 3 niet in een perfecte cirkelvorm zal gaan staan, maar eerder in een lichte S-vorm door de horizontale reactie krachten vanuit veer 1 en 2. Ook is de verlenging van de veren t.g.v. de trekkrachten in de handberekeningen buiten beschouwing gelaten.

7.4.7 Materiaal keuze voor versterker

De volgende hoofdeisen kunnen aan het materiaal gesteld worden:

- Corrosie bestendigheid: De demonstrator moet mobiel zijn en kan daarom een keer nat regenen, lakbewerkingen zijn ongewenst.
- Een rekgrens van minstens 200MPa (veiligheidsfactor ± 2).
- Een vermoeiingsgrens van meer dan 165MPa (veiligheidsfactor 1.5).
- Te bewerken met draadvonk techniek.
- Een lagere stijfheid zodat het niet teveel kracht kost om de versterker aan te drijven.

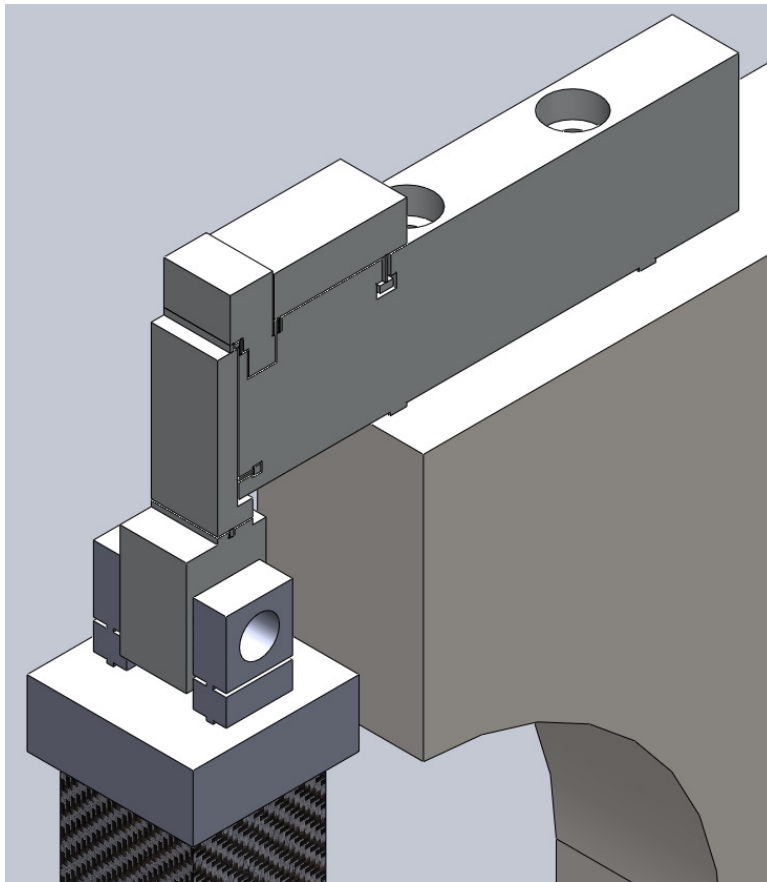
Wanneer we met de bovenstaande eisen een materiaal uitzoeken komen we uit op AlZn6MgCu (in Philips codering T1054/ 80). De mechanische eigenschappen van dit materiaal zijn in Tabel 6 terug te vinden [7].

Tabel 6 De mechanische eigenschappen van AlZn6MgCu [7].

Rm	540 MPa
Rp0,2	460 MPa
Breukrek	6 %
Vermoeiingsspanning (wisselend)	165 MPa
E-modulus	71 GPa
Soortelijke massa	2.8 kg/l

7.5 Het ontwerp van de bevestigingsdelen

Om de versterker aan de uitzettende staven en de vaste wereld te verbinden zijn er een aantal bevestigingsdelen nodig. Het is belangrijk dat deze delen een hoge stijfheid hebben zodat ze minimaal vervormen en de meting dus niet verstoren. De belangrijke bevestigingsdelen zijn de houder van de versterker (7.5.1) en de verbindingskap tussen de staven en de versterker (7.5.3). Van de versterkerhouder is een FEM analyse gemaakt om de stijfheid te controleren (7.5.2), dit is ook gedaan voor de verbindingskap (7.5.4). Een detail van de bevestigingsmethode is in Afbeelding 41 zichtbaar.

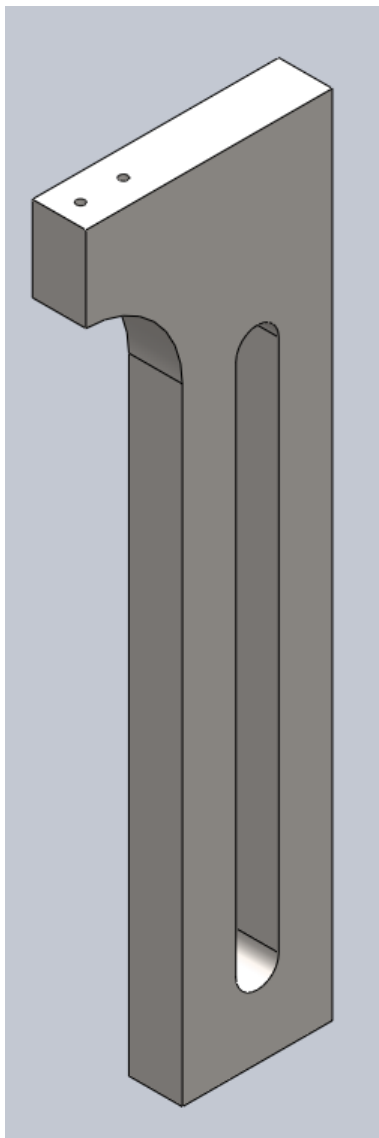


Afbeelding 41 Detail van de verbindingen van de versterker.

7.5.1 De versterker houder

De versterker zal boven de uitzettende staaf gepositioneerd worden door de versterkerhouder. De versterker moet zeer stijf op zijn plek gehouden worden zodat er geen meetresultaten verloren gaan. Aangezien de totale uitzetting van de aluminium balk $7.8 \cdot 10^{-6} m$ bedraagt (Vergelijking 15), wordt er gesteld dat de versterkerhouder maximaal $5 \cdot 10^{-7} m$ mag vervormen ten gevolge van de aangebrachte kracht.

De versterker wordt van bovenaf aan zijn houder bevestigd met twee bouten. Om te waarborgen dat de massa van de versterkerhouder niet te hoog oploopt is er een slobgat uitgefreesd. De versterkerhouder is in Afbeelding 42 zichtbaar.

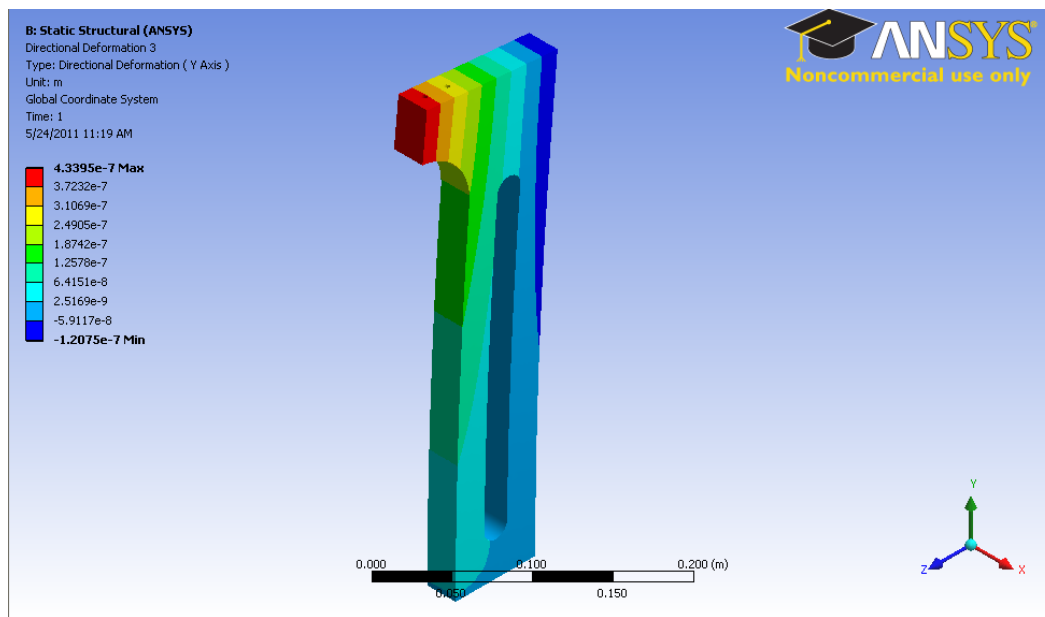


Afbeelding 42 De houder van de versterker.

7.5.2 Een FEM analyse van de versterkerhouder

Om te verifiëren dat de versterkerhouder de gewenste stijfheid bezit is er een FEM analyse van gemaakt. De versterker is gemeshd met de Automatic Mesh Method. Vervolgens is er op ieder boutgat de helft van de totale belasting van 64N aangebracht.

De analyse resultaten wijzen uit de versterker een verticale vervorming van $4.3 \cdot 10^{-7} m$ ondergaat (Afbeelding 43). Deze verplaatsing valt dus binnen de gestelde eis van $5 \cdot 10^{-7} m$.

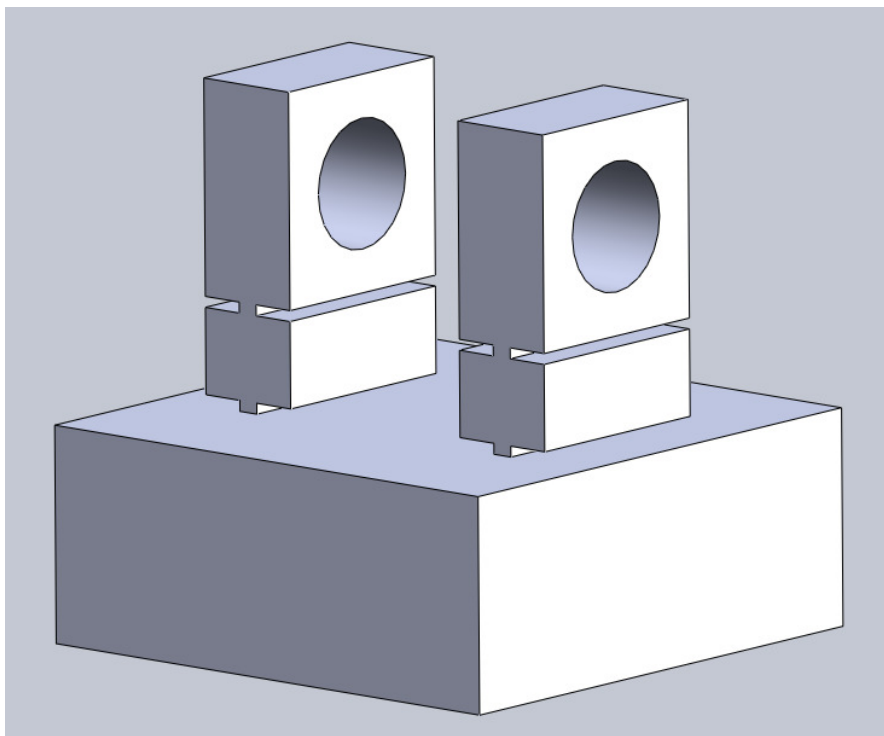


Afbeelding 43 De verticale vervorming van de versterkerhouder.

7.5.3 De verbindingskap

Om de staaf aan de versterker te verbinden is de verbindingskap uit Afbeelding 44 ontworpen. De verbinding tussen versterker en kap ontstaat door een inklemming. Om ervoor te zorgen dat de versterker aan zijn beide flanken geklemd wordt zijn er elastische elementen in de houder verwerkt. Er is hier gekozen om twee korte veren per klemoot te gebruiken zodat een zo hoog mogelijke stijfheid behouden blijft. De verbindingskap moet zeer stijf zijn zodat er geen meetresultaten verloren gaan.

Aangezien de totale uitzetting van de aluminium balk $7.8 \cdot 10^{-6} m$ bedraagt (Vergelijking 15), wordt er gesteld dat de verbindingskap maximaal $1 \cdot 10^{-7} m$ mag vervormen ten gevolge van de aangebrachte kracht.

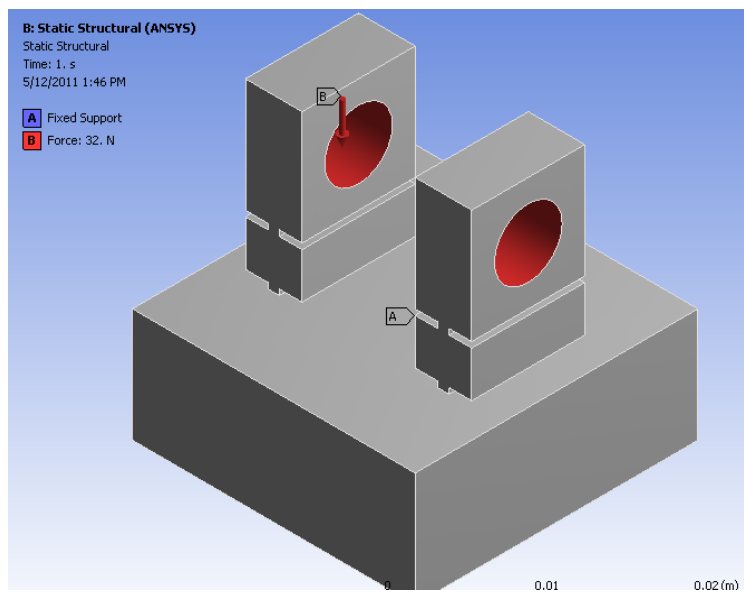


Afbeelding 44 De verbindingskap.

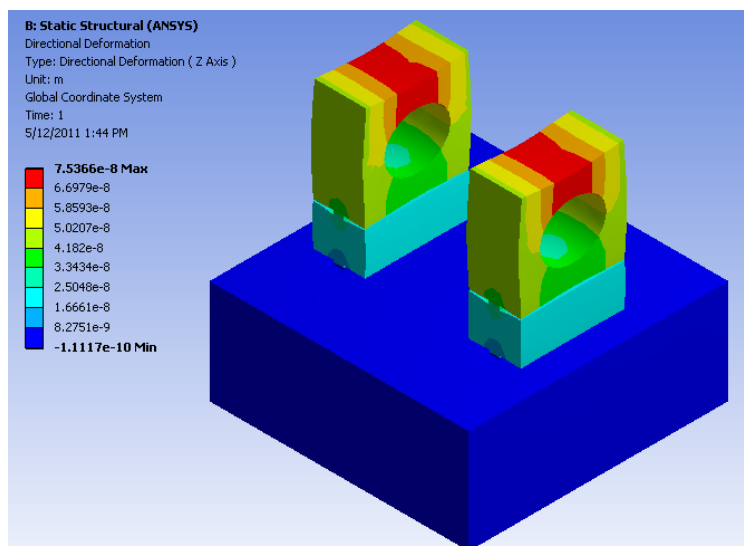
7.5.4 Een FEM analyse van de verbindingskap

Om te verifiëren dat de verbindingskap de gewenste stijfheid bezit is er een FEM analyse van gemaakt. De verbindingskap is gemeshd met de Automatic Mesh Method. Vervolgens is er op ieder boutgat de helft van de totale belasting van 64N aangebracht (Afbeelding 45).

De analyse resultaten wijzen uit de verbindingskap een verticale vervorming van $7.5 \cdot 10^{-8} m$ ondergaat (Afbeelding 46). Deze verplaatsing valt dus binnen de gestelde eis van $1 \cdot 10^{-7} m$.



Afbeelding 45 De belasting aangebracht op de verbindingskap.

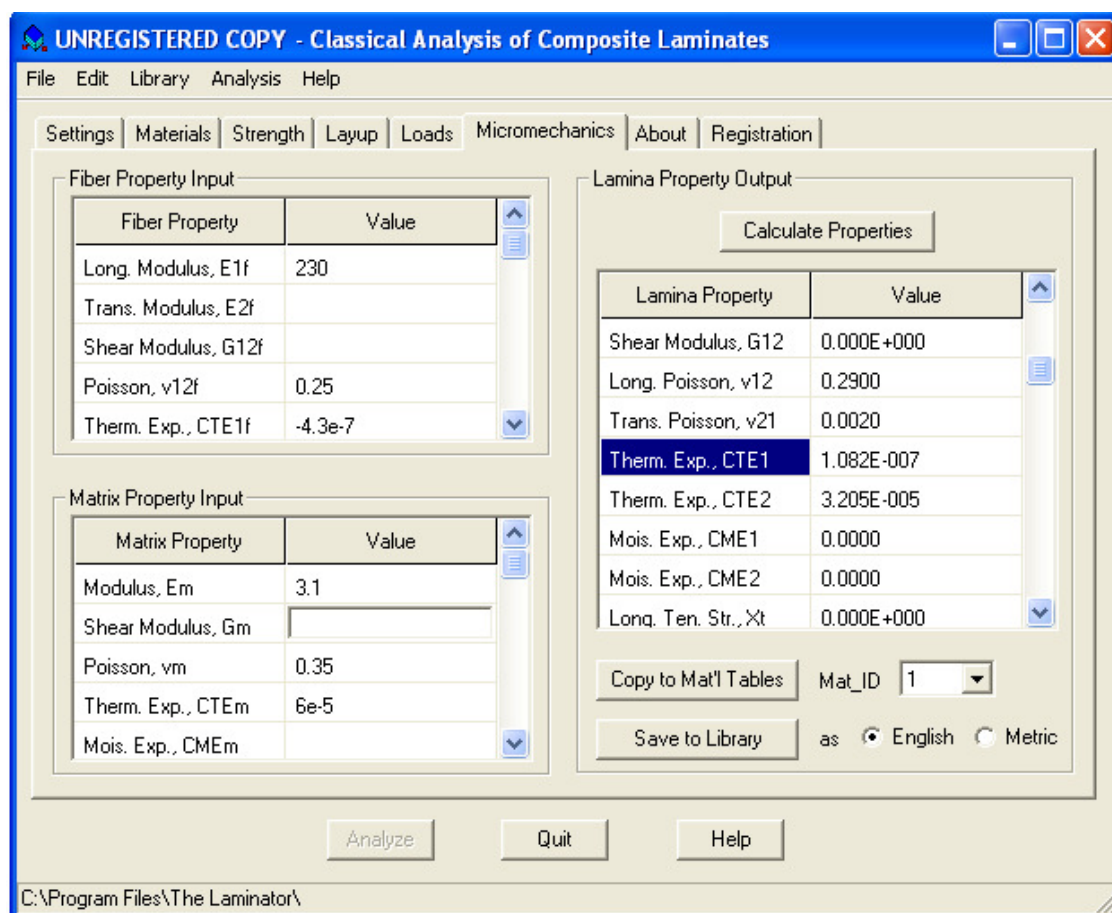


Afbeelding 46 De vervorming van de verbindingskap.

7.6 Het ontwerp van de koolstofvezelcomposiet balk

De belangrijkste eigenschap van de koolstofvezelcomposiet balk is de thermische uitzettingscoëfficiënt. De thermische uitzettingscoëfficiënten van een lamel en een composiet kunnen berekend worden met behulp van het programma The Laminator [5]. Wanneer er een unidirectionele lay-up voor het composiet wordt gekozen zal de thermische uitzettingscoëfficiënt van het composiet gelijk zijn aan dat van een lamel. Wanneer we de eigenschappen van de matrix en de vezel [1] in het programma invoeren vinden we een thermische uitzettingscoëfficiënt van

$$1.08 \cdot 10^{-7} \frac{m}{m \cdot K} \text{ in de hoofdrichting van het lamel (Afbeelding 47).}$$



Afbeelding 47 De thermische uitzettingscoëfficiënt van een lamel.

In Vergelijking 15 is gerekend met een thermische uitzettingscoëfficiënt van $2 \cdot 10^{-7} \frac{m}{m \cdot K}$ voor de composieten balk, hier kwamen we op een uitzetting van $6 \cdot 10^{-8} m$. Aangezien de daadwerkelijke uitzettingscoëfficiënt van de composiet balk $1.08 \cdot 10^{-7} \frac{m}{m \cdot K}$ is, moeten we deze waarde corrigeren naar $3 \cdot 10^{-8} m$.

