

An-Kristiina Wiik

Ajoneuvon sandwich-paneelin kennorakenteen optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

11.2.2018

Tekijä Otsikko	An-Kristiina Wiik Ajoneuvon sandwich-paneelin kennorakenteen optimointi
Sivumäärä Aika	53 sivua + 1 liite 11.2.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Esimiestyö ja johtaminen
Ohjaaja	Lehtori, Juha Kotamies
<p>Työn tarkoituksena oli tutkia, voitaisiinko Formula Student -auton sandwich-rakenteiset sivupaneelit valmistaa kevyemmästä, mutta Formula Student Germany -säännöt täyttävästä lujasta materiaalista. Työn toimeksiantajana toimi Metropolia Motorsport.</p> <p>Pintalevyjen ongelmana ollut liian suuren kovuuden aiheuttama hauras käyttäytyminen ratkaistiin vaihtamalla kuidun ja sideaineen materiaalit sekä laatimalla paksummat pintalevyt. Pintalevyt suunniteltiin tehtäväksi PBO-kuidusta sekä BMI-sideaineesta, latomalla 16 kerrosta kuitua ja paksuudeksi tuli 7 mm. Liimauksessa ongelmana ollut liitoksen liian alhainen lujuus sekä pinnanmyötö ratkaistiin vaihtamalla elastiseen, mutta lujaan adheesioaineeseen.</p> <p>Ytimessä päädyttiin käyttämään sekä kennoa että paisutettua vaahtoa. Paneelin ydinmateriaaliksi valikoitui näin ollen rakennetta vahvistava Nomex-kenno, jonka solut täytettiin kuituun kääriytyllä taipuisalla paisutetulla vaahdolla, tarkemmin taipuisalla x-aerogeelillä. Kenno paksuus suunniteltiin olevan 10 mm.</p> <p>Toivottua painosäästöä ei saavutettu, mutta paneeli täyttää sääntömääräiset vaatimukset. Lisäksi paneelin edelleenoptimointi voisi osoittautua hyödylliseksi, sillä kaikkea ei saatu sisällytettyä tämän työn piiriin.</p>	
Avainsanat	sandwich-paneeli, aerogeeli, PBO, kuitu, motorsport

Author(s) Title	An-Kristiina Wiik Optimization of the vehicle side panel core structure
Number of Pages Date	53 pages + 1 appendices 11th February 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials Technology and Surface Engineering
Specialisation option	
Instructor	Juha Kotamies, Lecturer
<p>The aim of this thesis was to investigate that if Formula Student vehicle's sandwich structure side panels could be manufactured from any lighter yet durable material that fulfil the vehicle requirements and regulations of Formula Student Germany. This thesis was commissioned by Metropolia Motorsport.</p> <p>The final design of the sandwich panel uses different faceskin materials, which means that the thickness from one millimetre carbon-epoxy has been replaced by a seven millimetre PBO-BMI faceskin, and the core materials and adhesive substance have been changed entirely. This was because the faceskin tended to behave brittly and was exceedingly thin compared to an aluminium honeycomb core. Furthermore, the adhesive substance did not create a strong enough bandage.</p> <p>Therefore, the selected core structure was a Nomex honeycomb, whose cells were filled with fibre wrapped rigid foam, more precisely x-Aerogel blocks. Nomex honeycomb was chosen to stiffen the structure more and to hold the aerogel blocks efficiently in place. Honeycomb height was designed to be 10 mm. Then the adhesive substance was considered, and a more elastic yet strong adhesive material was used.</p> <p>Nonetheless, the desired lighter weight sandwich-panel design was not reached, but the designed panel fulfils the vehicle requirements and regulations of Formula Student Germany. Ultimately, further optimization would be highly useful, for all the areas of sandwich-panel optimization were not fitted in this thesis.</p>	
Keywords	Sandwich panel, aerogel, PBO, fiber, motorsport

Sisälllys

1	Johdanto	1
2	Sandwich-paneeli	1
2.1	Teoria	1
2.1.1	Euler-Bernoullin palkkiteoria	8
2.1.2	Vaurioitumismekanismit	13
3	Kennorakenteen optimointi	18
3.1	Paneelin suunnittelun kriteerit	18
3.2	Formula Student Germany -sääntöjen asettamat vaatimukset	19
3.3	Nykyiset sandwich-paneelit	20
3.3.1	Design	20
3.3.2	Vuoden 2017 sivupaneelin tekniset ominaisuudet	21
3.4	Materiaalisuunnitelma	23
3.4.1	Pintalevyt	23
3.4.2	Ydin	28
3.4.3	Liima	34
3.5	Laskenta	36
3.6	Valmistus	41
3.7	Materiaalien testaussuunnitelma	44
3.7.1	Kolmipistetaivutustesti	44
3.7.2	Lävistystesti	45
3.7.3	Turpoamisen ja vedenimeytymisen testaus	46
3.7.4	Liimaliitoksen lujuustestaus	48
4	Yhteenveto	52
	Lähteet	54

Liite 1 Kevlar-, Nomex- ja alumiinikennojen lujuus-tiheysvertailu

1 Johdanto

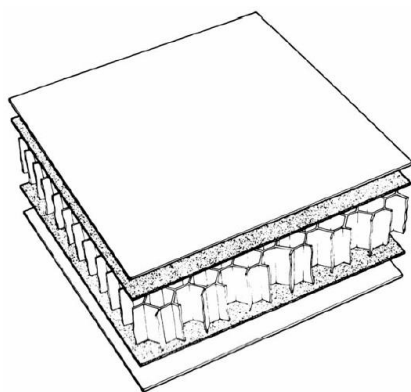
Työn tarkoituksena oli tutkia, voitaisiinko Formula Student -auton sandwich-rakenteiset sivupaneelit valmistaa kevyemmästä, mutta säännöt täyttävästä lujasta materiaalista. Työn toimeksiantajana toimi Metropolia Motorsport.

Materiaalitekniiseen vertailuun valikoitiin toimeksiantajan pyynnöstä alumiini-, Kevlar- ja Nomex-kennomateriaalit. Tämän jälkeen tarkasteltiin kaikkia mahdollisia ydinmateriaaleja optimaalisimman löytämiseksi. Työssä sivutaan myös pintalevyjen sekä liimauksen optimointia. Näin siksi, että jokainen paneelin komponentti vaikuttaa merkittävästi sen mekaanisiin ominaisuuksiin, ja tämä on huomioitava ytimen optimoinnissa.

2 Sandwich-paneeli

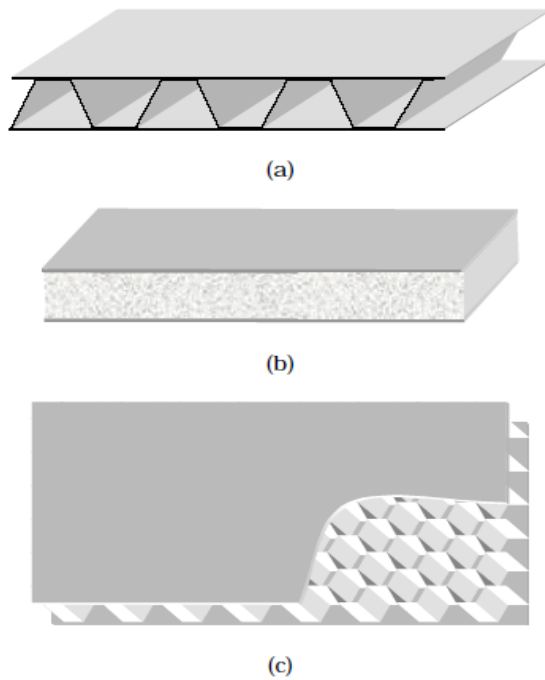
2.1 Teoria

Sandwich-rakenteella tarkoitetaan kolmikerrosrakennetta, joka koostuu kolmesta pääkomponentista, kahdesta pintalevystä ja ytimestä, kuva 1, minkä vuoksi sandwich-rakenteet luokitellaan komposiittimateriaaleiksi. Pääkomponenteista yhdistetään korkean suorituskyvyn materiaaleja.

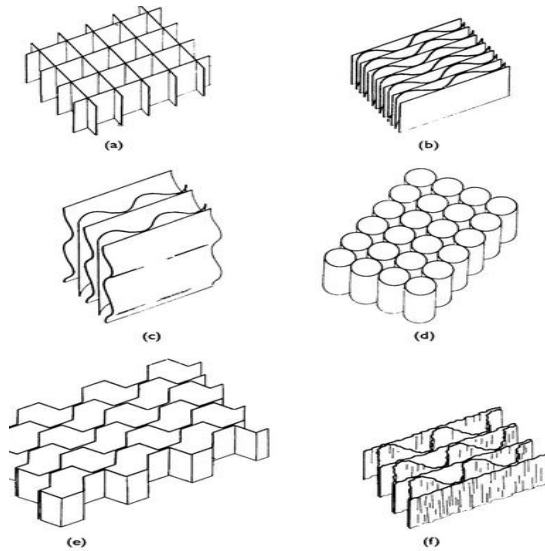


Kuva 1. Kolmikerros-sandwich-rakenne kenno-ytimellä. [1.]

Monissa tutkimuksissa on osoitettu, että sandwich-paneelit ovat moniin sovelluksien vaatimuksiin paremmat kuin tavanomaiset komposiitit. Syynä tähän on se, että monikerrosrakenteita on alkujaan lähdetty kehittämään, kun eri sovelluskohteissa on tarvittu luja materiaalia, mutta niissä massa tulee pitää minimisään. Sandwich-paneelien käyttökohteita ovat muun muassa, ilmailu-, avaruus-, meri-, ajoneuvo- sekä rakennusteollisuus. [1.] Sandwich-paneelien tyypillisimmät ydinrakenteet ovat paisutettu vaahto, kenno ja aaltolevy, kuva 2 ja 3.



Kuva 2. Monikerrosrakenne, (a) aaltolevy, (b) paisutettu vaahto ja (c) kenno-ydin. [1.]



Kuva 3. Kennojen solutyyppejä [2].

Meriteollisuudessa komposiittien hyödyntäminen alkoi 1950-luvulla, sillä tuolloin havaittiin lasikuituosien valmistamisen olevan edullisempää. Kilpa-autoissa auton runko valmistetaan komposiiteista, millä saadaan parannettua ajajan ajoturvallisuutta per massa yksikkö. Viimeisinä vuosikymmeninä meriteollisuuden sekä avaruusteollisuuden komposiitti sekä sandwich-rakente-ratkaisuja on sovellettu myös kuluttajatasen tuotteisiin, esimerkiksi urheilu-välineet, tennis- ja squash-mailat, airot ja polkupyörät. [1; 3; 4.]

Materiaalitekniiseen suunnitteluun monikerroskomposiittirakenteet antavat lisää mahdollisuuksia räätälöidä tuotteiden rakenteellisia ominaisuuksia entistäkin pidemmälle. Tämä johtaa siihen, että rakenteista tulee monimutkaisempia, mutta rakenteiden tehokkuutta pyritään ja ainakin osin pystytään lisäämään.

Sandwich rakenteen suorituskyky perustuu sen diskreettiseen rakenteeseen, missä suuren puristus- ja leikkauslujuuden omaava ydinmateriaali on kiinnitetty suoraan suurilujuuksikseen pintamateriaaliin. Ydinmateriaali kiinnitetään pintalevyihin tyypillisesti adheesio- eli liimakalvolla, -nesteellä tai -tahnalla. Liimaamisen tarkoituksena on komponenttien yhdistämisen lisäksi tarkoitus pystyä siirtämään leikkaus- ja aksiaaliset kuormitukset ytimeen ja tarvittaessa pois ytimestä. Liimauksen jälkeen tyypillisesti liitokset kovetetaan lämmöllä ja paineella, mutta toiset liimat kovettuvat myös huoneenlämmössä. Adheesioaineen valinnassa on otettava huomioon, että sen mekaaniset sekä termiset ominaisuudet ovat yhteensopivat sekä pinta- että ydinmateriaalin kanssa. Erityistä huomiota tulee kiinnittää materiaalien lämpölaajenemiseroihin.

Sandwich-rakenteen toimintaa verrataan usein I-palkkiin. Näin siksi, että sandwich-rakenne käyttäytyy I-palkin tavoin taivutuksen alaisena. Sandwich-rakenteen pintalevyt vastustavat puristus- ja vetojännityksiä, samaan tapaan kuin I-palkin ulkoreunat. Ydin puolestaan vastustaa leikkausjännityksiä, kasvattaa rakenteen jäykkyyttä pitämällä pintalevyt erillään toisistaan ja on paranneltu I-palkki, sillä kennosto tukee ja jäykistää pintalevyjä koko pinta-alalta. [1; 3; 5.]

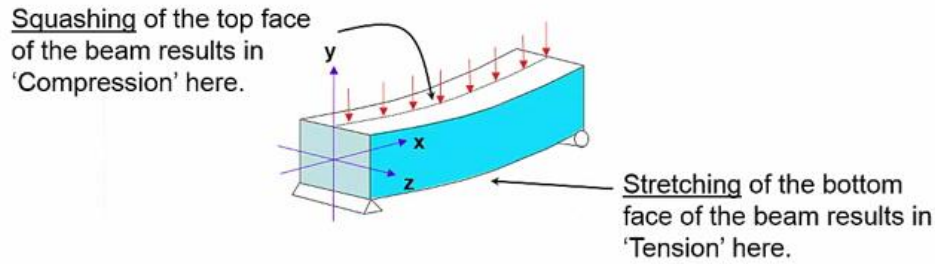
Tavanomaisesti sandwich-paneelin ulkopinnat ovat materiaaliltaan esimerkiksi

- puuta (balsapuuta)
- polymeeriä
- kuitu lujitettua muovia (kesto- ja kertamuovit)
- komposiittia
- metallia
- aramid-levyä
- keraamia
- kiveä.

Ydinmateriaalina puolestaan käytetään muun muassa seuraavia materiaaleja:

- Nomex, Korex, Kevlar, lasikuitu, hiilikuitu, alumiini (teksturoitu kenno-rakenne)
- alumiini, teräs, polyuretaani, epoksi, Nomex eli, hartsiin kastettua aramid kuitua (paisutettu vaahto)
- metalli, polymeeri (aaltolevy)
- muu kiinteä materiaali (balsapuu, epoksi) [6; 7].

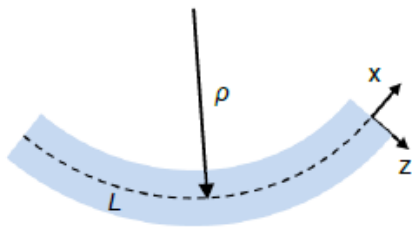
Sandwich-paneelin lujuus ilmenee parhaiten sen altistuessa taivutukselle, jolloin yhdelle pinnalle kohdistuu vetoa ja toiselle puristusta, kuva 4. Ytimen tehtävänä on pitää pintalevyt erillään toisistaan, mutta yhdessä, niin ettei paneeli nurjahda, muuta muotoaan, murru tai katkea. Toisin sanoen, ytimen ideana on pitää levyt staattisesti paikoillaan ja oikeassa suhteessa toisiinsa nähden niin, että rakenteen jäyhyysmomentti on suurempi kuin yksittäisten komponenttien.



Kuva 4. Ylempänä on havainnollistettu kuormituksen aiheuttamia puristusjännityksiä ja alempana on taivutuskuormituksen aiheuttamia vetojännityksiä [8].

Normaaliakseli sijaitsee pisteessä, jossa puristus- ja vetojännitysten summa on nolla.

Kuvissa 5 ja 6, p on kuormitus ja katkoviiva on kappaleen neutraaliakseli.



Kuva 5. Kaavakuva palkin taivutuksesta [26].

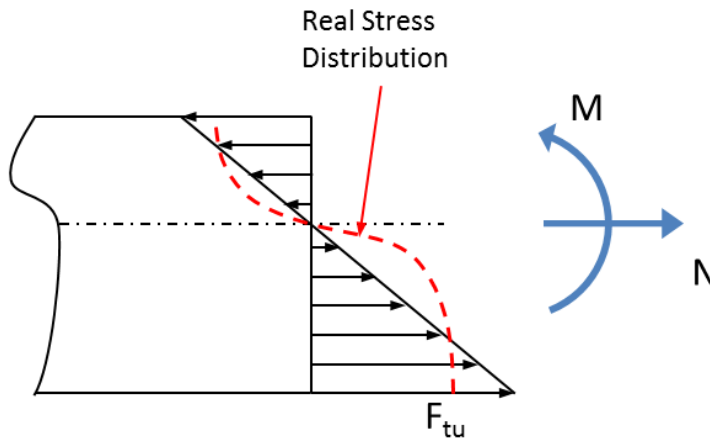
Taivutuksessa halutaan tietää muun muassa taivutuslujuus, eli kuinka paljon kappale kestää kuormitusta ennen murtumista. Lisäksi materiaalin taivutuslujuuden halutaan pysyvän alle kappaleen myötölujuuden.