Wanneer we de composieten balk unidirectioneel opbouwen in het laminaten programma [4] vinden we de mechanische eigenschappen uit Afbeelding 48. De stijfheid van de composiet balk is hoger dan die van de aluminium staaf, waardoor hij met meer kracht tegen de versterker zou kunnen drukken. Dit effect wordt echter verwaarloosd door de in verhouding lage uitzetting van de composieten balk.

E1:	139.24 GPa	Thickness:	19.99999999999996 mm
E2:	10.87 GPa	p:	1528.0 Kg/m3
E3:	10.87 GPa		
G12:	4.39 GPa		
G23:	4.39 GPa		
G31:	4.39 GPa		
v12:	0.29		
v23:	0.29		
v31:	0.29		

Afbeelding 48 De mechanische eigenschappen van de composiet balk.

Wanneer we de matrix van het ontworpen composiet analyseren zien we dat de gehele B- matrix en de koppelfactoren A16, A26, D16 en D26 gelijk zijn aan nul (Afbeelding 49). Dit resulteert in een “stabiel” laminaat (zie bijlage 1.4).

A			B			D		
2.8E3	6.34E1	0	0	0	0	9.34E4	2.11E3	0
6.34E1	2.19E2	0	0	0	0	2.11E3	7.29E3	0
0	0	8.78E1	0	0	0	0	0	2.93E3

Afbeelding 49 De koppelmatrix van de composiet balk.

7.7 Conclusie

Er is een opstelling ontworpen waarmee de relatief kleine uitzetting van een aluminium balk ($7.8 \cdot 10^{-6} m$ (Vergelijking 15)) zichtbaar gemaakt kan worden op een wand (0.107m (Vergelijking 23)). Wanneer de aluminium staaf vervangen wordt door een koolstofvezel composieten staaf zal deze een nauwelijks zichtbare verplaatsing tot stand brengen. Ondank de grote versterking is de opstelling toch compact en licht gebleven (420x150x80mm en 5kg).

De uitzetting van de staven wordt zichtbaar gemaakt door een mechanische versterking. De benodigde kracht voor het aandrijven van de versterker is handmatig berekend en tevens in een FEM analyse bepaald. De waarden uit de handmatige berekening en de FEM analyse lagen dicht bij elkaar in de buurt (72 versus 64N). Dit maakt het waarschijnlijk dat de FEM analyse betrouwbare resultaten geeft.

Wanneer de verplaatsing op de wand handmatig wordt berekend vinden we een waarde van 0.187m (Vergelijking 17). Wanneer we de verplaatsing op de wand echter berekenen aan de hand van de FEM analyse resultaten vinden we een waarde van 0.107m (Vergelijking 23). Deze afwijking wordt mogelijk veroorzaakt door lichte plastische vervormingen in het begin deel van de versterker. Bovendien worden er in de FEM analyse een aantal andere factoren meegenomen, zoals het licht stuiken van sommige veren. Wanneer de versterker in werking wordt gesteld kan er worden bepaald of de FEM analyse de juiste resultaten met betrekking tot de uitwijking op de wand levert.

Al met al kan geconcludeerd worden dat een opstelling is ontworpen die de lage thermische uitzettingscoëfficiënt van koolstofvezelcomposiet kan demonstreren. Het is de verwachting dat het demonstreren van deze lage thermische uitzettingscoëfficiënt van koolstofvezelcomposiet, de constructeurs van Philips Innovation Services kan overtuigen om het materiaal te gebruiken wanneer zeer maatvast toepassing vereist zijn.

7.8 Aanbevelingen

Om de daadwerkelijke demonstratie van de lage thermische uitzettingscoëfficiënt van koolstofvezelcomposiet uit te voeren zal de opstelling geproduceerd moeten worden. Tevens kan dan gecontroleerd worden of de FEM analyse van de versterker accurate resultaten levert.

Bewust leeg gelaten pagina.

8 De xylofoon

Het doel van de “xylofoon” opstelling is om de invloed van de vezelrichting op een composiet te demonstreren. Een aantal koolstofvezelcomposiet balkjes met verschillende vezelrichtingen maar identieke afmetingen zullen de balkjes van de xylofoon vormen. Doordat de vezelrichtingen van de balkjes verschillen zullen ook de stijfheden ergo de tonen verschillen. Tevens zal er een aluminium balk op de xylofoon zitten om een eventueel verschil in demping tussen de materialen te demonstreren.

Het ontwerp van de xylofoon valt als volgt op te delen:

- Het uiteenzetten van de eisen aan de xylofoon (8.1).
- Het samenstellen van de composieten voor de plaatjes (8.2).
- Het berekenen van de gewenste stijfheden van de plaatjes (8.3).
- Een FEM analyse van de xylofoon plaatjes (8.4).
- Het ontwerp van de versterkingsbuisjes (8.5).

Aan de hand van het ontwerp proces zal geconcludeerd worden of de ontworpen opstelling aan zijn eisen voldoet (8.6). Er zullen ook eventuele verbeterpunten worden aangedragen (8.7).

8.1 Eisen aan de xylofoon opstelling

In overleg met de opdrachtgever zijn de volgende eisen opgesteld waaraan de thermometer opstelling moet voldoen:

- De toonplaatjes moeten verwijderbaar zijn zodat mensen ze vast kunnen houden en het verschil in stijfheid tussen de plaatjes kunnen voelen.
- De plaatjes dienen identieke afmetingen te hebben. Dit demonstreert dat het verschil in stijfheid in het materiaal zit.
- De noten C, D en E moeten in de xylofoon voorkomen.
- De toon van de plaatjes mag niet meer dan 5Hz van de benodigde frequentie liggen.
- De xylofoon moet makkelijk naar demonstraties meegenomen kunnen worden. Hij mag daarom niet meer dan 10 kg wegen en zijn maximale afmetingen zijn beperkt tot 450*300*250mm.

8.2 Het berekenen van de gewenste stijfheden

De xylofoon dient drie koolstofvezel balkjes te bevatten die drie verschillende noten (C, D en E) produceren. Deze noten zijn meteen de eerste eigenfrequenties van de balkjes. De bij de noten behorende frequenties zijn in tabel 7 te vinden.

Tabel 7 De trillingsfrequentie bij de noten C, D en E.

Noot	Trilfrequentie (Hz)
C	525
D	588.5
E	661.5

De formule voor het berekenen van de eerste eigenfrequentie van een vrij opgelegde balk is gegeven in Vergelijking 24 [8].

$$f_1 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \cdot \left(\frac{22.373}{L^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}}$$

Vergelijking 24 De eigenfrequentie van een vrij opgelegde balk.

Hier ρ de massa per lengte, E de E-modulus van de balk en I het traagheidsmoment van de balk.

Vergelijking 24 kan dusdanig omgeschreven worden zodat we de E- modulus van een balk kunnen berekenen afhankelijk van de gewenste eigenfrequentie (Vergelijking 25).

$$E = \frac{0.007991 \cdot f_1^2 \cdot L^4 \cdot \pi^2 \cdot \rho}{I}$$

Vergelijking 25 De materiaalstijfheid van een balk afhankelijk van de gewenste eigenfrequentie.

Hier is f de eigenfrequentie van de balk.

Behalve de koolstofvezel plaatjes moet er ook een aluminium plaatje op de xylofoon geplaatst worden. Aangezien de E- modulus van het aluminium plaatje niet gevarieerd kan worden zal dit plaatje de afmetingen van alle plaatjes bepalen. Met behulp van Vergelijking 24 valt te bepalen dat een aluminium plaatje van 223.2x30x5mm een eigenfrequentie van 525.3 Hz bezit (Vergelijking 26).

$$f_1 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \cdot \left(\frac{22.373}{L^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}}$$

$$f_1 = 525.3 \text{ Hz}$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 3.125 \cdot 10^2 \text{ mm}^4$$

$$\rho = 4.05 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

$$E = 70 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vergelijking 26 De eigenfrequentie van een aluminium plaatje van 223.2x30x5mm.

Nu de afmetingen van de plaatjes bekend zijn kunnen de voor de composieten plaatjes gewenste stijfheden berekend worden m.b.v. Vergelijking 25. De gevonden waarden zijn in Tabel 8 terug te vinden.

Tabel 8 De gewenste stijfheden van de composieten plaatjes.

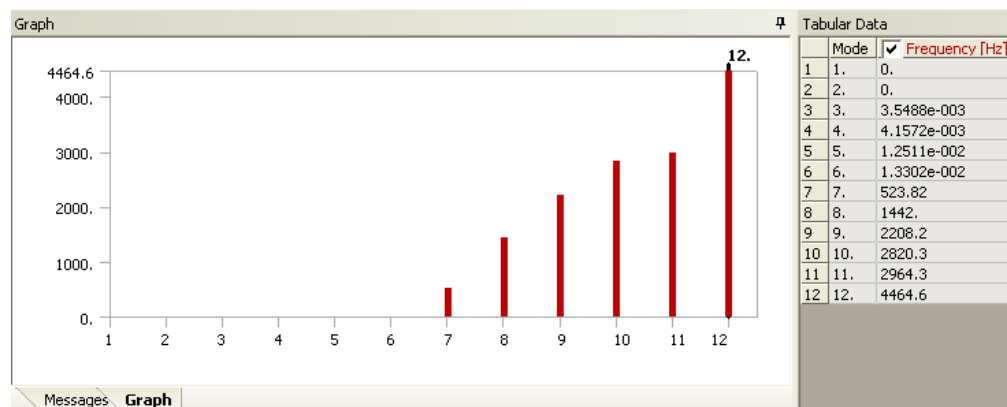
Eigenfrequentie (Hz)	E- modulus (Pa)
525	$3.96 \cdot 10^{10}$
588.5	$4.97 \cdot 10^{10}$
661.5	$6.28 \cdot 10^{10}$

8.3 FEM analyses van de plaatjes

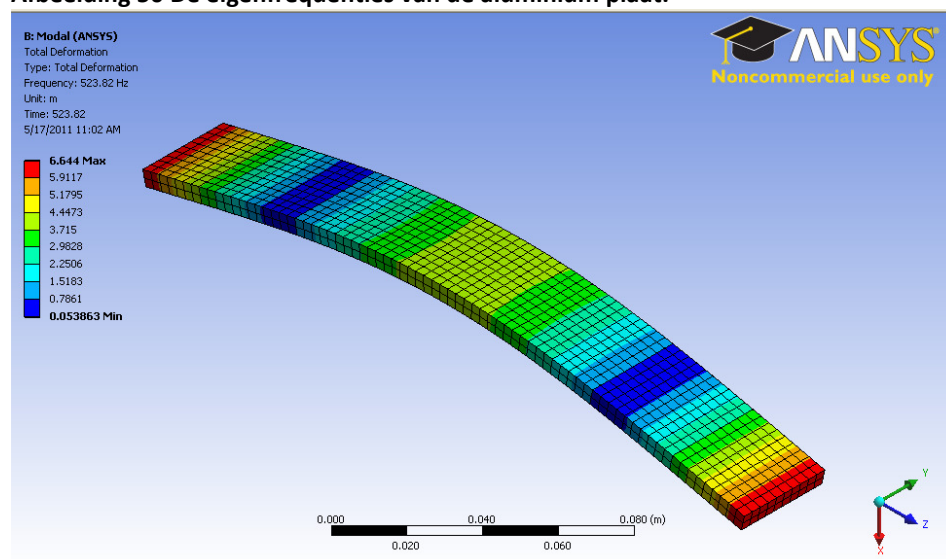
Om Vergelijking 24 te verifiëren is er een FEM analyse van het aluminium plaatje uitgevoerd (8.3.1). Hierna is er een FEM analyse van de koolstofvezelcomposiet plaatjes uitgevoerd (8.3.2).

8.3.1 De FEM analyse van het aluminium plaatje

Het aluminium plaatje is gemeshd met de Automatic Mesh instellingen en een Mesh Body Size van 3mm. Uit de FEM analyse blijkt dat de eerste eigenfrequentie op 524Hz ligt (Afbeelding 50). De eerste zes aangegeven eigenfrequenties zijn de graden van vrijheid van het balkje en worden daarom buiten beschouwing te laten. Wanneer we de vervorming van de plaat bij deze eigenfrequentie bekijken (Afbeelding 51) zien we dat de plaat om twee “draaipunten” vervormt (donkerblauw). Deze punten liggen 17 elementen, ofwel 51mm, uit de kanten van het plaatje. Het plaatje zal later op deze “draaipunten” bevestigd worden zodat de bevestiging slechts een minimale invloed heeft op de eigenfrequentie van de plaat.



Afbeelding 50 De eigenfrequenties van de aluminium plaat.



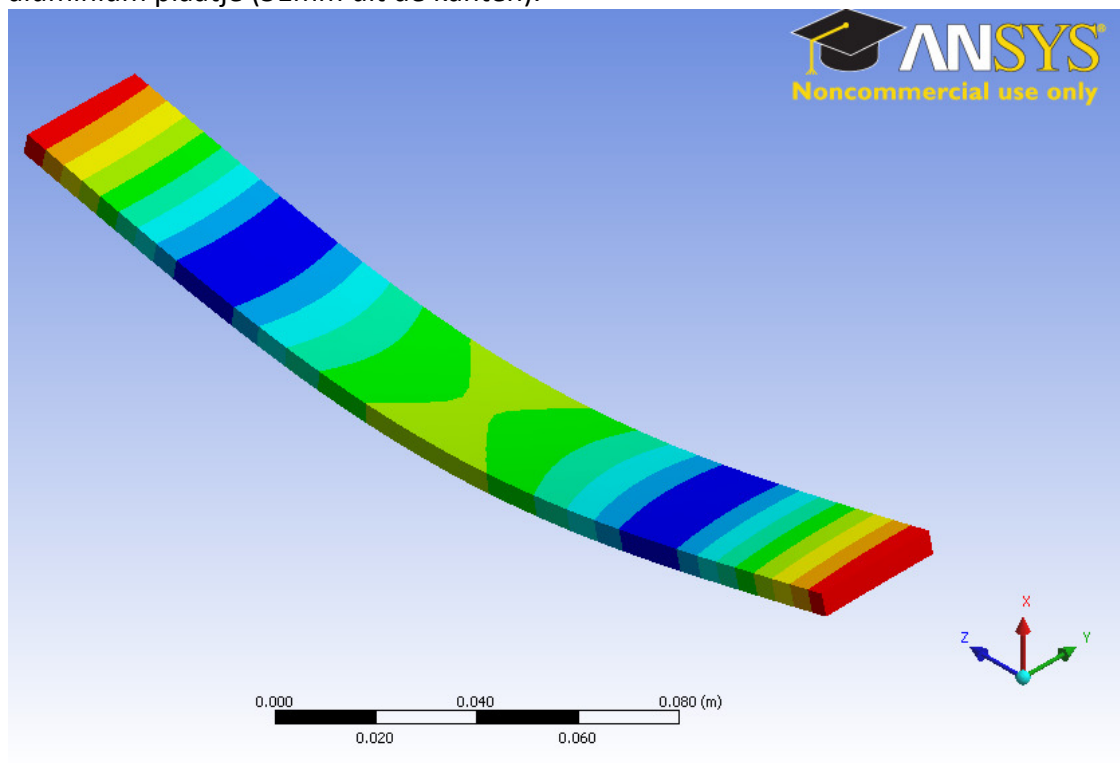
Afbeelding 51 De vervorming van de aluminium plaat op zijn eerste eigenfrequentie.

8.3.2 FEM analyses van de koolstofvezelcomposiet plaatjes

De koolstofvezelplaatjes zijn met Solid Shell Elementen gemeshd, de Mesh Body Size bedraagt 3mm. De hoofdassen van de elementen zijn in de lengterichting van het plaatje gericht. De eigenschappen van de composieten zijn d.m.v. commands aan de geometrie van het plaatje toegevoegd. Een verdere uitleg van deze stappen is in paragraaf 6.4.7 terug te vinden.

De vervorming van de koolstofvezelcomposiet plaatjes

Wanneer we de vervorming van de koolstofvezelcomposiet plaatjes beschouwen (Afbeelding 52), kunnen we concluderen dat de vervorming ervan niet gelijk is aan die van het aluminium plaatje (Afbeelding 51). De koolstofvezelcomposiet plaatjes gaan niet alleen om de Y- as krom staan, maar door de D- matrix gaan de plaatjes ook krom staan om de Z-as (assenstelsel in Afbeelding 52). Dit effect is in Afbeelding 52 terug te zien in de ronde overgangen tussen de vervormingsgebieden. Ondanks de additionele vervorming die de composieten plaatjes ondergaan liggen de “draaipunten” (donkerblauwe gebieden) op een zelfde positie als bij het aluminium plaatje (51mm uit de kanten).



Afbeelding 52 De vervorming van de koolstofvezelcomposiet plaatjes.

De eigenfrequenties van de koolstofvezelcomposiet plaatjes

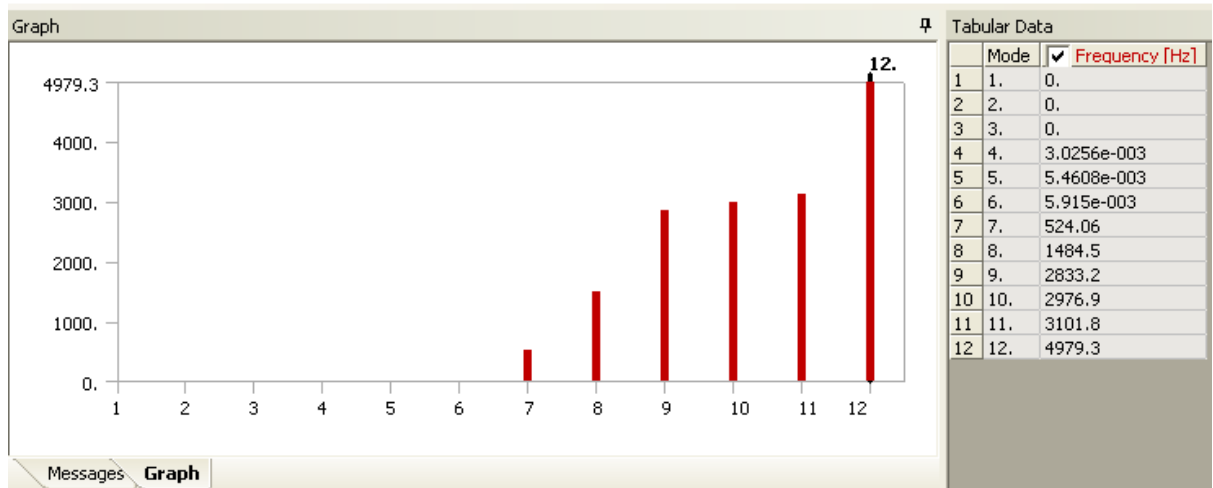
Om de eigenfrequenties te berekenen zijn met behulp van het laminaten programma composieten samengesteld met de handmatig berekende stijfheden uit Tabel 8. Het bleek dat de hier berekende stijfheden niet de gewenste eigenfrequenties opleverden. Dit is mogelijk te verklaren door het feit dat de plaatjes om 2 assen torderen (Afbeelding 52). Vervolgens zijn er volgens een iteratief proces composieten samengesteld die wel de stijfheden hadden die plaatjes voortbrachten met de juiste eigenfrequenties.

Het is echter door praktische beperkingen bij de composiet opbouw niet mogelijk om exact op de gewenste eigenfrequenties uit te komen. Door beperkingen in het laminatie proces is het mogelijk om lamellen te positioneren tot op ongeveer 1 graad nauwkeurig [9]. De ontworpen composieten zijn dus samengesteld uit lamellen met hoeken die uit hele graden bestaan. De composiet opbouw van de plaatjes zal in paragraaf 8.4 uitvoeriger worden besproken.

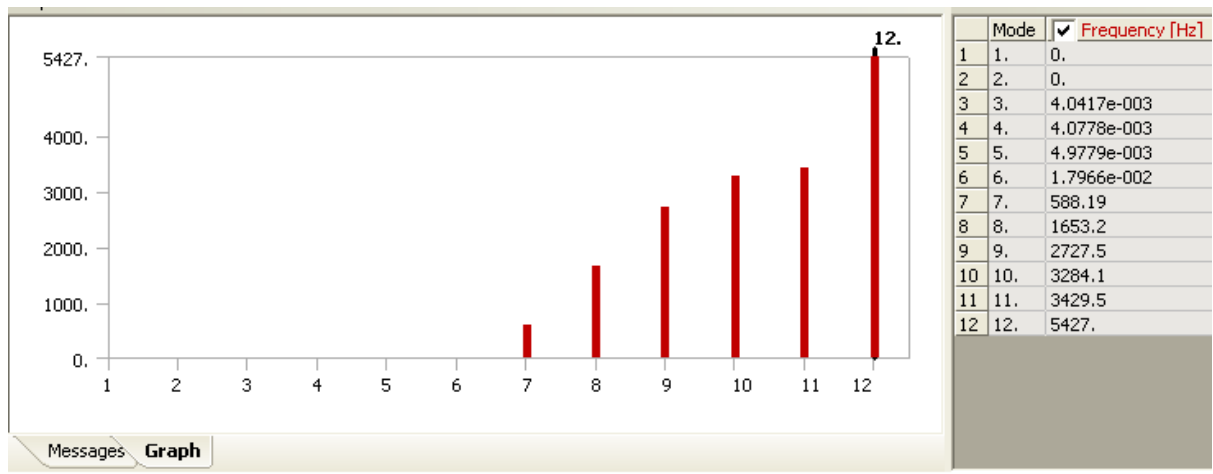
De daadwerkelijke stijfheden van de ingevoerde composieten en de daaruit volgende eigenfrequenties van de plaatjes zijn in Tabel 9 beschreven.