Maksimi taivutuslujuus ilmenee palkin ylä- ja alapinnoilla, kun taipuman, y , arvo on suurin. Kuvassa 5 on osoitettu taivutuksessa olevan palkin puristusjännitys ja vetojännitys-jakauma, missä vasemmalle osoittavat mustat nuolet kuvaavat puristusta ja oikealle suuntautuneet vetojännitystä. Jännitysjakuumalaskenta esitetään monesti lineaarisena, sillä se on yksinkertaisempi laskennan kannalta ja on oletettu jakauma, mutta se ei päde todellisen jakauman kanssa. Todellinen jännitys-jakauma on kuvattu punaisella katkoviivalla. M on sisämomentti ja N on neutraaliakseli. Toisinaan projekteissa unohdetaan, että lineaarinen esitystapa ei päde käytäntöön ja tästä voi seurata pahimmillaan koko rakenteen sortuminen. [1.]

Taivutuksen aiheuttaman voiman suuruus poikkileikkauspintaan voidaan laskea yhtälöstä,

$$F = \int_A \sigma dA = E \times K \times \int_A y dA \quad (1)$$

Jossa σ = kimmomoduuli



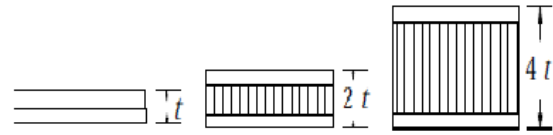
Kuva 6. Palkin jännitysjaakauma taivutuksessa [9].

Taulukko 1. on laadittu havainnollistamaan sandwich-rakenteen taivutusjäykkyys-lujuus eroa, verrattuna yksittäisiin pintalevyihin, hyödyntäen klassista palkkiteoriaa eli Euler-Bernoullin palkkiteoriaa. Se on yksinkertaistettu versio lineaarisesta kimmoisuus teoriasta, katso kohta 2.1.1 ja 2.1.2. Taulukossa 1, t on yksi yhtenäinen palkki, $2t = t/2$ eli palkki on halkaistu kahtia ja ydinmateriaali laitettu väliin ja $4t = t/4$. Jokaisessa tapauksessa pintalevyjen materiaalivahvuus on sama. Taulukosta voidaan nähdä, että paneeli $2t$ on massaltaan vain 2,92 % painavampi kuin t , kaava 2. $4t$ on 5,66 % painavampi, kuin t .

$$1 - (t / 2t) = 1 - (1,00 / 1,03) = 0,0292 \approx \mathbf{2,92 \%} \quad (2)$$

Painoero ei ole merkittävä, kun katsotaan jäyhyyksien ja lujuuksien kasvua. $2t$:n jäyhyys oli seitsemän kertaa suurempi, kuin t :n ja $4t$:n jäyhyys oli puolestaan 37 kertaa suurempi, kuin t :n. Puolestaan $2t$:n lujuus oli 3,50 kertaa suurempi kuin t :n ja 9,20 kertaa suurempi kuin $4t$:n.

Taulukko 1. Sandwich-paneelin rakenteellinen tehokkuus suhteessa massaan. [1.]



Suhteellinen taivutusjäyhyys	1,00	7,00	37,00
Suhteellinen taivutuslujuus	1,00	3,50	9,20
Suhteellinen massa	1,00	1,03	1,06

Sandwich-paneelin kaltaisen rakenteen massa on jonkin verran suurempi kuin yksittäisten komponenttien. Painoerojen suuruuserot riippuvat käytettävien komponenttien materiaaleista. Kuitenkin rakenteen on havaittu olevan tehokkaampi rakenteeltaan vastustamaan taivutus- ja nurjahduskuormituksia kuin tavanomaisten komposiittirakenteiden. [1; 10.]

Pääasiallinen rasitus, jolle ydin altistuu, on niin kutsuttu leikkausjännitys. Leikkausjännityksessä pintalevyt pyrkivät liukumaan toistensa suhteen. Ydinmateriaalin lujuus määritetään sen leikkausominaisuuksien mukaan. Paneelin lujuus puolestaan määrittyy pääosin ydinmateriaalin ominaisuuksien sekä ytimen paksuuden mukaan. Kennoydinmateriaalin ominaisuuksiin vaikuttaa lisäksi vielä solujen muoto ja koko.

Kennomateriaalien solumuotoja on tyypillisesti kaksi, heksagoninen ja suorakaide. Heksagonisella solurakenteella saadaan samalla materiaalimäärällä minimitiheys. Puolestaan suorakaide solurakenne on helpompi muovata W-suunnassa. Suorakaide solurakenteen heikkoutena voidaan pitää vähäisempää satulakaareutumista suhteessa heksagonisen kennon solurakenteeseen. Satulakaareutumisella tarkoitetaan pinnan taipumista tason tangentin ympärillä, kuitenkin niin, ettei taipunut pinta saavuta tangenttia missään pisteessä. Kyseistä taipumista kutsutaan negatiiviseksi taipumaksi ja satulakaareutumiseksi. [5; 11.]

Yleensä myös paneelien reunat suojataan adheesiomateriaalilla, jotta paneelille saadaan lisää jäykkyyttä eikä ydinmateriaali vaurioituisi erityisesti tahattomassa sivusuunnassa rasituksessa. Ilman paneelin kylkien suojausta pintalevyt liukuvat toistensa suhteen helposti, erityisesti taipuisien ytimien kohdalla, joiden kimmomoduuli on alhainen.

Kun ydinmateriaalia taivutetaan materiaalin murtolujuuden ohi, niin taivutettavan kappaleen pinta, johon kohdistuu vetoa, murtuu ensimmäisenä. Tällöin alhainen kimmomoduuli muodostuu ongelmaksi, sillä materiaalin murtamiseen vaadittava voima jää alhaiseksi. [10.]

2.1.1 Euler-Bernoullin palkkiteoria

Euler-Bernoullin palkkiteoria on yksinkertainen laskentamalli, jonka avulla voidaan laskennallisesti määrittää, kuinka paljon palkki taipuu kuormituksen alaisena. Teoria julkaistiin ensimmäisen kerran jo 1700-luvulla ja sitä on käytetty paljon, muun muassa Eiffel-tornin rakennesuunnittelussa ja alkuperäisessä maailmanpyörässä. Teoriaa on sittemmin paljon sovellettu mekaniikka-, yhdyskunta- ja rakennusteknisiin projekteihin. Teoriasta on kehitetty myös edistyneempiä laskentamalleja, joita voidaan hyödyntää moderneissa tekniikan projekteissa, mutta Euler-Bernoullin palkkiteoriaa käytetään edelleen usein sen yksinkertaisuuden vuoksi. [4; 12.]

Euler-Bernoullin yhtälö yleisessä muodossa

$$\frac{d^2}{dx^2} \times \left(EI \times \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = q \quad (3)$$

Jossa E = kimmomoduuli

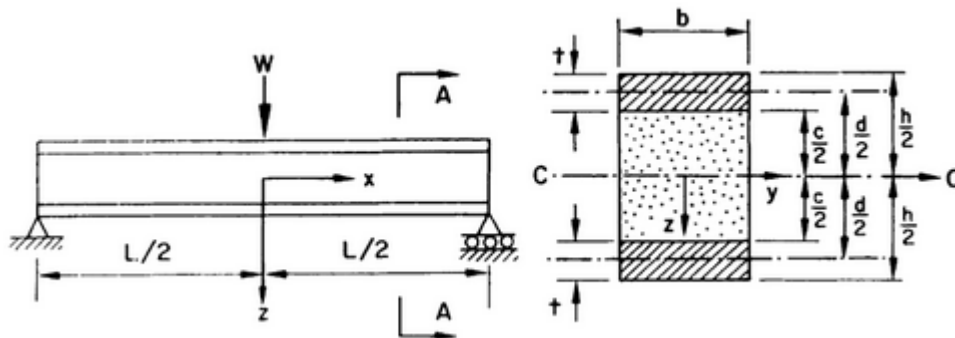
I = palkin poikkileikkauksen aksiaalinen jäyhyysmomentti

Yhtälöllä lasketaan palkin taipuman suhde kuormittavaan voimaan. Yhtälössä $w(x)$ tarkoittaa palkin taipumaa z-suunnassa, mutta paikassa x. Tämä tarkoittaa, että q on jakautunut kuorma. Näin ollen, voima per pituusyksikkö, F/x voi myös joissain tapauksissa tarkoittaa voiman suhdetta johonkin muun muuttujaan nähden. Toisena tapauksena on mahdollista, että paine kuormittaa palkkia, niin tällöin taipuman suhde kuormittavaan voimaan ilmaistaan paineen suhde pinta-alaan eli P/A.

Aksiaalinen jäyhyysmomentti tulee laskea sen akselin suuntaisena, joka lävistää poikkileikkauksen massakeskipisteen, joka on kohtisuorassa kuormittavaan voimaan nähden. Erityisesti palkki, jonka akseli on suuntautunut x-akselin suuntaisesti ja kuormitus z-akselin suuntaisesti, niin tällöin palkin poikkileikkauspinta on yz-tasolla. [12; 13.]

Euler-Bernoullin palkkiteoria sandwich-paneeleissa

Analysoitaessa sandwich-paneelien elastisuuksia teoria olettaa molempien, sekä pintalevyjen että ydinmateriaalin, olevan isotrooppisia eli materiaaleja, joiden ominaisuudet ovat samat joka suunnassa. Tätä yksinkertaistusta voidaan soveltaa, vaikka nykykäsityksen mukaan kennomateriaalia ei voida pitää isotrooppisena. Sandwich-paneelin dimensiot ovat nähtävillä kuvassa 7. Kuvan palkki koostuu kahdesta ohuesta pinnasta, jotka on erotettu toisistaan paksulla ydinmateriaalilla. [1; 2; 12.]



Kuva 7. Sandwich-palkin mitat [2].

Palkin jännitykset ja taipumat saadaan selville, ensiksi likimääräisesti, kun hyödynnetään tavallista taivutusteoriaa. Teoria pohjautuu oletukseen, että leikkauspinnat ovat tasoja ja ovat kohtisuorassa kuormittamattoman palkin pituusakseliin nähden ja pysyvät sellaisina myös taivutuksessa. Tämä oletus johtaa hyvin tunnettuun taivutusmomentin, M , ja taipuman, $1/R$, verrantoon,

$$\frac{E}{E \times I} = -\frac{1}{R} \quad (4)$$

Yhtälön vasemmanpuoleinen lauseke $-1/R$ on negatiivinen, sillä taipuma tapahtuu koordinaatiston origon positiivisella puolella, mutta taivutusmomentti on negatiivinen, kuva 8. Näin ollen merkki vaihtuu, kuva 8. $E \times I$ on taivutuslujuus, mikä tavallisessa palkissa on seurausta kimmomoduulista, E , ja palkin poikkileikkauksen aksiaalisesta jäyhyysmomentistä, I . Taivutuslujuutta merkitään yhdellä symbolilla D . Sandwich-paneeli on kuitenkin komposiittia, jonka taivutuslujuus on yksittäisten komponenttien, pintalevyt ja ydin, taivutuslujuuksien summa. Tämä summa mitataan koko leikkauspinnan massakeskipisteen akselin suuntaisena. [1; 2; 12.]

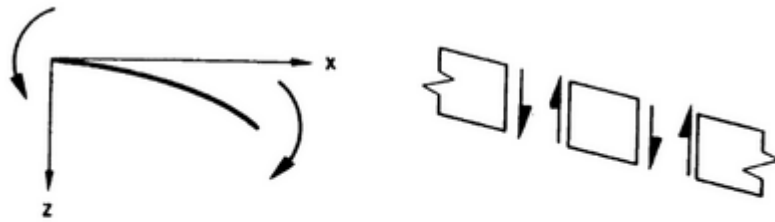


FIG. 2.2. Sign conventions. Left, positive deflection, slope and curvature; negative bending moment. Right, positive shear force, shear stress and shear strain.

Kuva 8. Merkin vaihto. Vasen positiivinen taipuma, kallistuma ja kaareutuminen; negatiivinen taivutusmomentti. Oikea, positiivinen leikkauskuormitus, leikkauslujuus ja leikkausvenymä [2].

Sandwich-paneelin taivutuslujuus, D , voidaan laskea seuraavasti,

$$D = \frac{E_{fx} \times b \times t^3}{6} + \frac{E_{fx} \times b \times t \times d^2}{2} + \frac{E_{cx} \times b \times c^3}{12} \quad (5)$$

Jossa d = ala ja yläpintalevyjen sivuttaishalkaisijoiden etäisyys toisistaan

h = palkin kokonaispaksuus

b = palkin leveys

t = pintalevyn paksuus, molemmilla sama

c = kennon paksuus

E_{fx} ja E_{cx} = pintalevyn ja ytimen kuormituksen tasokimmomoduuli x -suunnassa, alaindeksit f = pintalevy ja c = kenno.

Yhtälön oikealla puolella olevat kolme termiä vastaavat pintojen taipumista oman massakeskipisteen suhteen sekä suhteessa koko palkin massakeskipisteeseen ja ytimen taipumiseen. [1.] Yhtälön oikean puolen, kaksi ensimmäistä termiä kuvaavat pintojen jäykkyyttä koko sandwich-paneelin taipumiseen oman massakeskipiste akselinsa suhteen. Näistä ensimmäinen kuvaa pintalevyjen paikallista jäykkyyttä, taivutettaessa erikseen massakeskipisteen suhteen. Kolmas termi kuvaa ytimen taivutuslujuutta.

Yllä olevan yhtälön d voidaan ratkaista seuraavasti:

$$d = \frac{h+c}{2} \quad (6)$$

Yhtälö voidaan yksinkertaistaa olettamalla, että pintojen taipuminen massakeskipisteen suhteen on merkittävin tekijä. Olettaus vaikuttaa ensimmäiseen ja kolmanteen termiin, niin että niiden vaikutus taivutuslujuuden arvoon on vähemmän kuin 1 %, kun

$$\frac{d}{t} > 5,77 \text{ ja } 6 \times \frac{E_{fx}}{E_{cx}} \times \frac{t}{c} \times \left(\frac{d}{c}\right)^2 > 100 \quad (7)$$

Sandwich-paneeleissa, missä

$$6 \times \frac{E_{fx}}{E_{cx}} \times \frac{t}{c} \times \left(\frac{d}{c}\right)^2 > 100 \quad (8)$$

niin $d/c \stackrel{\circ}{\approx} 1$ ja t/c on välillä 0,02 - 0,1, näissä tapauksissa rajoittava arvo E_f/E_c sijoittuu välille, 835 - 167. Kaikissa sovelluksissa ei kuitenkaan suhde ole näin korkea.

Tällöin yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$D = E_{fx} \times \frac{b \times t \times d^2}{2} = E_{fx} \times I \quad (9)$$

missä I = sandwich-palkin poikkileikkauksen aksiaalinen jäyhyysmomentti

Kolmepistetaivutuksen maksimaalinen taivutusmomentti, M , sijaitsee palkin puolessa välissä ja vastaa pintalevyjen maksimikuormitusta, σ_{fx} ,

$$\sigma_{fx} = \frac{M \times E_{fx}}{D} \times \frac{d}{2} = \frac{W \times L}{4 \times d \times t} \quad (10)$$

Jossa W = keskeinen kuormitus, N/m

L = pituus

Mallilla voidaan määrittää pintalevyjen ja ytimen jännityksiä, hyödyntämällä tavallista taivutusteoriaa, joka on sovitettu leikkauspinnan komposiittiseen luonteeseen. Näin siksi, että poikkileikkausalat pysyvät tasoina ja kohtisuorassa pituusakselia vastaan. Venymän etäisyys pisteessä z, joka on massakeskipiste akselin alla, on M_z/D . Venymä voidaan kertoa sopivalla kimmomoduulin arvolla, jotta taivutusvoima saadaan tasolle z.

Yllä kuvattu teoreettinen malli jättää kuitenkin huomioimatta ytimen leikkaustaipuman, joka nousee merkittäväksi tekijäksi pienitiheysisillä ydinmateriaaleilla. Leikkaustaipuman huomioiminen mallissa mahdollistaa havaittujen palkin lujuus erojen ennakoimisen kennon soluseinämaljuskan eri orientaatioiden välillä. [1; 2.] Tästä syystä Allen [1; 2] johti pintalevyille maksimi aksiaalijännitykset seuraavan yhtälön avulla:

$$\sigma_{fx} = \frac{W \times b \times L}{4} \times \left(\frac{c+2 \times t}{2 \times I} + \frac{W \times L}{4} \times \frac{t}{2 \times I_f} \times \frac{1}{\theta} \right) \quad (11)$$

$$\text{Missä, } \theta = \frac{L}{c} \times \left[\frac{G_{cxz}}{2 \times E_{fx}} \times \frac{c}{t} \times \left(1 + \frac{3 \times d^2}{t^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, I = \frac{b \times t^3}{6} + \frac{b \times t \times d^2}{2}, I_f = \frac{b \times t^3}{6}$$

Jossa G_{cxz} = ytimen tason ulkopuoleinen leikkausmoduuli

I = sandwich-paneelin neutraaliakselin suuntainen jäyhyysmomentti

I_f = pintalevyjen oman massakeskipisteen akselin suuntainen jäyhyysmomentti

Yllä mainitusta yhtälöstä ilmenee, että θ on riippuvainen pintojen ja ytimen suhteellisista jäykkyyksistä.

Lisäksi maksimi aksiaalijännitysten yhtälöstä voidaan johtaa,

$$W = 4 \times \sigma_{fx} \times \varepsilon \times \frac{t}{L} \quad (12)$$

$$\text{Missä, } \varepsilon = \theta \times \frac{\frac{t^5}{9} + t^3 \times \frac{d^2}{3}}{h \times t^3 \times \frac{(\theta-1)}{3} + \frac{t^4}{3} + t^2 \times d^2}$$

Jossa L = pituus/jänneväli

G_{oxz} = ytimen leikkausjäyhyys

Kun pituus/jänneväli tai ytimen leikkausjäyhyys lähestyy ääretöntä, niin paneelilla on taipumus käyttäytyä yksinkertaisen palkin mallin mukaisesti. [1.]

Sandwich-paneelin kunnollisen suunnittelun tuloksena sandwich-paneelin ytimen tulisi olla niin jäykkä, että paneeli toimii yhtenäisenä taipuvana komposiittipalkkina. [1.]

Allen [1; 2] oli vielä erikseen johtanut sandwich-paneelille taivutuslujuuden yhtälön sekä sylinterisessä että antiklastisessa taivutuksessa.

$$\text{Sylinterinen taivutus } D = \frac{E_f \times t \times d^2}{2 \times (1 - \nu_f^2)} \quad (13)$$

$$\text{taivutuslujuus } D = \frac{E_f \times t \times h^2 \times b}{2} \quad (14)$$

Jos on tapaus, jossa sandwich-paneelin $E_c \ll E_f$, niin tällöin taivutuslujuuden yhtälö voidaan ilmaista muodossa [14]:

$$D = E_f \times \frac{b \times (h^3 - h_c^3)}{12} \quad (15)$$

2.1.2 Vaurioitumismekanismit

Suunniteltaessa sandwich-paneeleja on otettava huomioon, että kaikki potentiaaliset vaurioitumismekanismit ovat sisällytettynä analyysiin.

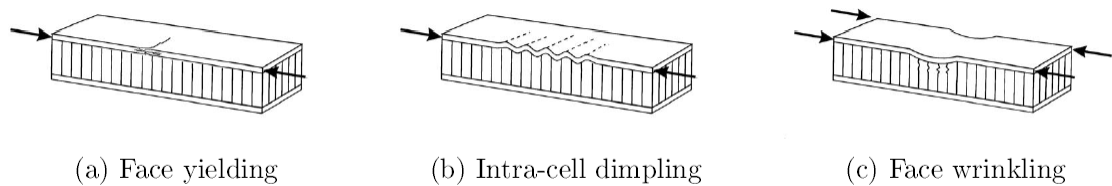
Tarkastellaan sandwich-ulokepalkkeja, joiden vapaata päätyä kuormitetaan. Kuormitus aiheuttaa kappaleeseen taivutusmomentin, joka on suurimmillaan kiinnitetyssä päässä, ja leikkausvoima on palkin pituussuuntainen.

Sandwich-paneeleilla taipuma koostuu taipumisesta ja leikkaustaipumasta. Taipuman korkeus, h , riippuu pintalevyjen suhteellisesta murtolujuudesta ja kokoonpuristuvuuskerroimesta. Leikkaustaipuma, μ , puolestaan on riippuvainen ydinmateriaalin leikkausmoduulista. Tällöin kokonaistaipuma $t_{\text{tot}} = h + \mu$. [1; 5; 15.]

Tässä käsitellään sandwich-paneelien seitsemää yleisintä vauriomekanismia, jotka jaetaan kahteen ryhmään vaurioitumislähteen mukaan joko pinta- tai ydinvaurioihin. [1; 15.]

Pintavauriot

Pintalevyjen kestäjän maksimijännityksen, σ_{fx} , ylittyminen voidaan havaita esimerkiksi, kuva 9, pinnan myötämisenä (a), solujensisäisenä puristusupotuksena (b) ja pinnan ryppistymisenä (c).



Kuva 9. Pinnan vaurioitumismekanismit [5].

Pinnanmyötö

Pinnan myötämistä ilmenee sitkeillä materiaaleilla kuten alumiinilla. Vaurio tapahtuu päällimmäisellä pintalevyllä, kuvassa 9 (a). Rasituksen seurauksena pintalevy myötää plastisesti, kun aksiaalirasitus on jommallakummalla pintalevyllä ja saavuttaa pintalevyn palkin keskiakselin suuntaisen tasolujuuden, σ_{fy} . Eli tällöin $\sigma_{fx} = \sigma_{fy}$. Mikäli oletetaan, että pinta käyttäytyy hauraasti kuten suuri osa komposiittimateriaaleista, niin silloin samainen vaurio ilmenee pintalevyn mikrolommahduksena. Symmetrisellä palkilla jännitykset ovat yhtä suuret puristus- ja vetopinnoilla. Tavanomaisesti komposiittisilla pintalevyillä puristukselle altistuva pinta on kriittisempi, kuin vedolle altistuva pinta. [1; 15.]

Solujensisäinen puristusupotus

Sandwich-paneelit, joiden ytimenä käytetään kennorakennetta, voivat vaurioitua pinnan lommahtamisella paikassa, jossa pintalevy ei ole kennon seinämien tukema. Yksinkertainen kimmoisan laatan lommahdusteoriasta voidaan johtaa matemaattinen lauseke pintalevyjen tasojännitykselle, σ_{fi} , missä ilmenee puristusupotusta, kuva 9 (b).

$$\sigma_{fi} = \frac{2 \times E_{fx}}{1 - \nu_{fxy}^2} \times \left(\frac{2 \times t}{\alpha} \right)^2 \quad (16)$$

Jossa α = kennon solukoko, solun sisään piirretyn ympyrän halkaisija

E_{fx} = kimmomoduuli

ν_{fxy} = kuormitetun pintalevyn poissonin luku, akselin suuntaisena

Samantapainen matemaattinen lauseke on laadittu ja todistettu kokeellisesti. Yllä olevaa yhtälöä voidaan käyttää kuvaamaan muutosta pinnanmyötämisestä solujensisäiseen puristusupotukseen seuraavasti:

$$\alpha = 2 \times t \times \sqrt{\frac{2}{1-\nu_{fxy}^2}} \times \frac{E_{fx}}{\sigma_{fY}} \quad (17)$$

Ratkaisuna on optimoitava solukoko niin pieneksi, ettei puristusupotuksia ilmene. [1; 15.]

Pinnan rypistyminen

Pinnan rypistyminen, kuva 9 (c), on pinnan murtumismekanismi suuremmalla aallonpituudella (leveydellä), kuin kennon solun leveys. Nurjahdus/lomahdus voi tapahtua ytimen suuntaan tai siitä poispäin, riippuen ytimen jäykkyydestä puristuksen alaisena ja adheesioaineen (liiman) lujuudesta. Käytännössä kolmepistetaivutuksessa pintalevyn rypistyminen tapahtuu ytimen suuntaan, kuorman keskipisteen ympäriltä. Kun pintalevyt mallinnetaan tasoina, jotka ovat kimmoisan alustan päällä, niin Allen [2] esitti matemaattisen lausekkeen päällimmäisen pintalevyn kriittisen puristusjännityksen, σ_{fw} , ilmentämisen seuraavasti [1; 15.]:

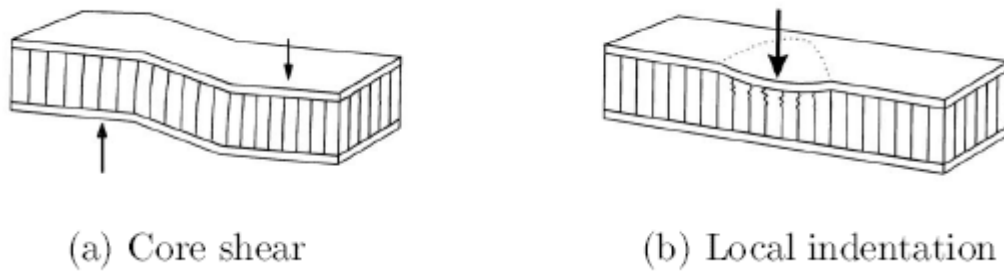
$$\sigma_{fw} = \frac{3}{(12 \times (3 - \nu_{cxz})^2 \times (1 + \nu_{cxz})^2)^{\frac{1}{3}}} \times E_{fx}^{\frac{1}{3}} \times E_3^{\frac{2}{3}} \quad (18)$$

Jossa ν_{cxz} = tason ulkopuoleinen poissonin luku

E_3 = kenno ytimen tason ulkopuoleinen kimmomoduuli

Ydinvauriot

Kennorakenteiset sandwich-paneelit voivat vaurioitua taivutuksessa ytimen pettämiseen. Näitä ovat muun muassa leikkausmurtuminen tai paikallinen kuorman aiheuttaman murtumisen läheisyyteen aiheutunut painuminen, kuva 10.



Kuva 10. Ytimen vauriot [1].

Leikkausmurtuminen

Oletetaan, että kyseessä on yksinkertainen palkki, jossa leikkausjännitys vaihtelee pintalevyin ja ytimen välillä parabolisesti kolmepistetaivutuksessa. Jos pinnat ovat huomattavasti jäykempiä ja ohuempia kuin ydin, leikkauslujuus voidaan mieltää lineaarisesti pinnoissa ja vakiona ytimessä. Keskiarvollinen leikkausjännitys ytimessä, τ_{cxz} , voidaan laskea seuraavalla kaavalla, jossa pintojen vaikutukset jätetään huomiotta, kuva 10 (a):

$$\tau_{cxz} = \frac{W}{2 \times d} \quad (19)$$

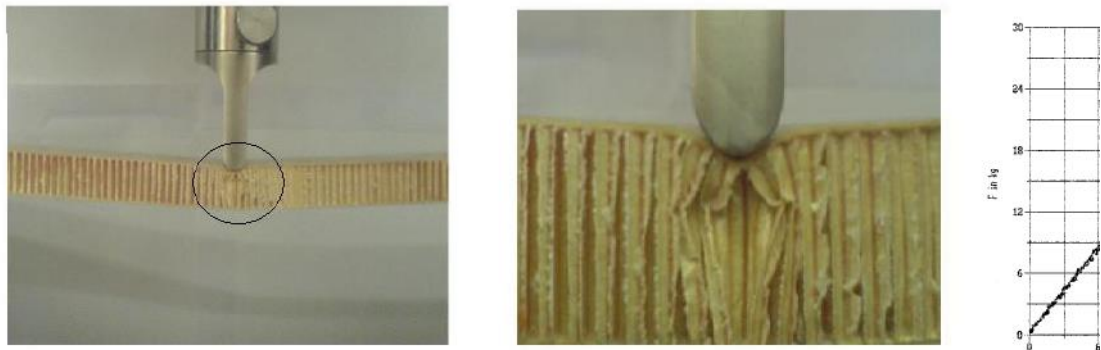
Jossa W = keskeinen kuormitus, N/m

Jos kappaleen oletetaan käyttäytyvän hauraasti, niin tämän tyyppistä vauriota ilmenee, kun kuormittava leikkausjännitys, τ_{xz} , on yhtä suuri kuin samansuuntainen ytimen leikkauslujuus, τ_{cs} . Eli, $\tau_{cxz} = \tau_{cs}$

Esimerkiksi matalatiheyksisellä -Nomex-kennoytimillä on erityinen taipumus tämän tyyppiseen vaurioitumiseen. Tämä on seurausta siitä, että kyseinen rakenne on anisotrooppinen, mikä tarkoittaa, että leikkauslujuuden suuruus on riippuvainen kuormituksen suunnasta. [1; 15.]

Paikallinen kuorman aiheuttaman vauriokohdan painuminen

Painumisvaurio, kuva 10 (b), sandwich-paneeleissa ilmenee tyypillisesti esimerkiksi kolmepistetaivutuksessa. Painumisvaurio on seurausta ytimen murtumisesta painimen alla. Pintalevyn taivutusjäyhyys ja ytimen jäyhyys määrittävät, missä määrin kuormittava kuorma leviää kuorman keskipisteestä muulle pinnalle. On tärkeä tässä vaiheessa ymmärtää, miten painauma ja pinnanrypistyminen eroavat toisistaan. Painumisessa päällimmäinen pintalevy taipuu painimen ja pinnan kontaktipinnan alueella, kuva 11. Pinnanrypistyminen ilmenee suuremmalla alueella, kuin painimen ja pinnan kontaktiala on. [1; 15.]

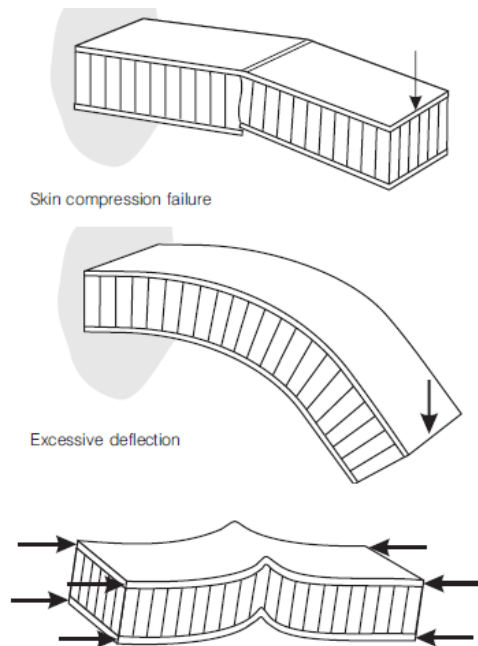


(b) Local indentation ($L = 300 \text{ mm}$, $C = 18.96 \text{ mm}$)

Kuva 11. Ytimen painuminen [16].

Sandwich-paneelien painumisvauriota ei ole riittävällä tasolla mallinnettu. Tästä syystä käytetään yksinkertaista empiiristä lähestymistapaa, jota on käytetty sandwich-paneelien rakentamiseen liittyvässä kirjallisuudessa. [1; 2; 15.]

Kolme yleistä huomioitavaa seikkaa on, että paneelin kokonaisuutena tulee kyetä vastustamaan veto-, puristus- ja leikkauskuormituksia. Lisäksi pintalevyjen ja ytimen välisen adheesiomateriaalin tulee kyetä siirtämään leikkausvoimia ytimen ja pintalevyjen välillä. Kuvassa 12 yllimpänä on nähtävillä, minkälainen vaurio tapahtuu, jos lujuus on liian alhainen suhteessa sovelluskohteessa paneeliin aiheutuvaan kuormaan. Lisäksi paneelin tulee olla riittävän jäykkä, jotta se pystyy vastustamaan taipumista. Mikäli paneeli on hyvin sitkeä, se taipuu suhteettoman paljon, kuva 12 (keskellä). Kolmanneksi paneelien ytimen paksuuden ja leikkausmoduulin tulee olla sopiva, jottei paneeli nurjahda päittäis-puristuksessa, kuva 12 (alin).



Kuva 12. Koko paneelin vaurioitumismekanismit [5].

3 Kennorakenteen optimointi

3.1 Paneelin suunnittelun kriteerit

Formula Student Germany -säännöt 2018 asettavat sandwich-paneelin suunnittelulle pääkriteerit mekaanisille ominaisuuksille. Lisäksi hyvään rakenteelliseen suunnitteluun sisältyvät sovelluskohteen asettamat kriteerit, jotka on tärkeää huomioida.

Huomioitavia rakenteellisia asioita ovat lujuus, jäykkyys, massa, liimattavuus, taloudellisuus ja materiaalien saatavuus.