Tabel 9 De daadwerkelijke stijfheden van de composieten en de daadwerkelijke eigenfrequenties van de plaatjes.

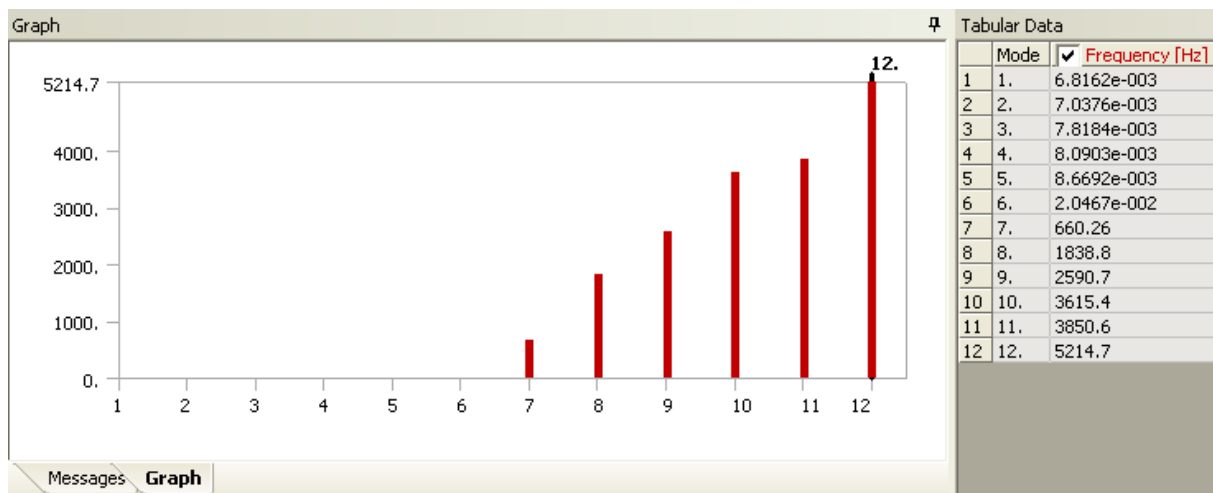
Gewenste eigenfrequentie (Hz)	Daadwerkelijke eigenfrequentie (Hz)	Handmatig berekende stijfheden (Pa)	Daadwerkelijk benodigde stijfheden (Pa)
525	524.1 (Afbeelding 53)	$3.96 * 10^{10}$	$4.2 * 10^{10}$
588.5	558.2 (Afbeelding 54)	$4.97 * 10^{10}$	$5.18 * 10^{10}$
661.5	660.3 (Afbeelding 55)	$6.28 * 10^{10}$	$6.64 * 10^{10}$



Afbeelding 53 De eerste eigenfrequentie van 524.1 Hz.



Afbeelding 54 De eerste eigenfrequentie van 588.2 Hz.



Afbeelding 55 De eerste eigenfrequentie van 660.3 Hz.

8.4 De opbouw van de composieten

Aangezien er Torayca T300J prepegs [1] beschikbaar zijn is het voor de hand liggend om de stijfheid van de plaatjes te variëren door de prepegs onder een hoek te belasten. Bij deze zogeheten Angle-Ply laminaten is het niet mogelijk om de koppelfactoren D16 en D26 gelijk te stellen aan nul, meer informatie over de effecten hiervan is in bijlage 1.4 te vinden. De B-matrix en de koppelfactoren A16 en A26 kunnen wel aan nul gelijkgesteld worden door de laminaat opbouw juist te kiezen.

Aan de hand van de FEM analyse (8.3.2) weten we de benodigde stijfheden voor de composieten uit Tabel 10. De eigenschappen van alle composieten zijn in bijlage 1.8 terug te vinden. De opbouw van het composiet met de benodigde stijfheid van $6.64 \cdot 10^{10}$ Pa zal in paragraaf 8.4.1 verder worden uitgewerkt. De overige composieten zijn op een identieke manier ontworpen.

Tabel 10 De benodigde stijfheden van de composieten.

Daadwerkelijk benodigde stijfheden (Pa)
$4.2 \cdot 10^{10}$
$5.18 \cdot 10^{10}$
$6.64 \cdot 10^{10}$

8.4.1 De opbouw van het composiet met een stijfheid van $6.64 \cdot 10^{10}$ Pa

Wanneer we het koolstofvezelcomposiet in het laminaten programma [4] opbouwen uit unidirectionele Torayca T300J prepegs [1] met een angle-ply lay-up, vinden we dat de volgende lay-up een stijfheid van $6.64 \cdot 10^{10}$ Pa in de hoofdrichting levert: 27/-27/25/-25/26/-26/26/-26/26/-26/26/-26/0/26/-26/26/-26/26/-26/26/-25/25/-27/27. De mechanische eigenschappen van het composiet zijn in Afbeelding 56 terug te vinden.

E1:	66.44 GPa	Thickness:	5.000000000000002 mm
E2:	10.8 GPa	ρ :	1528.0 Kg/m3
E3:	10.87 GPa		
G12:	23.34 GPa		
G23:	4.39 GPa		
G31:	4.39 GPa		
ν_{12} :	1.4		
ν_{23} :	0.29		
ν_{31} :	0.29		

Afbeelding 56 De mechanische eigenschappen van het composiet met de hoofdstijfheid van $6.64 \cdot 10^{10}$ Pa.

Wanneer we de stijfheidsmatrix van het composiet beschouwen (Afbeelding 57) zien we dat de B matrix en de koppelfactoren A16 en A26 gelijk zijn aan nul. De koppelfactoren D16 en D26 zijn echter niet gelijk aan nul. Dit is te wijten aan het feit dat het composiet symmetrisch is opgebouwd ten opzichte van zijn midden hoogte lijn. Door de D- matrix zal de composieten plaat niet alleen in zijn lengte richting doorbuigen maar ook in zijn breedte richting. Er zal tevens een buiging uit het vlak plaatsvinden doordat de koppelfactoren D16 en D26 niet gelijk zijn aan nul. De additionele buigingen van het plaatje verklaren dat de uitkomsten uit de handberekeningen afwijken van de uitkomsten uit de FEM analyse (8.3.2).

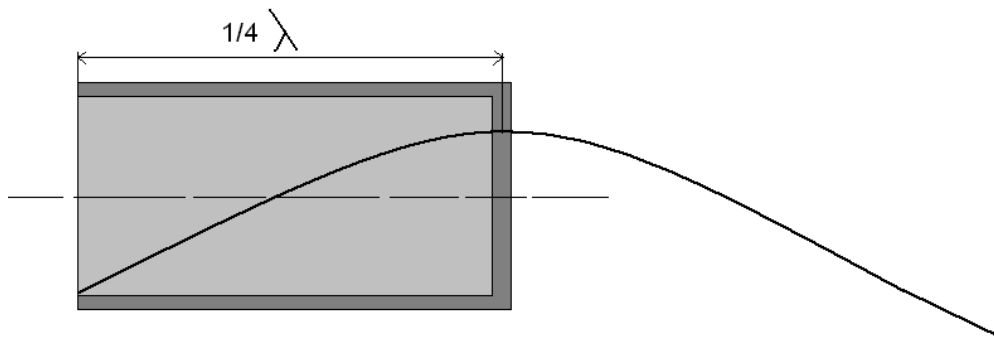
A			B			D		
4.87E2	1.11E2	0	0	0	0	9.92E2	2.4E2	5.1E1
1.11E2	7.92E1	0	0	0	0	2.4E2	1.68E2	1.26E1
0	0	1.17E2	0	0	0	5.1E1	1.26E1	2.53E2

Afbeelding 57 De stijfheidsmatrix van het composiet.

8.5 De versterking van de tonen

Om de door de composieten plaatjes gegenereerde tonen beter hoorbaar te maken zijn er versterkers ontworpen. Deze versterkers zijn PVC buizen met een gesloten einde. De buizen hebben een eigenfrequentie die identiek is aan de eerste eigenfrequentie van de composieten plaatjes. Wanneer de composieten plaatjes aangetikt worden zullen ze gaan vibreren op een aantal van hun eigenfrequenties. De versterker zal alleen meetrillen op de eerste eigenfrequentie van de plaatjes, Hierdoor zijn de andere eigenfrequenties van het plaatje minder goed hoorbaar.

Doordat de lengte van de buizen gelijk is aan een kwart van de golflengte van de tonen, zal de maximale amplitude van de trilling het gesloten einde van de buizen raken (Afbeelding 58). De buizen zullen dan geëxciteerd worden op hun eigenfrequentie en mee gaan vibreren.



Afbeelding 58 De maximale amplitude van de trilling raakt de onderkant van de buis.

De afstand waarvan het gesloten einde van de buisjes zich moet bevinden ten opzichte van de xylofoon plaatjes is te berekenen met de formule in Vergelijking 27.

$$L = \frac{\lambda}{4}$$
$$\lambda = \frac{V_{\text{geluid}}}{f}$$

Vergelijking 27 De afstand van het gesloten einde van de buisjes t.o.v. de xylofoon plaatjes.

Hier is V_{geluid} de geluidssnelheid in lucht bij een temperatuur van $293^\circ K$ en λ de golflengte van de trillingen.

Wanneer we Vergelijking 27 invullen vinden we de lengten uit Tabel 11 bij de eigenfrequenties van de plaatjes.

Tabel 11 De lengten van de buisjes a.d.h.v. de frequentie.

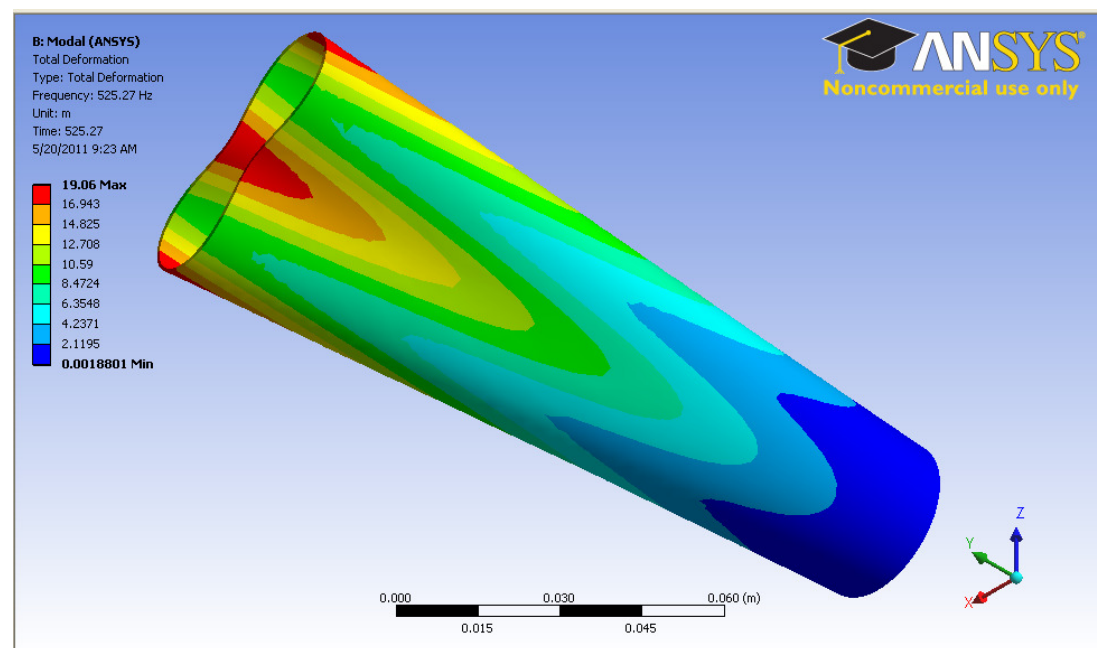
Frequentie (Hz)	Lengte buisje (mm)
524.1	164
588.2	146
660.3	130

Om de afmetingen van de versterkingsbuisjes zijn bepaald door middel van een FEM analyse. De buisjes zijn gemeshd met de instelling Automatic en een Mesh Body Size van 5mm. De buisjes zijn geanalyseerd in een niet ingeklemde conditie.

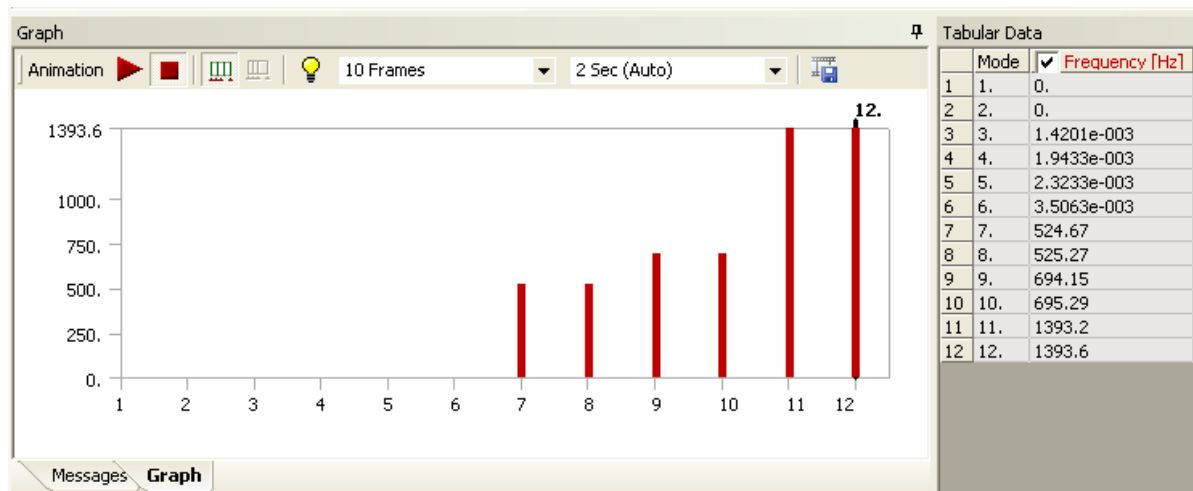
Uit de FEM analyse blijkt dat de 1^{de} en 2^{ste} eigenfrequentie van de buisjes de frequentie van de tonen het beste benadert. Op deze eigenfrequenties vibreren de buisjes in hun radiale richting (Afbeelding 59). De variabele die de eigenfrequentie van de buisjes bepaalt, is de relevante stijfheid. Deze stijfheid is afhankelijk van de diameter en de wanddikte van de buis. De E-modulus is voor alle buisjes identiek en de lengte van de buisjes is bepaald in Vergelijking 27.

Het is voor gekozen om de buisjes uit PVC te maken in verband met de lage E-modulus van dit materiaal.

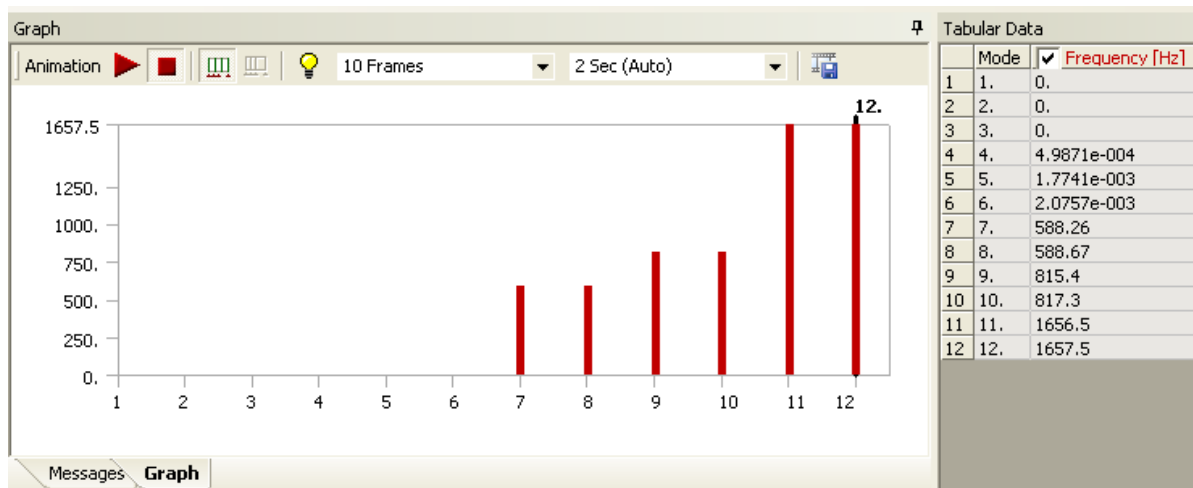
De gevonden afmetingen van de buisjes zijn in bijlage 1.9 te vinden. De eigenfrequenties van de buisjes zijn in Afbeelding 60 t/m Afbeelding 62 te vinden. Zoals de buisjes nu ontworpen zijn ligt hun eigenfrequentie een fractie te hoog. Hier is bewust voor gekozen zodat er nog een mogelijkheid is tot het “fine-tunen” van de buisjes met een fijn schuurpapiertje.



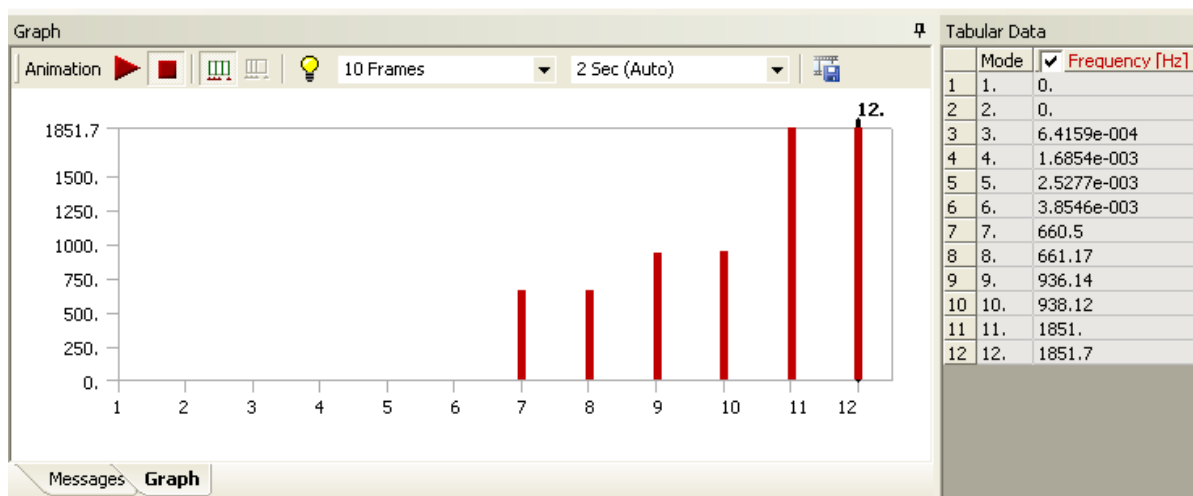
Afbeelding 59 De vervorming van de versterkingsbuisjes op hun eigenfrequentie.



Afbeelding 60 Het buisje met de eigenfrequentie van 524.1 Hz.



Afbeelding 61 Het buisje met de eigenfrequentie van 588.2 Hz.



Afbeelding 62 Het buisje met de eigenfrequentie van 660.3 Hz.

8.6 Conclusie

Het doel van de Xylofoon opstelling was om aan de constructeurs van Phillips Innovation Services te demonstreren wat de invloed van de vezelrichting in een composiet zijn op de eigenschappen ervan. Een hieruit voortkomende doelstelling is om aan te tonen dat het ook mogelijk is om dit nauwkeurig te voorspellen.

Er is voor gekozen om drie noten in de Xylofoon voor te laten komen C, D en E. Er zijn twee plaatjes die de C noot bevatten, de een is van aluminium en de ander van koolstofvezelcomposiet. Het aluminium plaatje is toegevoegd zodat het verschil in demping tussen koolstofvezelcomposiet en aluminium waargenomen kan worden. De plaatjes met de noten D en E zijn alleen in koolstofvezelcomposiet ontworpen.

Om nauwkeurig te voorspellen welke noten het aluminium plaatje en de koolstofvezelcomposiet plaatjes voortbrengen is er een FEM analyse van de plaatjes gemaakt. Het blijkt dat het rekening houdend met de praktische beperkingen van het laminatie proces, mogelijk is om de koolstofvezelcomposiet plaatjes tot op 1.2Hz (0.2%) nauwkeurig op hun gewenste toon te krijgen (Tabel 9).

Vervolgens zijn er versterkingsbuisjes ontworpen om de door de koolstofvezelcomposiet plaatjes gegenereerde tonen beter hoorbaar te maken. Het ontwerp van deze buisjes is gebaseerd op het principe dat ze mee resoneren met de koolstofvezelcomposiet plaatjes. Om dit te bereiken zijn ze met behulp van FEM analyses zo ontworpen dat hun eigenfrequenties gelijk zijn aan die van de composieten plaatjes.

Gebaseerd op de resultaten uit het ontwerp proces moet het mogelijk zijn om een Xylofoon opstelling te bouwen met composieten toonbalken. Tevens is het aangetoond dat het vrij eenvoudig is om met behulp van het laminaten programma en Ansys de stijfheid en eigenfrequentie van koolstofvezelcomposiet onderdelen te bepalen. Wanneer de Xylofoon verder ontworpen en gebouwd is zal het mogelijk zijn te bepalen of de in de analyses gevonden waarden ook correct zijn. Het is hiervoor wel cruciaal dat de toonplaatjes nauwkeurig gelamineerd worden, iedere graad afwijking in de angle-ply lay-up heeft effect op de stijfheid, dus de eigenfrequentie, van de plaatjes.

8.7 Aanbevelingen

Om de in paragraaf 8.3.2 berekende eigenfrequenties van de koolstofvezelcomposiet toonplaatjes te verifiëren zal de opstelling eerst geproduceerd moeten worden.

Wanneer dit is gedaan kunnen de eigenfrequenties van de plaatjes worden gemeten en vergeleken met de in de FEM analyse gevonden waarden.

Als de gemeten waarden dicht in de buurt liggen van de berekende waarden zal het voor de constructeurs van Philips Innovation Services duidelijk zijn dat de eigenschappen van koolstofvezelcomposiet nauwkeurig te voorspellen zijn. En dat ze ook naar wens aangepast kunnen worden.

Bewust leeg gelaten pagina.

9 Conclusie

De doelstelling van het project was om de kennis over koolstofvezelcomposieten bij de ingenieurs van Philips Innovation Services te vergroten, zodat zij het in de toekomst makkelijker kunnen toepassen in hun ontwerpen. Om dit te bereiken zijn er drie demonstrators ontworpen waarmee de mogelijkheden van koolstofvezelcomposiet aangegeven worden.

De eerste opstelling is een trekbank waarmee de kracht van een insert verbinding in een koolstofvezelcomposiet aangetoond wordt. Dit wordt bereikt door een M5 draadeind uit een aluminium plaat te trekken terwijl zijn andere uiteinde in een insert in een koolstofvezelcomposiet plaat is bevestigd. Voor het functioneren van deze opstelling is het cruciaal dat de koolstofvezelcomposiet plaat en de inserts kracht afhankelijk ontworpen kunnen worden. Er is weinig tot geen informatie beschikbaar over de kracht van insert verbindingen. Daarom is er een aannemelijke vuistformule opgesteld waarmee de maximale diameter van een geflensde insert, die op trek belast wordt, berekend kan worden. De FEM analyse van de insert in de koolstofvezelcomposiet plaat geeft vergelijkbare resultaten als de vuistformule. Wanneer de opstelling geproduceerd is zal het mogelijk zijn om de resultaten uit de FEM analyse en de handberekening te bevestigen.

Al met al lijkt het moeten construeren van insert verbindingen geen reden om af te zien van het werken met koolstofvezelcomposieten. Wel zal het meer tijd kosten dan het construeren van een normale boutverbinding, het gebruik van composieten kan echter ook grote voordelen leveren op op het gebied van soortelijke stijfheid en soortelijke sterkte. Daarom zal het materiaal voor bepaalde toepassingen zeer aantrekkelijk zijn en is het spenderen van extra tijd aan het ontwerpproces niet altijd een doodoener.

De tweede “thermometer” opstelling heeft als doelstelling aan te tonen dat het mogelijk is om koolstofvezelcomposieten te ontwerpen met een zeer lage thermische uitzettingscoëfficiënt. In deze opstelling wordt de thermische expansie van een koolstofvezelcomposiet en een aluminium balk versterkt door een mechanische en optische overbrenging. Aangezien aluminium een thermische

uitzettingscoëfficiënt van $26 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m \cdot K}$ heeft en het ontworpen composiet slechts

$0.1 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m \cdot K}$, zal de uitzetting van de aluminium staaf duidelijk waarneembaar zijn

terwijl die van de koolstofvezelcomposiet staaf dat niet is.

Aan de hand van het ontwerp proces is te concluderen dat er koolstofvezelcomposieten met een zeer lage thermische uitzettingscoëfficiënt ontworpen kunnen worden. Wanneer de opstelling geproduceerd is kan dit bevestigd worden.

De laatste opstelling die is ontworpen is de xylofoon opstelling. Het doel van deze opstelling is om te demonstreren wat de invloed van de vezelrichting is op de eigenschappen van een composiet. Door de vezelrichting te variëren kan de stijfheid van een composiet beïnvloed worden. Wanneer deze stijfheid varieert zal de eigenfrequentie ook variëren. Dit effect is aangetoond door de toonplaatjes van de xylofoon gelijke dimensies te geven, maar de toon van de plaatjes toch te variëren door een andere lay-up van de lamellen.

Om de eigenfrequentie van de koolstofvezelcomposiet toonplaatjes te bepalen zijn er FEM analyses van gemaakt. Hieruit blijkt dat de gewenste eigenfrequenties tot op 0.1% nauwkeurig te bereiken zijn wanneer men de lamellen in hele graden oplegt. Er zou meer “fine-tuning” mogelijk zijn door het vezelvolumepercentage van de prepegs te variëren.

In het ontwerpproces is duidelijk aangetoond welke invloed de vezelrichting op de eigenschappen van een composiet heeft. Verder kan geconcludeerd worden dat deze eigenschappen makkelijk te voorspellen zijn door middel van het laminaten programma en FEM analyses. Om te verifiëren dat deze uitkomsten ook accuraat zijn zal de opstelling echter geproduceerd en getest moeten worden.

Wanneer we het ontwerpproces evalueren kan geconcludeerd worden dat de ontworpen opstellingen aan alle eisen voldoen. De trekbank opstelling laat zien dat het mogelijk is om de toelaatbare belasting van een insert en een koolstofvezelcomposiet te berekenen. Verder zullen de trekproeven uitwijzen of de FEM analyses van de composieten plaat met insert ook accurate resultaten oplevert. De thermometer opstelling laat duidelijk zien dat het mogelijk is om composieten met een zeer lage uitzettingscoëfficiënt samen te stellen. En de xylofoon opstelling toont aan wat de invloed van de vezelrichting op de stijfheid van composieten is. Verder kan aan deze opstelling gemeten worden hoe accuraat de in FEM analyses voorspelde eigenfrequenties van de koolstofvezelcomposiet toonplaatjes zijn. De bedoeling van het project is om de constructeurs van Philip Innovation Services aan te tonen dat het werken met koolstofvezel composiet geen grote problemen hoeft op te leveren. In de ontwerpprocessen van de opstellingen is een aantal analyses uitgevoerd. De uitvoering hiervan heeft geen noemenswaardige problemen gekend. De ontworpen opstellingen dienen nog wel geproduceerd te worden om de analyse uitkomsten te bevestigen. Wanneer dit is gedaan kan men de constructeurs met zekerheid vertellen dat composiet onderdelen voorspelbare eigenschappen hebben.

10 Aanbevelingen

Om de in het ontwerpproces gemaakte berekeningen aan de koolstofvezelcomposiet onderdelen te bevestigen dienen de ontworpen demonstrators geproduceerd te worden. Wanneer dit is gedaan kan er door middel van metingen gecontroleerd worden of de resultaten uit de FEM analyses van de composiet onderdelen representatief zijn voor de praktijk. Het zou ook waardevol zijn als de formule voor het berekenen van de buitendiameter van de geflensde insert bevestigd zou worden. Constructeurs zouden hier een eerste inschatting van de integriteit van een insert mee kunnen maken.

Aangezien de doelstelling van het project is om de constructeurs van Philips Innovation Services te demonstreren dat het ontwerpen met koolstofvezelcomposiet geen problemen hoeft op te leveren, is het belangrijk dat de demonstrators ook daadwerkelijk gepresenteerd worden. De opstellingen zijn dusdanig ontworpen dat ze een duidelijke visuele of in het geval van de xylofoon akoestische demonstratie geven van de eigenschappen van koolstofvezelcomposiet. De thermometer opstelling demonstreert duidelijk de zeer lage thermische uitzettingscoëfficiënt van koolstofvezelcomposiet. En de xylofoon opstelling toont duidelijk dat de stijfheid van een koolstofvezelcomposiet een keuze is binnen een bepaald gebied. Al met al kan dus een aantal van de aantrekkelijke eigenschappen van koolstofvezelcomposiet met de demonstrators verduidelijkt worden.

11 Bronnen

Bron nr.	Titel	Auteur	Datum	(URL)
1	Torayca T300J Data Sheet	Toray Carbon Fibers America, Inc.	onbekend	http://www.toraycfa.com/pdfs/T300JDataSheet.pdf
2	Engineering Mechanics of Composite Materials	Isaac M. Daniel Ori Ishai	1994	ISBN 0 19 509738 6
3	Lichtgewicht Construeren	Bart Bastings	2011	Beschikbaar bij het Kenniscentrum Mechatronica van de Fontys Hogeschool Engineering.
4	Het laminaten programma	Bart Bastings		Beschikbaar bij het Kenniscentrum Mechatronica van de Fontys Hogeschool Engineering.
5	The laminator			http://www.thelaminator.net/
6	Rolof / Matek Machine-onderdelen	Dieter Muhs Herbert Wittel Manfred Becker Dieter Jannasch Joachim VoBiek	2007	ISBN 978 90 395 2321 6
7	De Philips Constructeurs map			Beschikbaar bij Philips Innovation Services.
8	Bending Frequencies of Beams, Rods and Pipes	Tom Irvine	2010	http://www.vibrationdata.com/tutorials2/beam.pdf

9	Persoonlijk gesprekken met: Giel van der Kevie (airboirne composites) Jordy van Loon (Composieten lab Inholland)			
10	Vezel-versterkte kunststoffen Mechanica en ontwerp	A.H.J. Nijhof	2004	ISBN 978-90-407-2484-8

1 Bijlagen

1.1 Vragen Philips Innovation Services

Om te inventariseren wat de redenen zijn voor de ingenieurs van Philips Innovation services om niet met koolstofvezelcomposiet te construeren is er een gezamenlijk interview gehouden. Hier waren zes ingenieurs aanwezig die allen andere ervaring hadden met koolstofvezelcomposiet. Aan de hand van de hieronder gestelde vragen zullen de eisen aan de demonstrator geformuleerd worden.

Welke materialen gebruiken jullie voornamelijk in jullie ontwerpen?

Voornamelijk de conventionele materialen staal en aluminium. Maar ook steeds vaker exotische materialen zoals titanium en keramiek. Bij het gebruik van keramiek worden dezelfde "problemen" ondervonden als bij het gebruik van koolstofvezel.

Heeft er iemand ervaring met het werken met koolstofvezel?

De ervaringen met koolstofvezel van het hele Mechatronica ontwerp team zijn op een hand te tellen. Eigenlijk valt er dus te stellen dat er geen ervaring is met het ontwerpen met koolstofvezel.

Is er een reden / materiaaleigenschap waarom een aantal van jullie liever niet construeren met koolstofvezelcomposiet?

De belangrijkste redenen waarom er binnen Philips Innovation Sciences bijna niet met koolstofvezelcomposiet wordt gewerkt zijn:

- *Het product moet in een keer goed ontworpen worden. De aanpassingsmogelijkheden zijn bij een koolstofvezel product laag omdat men er niet aan kan lassen etc. Mocht er iets fout zijn dan moet er een nieuwe mal worden gemaakt. We vergelijken hier het gebruik van koolstofvezel ook wel met de stap naar het gieten van producten.*
- *Er is onzekerheid over het doorrekenen van een onderdeel met FEM. Men weet niet hoe de anisotrope eigenschappen van een laminaat ingevoerd moeten worden. Er wordt gedacht dat er te veel tijd in het maken van een ontwerp gaat zitten.*
- *Ook is er onzekerheid over de reproduceerbaarheid van producten, het is onbekend welke toleranties gehaald kunnen worden.*
- *Men is er bang voor dat bij breuk delen loslaten en in de machine terecht komen.*
- *Verder vrezen de constructeurs voor een grote productie doorlooptijd omdat er eerst mallen gemaakt moeten worden.*
- *Er wordt verondersteld dat koolstofvezel duur is.*
- *Als er geometrisch complexe onderdelen met veel bevestigingen gemaakt worden is het gebruik van koolstofvezel te moeilijk.*

De eigenschappen licht en stijf weten mensen vaak te benoemen van koolstofvezel. Maar over welke eigenschappen zouden jullie graag mee willen weten? (thermische expansie, vermoeiing, etc.)

- Spannings-relaxatie zowel in de vezel richting als haaks erop.*
- Spannings-relaxatie bij compressie.*
- Vermoeiingsgedrag van het composiet.*
- Geometrische stabiliteit door vermoeiing en spannings-relaxatie.*
- Hoe het composiet zich houdt in vacuüm omstandigheden.*
- Bestendigheid tegen vocht en temperatuur.*
- De demping van het materiaal. Het is bekend dat koolstofvezel hoge frequenties beter dempt dan bijvoorbeeld staal. Maar er zijn geen waarden bekend.*

Over welke praktische eigenschappen van koolstofvezel zouden jullie graag meer willen weten? (hoe schroef je erin, hoe plaats je er een lager in, etc)

- De voornaamste vraag is hoe om te gaan met inserts. Welke inserts moeten voor welke spanningstoestanden worden gebruikt? Wat is de te halen maatvoering? Kunnen inserts ook worden bewerkt nadat ze in het composiet geplaatst zijn? Er rekening mee houdend dat er geen vervuilingen in een vacuüm mag ontstaan door koelmiddel etc.*
- Een aansluitende vraag was hoe koolstofvezel onderdelen (buizen etc.) aan de vaste wereld (aluminium etc.) bevestigd kunnen worden.*
- Hoe moeten overgangen binnen een koolstofvezel onderdeel worden vormgegeven (radiussen etc)?*
- Hoe kan men ervoor zorgen dat een koolstofvezel onderdeel na een botsing nog functioneert?*

Kunnen jullie een aantal mechanismen opnoemen die jullie vaak gebruiken in ontwerpen (rechtgeleidingen etc.)?

- Bladveren en andere elastische elementen.*

Zien jullie mogelijkheden voor koolstofvezel in de mechanismen en producten die jullie ontwerpen? Voorzien jullie bepaalde problemen wanneer je koolstofvezel zou gaan gebruiken?

- Men ziet mogelijkheden voor alle bewegende delen die in machines zitten omdat koolstofvezel een hoge stijfheid en een lage soortelijke massa heeft. En daarom de eigenfrequenties van onderdelen verhoogd kunnen worden.*

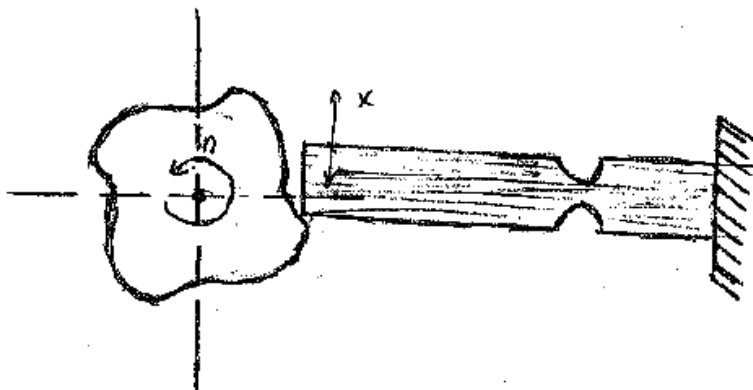
1.2 Concepten aan de hand van de eisen

Aan de hand van de eerder gestelde eisen zijn er een aantal conceptonderdelen bedacht waarin de aparte eisen verwerkt zijn. Deze onderdelen kunnen op een later stadium samengevoegd worden tot de demonstrator. De concepten zijn bewust ongedetailleerd uitgewerkt zodat er zo min mogelijk creatieve beperkingen zijn in de samenvoegende fase van het project.

1.2.1 Eis: De vermoeiingseigenschappen van koolstofvezelcomposiet demonstreren

Buigvermoeiing

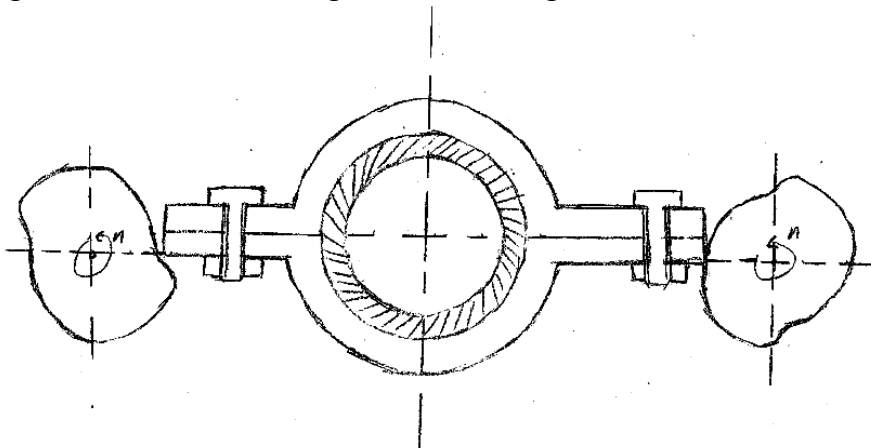
Om de vermoeiingseigenschappen van een koolstofvezelcomposiet te demonstreren kan men een gatscharnier of een bladveer wisselend belasten. Deze wisselende belasting kan met een nok aangebracht worden. In afbeelding 63 is een schets zichtbaar.



Afbeelding 63 Vermoeiing door een wisselende belasting op een gatscharnier.

Torsie vermoeiing

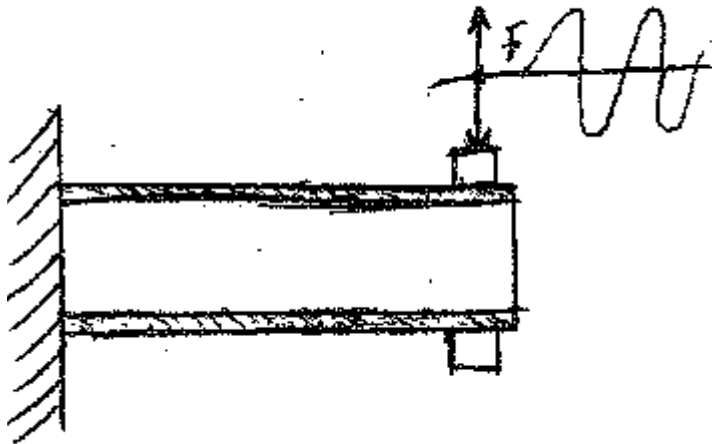
Tevens zou men ervoor kunnen kiezen om de vermoeiingseigenschappen van een composiet te demonstreren door een wisselende torsie belasting met nokken op een ingeklemde as aan te brengen. In afbeelding 64 is een schets zichtbaar.



Afbeelding 64 Vermoeiing door een wisselende torsie belasting.

Het wisselend belasten van een balk op zijn eigenfrequentie

Wanneer men een balk wisselend op zijn eigenfrequentie belast (afbeelding 65) zal deze extra snel vermoeien.