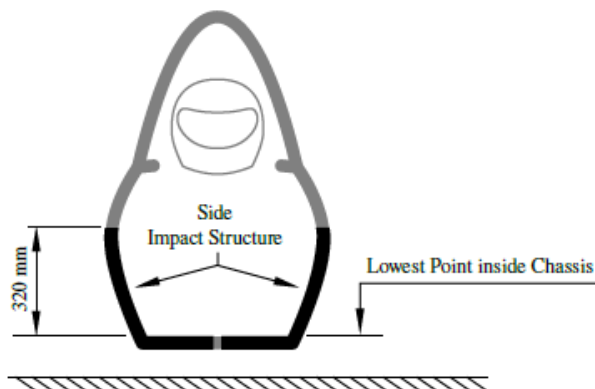
Ympäristöllisiä seikkoja ovat lämpötila, syttymisherkkyys, lämmön johtuminen, kosteus herkkyys, adheesioaineet (VOC-päästöt, jätteen hävitys yms.) ja ilmanpoisto valmistuksessa.

3.2 Formula Student Germany -sääntöjen asettamat vaatimukset

Vuoden 2018 Formula Student Germany -sääntöjen [17] mukaan formula-auton runkoon käytettävien ei-hitsattavien materiaalien mekaanisten ominaisuuksien tulee olla seuraavat: kimmomoduuli 200 GPa, myötölujuus 305 MPa, murtolujuus 365 MPa.

Sivupaneelien ollessa komposiittia vaatimukset ovat seuraavat:

- Leikkausmurtolujuuden on oltava vähintään 7,5 kN:n kuormituksen kestävä alueella, jonka halkaisija on 25 mm.
- Pystysuuntaisen paneelin kyljen absorboiman energian tulee vastata kahden teräsputken absorptioenergian suuruutta.
- Alueen, joka on pituussuuntaisesti päärunkoa edellä ja eturungon takana ja pystysuuntaisesti alustan pohjapinnasta 320 mm:ä alimman sisemmän rungon pisteen yläpuolella. Etuosan ja päärungon välissä olevan alustapisteen taivutusjäyhyyden on oltava yhtä suuri kuin kolmen teräsputken, jonka se korvaa, kuva 13.
- Pystysuuntaisen sivupaneelirakenteen taivutusjäyhyyden tulee vastata kahden teräsputken taivutusjäyhyyttä, ja puolikkaan vaakasuuntaisen pohjan taivutusjäyhyyden tulee vastata yhden teräsputken taivutusjäyhyyttä.



Kuva 13. Sivupaneelirakenne itseään kantavassa rungossa. [17.]

Komposiittimateriaaleista, joita käytetään kantavissa rakenteissa tai akkukotelossa, SES-dokumenttiin tulee sisällyttää seuraavat tiedot:

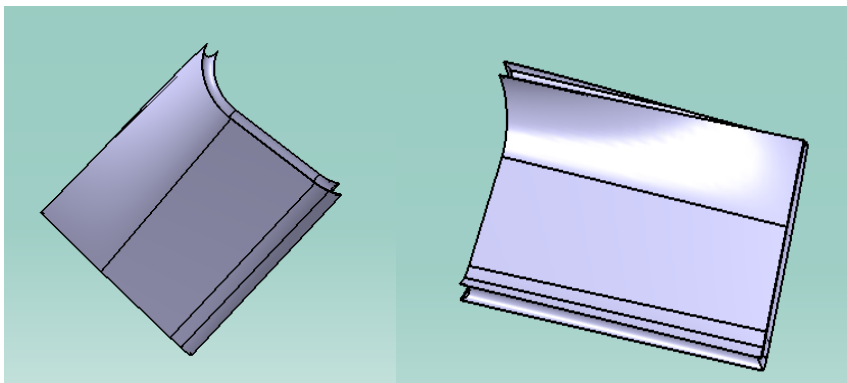
- materiaalityyppi/tyypit
- kuitumassa
- hartsin tyyppi
- kuitusuunta
- kerrosten määrä
- ydinmateriaali
- valmistustekniikka
- kolmepistetaivutustestidata ja leikkaustestidata. [17.]

3.3 Nykyiset sandwich-paneelit

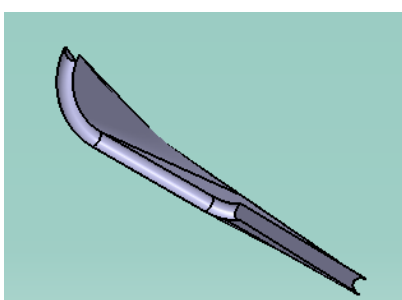
3.3.1 Design

Tämän hetkiset paneelit rakentuvat yhteensä kahdesta hiilikuitulevystä, joiden yksikköpaksuus on yksi millimetri. Hiilikuitukomposiittilevyt on valmistettu kolmesta hiilikuitumattokerroksesta ladottuna päällekkäin ja lujiteaineena on käytetty epoksihartsia. Paneelin ytimenä on käytetty alumiinikennoa, jonka alumiini on laatua EN AW-3003, korkeus on 25 mm, seinämäpaksuus 12 µm, solukoko 12 mm, tiheys 29–30 kg/m³ ja puristuslujuus 0,8–0,95 MPa. Adheesioaineena on käytetty eräänlaista liimakalvoa. Paneelin yksikköpaino neliömetrillä on noin neljä kiloa.

Vuoden 2017 auton sivupaneelin 3D-mallinnettu suunnitelma on esitettyinä kuvissa 14 ja 15.



Kuva 14. Vuoden 2017 formula-auton sivupaneelin ulkopinta vasemmalla ja oikealla sisäpinta.



Kuva 15. Vuoden 2017 formula-auton sivupaneelin sivuprofiili.

3.3.2 Vuoden 2017 sivupaneelin tekniset ominaisuudet

Kennon paksuus on 275 mm, kimmomoduuli on ollut testauksissa 29,1 GPa ja maksimi voima jolla kappaletta on testattu, 5402,4 N.

Suurin absorboitu energia on 228,32 J ja murtolujuus 65 MPa. Tiedot teknisistä ominaisuuksista on saatu vuoden 2017 SES-dokumentista. Kuvassa 16 on kuorma-taipuma käyrä.



Figure 1: Test setup - Laminate Panel

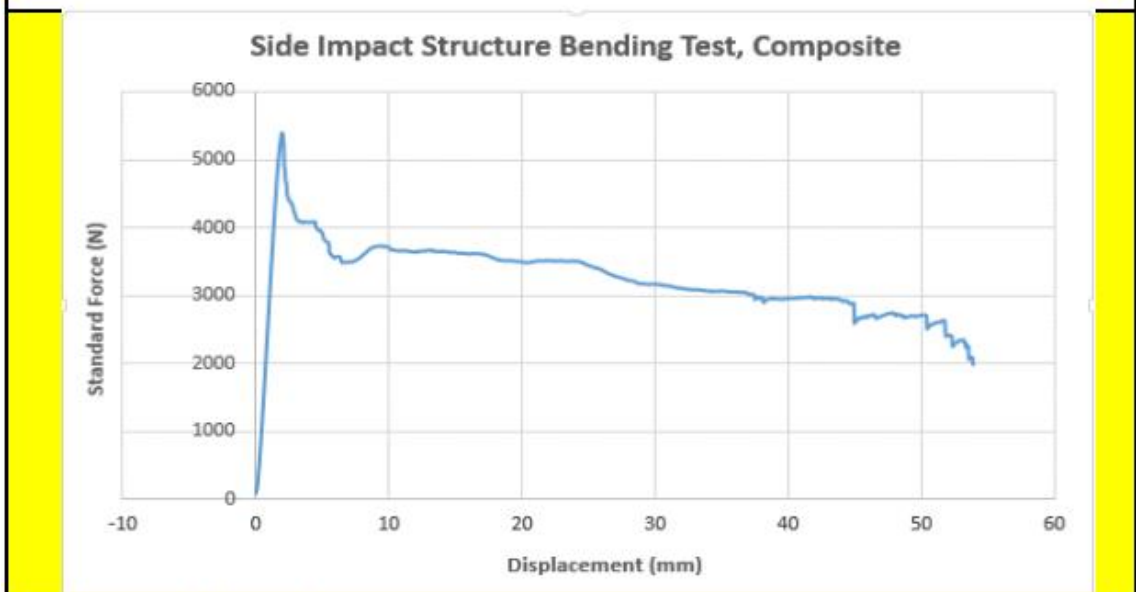


Figure 2: Load Deflection Curve

Kuva 16. Sivupaneelin taivutustesti.

Tämän hetkisisissä paneeleissa on havaittu ongelmalliseksi niiden taipumus leikkausmurtumiseen. Taipumus on seurausta liian ohuista ja jäykistä pintalevyistä suhteessa ytimen paksuuteen ja jäyhyyteen.

3.4 Materiaalisuunnitelma

3.4.1 Pintalevyt

Pintalevyjen optimointia lähdettiin lähestymään tutkimalla eri kuitujen ominaisuuksia. Tutkittiin eri komposiittimateriaaleja sekä erilaisia sandwich-paneelien pintalevymateriaaleja. PBO eli poly(p-fenyleeni-2,6-bentsobisoksatsoli) myyntinimeltään Zylon vaikuttaisi soveltuvimmalta ratkaisulta tähän sovelluskohteeseen. Asiaa tukee vielä se seikka, että ilmeisesti täysikokoisissa formula-autojen runko-osissa käytetään PBO-kuitua pintalevyjen materiaalina. Toisissa sovelluksissa käytetään esimerkiksi myös hiilikuitua ja lasikuitua. [18; 19; 20.]

Kaikista kestävin ja ajoturvallisin ratkaisu olisi tehdä sivupaneelien pintalevyistä PBO-kuituiset, 16 kerrosta, 7 mm paksu pintalevy. Kaksi pintalevyä ovat tällöin yhteensä 14 mm paksuudeltaan. 7 mm:n pintalevypaksuus pitäisi olla yksi optimaalisimmista, sillä testeissä oli havaittu kyseisellä paksuudella tehdyn levyn kestävän yli 2 000 kg:n kuormitus 30 sekunnin kestäneessä kuormituksessa. Törmäystestissä puolestaan PBO-kuidusta valmistettu sivupaneeli ei vaurioitunut 780 kg:n šokki kuormituksessa nopeudella 10 m/s. Lisäksi törmäystestissä levy absorboi 15–35 % törmäysenergiasta. Puolestaan staattisessa kuormituksessa sivupaneeli kesti ilman rakenteellisia vaurioita 3 000 kg, 15 mm:n maksimitaipumalla. [18.]

PBO-kuidusta löytyi kirjallisuusmateriaalia yllättävän hyvin. Eräässä tutkimusraportissa [40] oli tutkittu M5- ja PBO-kuitujen ominaisuuksia ballistisissa sovelluksissa. Tutkimuksessa todettiin, että M5 olisi tunnetuista kuiduista lujinta. Kyseisestä kuidusta ei kuitenkaan löytynyt tietoa, että sitä olisi käytetty ajoneuvosovelluksiin. Tutkimus totesi, että PBO-kuidun fysikaaliset ominaisuudet ovat kokeellisesti testattuna seuraavat: lujuus $\sigma = 5,20$ GPa, murtovenymä $\epsilon = 3,10$ %, kimmomoduuli 169 GPa [21].

Valmistajan tekniset tiedot [22] zylon AS:n (punottuna) ja zylon HM:n (suurilujuus) ovat nähtävillä taulukossa 2. Zylonilla on noin 100 °C korkeampi sulamislämpötila, kuin p-aramid-kuidulla. Myös rajoittava happi-indeksi, 68, on orgaanisista superkuiduista korkein. [23.]

Taulukko 2. Zylon AS ja Zylon HM:n tekniset tiedot [22].

	Zylon AS	Zylon HM
Kuitu decitex	1,70	1,70
Tiheys (g/cm ³)	1,54	1,56
Murtolujuus (GPa) (kg/mm ²)	5,80 590,00	5,80 590,00
Vetokerroin (GPa)(kg/mm ²)	180,00 18000,00	270,00 28000,00
Murtovenymä (%)	3,50	2,50
Kosteuslisä (%)	2,00	0,60
Sulamislämpötila °C	650,00	650,00
LOI, rajoittava happi-indeksi	68,00	68,00
Poissonin luku [54.]		0,30
Flexular modulus GPa [drive]		70,0
Lämpölaajenemiskerroin	-	-6*10 ⁻⁸

Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty eri kuitujen ominaisuuksia ja Zylon eli PBO on ainakin toiseksi lujinta teknistä kuitua [21; 22; 24].

Taulukko 3. Eri kuitujen teknisiä ominaisuuksia [22].

	Lujuus	Kimmo-moduuli	Murtovenymä	Tiheys	Kosteuden imeytyvyys	LOI	Kuumalujuus
	Gpa	Gpa	%	g/cm ³	%	-	C
Zylon AS	5,80	180,00	3,50	1,54	2,00	68,00	650,00
Zylon HM	5,80	270,00	2,50	1,56	0,60	68,00	650,00
p-Aramid (HM)	2,80	109,00	2,40	1,45	4,50	29,00	550,00
m-Aramid	0,65	17,00	22,00	1,38	4,50	29,00	400,00
Teräs kuitu	2,80	200,00	1,40	7,80	0,00	-	-
HS-PE	3,50	110,00	3,50	0,97	0,00	16,50	150,00
PBI	0,40	5,60	30,00	1,40	15,00	41,00	550,00
Polyesteri	1,10	15,00	25,00	1,38	0,40	17,00	260,00

Taulukko 4. M5-kuidun mekaaniset ominaisuudet [21].

Kuitu	Lujuus (GPa)	Murtovenymä (%)	Kimmomoduuli (GPa)	$U^{1/3}$ (m/s)
M5 perinteinen	8500,0	2,5	300,0	940,0
M5 tavoite	9500,0	2,5	450,0	1043,0
M5 (2001 näyte)	3960,0	1,4	271,0	583,0

Zylonin palamisessa muodostuvien palokaasujen määrät on listattu taulukkoon 5 ja samassa taulukossa myös verrataan Zylon-kuitujen palamisessa muodostuvien palokaasujen määrää aramid-kuitujen muodostamaan määrään. Muodostuneet palokaasut 750 °C:ssa on mitattu japanilaisen teollisen standardin mukaan (JIS). Zylonilla myrkyllisten kaasujen, muun muassa HCN, NO_x ja SO_x, muodostuminen on hyvin pientä verrattaessa p-aramid-kuituun. Myös muodostuvien palokaasujen määrä oli mitattu 500 °C:ssa. Lasin muovauksessa ja alumiinin kuumapuristuksessa matriisimateriaalit, kuten huopa, toisiinsa kuumennetaan noin 500 °C:ksi. Zylonista muodostuvien myrkyllisten kaasujen määrä oli tuolloin myös pientä. [22.]

Taulukko 5. Muodostuvat palokaasut [22].

Lämpötila (°C)	Zylon		p-aramid	
	500	750	500	750
CO (mg/g)	6,90	1>	107,00	112,00
CO ₂ (mg/g)	35,80	2660,00	1230,00	2010,00
NH ₃ (mg/g)	0,35	0,05>	3,95	0,05>
HCN (mg/g)	1,48	0,57	14,80	25,10
HCl (mg/g)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
NO _x (mg/g)	0,15	0,16	1,00	0,47
SO _x (mg/g)	<0,01	0,10	1,40	1,04

Materiaalin valmistajan sivustolla [22] oli ilmoitettu myös Zylonin orgaanisten kemikaalien kestävyys, taulukko 6. Zylon valmistajan tietojen mukaan näyttäisi ainakin kestävän varsin hyvin orgaanisia aineita.

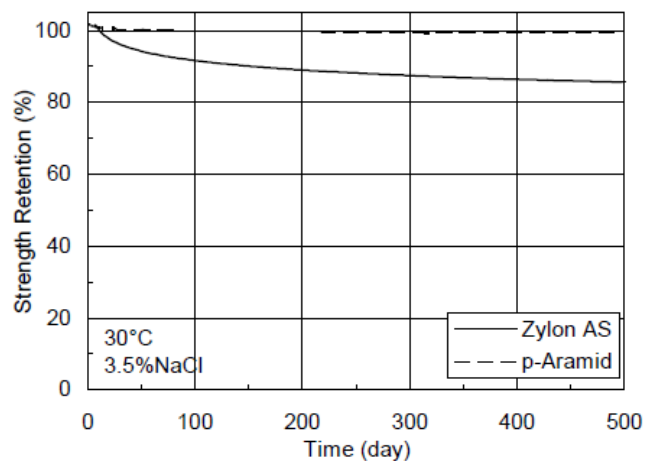
Taulukko 6. Zylonin kemikaalikestävyys [22].