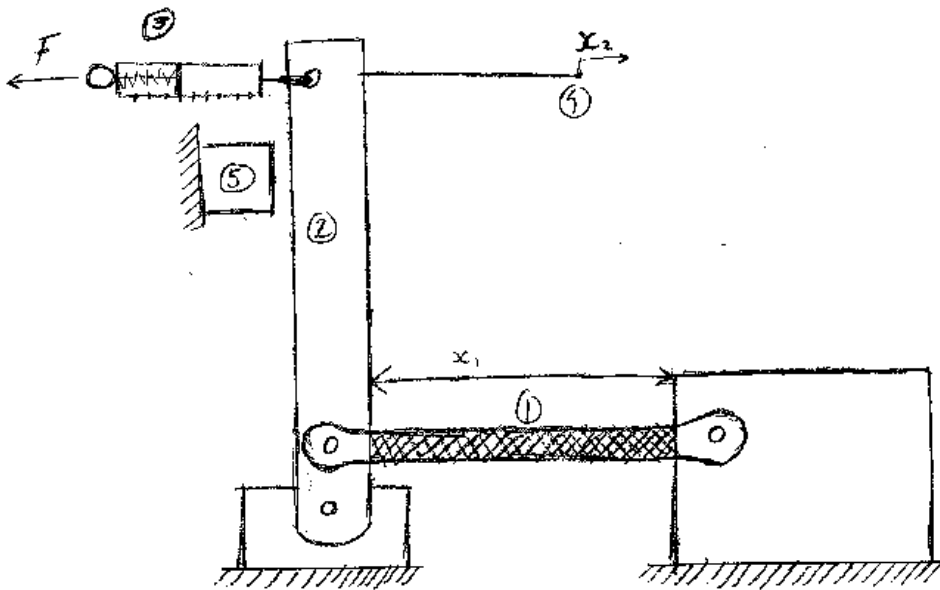


Afbeelding 65 Het wisselend belasten van een balk op zijn eigenfrequentie.

1.2.2 Eis: De relatie tussen FEM en realiteit demonstreren

Trek of buigbelasting op een as aangebracht met een hefboom.

Om de resultaten uit een FEM analyse te vergelijken met de realiteit kan men een simpele meetopstelling maken (afb. 66). Op een koolstofvezelcomposieten staaf (1) kan een trekbelasting aangebracht worden. De belasting kan gemeten worden door de aangebrachte kracht te meten met een veerunster (3), de verhouding van de hefboom (2) dient hierin verwerkt te worden. De verlenging van de afstand x_1 kan geregeld worden doormiddel van een aanslag (5). Een buigbelasting kan vergeleken worden door de staaf (1) verticaal in te klemmen.

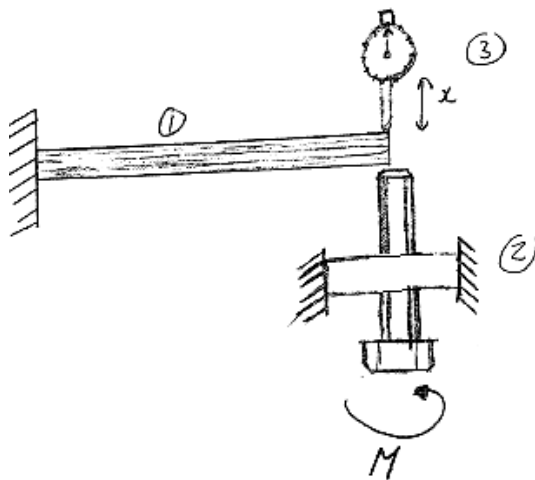


Afbeelding 66 Trek belasting aangebracht door een hefboom.

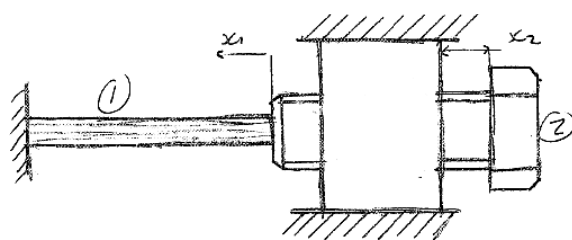
Belastingen op een as aangebracht met een bout

De verbuiging van een as zou gemeten kunnen worden door er met een bout een kracht op aan te brengen (afb. 67). De drukkracht van de bout (2) kan gereguleerd worden met behulp van een momentsleutel. De doorbuiging van de as (1) kan worden gemeten met een meetklok (3).

De analyse resultaten van de stuik van een koolstofvezelcomposieten staaf (1) zouden tevens getest kunnen worden door met een bout een kracht erop aan te brengen (afb. 68). De drukkracht van de bout (2) kan gereguleerd worden door er met een momentsleutel een afgeregeld moment aan te brengen. De verplaatsing van de bout (x_1) kan met een meetklok gemeten worden. Om te waarborgen dat de staaf niet kapot gedrukt wordt zal de afstand x_2 beperkt moeten zijn.



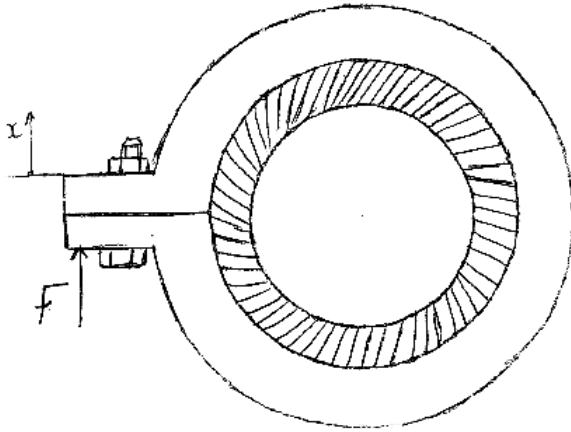
Afbeelding 67 Buigbelasting.



Afbeelding 68 Stuik.

Een torsie belasting aangebracht op een ingeklemde as

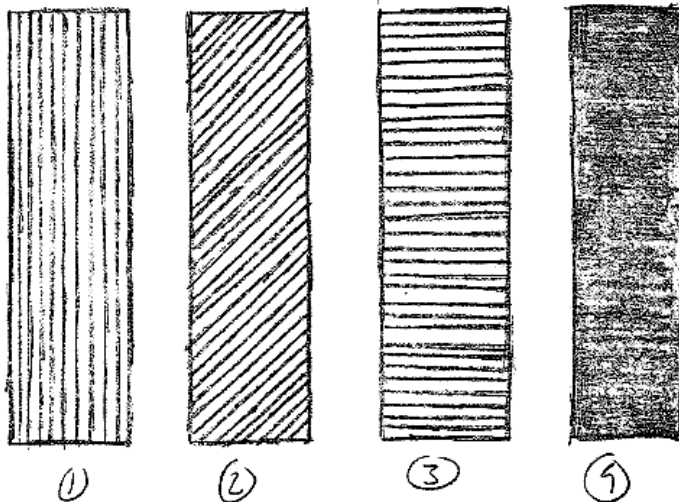
De hoekverdraaiing van een as tengevolge van een torsiemoment, kan gemeten worden door een as in te klemmen en met behulp van een hefboom of een bout een torsiemoment aan te brengen (afb. 69). De hoekverdraaiing kan met een meetklok bepaald worden.



Afbeelding 69 Een op torsie belaste as.

Een "Xylofoon"

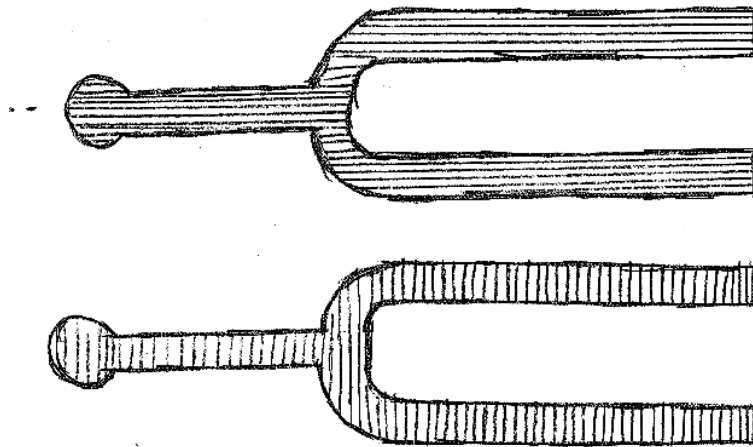
Door een aantal plaatjes met verschillende vezelrichtingen (afb. 70), dus verschillende stijfheden, dus verschillende eigenfrequenties, aan te tikken kunnen verschillende tonen hoorbaar worden gemaakt. Deze tonen kunnen gemeten worden en vergeleken met de eigenfrequentie uit de FEM analyse.



Afbeelding 70 Een "Xylofoon".

Carbon Stemvorken

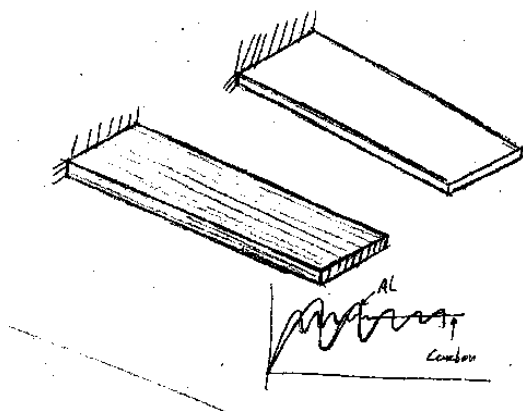
Door een aantal stemvorken met verschillende vezelrichtingen (afb. 71), dus verschillende stijfheden, dus verschillende eigenfrequenties, aan te tikken kunnen verschillende tonen hoorbaar worden gemaakt. Deze tonen kunnen gemeten worden en vergeleken met de eigenfrequentie uit de FEM analyse.



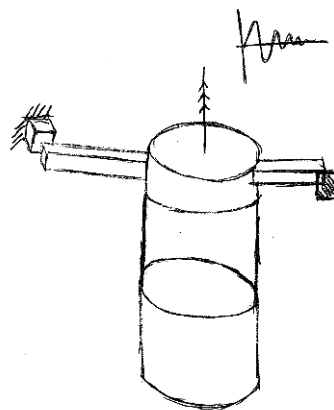
Afbeelding 71 Carbon stemvorken.

Verschillende natril tijden

Wanneer men een aluminium en een koolstofvezelcomposieten plaat gelijktijdig aantikt (afb. 72) zullen ze gaan trillen. Het koolstofvezelcomposieten plaatje zal korter trillen door de betere dempingeigenschappen. Tevens zal het composieten plaatje sneller trillen door de hogere stijfheid en lagere massa, dit zou met FEM berekend kunnen worden. Hetzelfde concept kan ook voor een rotatie worden toegepast (afb. 73)



Afbeelding 72 Verschil in natril tijden.

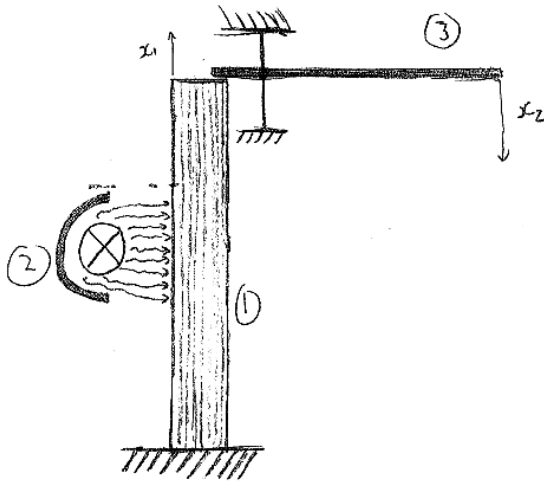


Afbeelding 73 Natrillen in de rotatierichting.

1.2.3 Eis: De invloed van temperatuur demonstreren

Een verplaatsing t.g.v. de uitzetting van een balk

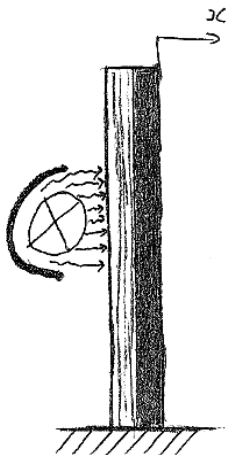
De uitzetting van een balk (1) kan gedemonstreerd worden door hem te verhitten met bijvoorbeeld een sterke gloeilamp (2). Door de uitzetting te versterken met een overbrenging zal hij met het blote oog waarneembaar worden (3). Een schets van de opstelling is in afbeelding 74 zichtbaar.



Afbeelding 74 Een verplaatsing t.g.v. de uitzetting van een balk.

Een "bimetaal"

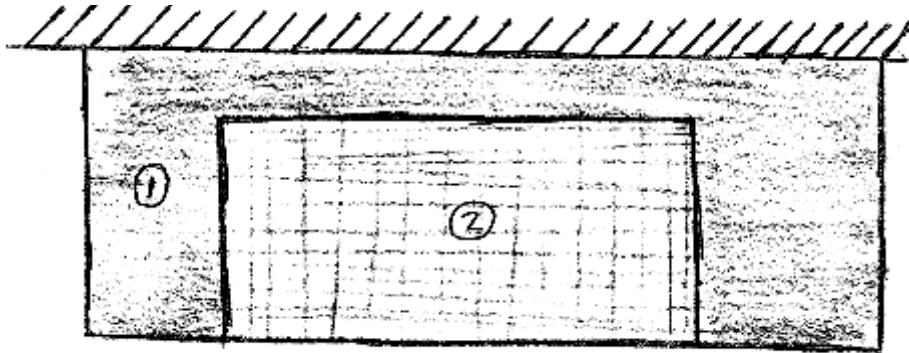
De uitzetting van koolstofvezel composiet kan ook gedemonstreerd worden door het materiaal op een ander materiaal te verlijmen met een andere uitzettingscoëfficiënt (afb. 75). Door de verschillende uitzettingscoëfficiënten zal het "bimetaal" krom gaan staan.



Afbeelding 75 Een "bimetaal" met koolstofvezelcomposiet.

Variatie in passing

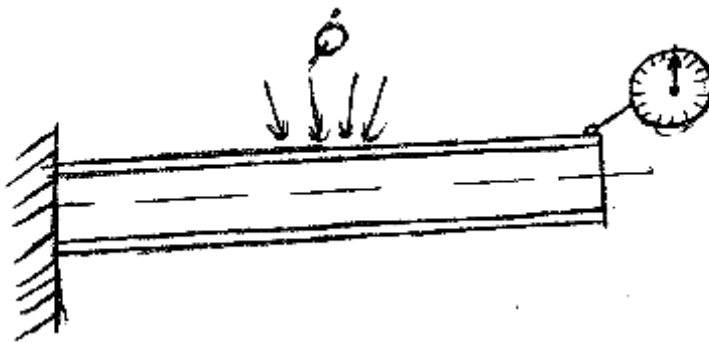
Om de invloed van temperatuur te demonstreren kan men twee blokken met een vaste pasfitting in elkaar monteren. Als het blok 1 een grotere uitzettingscoëfficiënt heeft dan blok 2, dan zal blok 2 loslaten wanneer het voldoende verwarmd wordt. In afbeelding 76 is een schets zichtbaar.



Afbeelding 76 Twee in elkaar gekrompen blokken.

Het kromtrekken van een buis door aanraking

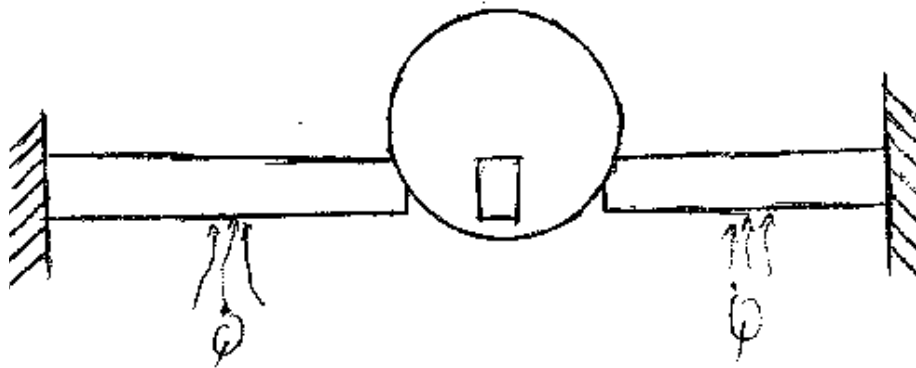
Wanneer men een RVS buis aanraakt zal deze iets krom gaan staan, dit krom staan kan met een micrometer gemeten worden. Wanneer men echter een koolstofvezelcomposieten buis aanraakt zal deze niet krom gaan staan. Deze proef, afgebeeld in afbeelding 77 geeft een duidelijk verschil in uitzettingscoëfficiënten weer.



Afbeelding 77 Het kromtrekken van een buis door aanraking.

De negatieve krimp van balken

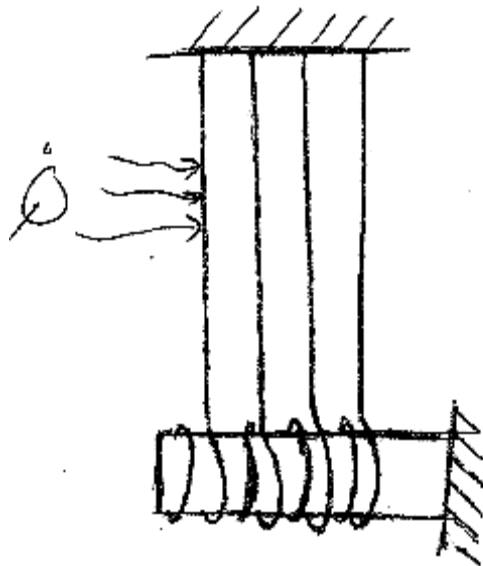
Wanneer men koolstofvezelcomposiet met een bepaalde samenstelling verwarmt krimpt het. Men zou dit effect kunnen demonstreren door een bal op een drie-puntsoplegging te laten rusten die de bal doorlaat wanneer deze verwarmd wordt. Het concept is in afbeelding 78 te zien.



Afbeelding 78 De negatieve krimp van blaken.

De toonverandering van snaren

Wanneer men een aantal snaren voorspant zullen deze van toon veranderen als ze verhit worden. Het concept is in afbeelding 79 afgebeeld.

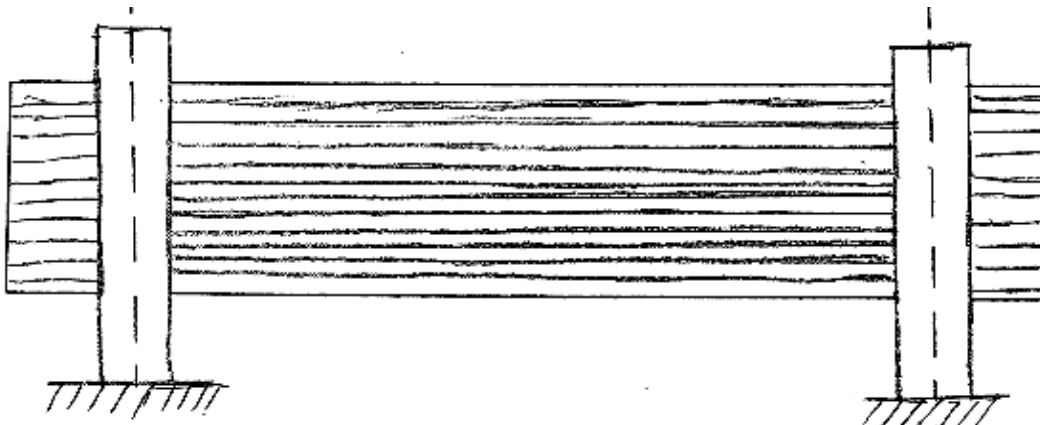


Afbeelding 79 De toonverandering van snaren.

1.2.4 Eis: De te halen toleranties demonstreren

Verwisselbare onderdelen met nauwe passingen

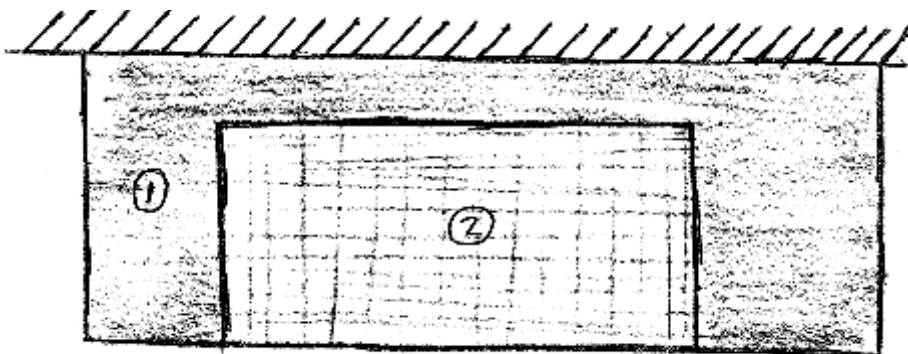
Om de te halen passingen te demonstreren kan men ervoor kiezen om verwisselbare onderdelen toe te passen waarin nauwe passingen verwerkt zijn. In afbeelding 80 is een voorbeeld van dit concept afgebeeld. Als de gaten en de assen een zeer kleine spelling hebben, zal de positie van de gaten bepalend zijn voor de mogelijkheid tot montage.



Afbeelding 80 Verwisselbare onderdelen.

Onderdelen met een passing

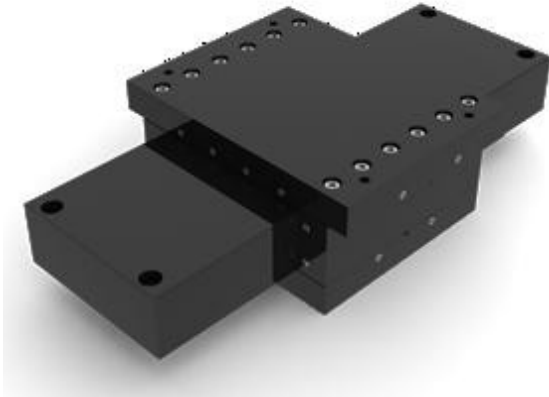
Om te halen toleranties te demonstreren kan men er ook voor kiezen om onderdelen met een nauwkeurige passing toe te passen. In afbeelding 81 zijn twee in elkaar geperste blokken zichtbaar.



Afbeelding 81 In elkaar geperste blokken.

Een koolstofvezelcomposiet luchtlager

Door een koolstofvezelcomposiet luchtlager (afb. 82) te maken kunnen de te halen toleranties alsmede de te halen oppervlaktevlakheid en kwaliteit gedemonstreerd worden.



Afbeelding 82 Een koolstofvezelcomposiet luchtlager.

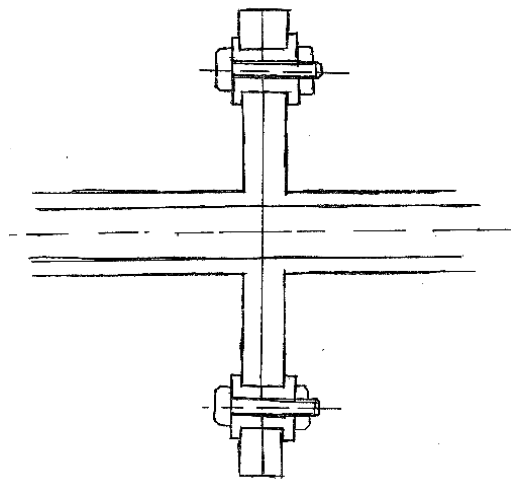
Een spiegel op koolstofvezelcomposiet

De te halen toleranties kunnen ook gedemonstreerd worden door een spiegel op een koolstofvezelcomposiet oppervlak te laten maken. Wanneer deze spiegeltjes vlak genoeg zijn kan men ze tegen elkaar aan plakken bij ASML ook wel “Ansprengen” genoemd. Ansprengen is het door moleculaire aantrekkingskracht (cohesie of adhesie) aan elkaar blijven plakken van twee zeer fijn- afgewerkte en vlakke objecten. Dit effect is bijvoorbeeld zichtbaar wanneer twee eindmaten (hulpblokjes bij frezen) tegen elkaar worden gedrukt

1.2.5 Eis: Het gebruikt van insert bussen demonstreren

Het op torsie of buiging belasten van verbonden assen

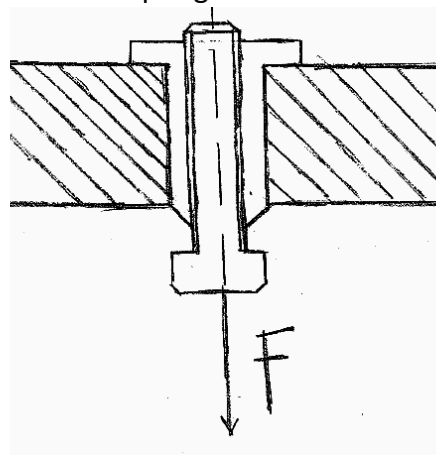
Men kan de functie van insert bussen demonstreren door er bijvoorbeeld twee op torsie of buiging belaste assen mee te verbinden. In afbeelding 83 is dit concept uitgebeeld.



Afbeelding 83 Door insert bussen verbonden as.

Het trekken aan een insert bus

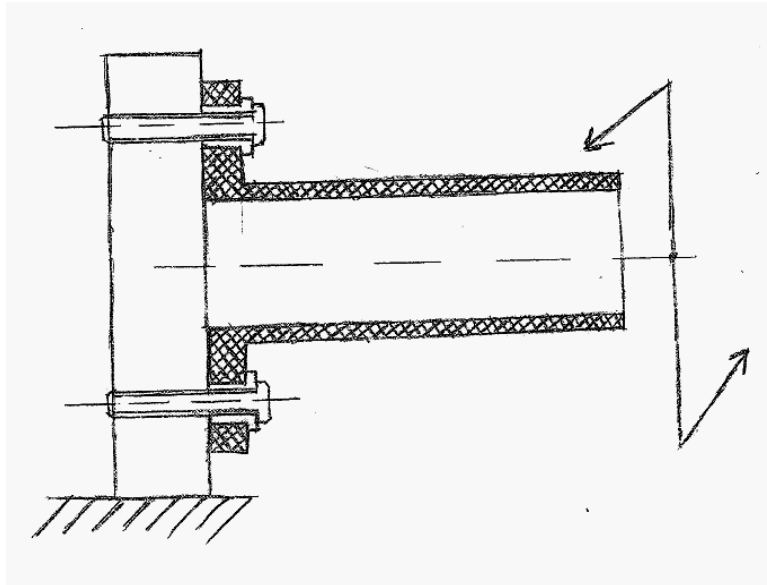
Een ander belastingsgeval waarmee de werking van een insert- bus gedemonstreerd kan worden is een trekbelasting. In afbeelding 84 is dit concept afgebeeld. Ook zou er bout kapot getrokken kunnen worden terwijl de insert intact blijft.



Afbeelding 84 Trekbelasting op een insert bus.

Het buigen of torderen van een as verbonden aan de vaste wereld.

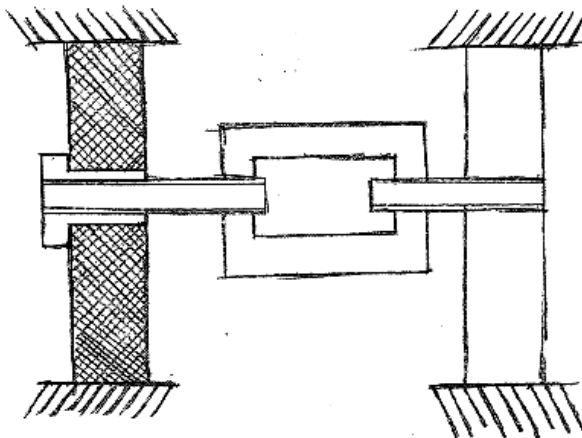
Om de kracht van een verbinding met insert bussen te demonstreren kan men een as die met insert bussen aan de vaste wereld is bevestigd kapot torderen (afb. 85). Het zou natuurlijk het meest sprekend zijn als de as bezweek in plaats van de verbindingen.



Afbeelding 85 Het buigen of torderen van een as verbonden aan een de vaste wereld.

Het uittrekken van een draadeind

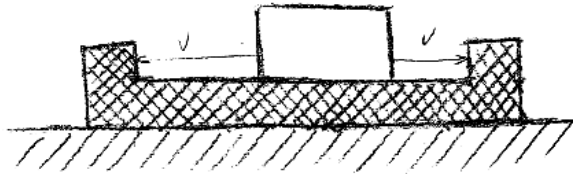
Een ander voorbeeld om de kracht van inserts in koolstofvezelcomposiet te demonstreren, is door met behulp van een draadeindspanner een draadeind uit een aluminium blok te trekken, dit terwijl het draadeind wat met zijn andere uiteinde gemonteerd is in een koolstofvezelcomposiet plaat heel blijft. Het concept staat in afbeelding 86 afgebeeld.



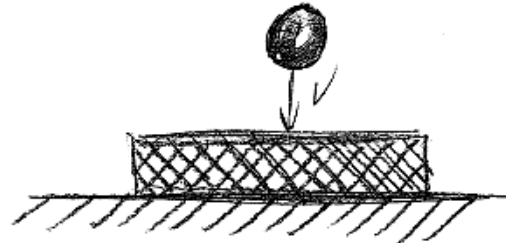
Afbeelding 86 Het uittrekken van een insert.

1.2.6 Eis: Het demonstreren van functionaliteit na een botsing.

Men kan de functionaliteit na een botsing van koolstofvezelcomposieten onderdelen demonstreren door een onderdeel tegen een aanslag te laten lopen (afb. 87), of door er een massa op te laten vallen (afb.88).



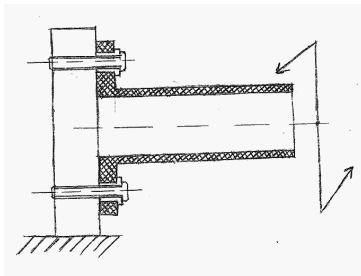
Afbeelding 87 Botsing met aanslagen.



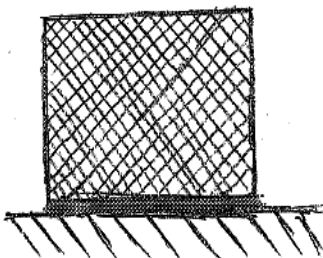
Afbeelding 88 Botsing met vallende massa.

1.2.7 Eis: De verbinding van koolstofvezel onderdelen aan de vaste wereld demonstreren.

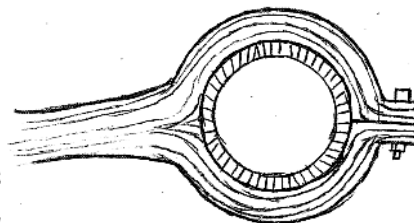
De mogelijkheden van het verbinden van koolstofvezelcomposieten kunnen op de volgende wijzen afgebeeld worden: lijmen (afb. 89), klemmen (afb. 90) en schroeven m.b.v. inserts (afb. 91).



Afbeelding 89 Lijmen.



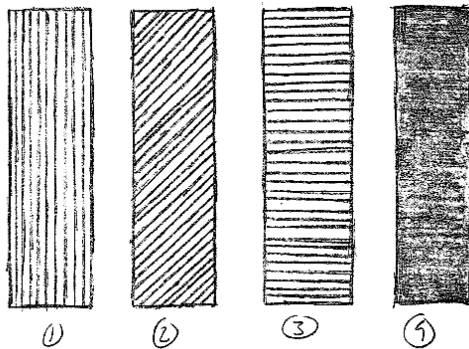
Afbeelding 90 Klemmen.



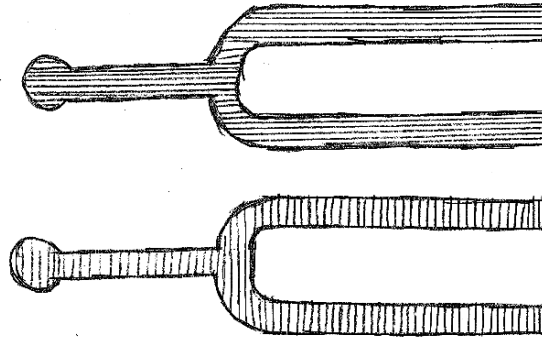
Afbeelding 91 Schroeven.

1.2.8 Eis: Het demonstreren van de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van het materiaal.

Het demonstreren van de verschillende stijfheden in de verschillende vezelrichtingen van het composiet, kan bereikt worden door materialen aan te tikken en verschillende hoorbare frequenties te produceren. Natuurlijk kan dit verschil in stijfheid ook gevoeld worden door de objecten handmatig te buigen. In afbeelding 92 is een xylofoonachtig concept te zien en in afbeelding 93 twee stemvorken.



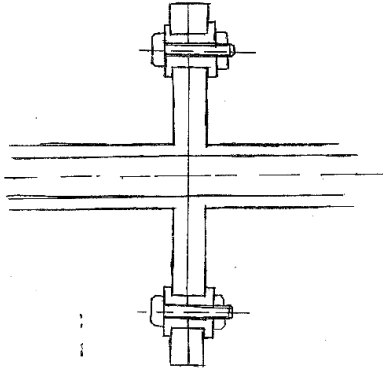
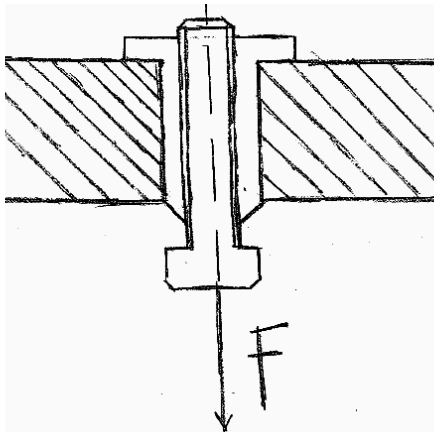
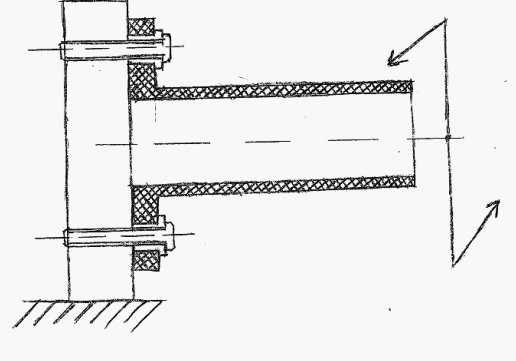
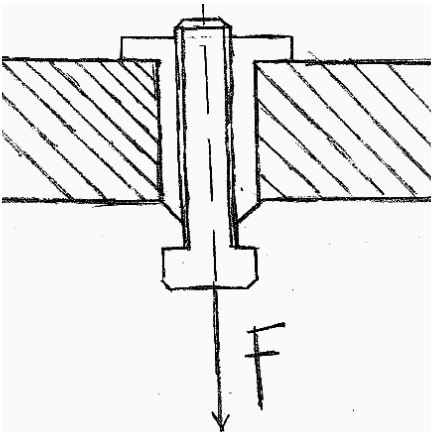
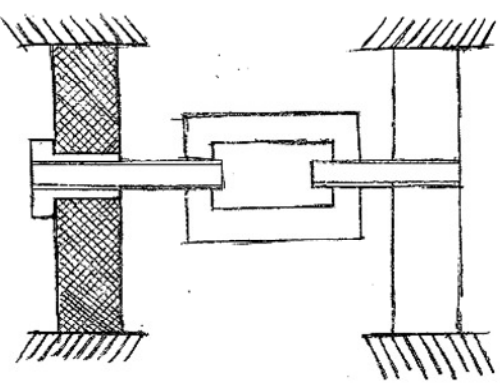
Afbeelding 92 Een Xylofoon.

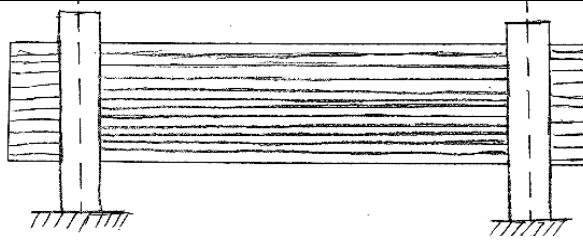
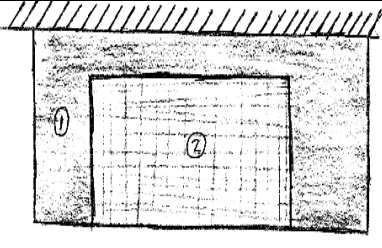
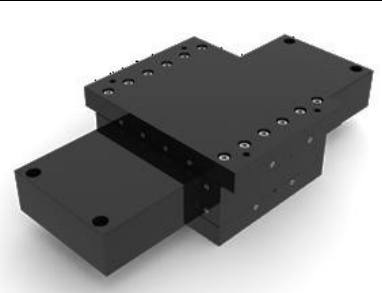
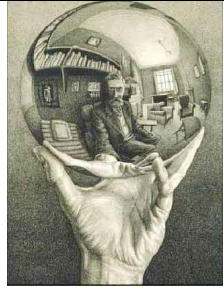
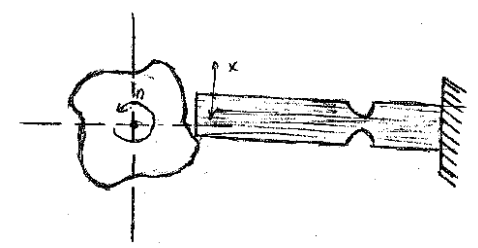
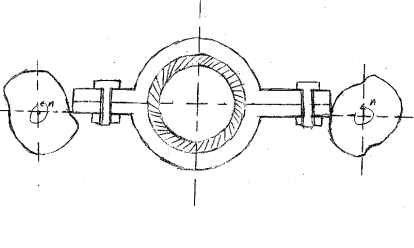
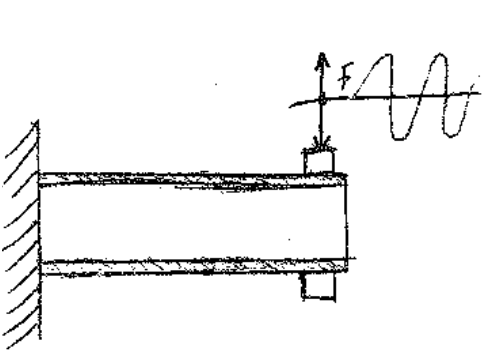


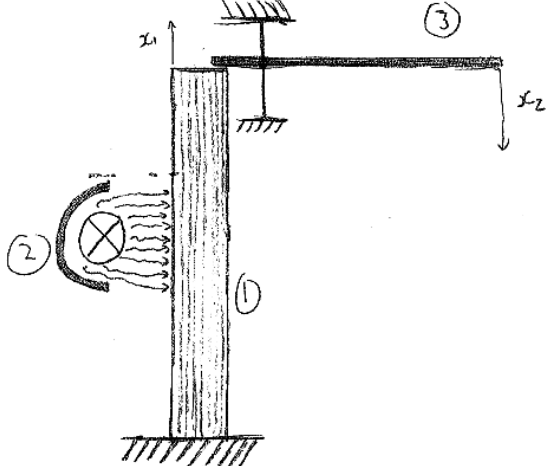
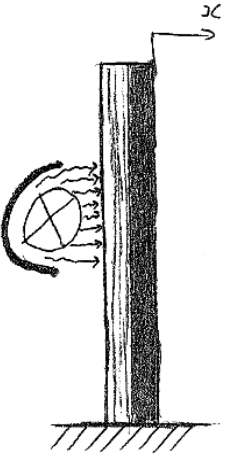
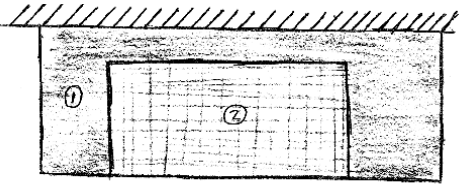
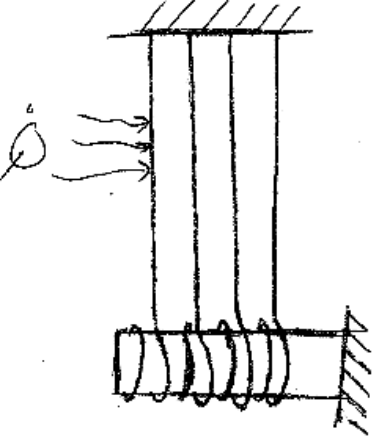
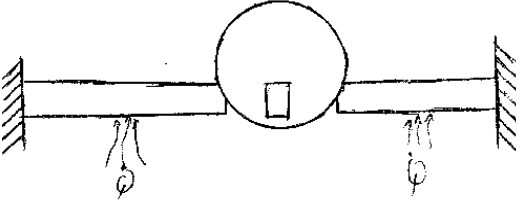
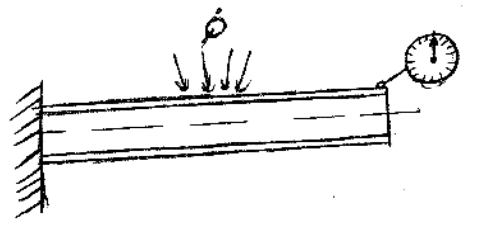
Afbeelding 93 Stemvorken.