Kemikaali	Lujuuden heikentyminen ~ % 500 tunnin upotuskokeen jälkeen, 24 °C	
	Zylon AS	Zylon HM
Metyyli-etyyliketoni	0	1
Dimetyyliformamidi	0	3
Metanoli	0	1
Bensa	0	5
Jarruneste	0	4

Valmistaja oli myös testannut Zylonin suolavesikestävyys, kuva 17, sekä kosteuden imeytymisen, kuva 18. Suolavesitestistä oli todettu, että suolavesisimuloinnit osoittavat samanlaista lujuuden heikkenemistä, kuin on havaittu korkean kosteusprosentin olosuhteissa, kuva 17. Kosteudenimeytymistestit oli suoritettu 20 °C:n lämmössä, 65 %:n ilman suhteellisessa kosteudessa. Testin tuloksena kosteutta imeytyi Zylon AS:n 2,0 % ja Zylon HM:n 0,6 %. Lisäksi oli havaittu, että Zyloniin imeytyi huomattavasti vähemmän kosteutta kuin aramid-kuituun.

7.3 Seawater resistance

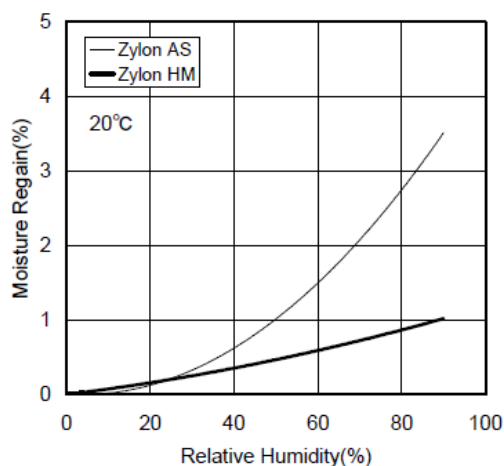
Seawater simulation shows similar strength loss to high humidity condition.



Kuva 17. Suolavesitestausta, aika-lujuuden muutos kuvaaja [22].

8. Moisture pick-up

The moisture regain of ZYLON[®] at 20°C, 65%RH is 2.0% for AS and 0.6% for HM. The moisture regain of ZYLON[®] HM is far less than p-Aramid.



Kuva 18. Kosteuden imeytyvyys, suhteellinen kosteus-imeytyvyyskuvaaja [22].

Lisäksi vielä Zylonista oli testattu sen lujuusominaisuudet, taulukko 7. Zylonin puristuslujuuden havaittiin olevan huomattavasti heikompi, kuin sen murtolujuuden, kuten myös para-aramid-kuidulla havaittiin olevan.

Taulukko 7. Puristuslujuustestit [22].

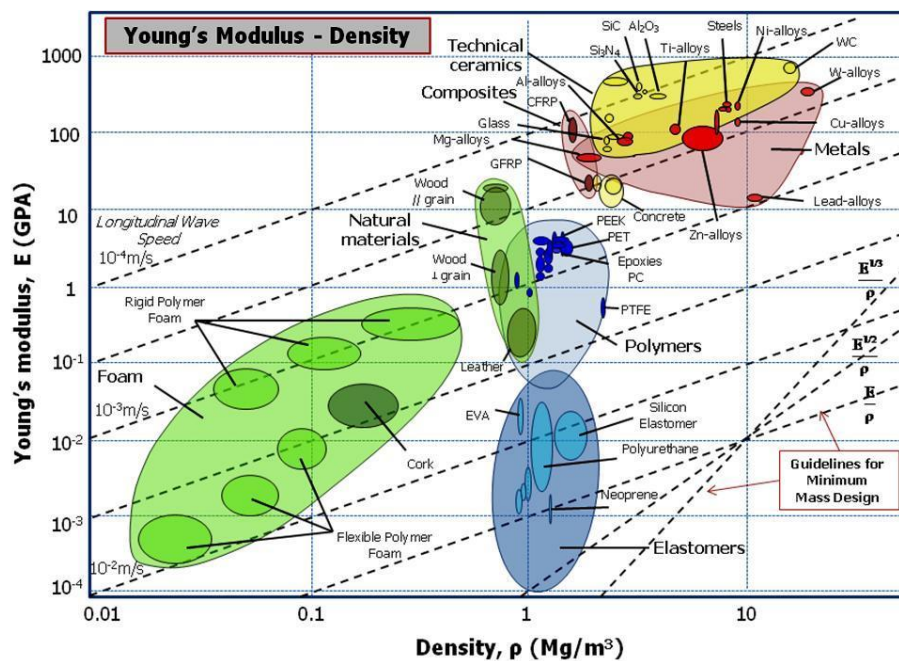
Näyte	Kriittinen venymä	Murtolujuus	Puristuslujuus
	%	Gpa	Gpa
Zylon AS	0,217	216,000	0,469
Zylon HM	0,227	247,000	0,561
Aramid HM	0,633	118,000	0,749

PBO-kuidun on kuitenkin havaittu ilmeisesti kärsivän merkitsevästi altistuessaan ultra-violetti säteilylle. Materiaalin UV-valohauraus aiheuttaa sen, että pintalevyjen ulkopinnat olisi hyvä pinnoittaa sen teknisten ominaisuuksien säilyttämiseksi. [23.] Sandwich-paneelin pintalevyjen pinnoitteena on käytetty muun muassa eräänlaista geeli- ja Kevlar-pinnoitteita. Myös maalipinnoite soveltuu yhtä hyvin. Kevlar-ohutkalvopinnoite voisi olla erinomainen ratkaisu, sillä pinnoite lujittaisi levyn ulkopintaa entisestään sekä hivenen jäykistäisi sitä. Voidaan kuitenkin olettaa, ettei paneeli tarvitse lujittavaa pinnoitetta, vaan ensisijaisesti UV-suojaavan pinnoitteen.

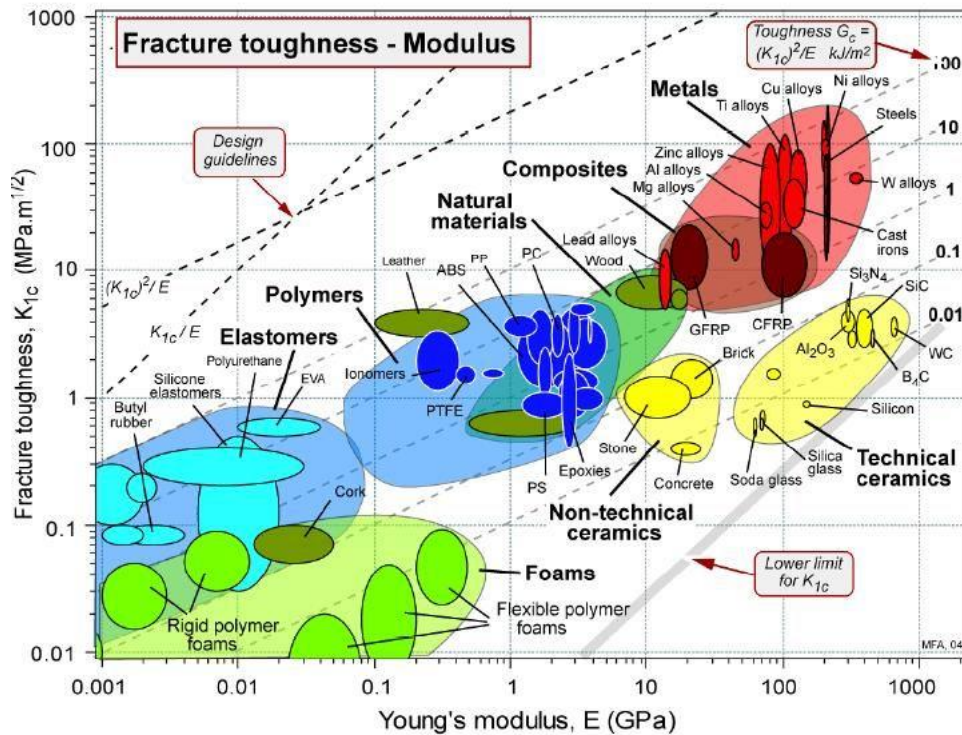
Pintalevyjen valmistuksessa voitaisiin käyttää sideaineena BMI:tä tai polyimidia. Näin siksi, että huipputeknisissä ilmailu- ja avaruustekniikan sovelluksissa pintalevyjen lujiteaineena käytetään nykyisin usein jo BMI-, polyimidihartseja, epoksin sijaan. [25.] Lisäksi nykyisen hiilikuitulevyn lujiteaineena käytetty epoksi voi olla aiheellista vaihtaa, sillä murtumismekanismi eli tässä tapauksessa leikkausmurtuminen osoittaa, että nykyiset pintalevyt ovat liian ohuet, kovat ja hauraat suhteessa ydinmateriaaliin. Näin ollen lujiteaineeksi voitaisiin vaihtaa BMI tai polyimidi. Näistä kahdesta vaihtoehdosta BMI on viimeisimmässä avaruus- ja ilmailuteollisuuden tuotekehityksessä osoittautunut paremmaksi ratkaisuksi kuin polyimidi. Kirjallisuudessa ei kuitenkaan ole vielä erityisiä perusteita mainittu, sillä kyseisten komposiittien tutkimukset ovat vielä kesken. [25.]

3.4.2 Ydin

Kennon optimaalisen materiaalin valintaa lähestyttiin aluksi tarkastelemalla materiaalinvalintataulukoita, kuvat 19 ja 20.



Kuva 19. Materiaalivalintataulukko, tiheys-kimmomoduuli [26].



Kuva 20. Materiaalinvalintataulukko, kimmomoduuli-murtolujuus [26].

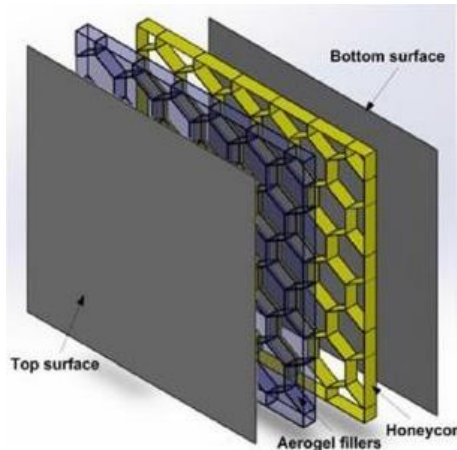
Taulukoiden sekä materiaalitietämyksen perusteella soveltuvia materiaaliryhmiä voisivat olla paisutetut vaahdot, komposiitit sekä polymeerit. Keveyden ollessa yksi kriteereistä teknistä laatua olevat paisutetut vaahdot voisivat olla optimaalisimpia ratkaisuja, mikäli niiden lujuus vain riittää. Toissijaisena vaihtoehtona voisi olla jonkin näköinen hybridi-komposiitti, sillä näissä taulukoissa ei ole kaikki mahdolliset materiaalit lueteltuna.

Myös polymeeriytimiä tarkasteltiin paneelin ytimenä, sillä ne ovat usein käytettyjä esimerkiksi henkilöautojen paneelirakenteissa. Polymeeriydinten lujuusominaisuudet eivät ole riittävät, jotta saavutettaisiin riittävä jäykkyys paneelille. Lisäksi pintalevyt eivät pääse käyttäytymään kahden palkin tavoin taivutuksessa.

Taulukoiden pohjalta lähdettiin tutkimaan, löytyisikö taipuisista polymeerivaahdoista kohteeseen soveltuvaa ydinmateriaalia [27]. Lisäksi tuli harkita, minkälainen rakenne toimisi parhaiten. Pelkkä joustava paisutettu vaahto kahden lujan pintalevyn välissä saisi todennäköisesti taivutuksessa paneelin pintalevyt toimimaan kahtena erillisenä palkkina, kuten aikaisemmin teoriaosuudessa on kuvattu. Näin ollen yksi toimiva ratkaisu voisi olla ydin, joka koostuu kahdesta komponentista: kennorakenteesta, joka jäykistää rakennetta ja paisutetusta vaahdosta kennon täyteaineena, kuva 21. Tämänlainen ydin voisi parhaimmillaan olla helposti muovattavissa kaarevaan muotoon paneelia valmistettaessa

sekä omat kriteerit täyttävät fysikaaliset ominaisuudet. Lisänä vielä olisi mahdollista, että paneeli olisi kosteudenkestävä sekä tulenkestävä.

Tutkittaessa taipuisien polymeeri vaahtojen joukosta mahdollista soveltuvaa materiaalia joukosta löytyi myös aerogeelit. Tästä muodostui idea, että voisiko aerogeeli toimia paneelien ydinmateriaalina, sillä kyseinen materiaali on kevyttä ja painoonsa nähden lujaa. [27; 28; 29; 30.]



Kuva 21. Rakennekuva hybridipaneelistä [26].

Aerogeelin tekninen määritelmä on seuraava: aerogeeli on avosoluinen, mesohuokoinen, kiinteä paisutettu vaahto, joka rakentuu toisiinsa kiinnittyneistä verkkomaisista nanorakenteista ja jolla on huokoisia ominaisuuksia. Huokoisia tulee olla vähintään 50 tilavuus-%. [27; 28; 31] Mesohuukoisella materiaalilla tarkoitetaan materiaalia, jonka huokokset ovat halkaisijaltaan 2–50 nanometriä [31].

Aerogeelillä siis tarkoitetaan laajaa huokoista, kiinteän aineen materiaaliyhmää, jolla on hämmästyttävä määrä äärimmäisiä materiaaliominaisuuksia. Merkittävin ominaisuus aerogeelillä on niiden keveys, joka vaihtelee tyypillisesti noin välillä 0,0011–0,5 g/cm³. Keveimmät valmistetut kiinteät materiaalit ovat kaikki aerogeeliä, näistä yksi on muun muassa piioksidi-aerogeeli, joka on vain kolme kertaa ilmaa painavampaa, ja siitä saataisiin ilmaakin kevyempää, jos kaikki ilma saataisiin poistettua aerogeelin huukosista. Tyypillisesti aerogeeli on tilavuudeltaan 95–99 % ilmaa tai muuta kaasua. Kevein aerogeeli on tilavuudeltaan 99,98 % ilmaa. [27; 31.]

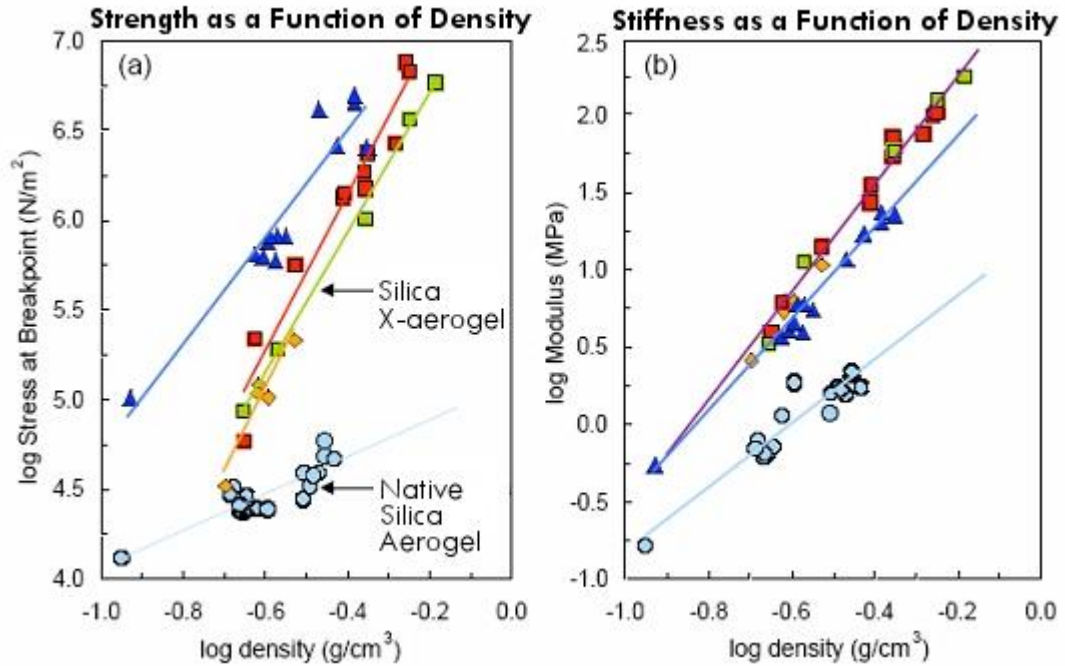
Aerogeelit ovat siis huokoisia, kuivaa materiaalia, pienitiheyksistä ja kiinteärunkoista geeliä, joka on erotettu geelin nestefaasista, niin etteivät ne pääse kosketuksiin toistensa kanssa (aineesta, joka muodostaa suurimman osan geelistä). Aerogeelien huokokset ovat rakenteeltaan avoimia, mikä tarkoittaa, että huokosissa oleva kaasu ei ole suljettuna huokosen sisään. Huokosten halkaisija vaihtelee <math><1-100\text{ nm}</math> välillä ja on tyypillisesti <math><20\text{ nm}</math>. [27; 28; 31; 33.]