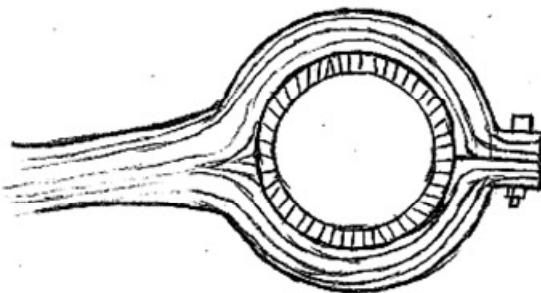
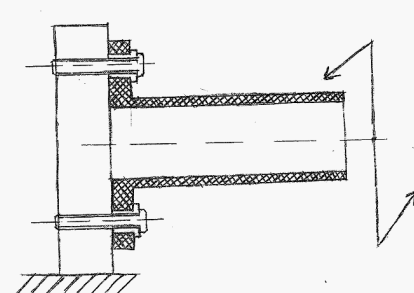
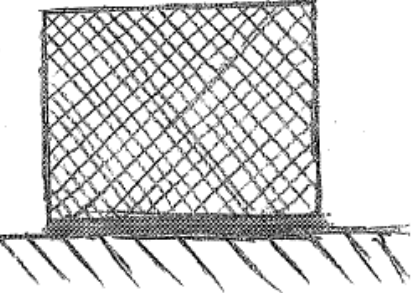
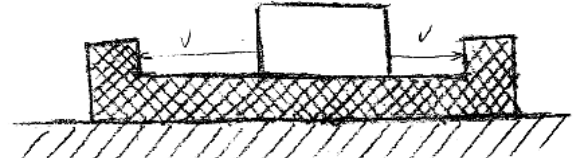
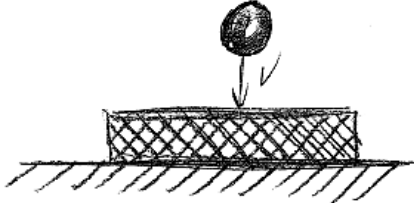
1.3 De morfologische kaart

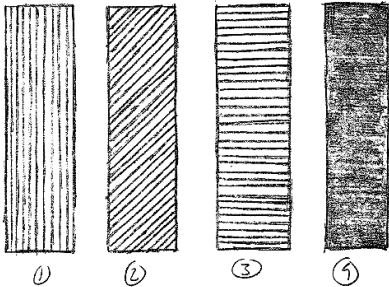
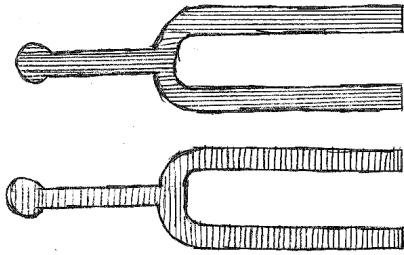
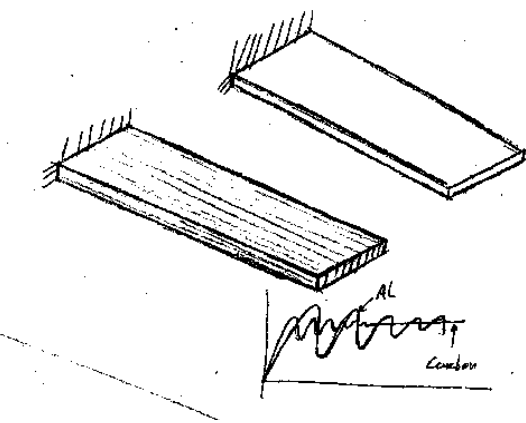
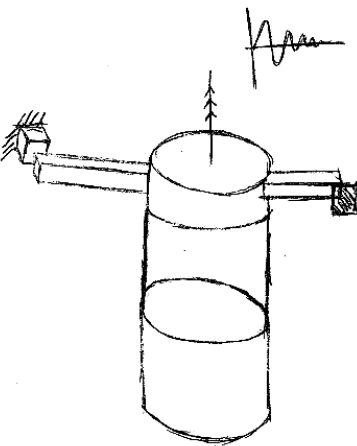
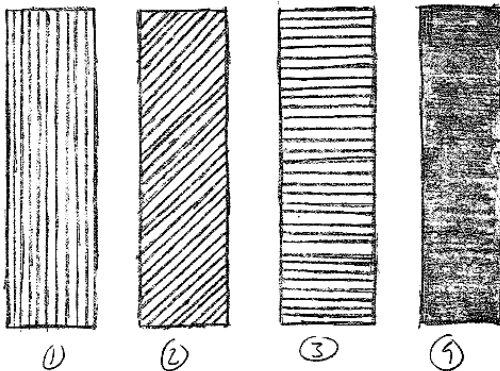
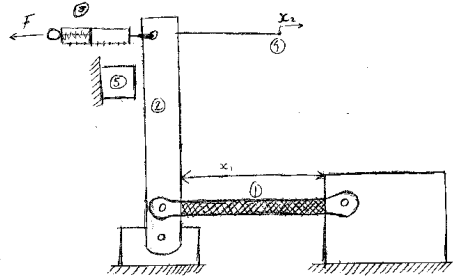
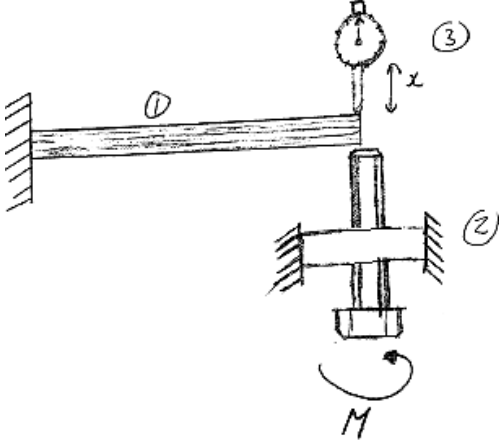
De opgestelde concepten zijn in de onderstaande morfologische kaart opgesomd zodat bij iedere eis een concept gekozen kan worden. De keuze argumenten kunnen ook in de morfologische kaart terug gevonden worden.

Eis	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4	Concept 5
Het gebruik van inserts in koolstofvezel onderdelen demonstreren.	 Het op buiging of torsie belasten van een door inserts verbonden as.	 Een trekkracht uitoefenen op een insert.	 Het buigen of torderen van een as verbonden aan de vaste wereld.	 Een bout kapot trekken voordat de insert bezwijkt.	 Een draadeind uit aluminium trekken met een draadspanner en een draadeind/ insert bevestigd in composiet.
Keuze / verwerping-argumenten	Nadeel: -In deze opstelling worden hoogstwaarschijnlijk voornamelijk de flenzen getest en niet de inserts.	Valt binnen concept 5.	Nadeel: -Geeft geen duidelijk vergelyk met een bekend materiaal als aluminium.	Valt binnen concept 5.	Voordelen: -Geeft een duidelijk vergelyk met een bekend materiaal. Waardoor mensen gevoelsmatig een referentie hebben. -Bevat concepten 2 en 4. Keuze

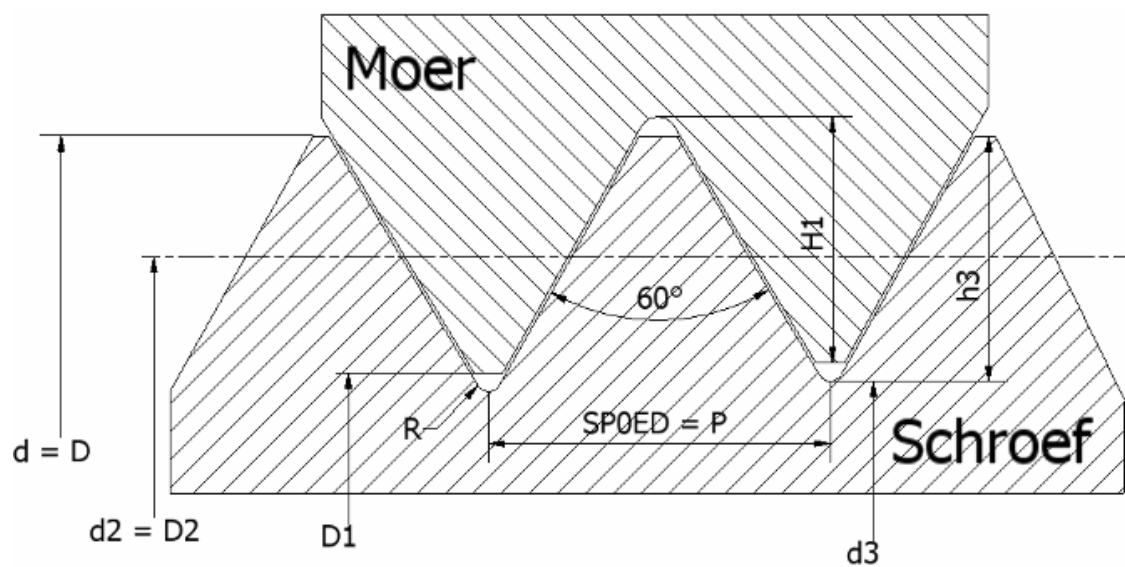
Het demonstreren van te halen maatvastheid bij het bewerken van koolstofvezel onderdelen.	 Verwisselbare onderdelen	 Onderdelen met een passing	 Een koolstofvezel luchtlager	 Een spiegel op een koolstofvezel vlak.
Keuze / verwerping-argumenten	Nadelen: -Het nabewerken toont voornamelijk de machinenauwkeurigheden aan. -De toleranties zijn niet met het oog zichtbaar maar moeten gemeten worden, daarom is de demonstratieve waarde laag. -De kostprijs van onderdelen met dergelijke toleranties is zeer hoog.	Nadelen: -Het nabewerken toont voornamelijk de machinenauwkeurigheden aan. -De toleranties zijn niet met het oog zichtbaar maar moeten gemeten worden, daarom is de demonstratieve waarde laag. -De kostprijs van onderdelen met dergelijke toleranties is zeer hoog.	Nadeel: -Om een luchtlager te laten functioneren is een compressor nodig, dit is niet praktisch voor een demonstrator.	Voordelen: -Makkelijk te integreren in een ontwerp. -Toont tevens aan dat het mogelijk is om coatings aan te brengen op composieten. Keuze
Het demonstreren van het vermoeiingsgedrag van koolstofvezel onderdelen.	 De vermoeiing van een gatscharnier of bladveer in aluminium en koolstofvezel.	 Vermoeiing door torsie belasting	 Een kracht op een as zetten met de eigenfrequentie van de as.	
Keuze / verwerping-argumenten	Voordelen: -Wordt in de praktijk vaak toegepast. -Goed realiseerbaar. -Door de nok aan te drijven met een carbon as wordt concept 2 verwerkt. -Door het bladveer of eventueel de as op eigenfrequenties te belasten wordt concept 3 verwerkt.	Valt in concept 1 te verwerken.	Valt in concept 1 te verwerken.	

De invloed van temperatuur op een koolstofvezel composiet demonstreren (expansie).	 De expansie van een aluminium en koolstofvezel balk demonstreren.	 Een "bimetaal".	 Het loslaten van een vaste passing.	 Snaren van koolstofvezel die een hogere toon krijgen door blootstelling aan warmte.	 Drie sprieten die door warmte krimpen en een bol laten vallen. Nadeel: -Om de benodigde krimp te realiseren worden de afmetingen van de sprieten te groot.
Keuze / verwerping-argumenten	Voordelen: -Geeft een duidelijk vergelijking tussen koolstofvezel en een bekend materiaal als aluminium. -Makkelijk te realiseren. -Is meetbaar. Keuze	Nadeel: -Levert geen kwantitatieve data.	Nadelen: -De kostprijs van onderdelen met dergelijke toleranties is zeer hoog. - Levert geen kwantitatieve data.	Nadeel: -Levert geen kwantitatieve data. -Lastig te realiseren.	 Een RVS buis die krom gaat staan door hem aan te raken en een koolstofvezelbuis die recht blijft. Is identiek aan concept 1 alleen de overbrengverhouding is anders vormgegeven.

De verbinding van koolstofvezel onderdelen aan de vaste wereld (aluminium of staal) demonstreren.			
	Een carbon as ingeklemd in een carbon flens.	Een bevestiging met inserts.	Het vastlijmen van een onderdeel.
Keuze / verwerping-argumenten	Nadeel: -Zal in de praktijk niet vaak toegepast worden omdat met inserts nauwkeuriger te werken valt.	Is te zien bij het onderwerp inserts.	Voordeel: -Makkelijk te integreren in een ontwerp. -Toont dat er behalve schroeven ook andere mogelijkheden zijn. Keuze
Het demonstreren van functionaliteit na een botsing.			
	Een bewegend onderdeel tegen carbon aanlopen laten botsen.	Een massa op een carbon onderdeel laten vallen.	
Keuze / verwerping-argumenten	Verschilt niet van concept 2 voor de aantoning. De botskracht wordt berekend aan de hand van de snelheden, stijfheden en massa's. Keuze a.d.h.v. de beste toepassingsmogelijkheden in het ontwerp	Verschilt niet van concept 1 voor de aantoning. De botskracht wordt berekend aan de hand van de snelheden, stijfheden en massa's. Keuze a.d.h.v. de beste toepassingsmogelijkheden in het ontwerp	

Het demonstreren van de invloed van de vezelrichting op de eigenschappen van het materiaal.	 De xylofoon.	 Stemvorken met verschillende vezel richtingen.			
Keuze / verwerping-argumenten	Voordelen: -Ludiek. -Goed waar te nemen. Keuze	Is hetzelfde als concept 1 alleen anders vormgegeven. Concept 1 is ludieker en is als een onderdeel toe te passen.			
Het demonstreren van een relatie tussen FEM-analyse en een echte belasting van een koolstofvezel onderdeel.	 Het verschil in natril tijd tussen een carbon en een stalen plaat demonstreren.	 De natrilling van een roterend blok op twee carbon veren demonstreren.	 De eigenfrequenties van verschillende platen analyseren.	 Een "trekbank".	 De buigstijfheid van een balk meten.
Keuze / verwerping-argumenten	Is concept 3 maar dan met een andere bevestiging.	Concept 3 is ludieker.	Voordelen: -Ludiek -Toont tegelijkertijd duidelijk de invloed van vezelrichtingen aan. -Goed voelbaar en hoorbaar. -Kan een duidelijke referentie geven met conventionele materialen als aluminium en staal. Keuze	Nadelen: -Is meer een meetapparaat dan een demonstrator. -Data kan veel beter op een trekbank verzameld worden.	Nadelen: -Is meer een meetapparaat dan een demonstrator. -Data kan veel beter op een trekbank verzameld worden.

1.4 De schroefdraad diameters



1.5 De eigenschappen van een composiet

De informatie uit deze paragraaf is overgenomen uit de bronnen 2, 3 en 10 (12). In het onderstaande stuk is getracht een korte samenvatting te geven.

Aangezien de eigenschappen van een composiet afhankelijk zijn van de lamellen en hun lay-up zal er in deze paragraaf eerst naar de eigenschappen van een lamel gekeken worden. Hierna zullen de eigenschappen van een composiet behandeld worden.

De eigenschappen van een lamel

De longitudinale (0 graden) elasticiteitsmodulus;

$$E_L = v_f E_f + v_m E_m$$

Hier zijn E_f en E_m de stijfheden van de koolstofvezels en de matrix en zijn v_f en v_m het volume percentage vezels en matrix.

Als een materiaal in de 0° richting rekt zal het in de 90° stuiken, het verband tussen deze rekken word beschreven door de dwarscontractiecoëfficiënt μ_{LT} ;

$$\mu_{LT} = v_f \mu_f + v_m \mu_m$$

Waar μ_f en μ_m staan voor de dwarscontractiecoëfficiënten van de koolstofvezels en de matrix.

De glijdingsmodulus in de longitudinale richting G_{LT} kan worden berekend met behulp van η_{LT} .

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{v_f}{v_f + \eta_{LT} v_m} * \frac{1}{G_f} + \frac{\eta_{LT} v_m}{v_f + \eta_{LT} v_m} * \frac{1}{G_m} \quad \text{en} \quad \eta_{LT} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{G_m}{G_f} \right)$$

Hier zijn G_f en G_m de glijdingsmoduli van de koolstofvezels en de matrix.

De compressiemodulus κ wordt berekend met behulp van uitzonderlijke compressiemoduli voor de vezel en de matrix (κ_f en κ_m) en η_K .

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{v_f}{v_f + \eta_K v_m} * \frac{1}{\kappa_f} + \frac{\eta_K v_m}{v_f + \eta_K v_m} * \frac{1}{\kappa_m} \quad \text{en} \quad \eta_K = \frac{1}{2(1 - \mu_m)} \left(1 + \frac{G_m}{\kappa_f} \right)$$
$$\kappa_{(f)} = \frac{E}{3(1 - \mu_{(f)})} \quad \text{en} \quad \kappa_{(m)} = \frac{E}{3(1 - \mu_{(m)})}$$

De transversale glijdingsmodulus (uit het vlak van de lamel) kan gebruik makend van η_{TT} berekend worden.

$$\frac{1}{G_{TT}} = \frac{\nu_f}{\nu_f + \eta_{TT}\nu_m} * \frac{1}{G_f} + \frac{\eta_{TT}\nu_m}{\nu_f + \eta_{TT}\nu_m} * \frac{1}{G_m} \quad \text{en} \quad \eta_{TT} = \frac{1}{4(1-\mu_m)} \left(3 - 4\mu_m + \frac{G_m}{G_f} \right)$$

Tevens kan de transversale elasticiteitsmodulus E_T berekend worden:

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1}{4G_{TT}} * \frac{1}{4\kappa} + \frac{\mu_{LT}^2}{E_L}$$

Conclusie

Uit de mechanische eigenschappen van de lamellen valt op te maken dat de stijfheid gevoeld bij de insert niet alleen wordt bepaald door de buigstijfheid van de plaat, maar ook door de transversale compressie stijfheid van de lamellen. Wanneer er met een lange en dunne plaat gewerkt wordt zal dit effect verwaarloosbaar zijn. Echter zal dit effect niet te verwaarlozen zijn wanneer de insert in een buig stijve plaat bevestigd wordt en men hoge eisen aan de stijfheid stelt. In de huidige opstelling zal er voornamelijk op sterkte geconstrueerd worden en niet op stijfheid, daarom zal de transversale compressie stijfheid niet meegenomen worden.

De stijfheidsmatrix van een lamel

In de standaard stijfheidsmatrix voor een lamel worden de spanningen (σ en τ), door gebruik te maken van de vectorstijfheid Q , gekoppeld aan rekken (ε en γ). Deze koppeling is gebaseerd op de wet van Hooke ($\sigma = E \cdot \varepsilon$). Wanneer men van een vlakspanningstoestand uitgaat ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$) levert dit de stijfheidsmatrix van afbeelding 94.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}$$

Afbeelding 94 De stijfheidsmatrix van een lamel.

Conclusie

In de stijfheidsmatrix van een lamel wordt er uitgegaan van een vlakspanning echter heerst er in de constructie ook een transversale spanning. De gebruikte calculator, die de composiet eigenschappen berekent, doet een waarschijnlijke aanname van de composiet eigenschappen in de transversale richting. Enige voorzichtigheid is dus geboden bij de interpretatie van eventuele FEM analyse resultaten.

De stijfheidsmatrix van een composiet

Met een aantal rekenkundige stappen zijn de stijfheidsmatrices van de aparte lamellen te combineren tot een stijfheidsmatrix voor het composiet (afb. 95).

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_6 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ \hline B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_6 \end{bmatrix}$$

Afbeelding 95 De stijfheidsmatrix van een composiet.

Conclusie

Een analyse van de stijfheidsmatrix uit afbeelding 95 onthult dat de koppelmatrix B lineaire krachten aan kromming en momenten aan lineaire rek koppelt. Dit betekent dat een koolstofvezelplaat kan torderen of buigen als er een trekkracht op het koolstofvezelcomposiet aangebracht wordt, tevens betekent dit dat er een vlakke rek kan ontstaan t.g.v. een moment. Om deze effecten, die vaak ongewenst zijn, te voorkomen zal het laminaat dusdanig samengesteld moeten worden zodat $B=0$. Er wordt aan deze voorwaarde voldaan wanneer men het composiet symmetrisch opbouwt t.o.v. zijn midden- hoogte lijn (bijv. een 0/90/90/0 lay-up).