Aerogeelit ovat siis kuivaa materiaalia. Tyypillisesti sana geeli tuo mieleen nestemäisen hyytelömäisen aineen, sana aerogeeli viittaa siihen, että aerogeelit valmistetaan tyypillisesti geelistä. Nestemäisestä geelimäisestä seoksesta saadaan nykyisillä menetelmillä tehokkaasti valmistettua kiinteä rakenne, mutta sen huokosissa on kaasua tai tyhjiö nesteen sijasta. [31.]

Eri tutkimuslaitokset ovat tutkineet paljon aerogeeliä, sen valmistuksen tehostamiseksi ja aerogeelin hyödyntämiseksi eri sovelluksissa. Aerogeeli on yleisesti ottaen kevyttä ja lujaa, vaikka kaupallisten aerogeelien tiheydet yleisesti ottaen vaihtelevat $0,0011-0,5\text{ g/cm}^3$ välillä ja aerogeelit pystyvät kantamaan vähintään 5 800 kertaa oman painonsa verran kuormaa. [34; 35.]

Aerogeelin etuna on myös sen alhainen lämmönjohtuminen, mikä tarkoittaa, että aerogeelien on havaittu olevan tulenkestäviä ja siten vaikeasti syttyviä. Tämä on hyödyllinen seikka, kun mietitään moottoriajoneuvoja. Esimerkiksi, lämmönjohtumisen takia suurissa nopeuksissa ajoneuvon komponentit, muun muassa moottori, voimansiirto ja renkaat lämpenevät voimakkaasti. Lisäksi tulenkestävyydestä on etua myös törmäystilanteessa. [31; 32; 36.]

Aerogeelien yhtenä ongelmana on kuitenkin ollut niiden hygroskooppisuus ja hauraus. Aerogeelien hygroskooppisuus on ollut ongelmana, sillä perinteisesti tuotettujen aerogeelien pinta on hydrolysoitunut, eli sen pinta on täynnä hydroksyyli- eli OH-ryhmiä. Hydroksyyli-ryhmät ovat hyvin reaktiivisia ollessaan kosketuksessa veden kanssa, lisäksi aerogeeli on huokoista, joten huokosiin kulkeutunut vesi aiheuttaa kapillaari-ilmiötä huokosiin, mikä rikkoo tavanomaisen aerogeelin rakenteen. Tämä olisi mahdollista ratkaista esimerkiksi x-aerogeeleillä, risticillotetuilla titaani- tai zirkoniumaerogeeleillä, kuva 22. [32; 37.]



Kuva 22. Aerogelien materiaalivalinta taulukko, tiheys-murtumispiste [33].

Tutkimuksessa [34] oli tutkittu kolmen metallioksidiaerogelin, Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 ominaisuuksia teksturoimattomille, eli luonnollisille, ja nanoteksturoiduille, eli ydinkuoriaerogeeleille. Nanoteksturoitu aerogeele on tekniseltä nimeltään MO_x - ($\text{MO}_x / \text{SiO}_2$) - SiO_2 , joka on nanoteksturoitua metallioksidi märkägeeliä.

Tutkimuksen tulokset, taulukko 8, antavat viitteitä, että kun sandwich-paneelissa pyritään mahdollisimman kevyeseen ja lujaan ratkaisuun niin ZrO_2 -aerogeelele voisi toimia ytimenä tai ydinkennon täyteaineena. Ainoa mikä saattaa muodostua ongelmaksi, on kyseisten aerogelien jäykkyys ja hygroskooppisuus. Lisäksi NASAn artikkelin mukaan [36] x-aerogeelele toimisi ajoneuvosovelluskohteessa paremmin, sillä sen lujuus on suurempi, se on varsin taipuisaa ja isosyanaattimenetelmällä valmistettuna hydrofobista. X-aerogeelele on siis monoliittisella polymeerillä ristosilloitettu epäorgaaninen aerogeelele. Tyyppilliset aerogeelit ovat puolestaan ”luonnollisia” eli ei-ristisilloitettuja ja orgaanisia tai epäorgaanisia aerogeelelejä, täten myös varsin hauraita.

Taulukko 8. Metallialkoksidiaerogeelien tiheyksien ja lujuuksien vertailu [34].

aerogel	core-shell structured	ρ_{init}^a (mg/cm ³)	E^b (MPa)
Al ₂ O ₃	No	93	1.7
Al ₂ O ₃	Yes	143	6.7 (11.2) ^f
ZrO ₂	No	446	4.2
ZrO ₂	Yes	245	10.7
TiO ₂	No	145	1.1
TiO ₂	Yes	203	4.3

Mahdollisia hyödynnettäviä aerogeelejä [32; 34; 37; 38; 39]

- ristosillotettu poly(heksametyleeni diisosyanaatti)
- polystyreeni x-aerogeeli
- polyhedraalinen oligomeerinen silseskvioksaani eli, POSS, joka voidaan ristosilloittaa poly(4-vinyylipyridiini):ksi eli, (P4VP). [39.]

Mahdollisia yrityksiä, joilta aerogeelejä voitaisiin hankkia, ovat erilaiset ilmailutekniikkaan liittyvät tutkimuskeskukset, tutkimuslaitokset, esimerkiksi, Nasan ja Esan yhteistyöyritykset ja tutkimuslaitokset [36].

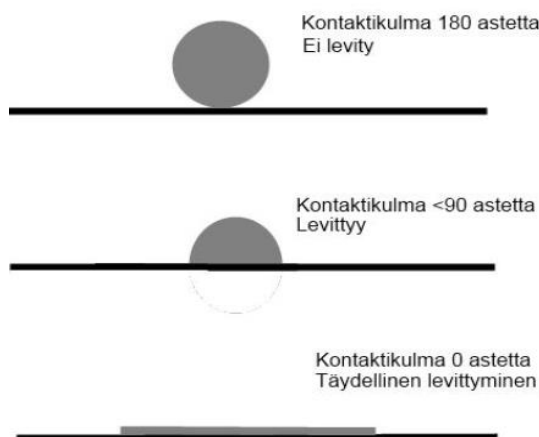
Seuraavana kysymyksenä oli, minkälainen jäykistävä kenno paneelissa toimisi. [39.] Sandwich-paneelien ydinmateriaaleista on saatavilla paljon dataa, mutta kennomateriaalin solumuodon eikä -koon optimointia varten tietoa ei juurikaan ole. Kuitenkin löydettävissä oli muun muassa yleinen maininta, että heksagoninen solumuoto olisi optimaalisin eritoten sandwich-paneeleissa, joita hyödynnetään kulkuneuvojen rakenteellisissa osissa. [18.] Solukoon optimointiin lopulta on löydettävissä ratkaisu eräästä patentista [41]. Patenttia käsitellään myöhemmin tässä työssä, osiossa 3.6.

Ydin voisi olla 10 mm paksua, sillä formula-autojen sekä muiden kulkuneuvojen rakenteellisissa sandwich-paneeleissa on yleisesti käytetty 10 mm:n paksuisia kennoja. Painon säästämiseksi kenno voisi olla Nomexia tai alumiinia. Jäykistäväksi kennoksi harkittiin myös Kevlaria, mutta sen lujuusominaisuudet olivat merkittävästi Nomexia heikom-

mat, liite I. Mikäli kenno päädytään valmistamaan Nomexista, niin kenno olisi hyvä ennen paneelin valmistusta kastaa hartsiin tai muuhun sideaineeseen, jotta kennoon saadaan lisättyä jäykkyyttä.

3.4.3 Liima

Adheesioaineen eli liiman valinnassa tulee huomioida paitsi liiman lujuus, myös sen kemialliset- sekä levittymisominaisuudet. Liiman levittymiseen vaikuttaa liiman rakenne, pintajännitys sekä viskositeetti. Kappaleiden liimauksessa tavoitteena on, että liiman levittymiskyky eli kostutuskyky on nolla, eli sen kontaktikulma on nolla, kuva 23. Kontaktikulmaan vaikuttaa matriisimateriaalin ja liiman välisten pintajännitysten suhde. Liiman pintajännityksen on oltava pienempi kuin matriisimateriaalin. Näin siksi, että liima niin sanotusti pisaroituu eikä siten levity pinnalle. Lisäksi käytettävän liiman lasittumislämpötilan tulee olla kohteen käyttölämpötila-alueen ulkopuolella. Näin siksi, etteivät liiman koheesio-ominaisuudet heikkene eikä liitos viru tai murru. Koheesio tarkoittaa siis liima-aineen sisäistä lujuutta, molekyylien välisiä kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia.



Kuva 23. Kontaktikulman vaikutus liiman levittymiseen [42].

Liimaliitoksen kestävyteen vaikuttavat suuresti esimerkiksi liiman elastisuus ja kerrospaksuus, joka vaikuttaa jännitys jakaumaan ja siten myös kappaleiden kuormitukseen. Liimauskohdan ympärille muodostuvat purseet lisäävät liitoksen reunojen liitoslujuutta.

Liimauksessa olisi tarvetta määritellä optimaalisin liimakerroksen paksuus, laatia liimaliitoksen jännitys jakauma ja optimoida liitosgeometriaa.

Tässä työssä sivutaan myös liiman valintaa. Erään opiskelijatiimin tekemä tutkimus adheesioaineista [43] viittaisi siihen, että elastinen polyuretaaniliima- ja tiivistemassa, esimerkiksi sikaflex tai vastaava, toimisi parhaimpana komposiittimateriaalien liima-aineena verrattaessa epoksi- ja polymeeriliimoihin.

Muussa tapauksessa esimerkiksi HEXCEL Compositesin REDUX® -liimakalvo tai vastaava voi tulla kyseeseen. [44.] Oletus on kuitenkin, että esimerkiksi Sikaflex-211 on kestävä-elastinen liima, joka on myös helpommin saatavilla, edullisempi ja liimausmenetelmänä yksinkertaisempi.

3.5 Laskenta

Tässä osiossa lasketaan suunnitellulle paneelille teoreettisia mekaanisen rasituksen arvoja. Taivutuslujuutta on laskettu useaan otteeseen eri yhtälöillä, sillä eri kirjallisuuslähteissä oli käytetty toisistaan eroavia yhtälöitä. Laskennan ensisijainen tarkoitus on kuitenkin osoittaa, että suunniteltu paneeli täyttää paneelille asetetut kriteerit.

Aerogeelin kimmomoduuliarvoa ei löytynyt, mutta sille löytyi eräästä tutkimuksesta johdettu lauseke, jolla kimmomoduuli pystyttäisiin laskemaan,

$$E (\text{aerogeeli}) = 9,638 \cdot \rho^{3,378} = 9,638 \cdot 0,5^{3,378} = 0,927059 \text{ GPa} [45.] \quad (20)$$

$$\text{Paneelin rajoittava arvo } E_f / E_c = \frac{\text{Kuitu+sideaine}}{\text{kenno+kuitu+aerogeeli}} \quad (21)$$

$$= \frac{360 \text{ GPa} + 0,124 \text{ GPa}}{0,050 \text{ GPa} + 360 \text{ GPa} + 0,927059 \text{ GPa}} = 1,00021 \text{ GPa}$$

Jossa E (kenno) = 0,050 GPa

E (sideaine) = 0,124 GPa

E (PBO kuitu) = 360 GPa [46.]

Sylinterinen taivutuslujuus [2.]

$$D = \frac{E_f \times t \times d^2}{2 \times (1 - \nu_f^2)} \quad (22)$$

$$= \frac{(360 \times 10^9 \text{ Pa}) \times (14 \times 10^{-3} \text{ m}) \times (17 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{2 \times (1 - 0,3^2)} = 8,00308 \times 10^{11} \text{ Pa} \approx \mathbf{800,3 \text{ GPa}}$$

Jossa $\nu(\text{PBO MH}) = 0,3$

Teoreettinen sylinterisen taivutuslujuuden arvo on hyvä, sillä 800,3 GPa > 365,0 MPa.

Antiklastinen taivutuslujuus [2.]

$$D = \frac{E_{fx} \times b \times t \times d^2}{2} \quad (23)$$

$$= \frac{(360 \times 10^9 \text{ Pa}) \times 0,5 \text{ m} \times (14 \times 10^{-3}) \times (17 \times 10^{-3})^2}{2} = 364140 \text{ Pa} = \mathbf{364,1 \text{ kPa}}$$

Teoreettinen antiklastinen taivutuslujuus on yllättävän pieni, minkä vuoksi sekä paneelin valmistuksessa että käytössä on pyrittävä pitämään antiklastis-suuntaiset kuormittavat voimat pieninä.

Euler Bernoullin yhtälön mukainen taivutuslujuus, D

$$D = \frac{E_{fx} \times b \times t^3}{6} + \frac{E_{fx} \times b \times t \times d^2}{2} + \frac{E_{cx} \times b \times c^3}{12} \quad (24)$$

$$= \frac{(360 \times 10^9 \text{ Pa}) \times 0,5 \text{ m} \times (14 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{6} + \frac{(360 \times 10^9 \text{ Pa}) \times 0,5 \text{ m} \times (14 \times 10^{-3} \text{ m}) \times (17 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{2} +$$

$$\frac{(360,05 \times 10^9 \text{ Pa}) \times 0,5 \text{ m} \times (10 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12}$$

$$= 4,20379 \times 10^8 \text{ Pa} = \mathbf{420,4 \text{ MPa}}$$

Teoreettinen taivutuslujuus D on hyvä, sillä se ylittää sääntömääräisen vaatimuksen (365 MPa) ja näin pieni varmuuskerroin saavutetaan.

Taivutuslujuus, kun oletetaan, että paneelin ydin on jäykkä, mutta yleisesti ottaen pehmeä, joten sen kimmomoduuli on huomattavasti pienempi, kuin pintalevyjen. Tämä toteutuu suunnitellussa paneelissa. $E_c \ll E_f$ ja kun oletetaan pintalevyjen olevan ohuet, D:n yhtälöksi muodostuu [47]

$$D \approx E_f \times \frac{b \times (h^3 - h_c^3)}{12} = 360 \times 10^9 \text{ Pa} \times \frac{0,5 \text{ m} \times ((24 \times 10^{-3} \text{ m}) - (10 \times 10^{-3} \text{ m}))}{12} \quad (25)$$

$$= 2,1 \times 10^8 \text{ Pa} = \mathbf{210,0 \text{ MPa}}.$$

Tässä tapauksessa teoreettinen taivutuslujuus on heikko, sillä $210,0 \text{ MPa} < 365 \text{ MPa}$. Kuitenkin on muistettava, ettei yhtälö huomioi, että tässä tapauksessa ydin muodostuisi useammasta komponentista.

Kolmepistetäivutuksen taivutusmomentti, M

$$\frac{WL}{4} = \frac{7500\text{N} \times 400\text{mm}}{4} = 750000 \text{ J} \quad (26)$$

Taivutusjäykkyys, D [5].

Maksimi leikkausvoima, F

$$P/2 = 7800 \text{ N}/2 = 3900 \text{ N} \quad (27)$$

Maksimi taivutusmomentti, M

$$(P \cdot l)/4 = (7800 \text{ N} \cdot 0,5\text{m})/4 = 975 \text{ Nm} \quad (28)$$

Taipumavakio taivutuksessa, k_b

$$1/48 = 0,020833 \quad (29)$$

Leikkaus taipumavakio, k_s

$$1/4 = 0,25$$

$$D = \frac{E_f \times t_f \times h^2 \times b}{2} \quad (30)$$

$$= \frac{(360 \times 10^9 \text{ Pa}) \times (14 \times 10^{-3} \text{ m}) \times (24 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \times 0,275 \text{ m}}{2} = 399168 \text{ Nm}^2 \approx \mathbf{399,2 \text{ kPa}}$$

Taipuma [5.]

$$\vartheta = \frac{k_b \times P \times l^3}{D} = \frac{1}{48} \times \frac{7800 \text{ N} \times 0,5^3}{399168 \text{ Nm}^2} = 0,000102 \text{ m} \approx \mathbf{0,1 \text{ mm}} \quad (31)$$

Jossa P = kuormittava voima = 7,8 kN = 7800 N

l = pituus

Pinta kuormitus [5.]

$$\sigma_f = \frac{M}{h \times t_f \times b} = \frac{975 \text{ Nm}}{(24 \times 10^{-3}) \times (14 \times 10^{-3}) \times 0,5 \text{ m}} = 5,80357 \times 10^6 \text{ Pa} = \mathbf{5,8 \text{ MPa}} \quad (32)$$

Laskettu jännitys on vähemmän kuin pintamateriaalin tyypillinen myötölujuus, ~2,75 GPa, joten pinnoille tulee varmuuskerroin jo valmiiksi [48].

Ytimen kuormitus [5.]

$$\tau_c = \frac{F}{h \times b} = \frac{3900 \text{ N}}{(24 \times 10^{-3}) \times 0,5 \text{ m}} = 325000 \text{ Pa} \approx \mathbf{0,3 \text{ MPa}} \quad (33)$$

0,3 MPa on vähemmän, kuin kennon W -suuntainen leikkauslujuus, 0,71 MPa, mikä täten antaa varmuuskertoimen ytimelle.

Paneelin paino

Suunnitellulle paneelille määritettiin teoreettinen massa neliometrillä, taulukko 9. Todellinen massa voi erota teoreettisesta muun muassa valmistusteknisten seikkojen vuoksi, kerrospaksuuksien osalta tai mikäli käytetään suunnitelmasta eroavia materiaaleja.

Taulukko 9. Sandwich-paneelimateriaalien erittelytaulukko.

Materiaali	Massa per 1m ² , kg	Kerrospaksuus, mm
16 kerrosta PBO HM kuitumattoa (1560 kg/m ³)	$16 * (271 \text{ g/m}^3 [77]) = 4336 \text{ g} \approx \mathbf{4,34}$	$16 * 0,44 \text{ mm} = \mathbf{7,00 \text{ mm}}$
BMI lujite aine (1250 kg/ m ³)	$(20 * 10^{-6} \text{ m} * 1 \text{ m} * 1 \text{ m}) * 1250 \text{ kg/m}^3 = 0,00002 \text{ m}^3 * 1250 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{0,025}$	-
Sikaflex (1,3 kg/l)	$\text{tilavuus} * \text{tiheys} = ((3 * 10^{-3} \text{ m}) * 1 \text{ m} * 1 \text{ m}) * 1,3 \text{ kg/m}^3 = 0,0039 \approx \mathbf{3,90 * 10^{-3}}$	3,00
Ydin (aerogeeli, PBO, Nomex)	$\text{Massa(aerogeeli)} = \text{Keskiarvotiheys} * \text{tilavuus} = 0,25055 \text{ kg/m}^3 * (10 * 10^{-3} \text{ m} * 1 \text{ m} * 1 \text{ m}) = 0,002506 \approx \mathbf{2,51 * 10^{-3}}$ $\text{Massa(PBO)} = 3 * 271 \text{ g/m}^3 = 813 \text{ g} \approx \mathbf{0,81}$ $\text{Massa(Nomex)} = ((10 * 10^{-3} \text{ m}) * 1 \text{ m} * 1 \text{ m}) * 56,07 \text{ kg/m}^3 = 0,5607 \approx \mathbf{0,56}$	10,00
Sikaflex (1,3kg/l)	$\mathbf{3,90 * 10^{-3}}$	3,00
16 kerrosta PBO HM kuitumattoa	4,34	7,00
BMI lujite aine (1250 kg/ m ³)	0,025	-
Summa	10,11	30,00
Suunnitellun paneelin massan suhde nykyisen paneelin massaan	$1 - (4,00/10,11) = 1 + 0,39564787 = 1,39564787 \approx 140,00 \%$	

Kustannusarvio

Paino/tilavuusyksikkökohtainen kustannusarvio on laadittu suunnitellulle sekä vaihtoehtoisille materiaaleille, taulukko 10. Kustannusarviossa ei ole otettu huomioon henkilökustannuksia, paneelin pinnoitetta eikä lopullista tarvittavan materiaalin määrää.

Taulukko 10. Materiaalien kustannusarvio.

Materiaali	Hinta per paino tai tilavuusyksikkö	Jälleenmyyjä
PBO-kuitu	~15,00 €/kg [49.]	Toyobo CO. LTD, Eurofibers
BMI sideaine	>56,77 €/kg [50.]	Renegade materials corporation
Polyimidi sideaine	>90,85 €/kg [50.]	Renegade materials corporation
X-Aerogeeli	Laadittava tarjouspyyntö	NASA, ESA, muu avaruustutkimuslaitos
Adheesioaine, Sikaflex-211	≥33,17 €/l	Motonet Oy, K-rauta, stark tai muu yritys
Adheesioaine, Redux®	Laadittava tarjouspyyntö	HEXCEL composites

3.6 Valmistus

Paneelin valmistukseen tulisi tällöin hankkia seuraavia materiaaleja, oletuksena kuitenkin, että välineet ja laitteet ovat käytettävissä joko tiimin puolelta tai sponsoriyrityksillä tai vastaavaa:

- Kevlar tai geeli tai maalipinnoite
- PBO-kuitumatto
- BMI-lujiteaine
- adheesioaine esimerkiksi Sikaflex-liima
- heksagoninen verkko tai kenno
- aerogeelipaloja.

Suunnitellun materiaalikombinaation ajoturvallisuus on mahdollista saada korkeaksi ja paneeli on mahdollista myös lisäoptimoinnilla saada tuotannossa valmistettavaan autoon kelpaavaksi. Tällöin edellytyksenä on tehdä riittävät mekaanis-kemialliset testaukset, jotta valmistus saadaan validoitua sekä varmistettua, että paneeli täyttää kaupalliset vaatimukset. [51; 52.]

Mikäli sandwich-paneelin valmistuksessa saataisiin käyttää patenttia US20130263727 A1 [41], tällöin tarkka valmistusproseduuri tulee katsoa lunastetusta patentista. Sandwich-paneeli voitaisiin rakentaa seuraavista komponenteista:

- kaksi kappaletta pintalevyjä
- heksagoninen tai suorakaidesoluista rakennettu kenno
- adheesioaine
- kaksi kerrosta aerogeelipaloja, kääritty kuitumattoon.

Kuvassa 24 on visuaalinen esitys sandwich-paneelin rakenteesta. Sandwich-paneelissa olisi paneelien epäkeskisen kaarevan muodon vuoksi hyvä käyttää heksagonista kennoa ytimen vahvikkeena [5]. Kuitenkin huomioitaessa valmistuksen helppous ja yksinkertaisuus saattaa neliskanttinen tai suorakulmainen tukikehikko olla parempi ratkaisu.

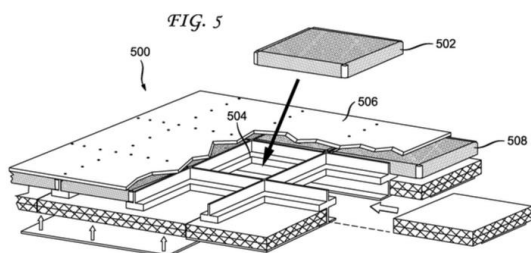
Patentissa esitetään valmistus proseduurina, että kennon solut täytetään taipuisalla paisutetulla vaahdolla, joka vahvistetaan murtumien välttämiseksi käärimällä vaahtopala, palalla kuitumattoa. Tätä pystyttäisiin soveltamaan, niin että aerogeelistä valmistetaan soluihin tyköistuvia paloja, jotka kääritään vähintään kolmeen PBO-kuitumattoon. Käärityt aerogeelipalat tiivistetään prässillä tai autoklaavissa, jotta saadaan ylimääräinen ilma poistettua. Tiivistyksen tarkoituksena on myös tehdä paloista sileitä, tiiviitä ja saada paloista viimeisteltyjä. Tiivistyksessä tulee kuitenkin huomioida, että aerogeelilla on tilaa taipua. Tarvittaessa kuitumatto pystytään myös liimaamaan aerogeelipalaan pienellä määrällä adheesioainetta.

Aerogeelipalojen kääriminen kuitumattoihin antaa niille lisää lävistyksen kestävyyskykyä. Kuidulla päällystetty aerogeelipala saa kuitumaton kasvattaman kuormituspinta-alan ansiosta osakseen parannellut kimmoisan törmäyksen ominaisuudet. Törmäys ja erityisesti lävistävässä törmäyksessä ytimessä sijaitseva kuidun tuoma lisäpinta-ala kasvattaa py-

säytysvoimaa. Suuri määrä kuitua kuormittavan jännityksen alla absorboi vetojännityksen aiheuttamaa energiaa ja samalla työntää lävistyksessä mahdollisesti muodostuneita pirstaleita pois. Kun päällystetty pala työntää törmäyksessä aiheutuneita pirstaleita pois, niin jännitys jatkaa kasvuaan, mutta samalla vetää itseään päin palasta pursuneita osia. Tämä aiheuttaa törmäyksen/lävistyksen kineettisen energian äkillisen hidastumisen ja hajaantumisen. [41.]

Testaukset ovat osoittaneet, että palojen päällystäminen kuitumatolla voi huomattavasti kasvattaa nopeuksia, joita pala kykenisi absorboimaan ilman hajoamista. Sovelluksen etuna voidaan katsoa olevan myös painon kevennys, sitkeyden kasvu sekä kasvanut kyky pitää hajonneet palat koossa vielä törmäyksen jälkeen. [41.]

Paneelia tukeva kenno voisi olla hyvä ennen paneelin valmistusta kastaa esimerkiksi fenolihartsiin.



Kuva 24. Paneelin rakenne [41].

Pintalevyt voitaisiin valmistaa siten, että PBO-kuitumatot puhdistetaan vuorotellen asetonilla ja ionivaihdetulla vedellä, jotta pinnalta saadaan poistettua rasvat ja suolat sekä pinta saadaan karhennettua liimausta ja pinnoitusta varten. Tämän jälkeen kuidut kuivataan 105 °C:ssa tyhjiöuunissa noin kolme tuntia ennen sideaineen lisäystä. BMI-hartsin liuotetaan asetoniin, niin että saadaan 40 m~ % liuos.

PBO-kuitu kyllästetään BMI-asetoniliuoksella. Kyllästytyt kuidut kuivataan 40 °C:ssa tyhjiöuunissa yhden tunnin ajan, jotta VOC-päästöt jäävät alle 2,5 m~ %:iin. Komposiitti valmistetaan alipaineinjektiolla tai muottipuristuksella 130 °C:ssa tunnin ajan.

Ennen liimauksia pintalevyt pyyhitään esimerkiksi asetonilla, jonka annetaan haihtua 20 min. Mikäli pintalevyt eivät ole karhentuneet riittävästi levyjen valmistuksen yhteydessä, niin pinta olisi hyvä kevyesti karhentaa. Tämä voitaisiin suorittaa esimerkiksi käsin hio-mapaperilla, ristikkäisillä vedoilla. Hiontapöly poistetaan karistamalla isoin osa ja -painelmalla loput. Työskentelyssä on huomioitava, ettei hiontapölyä päädy keuhkoihin. Tämä on vältettävissä eristetyssä tilassa työskentelemällä ja käyttämällä hengityssuojainta.

3.7 Materiaalien testaussuunnitelma

Formula Student Germany -säännöt [17] vaativat ainakin kaksi materiaalitestistä, kolmipistetaivutustestin ja lävistystestin, joten vähintään nämä tulee toteuttaa. Säännöissä mainitaan lisäksi ohjeistukset taivutus- ja lävistystestien suorittamisesta. Myöhemmin tässä raportissa on vielä suomennettuna sääntöjen edellyttämät testaukset, 4.5.1 ja 4.5.2.

Tavoitearvot: taivutus ja materiaali testeille, paneelin kimmomoduuli 200 GPa, myötölujuus 305 MPa, murtolujuus 365 MPa.

Lisäksi jokaisessa testissä tulisi määrittää, mitkä seikat aiheuttavat virhettä tuloksissa sekä laskennallisesti määrittää mittausepävarmuudet.

3.7.1 Kolmipistetaivutustesti

Tarvittavat välineet ja laitteet

- kolmipistetaivutuslaitteisto
- viivoitin/työntömitta
- koekappaleita 275 mm x 500 mm, vähintään kaksi kappaletta.

Testipaneelien tulee olla kooltaan 275 mm x 500 mm ja niiden tulee olla suunnittelultaan, ladonnaltaan ja valmistusmenetelmältään samanlainen, kuin lopullinen tuote. SES-dokumenttiin tulee sisällyttää testidata, proseduuri ja kuvat testausproseduurista ja testattavista kappaleista. Kuvissa tulee näkyä kahden tuen ja painimen dimensiot. Testitulok-

sia tulee käyttää jokaisen laminaattipaneelin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien johtamiseen. Testattavan kappaleen ollessa sivupaneelilevy testeissä tulee todistaa, että sivupaneelilla on samat nurjahdus-, myötölujuus- sekä energian absorptio-ominaisuudet kuin kahdella sivutörmäysrakenneteräsputkella. Tukien välinen etäisyys tulee olla 400 mm. Painimen tulee olla metallia ja säteen tulee olla 50 mm. Painimen tulee tulla kappaleen reunojen yli, jotta vältetään kulmajännitykseltä. Painimen ja testikappaleen välissä ei saa olla mitään kappaleita. [17.]

Hyvän tavan mukaisesti taivutustestejä tulisi suorittaa vähintään kahdelle koekappaleelle, jotka ovat näyte ja referenssinäyte. Kuitenkin, yleisesti hyvä vertailukokeiden määrä on viisi koekappaletta ja niille referenssit.

Tuloksista raportoidaan, täyttävätkö paneelin ominaisuudet sääntömääräiset vaatimukset ja keskiarvollinen prosentuaalinen analyysi kuinka paljon tulokset eroavat annetuista sääntömääräisistä arvoista. Määritetään keskiarvolliset minimi- ja maksimikuormat ja -lujuudet, vaurioitumismekanismi, taipuman suuruus. Tuloksista laaditaan vielä kuormataipumakäyrät.

3.7.2 Lävistystesti

Tarvittavat laitteet ja välineet

- lävistyskoelaitteisto
- viivoitin/työntömitta
- koekappaleita 100 mm x 100 mm, vähintään kaksi.

Testeissä tulee mitata voima, joka vaaditaan 25 mm:n halkaisijan tylpän lävistimen työntämiseen laminaattinäytteen läpi. Testikappaleen tulee olla kooltaan vähintään 100 mm x 100 mm. Ytimen ja pintalevyjen tulee olla identtiset materiaaliltaan, suunnittelultaan sekä valmistusproseduuriltaan lopullisen käytettävän materiaalin kanssa. Testikappaleen kiinnityksen tulee tukea koko näytettä, lukuun ottamatta 32 mm:n reikää, joka on koaksiaalaisesti linjassa lävistäjän kanssa. [17.]

Hyvän tavan mukaisesti taivutustestejä tulisi suorittaa vähintään kahdelle koekappaleelle, jotka ovat näyte ja referenssinäyte. Kuitenkin, yleisesti hyvä vertailukokeiden määrä on viisi koekappaleita ja niille referenssit.

Tuloksista raportoidaan seuraavaa:

- Analysoidaan, täyttävätkö paneelin ominaisuudet sääntömääräiset vaatimukset.
- Määritetään keskiarvoinen prosentuaalinen analyysi, kuinka paljon tulokset eroavat annetuista sääntömääräisistä arvoista.
- Määritetään keskiarvoiset minimi- ja maksimikuormat ja -lujuudet.
- Määritetään vaurioitumismekanismi.
- Määritetään taipuman suuruus.
- Tuloksista laaditaan kuorma-poikkeamakäyrät.

3.7.3 Turpoamisen ja vedenimeytymisen testaus

Tarvittavat välineet ja laitteet

- analyysivaaka
- mittausvälineet, työntömitta, viivoitin
- koekappaleiden ripustusvälineet esimerkiksi, statiivi ja klamppi
- nestettä kestävä astia, esimerkiksi ämpäri.

Tarvittavat kemikaalit

- ionivaihdettua vettä
- NaCl:a
- bensiiniä
- jarrunestettä.

Koekappaleiden koko 100 mm x 100 mm, koekappaleita yhteensä kahdeksan kappaletta, tutkittava näyte ja referenssi jokaiselle upotustestille.

Koekappaleet upotetaan nesteellä täytettyihin astioihin 25 mm:n syvyydelle nesteen pinnasta. Kaksi koekappaletta upotetaan ionivaihdetulla vedellä täytettyyn astiaan, kaksi 5 t-% suolavedellä täytettyyn, kaksi bensiinillä täytettyyn ja kaksi jarrunesteellä täytettyyn.