Uit de matrix blijkt ook dat de vectorstijfheden A_{16} en A_{26} een kracht in het hoofdvlak koppelen aan een rek in het transversale vlak en een kracht in het transversale vlak aan een rek in het hoofdvlak. Om deze ongewenste effecten te voorkomen dienen de vectorstijfheden A_{16} en A_{26} gelijk te zijn aan 0, dit wordt bereikt door het composiet symmetrisch opbouwt t.o.v. zijn midden- lengte lijn (bijv. een 45/-45/-45/45 lay-up).

Verder koppelen de factoren D_{16} en D_{26} een buigmoment in het hoofdvlak aan een buiging in het transversale vlak en een buiging in het transversale vlak aan een buiging in het hoofdvlak. Om dit effect te voorkomen dient een laminaat onsymmetrisch t.o.v. zijn midden- hoogte lijn te zijn samengesteld (bijv. een -45/45 lay-up). Echter zal dit betekenen dat de B- matrix niet gelijk is aan nul. De factoren D_{16} en D_{26} zijn wel klein te houden door te werken met veel dunne lagen (bijv. een -45/45/-45/45/-45/45 lay-up i.p.v. een -45/-45/-45/45/45/45 lay-up). Wanneer de factoren D_{16} en D_{26} klein worden gehouden zal men er in de praktijk weinig hinder van ondervinden.

1.6 Validatie mesh-methode versterker

Om de mesh, gebruikt in Ansys voor het analyseren van de bladveer versterker, te valideren is er eerst een analyse van een simpele bladveer uitgevoerd. Wanneer men hand berekeningen uitvoert worden de volgende waarden voor spanning en uitwijking gevonden:

$$L_{\text{veer}} := 40 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad B_{\text{veer}} := 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad S_{\text{veer}} := 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$E_{\text{veer}} := 200 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$I_{\text{veer}} := \frac{B_{\text{veer}} \cdot S_{\text{veer}}^3}{12}$$

$$I_{\text{veer}} = 8.333 \times 10^{-13} \text{ m}^4$$

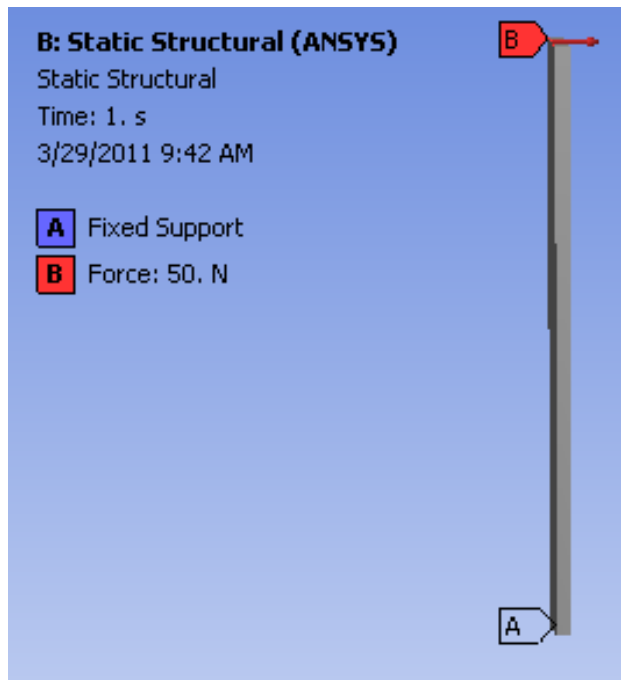
$$P := 50 \text{ N}$$

$$V_{\text{max}} := \frac{P \cdot L_{\text{veer}}^3}{3 \cdot E_{\text{veer}} \cdot I_{\text{veer}}} \quad V_{\text{max}} = 6.4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

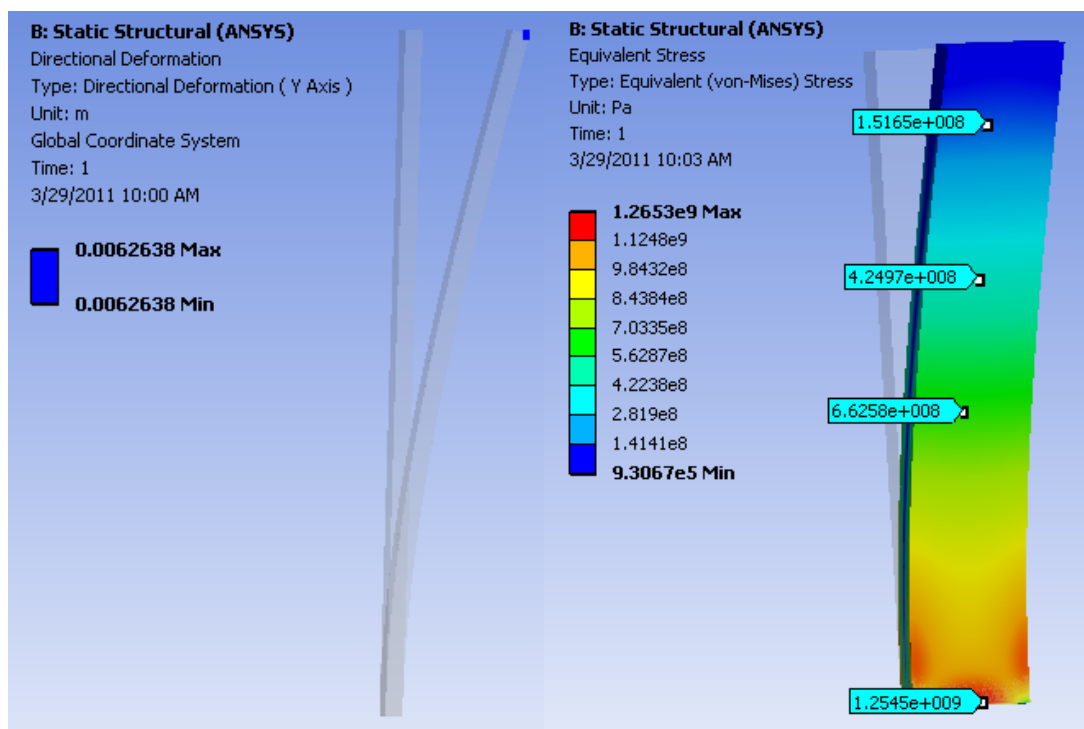
$$\sigma_b := \frac{P \cdot L_{\text{veer}} \cdot \frac{S_{\text{veer}}}{2}}{I_{\text{veer}}} \quad \sigma_b = 1.2 \times 10^9 \text{ Pa}$$

Wanneer we de veer in Meshen met de instellingen: Sweep-Method, Automatic, Number of divisions: 4 en een element size van 0.1mm. Het ene uiteinde van de veer fixeren met een fixed support en op het andere einde een kracht van 50N uitoefenen (zie afb. 96 pag.). Vinden we een spanningswaarde van 1265 MPa (afb. 97) en een uitwijking van 6.26mm (afb 98).

Conclusie: de gebruikte instellingen leveren een realistische waarde voor de uitwijking van/spanning in een bladveer.



Afbeelding 96 Inklemming en kracht.



Afbeelding 97 Uitwijking t.g.v. kracht.

Afbeelding 98 Spanning in bladveer.

1.7 Controle koolstofvezelcomposiet eigenschappen in Ansys.

Om te controleren of de koolstofvezelcomposiet eigenschappen op een juiste wijze in de FEM analyse verwerkt worden is er een simpele proef gehouden. Op een balk met de afmetingen 10x50x100mm is een trekkracht van 10kN aangebracht. Het ingevoerde composiet heeft een longitudinale stijfheid van 114GPa , de te verwachte verlenging van de plaat t.g.v. de kracht zal dus $1.75 \cdot 10^{-2}\text{mm}$ zijn (vergelijking 28).

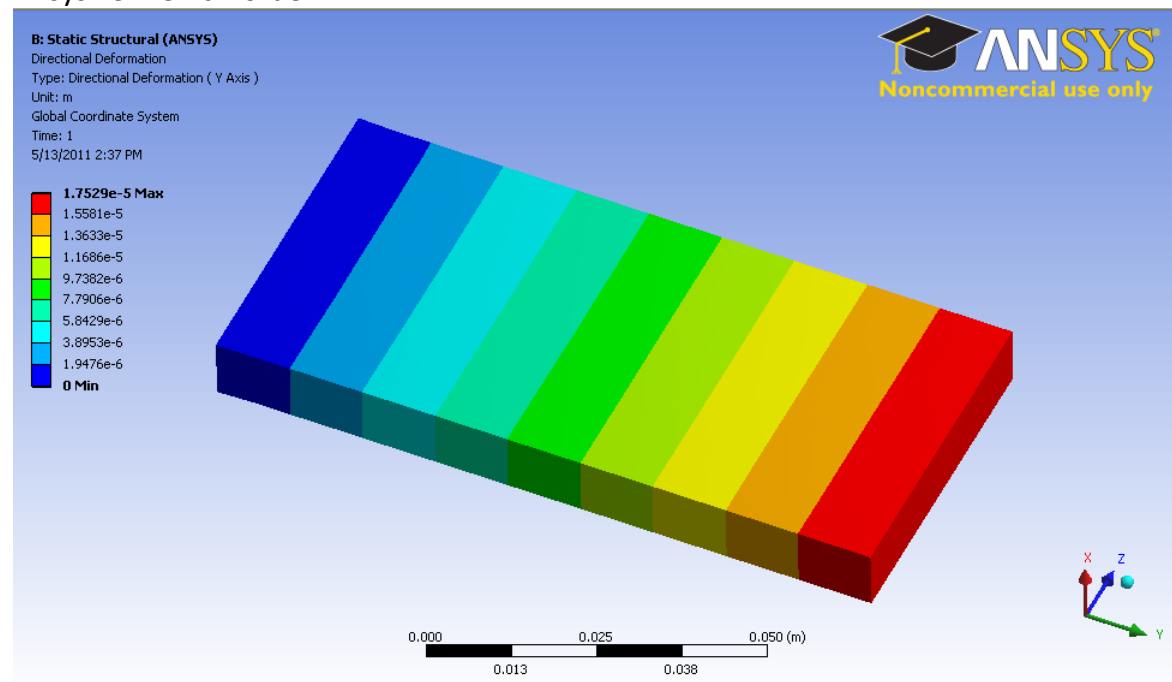
$$U = \frac{F}{C}$$

$$C = \frac{E \cdot A}{L} = \frac{114 \cdot 10^3 \cdot 500}{100} = 5.7 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$U = \frac{1 \cdot 10^4}{5.7 \cdot 10^5} = 1.75 \cdot 10^{-2} \text{mm}$$

Vergelijking 28 De verwachte verlenging van de plaat.

Uit de FEM analyse komt ook een waarde van $1.75 \cdot 10^{-2}\text{mm}$ (afb. 99). Het kan dus geconcludeerd worden dat het composiet eigenschappen op een juiste wijze door Ansys verwerkt worden.



Afbeelding 99 De rek van de composieten plaat.

1.8 De eigenschappen van de Xylofoon composieten

1.8.1 Het composiet met de stijfheid van 42GPa

The laminate has the following constants:

E_1 : 42.0 GPa	G_{12} : 29.59 GPa	ν_{12} : 1.3
E_2 : 11.66 GPa	G_{23} : 4.39 GPa	ν_{23} : 0.29
E_3 : 10.87 GPa	G_{31} : 4.39 GPa	ν_{31} : 0.29

The matrices of this laminate are:

A		
394.051	141.892	0.0
141.892	109.383	0.0
0.0	0.0	147.97

B		
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0

D		
804.973	303.412	51.737
303.412	228.241	21.285
51.737	21.285	316.074

#	Material	Angle	Thickness
1	Torayca prepeg	32°	0.2 mm
2	Torayca prepeg	-32°	0.2 mm
3	Torayca prepeg	32°	0.2 mm
4	Torayca prepeg	-32°	0.2 mm
5	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
6	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
7	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
8	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
9	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
10	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
11	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
12	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
13	Torayca prepeg	0°	0.2 mm
14	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
15	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
16	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
17	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
18	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
19	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
20	Torayca prepeg	-33°	0.2 mm
21	Torayca prepeg	33°	0.2 mm
22	Torayca prepeg	-32°	0.2 mm
23	Torayca prepeg	32°	0.2 mm
24	Torayca prepeg	-32°	0.2 mm
25	Torayca prepeg	32°	0.2 mm

The material Torayca prepeg is unidirectional

E_l : 139.24 GPa	α_l : 0.0 °C ⁻¹	G_{lt} : 4.39 GPa	ν_{lt} : 0.29
E_t : 10.87 GPa	α_t : 0.0 °C ⁻¹	G_{tt} : 3.81 GPa	ν_{tt} : 0.43

1.8.2 Het composiet met de stijfheid van 51.8 GPa

The laminate has the following constants:

E_1 : 51.81 GPa	G_{12} : 26.97 GPa	ν_{12} : 1.37
E_2 : 11.14 GPa	G_{23} : 4.39 GPa	ν_{23} : 0.29
E_3 : 10.87 GPa	G_{31} : 4.39 GPa	ν_{31} : 0.29

The matrices of this laminate are:

A		
435.913	128.776	0.0
128.776	93.753	0.0
0.0	0.0	134.854

B		
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0

D		
895.884	274.474	52.06
274.474	195.206	16.99
52.06	16.99	287.136

#	Material	Angle	Thickness
1	Torayca prepeg	29°	0.2 mm
2	Torayca prepeg	-29°	0.2 mm
3	Torayca prepeg	29°	0.2 mm
4	Torayca prepeg	-29°	0.2 mm
5	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
6	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
7	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
8	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
9	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
10	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
11	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
12	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
13	Torayca prepeg	0°	0.2 mm
14	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
15	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
16	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
17	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
18	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
19	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
20	Torayca prepeg	-30°	0.2 mm
21	Torayca prepeg	30°	0.2 mm
22	Torayca prepeg	-29°	0.2 mm
23	Torayca prepeg	29°	0.2 mm
24	Torayca prepeg	-29°	0.2 mm
25	Torayca prepeg	29°	0.2 mm

The material Torayca prepeg is unidirectional

E_l : 139.24 GPa	α_l : 0.0 °C ⁻¹	G_{lt} : 4.39 GPa	ν_{lt} : 0.29
E_t : 10.87 GPa	α_t : 0.0 °C ⁻¹	G_{tt} : 3.81 GPa	ν_{tt} : 0.43

1.8.3 Het composiet met de stijfheid van 66.44 GPa

The laminate has the following constants:

E_1 : 66.44 GPa	G_{12} : 23.34 GPa	ν_{12} : 1.4
E_2 : 10.8 GPa	G_{23} : 4.39 GPa	ν_{23} : 0.29
E_3 : 10.87 GPa	G_{31} : 4.39 GPa	ν_{31} : 0.29

The laminate has the following CTE constants:

In plane	Curvature
α_1 : 0.0 °C ⁻¹	α_{c1} : 0.0 °C ⁻¹
α_2 : 0.0 °C ⁻¹	α_{c2} : 0.0 °C ⁻¹
α_{12} : 0.0 °C ⁻¹	α_{c12} : 0.0 °C ⁻¹

The matrices of this laminate are:

A		
486.796	110.632	0.0
110.632	79.159	0.0
0.0	0.0	116.71

B		
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0

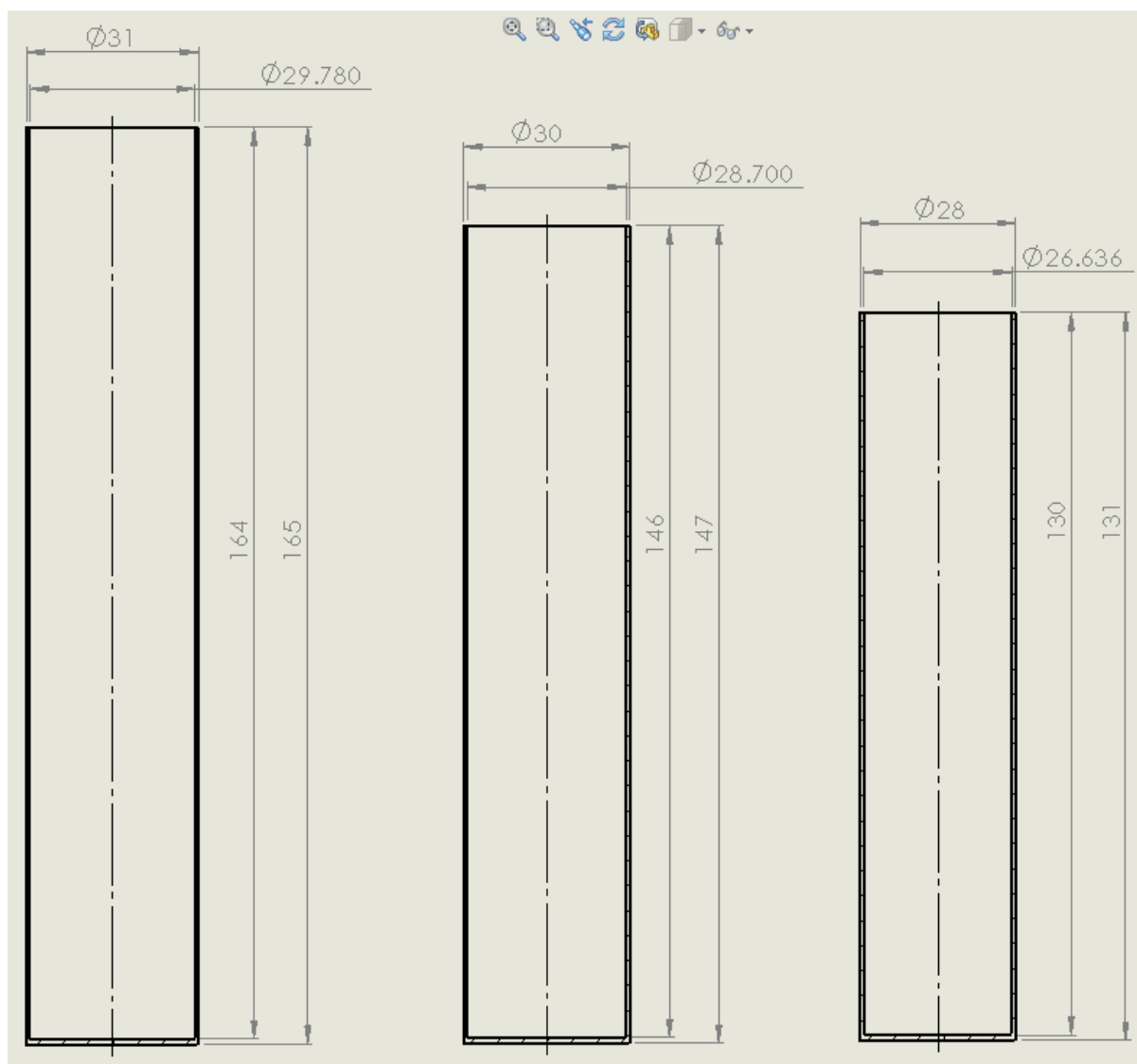
D		
991.721	240.109	51.016
240.109	168.099	12.592
51.016	12.592	252.771

#	Material	Angle	Thickness
1	Torayca prepeg	27°	0.2 mm
2	Torayca prepeg	-27°	0.2 mm
3	Torayca prepeg	25°	0.2 mm
4	Torayca prepeg	-25°	0.2 mm
5	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
6	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
7	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
8	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
9	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
10	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
11	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
12	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
13	Torayca prepeg	0°	0.2 mm
14	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
15	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
16	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
17	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
18	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
19	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
20	Torayca prepeg	-26°	0.2 mm
21	Torayca prepeg	26°	0.2 mm
22	Torayca prepeg	-25°	0.2 mm
23	Torayca prepeg	25°	0.2 mm
24	Torayca prepeg	-27°	0.2 mm
25	Torayca prepeg	27°	0.2 mm

The material Torayca prepeg is unidirectional

E_l : 139.24 GPa	α_l : 0.0 °C ⁻¹	G_{lt} : 4.39 GPa	ν_{lt} : 0.29
E_t : 10.87 GPa	α_t : 0.0 °C ⁻¹	G_{tt} : 3.81 GPa	ν_{tt} : 0.43

1.9 De afmetingen van de versterkingsbuisjes



2 Digitale bijlagen

In de digitale bijlagen zijn de volgende bestanden terug te vinden:

- Het eindverslag.
- De 3-D modellen van de demonstrators.
- De FEM analyses van de demonstrators.
- Het laminaten programma. Let wel dat dit nog een testversie is en dat niet alle functies naar behoren werken.