Veden/nesteen imeytymisestä tehdään dimensio ja massanmuutosmittaukset 24 tunnin välein. Kaikki häiriöt testissä kirjataan ja testiä jatketaan, kunnes veden imeytyminen saavuttaa tasapainon. Kun koekappaleet ovat saavuttaneet tasapainon, ne kuivataan kevyesti pinnoilla olevasta ylimääräisestä vedestä/nesteestä ja niiden dimensiot ja massat mitataan testin päätöspisteessä.

Tuloksista raportoidaan seuraavaa:

- Mitatut dimensiot sekä massat kirjataan.
- Tuloksista laaditaan aika-massanmuutos sekä aika-dimensiokuvaajat.
- Lasketaan veden/nesteen absorptioprosentti.
- Tuloksista analysoidaan keskiarvollinen veden-/nesteenimeytyvyys.
- Määritetään paneelin turpoaminen prosentuaalisesti erikseen jokaiselle testatulle nesteelle.

Veden imeytyminen lasketaan massan muutoksesta,

$$\text{Veden absorptio} \sim \% = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (34)$$

Jossa W_0 = Koekappaleen massa ennen testejä

W_1 = Koekappaleen massa testin jälkeen

3.7.4 Liimaliitoksen lujuustestaus

Tarvittavat välineet ja laitteet

- vetokoekone
- puristimia tai lasihelmiä
- ilmankosteusmittari
- lämpömittari
- koelevyjä 10 kappaletta
- hiomapaperia P80
- tarvittaessa uuni.

Tarvittavat kemikaalit

- adheesioainetta
- rasvan- ja lianpoistoon asetonia, laboratoriolaatua.

Liimaliitoksien testausproseduurissa sovelletaan standardia ASTM D 5868 - 01 [42].

Koekappaleiden koko 25,4 x 100 mm ja koekappaleiden lukumäärä yhteensä 10. Koekappaleina käytetään sandwichpaneelin pintalevymateriaalia.

Pinnat puhdistetaan ja karhennetaan, kuitenkin niin, ettei käsittely heikennä komposiittien ominaisuuksia. On käytettävä kuitenkin sellaista käsittelyä, joka on sovellettavissa varsinaisiin tuotanto-oloihin.

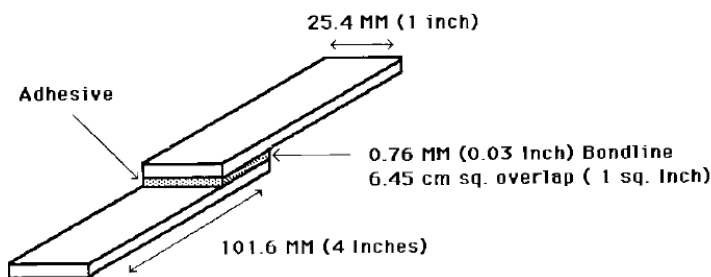
Koeliitoksien valmistelu

Adheesioaine tulee lisätä pinnalle/pinnoille valmistajan ohjeiden mukaisesti tai muun validin dokumentin mukaisesti. Kaksikomponenttisten adheesioaineiden kohdalla komponentin tulee sekoittaa valmistajan ohjeiden mukaisesti. Adheesioaine kovetetaan.

Liitosgeometriaa, kuva 25, voidaan hallita tarvittaessa esimerkiksi puristimilla, lasihelmillä tai muulla asianmukaisella tavalla, jotta adheesioaineen kerrospaksuus on 0,76 mm liitoskohdassa. Mikäli lasihelmiä käytetään, niitä tulee käyttää minimimäärä adheesioaineen kerrospaksuuden saavuttamiseksi. Puristusaine on sallittu. Koekappaleet ovat 64,5 mm

pituudeltaan päällekkäin ja leveydessä koko mitaltaan toistensa suhteen linjassa. Testausliitoksia tulee olla vähintään viisi.

Koekappaleiden tulee antaa viilentyä huoneenlämpötilaan vähintään yhden tunnin ajan, mikäli adheesioaine on kovetettu korotetussa lämpötilassa. Mikäli kovetus on toteutettu huoneenlämpötilassa, niin kappaleiden tulee asettua koko kovetusaika + 10 % ennen testauksia.

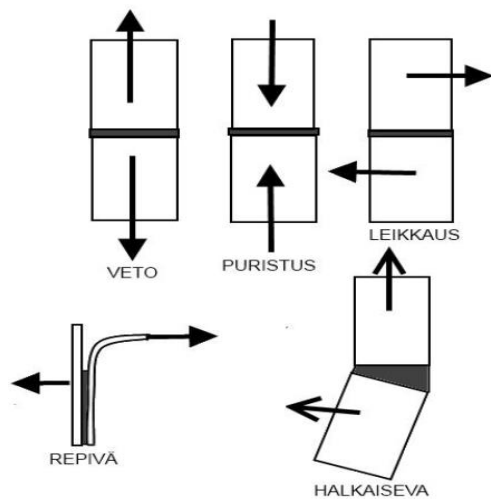


Kuva 25. Liitosgeometria [42].

Testausproseduuri

Koekappaleet kiinnitetään päistään koelaitteiston leukoihin, joiden etäisyys tulee olla 75 mm ja kiinnitysleukojen leveys minimissään 25,4 mm. Koekappaleen kuormitusaste tulee olla 13 mm/min.

Lisäksi mikäli asianmukaista laitteistoa on saatavilla sekä koekappaleita ja testejä voidaan tehdä enemmänkin, liitoslujuustestejä voisi myös tehdä puristus-, leikkaus-, halkaisu- sekä repivässä suunnassa. Näin siksi, että käyttökohteessa sandwich-paneelit voivat altistua erisuuntaisille kuormituksille, esimerkiksi kolmipistetaivutuksessa sandwich-paneelin sisällä liimausliitokset altistuvat yläpinnalla puristaville ja leikkaaville jännityksille. Paneelin alapinta puolestaan altistuu pinta-alan keskiosassa puristukselle, laidalla vedolle ja leikkauskuormituksille, kuva 26.



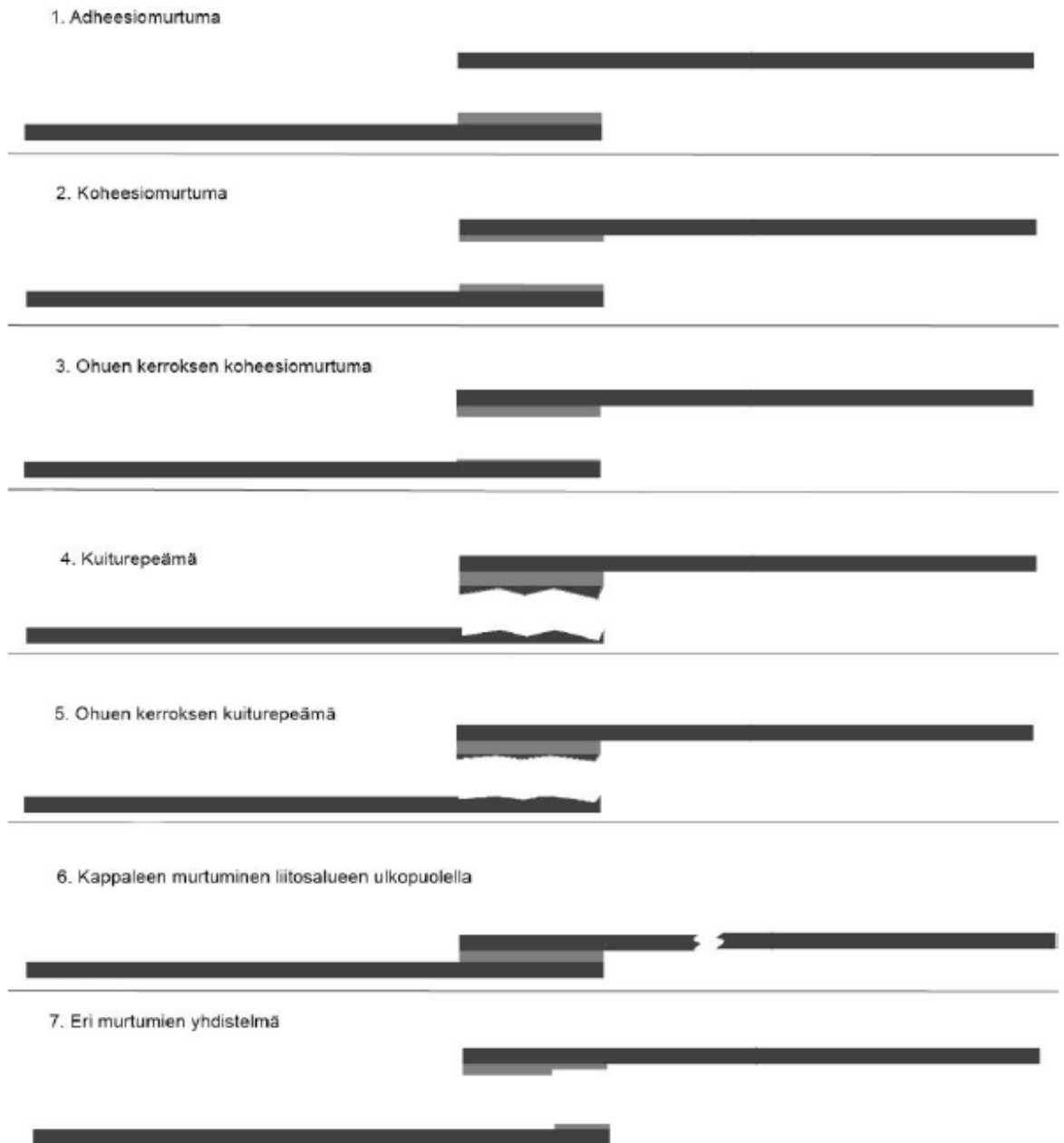
Kuva 26. Liitoskuormitukset [18].

Raportointi

Testauksista tulee raportoida seuraavat asiat:

- adheesioaineen täydelliset tuotetiedot, sisältäen valmistajan tuotenumeron ja adheesiotyyppin
- matriisimateriaalien täydelliset tuotetiedot, sisältäen hartsin tyyppin ja kuitujen suuntauksen ja pinnan esivalmistelussa käytetyt työmenetelmät
- kovettumisolosuhteet: aika, lämpötila, suhteellinen ilmankosteus, ympäristöaltistukset
- yksittäiset huippukuorma-arvot, kPa (psi) ja keskiarvot maksimi ja minimi arvoista
- venymä-jännityskäyrät
- testauslämpötila ja -olosuhteet (muun muassa ilman suhteellinen kosteus).
- vauriomekanismi (esimerkiksi kuiturepeämä, adhesio-, koheesiomurtuma).

Alla on esitetty yleisimmät vaurioitumismekanismit, kuva 27.



Kuva 27. Adheesioitosten vaurioitumismekanismit [18].

4 Yhteenveto

Paneelin ydinmateriaaliksi valikoitui siis rakennetta vahvistava Nomex-kenno, jonka solut täytettiin taipuisalla paisutetulla vaahdolla, tarkemmin taipuisalla x-aerogeelillä. Ytimessä päädyttiin käyttämään sekä kennoa että paisutettua vaahtoa, sillä kennorakenteisten sandwich-paneelit ovat alttiita murtumaan kennojen solujen sisällä olevan tyhjätilan kohdalta. Lisäksi pintalevyjen on tarkoitus ytimen avulla toimia taivutuksessa yhden palkin tavoin, jolloin taipuisa aerogeeli ydin ei yksinään riitä toteuttamaan tätä. Nomex-kennoon päädyttiin paino-säästösyistä, mutta mikäli kokeelliset testit osoittavat ytimen liian heikoksi, niin tällöin on syytä pysyä alumiinikennossa. Kennopakisuuden suunniteltiin olevan 10 mm.

Pintalevyjen ongelmana oli hauras käyttäytyminen ja liian alhainen lujuus. Hauras käyttäytyminen ratkaistiin vaihtamalla kuidun ja sideaineen materiaalit sekä laatimalla paksummat pintalevyt. Pintalevyt suunniteltiin tehtäväksi PBO-kuidusta sekä BMI-sideaineesta, latomalla 16 kerrosta kuitua ja lopullisena paksuutena 7 mm. Liimauksessa ongelmana ollut liitoksen liian alhainen lujuus sekä pinnanmyötö ratkaistiin vaihtamalla elastiseen, mutta lujaan adheesioaineeseen. Selvityksen perusteella, esimerkiksi Sikaflex-211, HEXCEL Compositesin REDUX® -liimakalvo tai vastaava voisi olla optimaalinen adheesioaine. Mikäli Sikaflexiä -211:tä käytettäisiin, niin liimakalvon optimaalinen paksuus valmistajan mukaan olisi 2–3 mm.

Suunniteltu paneeli täyttää sääntömääräiset vaatimukset varmuuskertoimin. Toivottua painosäästöä ei saavuteta, mikäli paneelin halutaan toteuttavan sääntömääräiset mekaaniset vaatimukset. Suunniteltu paneeli on 140,00 % painavampi, kuin tämän hetkinen paneeli ja sen pintalevyt ovat 6 mm paksummat. Puolestaan kennoydin, jonka suunniteltu korkeus (10 mm) on 33 % tämän hetkisen alumiinisen kennon korkeudesta (30 mm). Lisäksi laskennallisesti paneelin sylinterinen taivutuslujuus on $800,3 \text{ GPa}$, joka on 2193 kertaa suurempi, kuin sääntömääräinen murtolujuus (365 MPa) ja Euler-Bernoullin yhtälön mukainen taivutuslujuus on $420,4 \text{ MPa}$, mikä puolestaan on 13 % suurempi, kuin sääntömääräinen (365 MPa). Laskettujen lujuusominaisuuksien yhteydessä tulee huomioda, etteivät yhtälöt huomioi ytimessä olevien PBO-kuitupinnoitteisten aerogeelipalojen vaikutusta paneelin lujuusominaisuuksiin.

Lisäksi laskennalliset lujuusarvot eroavat toisistaan merkittävästi, mikä vain osoittaa, että yhtälöt ovat yleispäteviä, mutteivat juuri tämänlaiselle paneelille optimaalisimpia simuloimaan sen lujuusominaisuuksia. Näin siksi, että jo kirjallisuusmateriaalissa [18] F1-formuloissa sivupaneeleissa ja törmäyssuojissa käytetään samaa PBO-kuitua. Kyseiset F1-formulan paneelit kestävät 750–900 kg:n šokkikuormituksen ja erisuuntaisia piste-kuormituksia 1 000–7 500 kg:n kuormaa, noin 15 mm:n maksimitaipumalla. Ainoa mahdollinen poikkeavuus paneelien välillä voi olla sivupaneeleissa käytetty sideaine ja kenomateriaali.

Yksi tutkittava seikka olisi testata, kestääkö pelkkä yksi pintalevy Formula Student Germany -sääntöjen edellyttämät kuormat. Näin siksi, että Formula Student -luokan ajoneuvojen ei tarvitse kestää aivan yhtä paljon kuormia, kuin F1-formuloiden. Lisäksi yksittäisen pintalevyn lujuusominaisuuksien selvittämisestä saataisiin arvokasta dataa tulevia ajoneuvoja varten.

Paneelien edelleen kehittäminen olisi suotavaa, sillä esimerkiksi paneeliin kohdistuvien kuormien jakautuminen olisi hyödyllistä simuloida esimerkiksi ANSYS-nimisellä ohjelmalla tai muulla vastaavalla. Lisäksi paneelin liimauksessa olisi tarvetta määritellä optimaalisin adheesioaine, optimaalisin liimakerroksen paksuus, laatia liimaliitoksen jännitysjauma ja optimoida liitosgeometriaa. Lisäksi voisi olla hyödyllistä, että pintalevyjen valmistusta tehostettaisiin ja optimoitaisiin levyjen ominaisuuksia edelleen paneeliin paremmin soveltuviksi.

Lähteet

- 1 Achilles, Petras. 1998. Verkkodokumentti. Design of Sandwich Structures. Cambridgen yliopisto, insinööritieteiden laitos. <<https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/236995/design?sequence=1>> Luettu 8.11.2017.
- 2 Sadighi, M; Dehkordi, A. A; Khodambashi, R. 2009. Verkkodokumentti. A Theoretical and Experimental Study of Failure Maps of Sandwich Beams with Composite Skins and Honeycomb Core. <http://miscj.aut.ac.ir/article_193_48d39b276be5e9893aab9402319de84e.pdf> 30.3.2009 Luettu 5.12.2017.
- 3 Wennberg, David. Verkkodokumentti. A Light Weight Car Body for High-Speed Trains. <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:487670/fulltext01>> Luettu 7.12.2017.
- 4 Schwan, Marina; Tannert, René; Ratke, Lorenz. 2015. Verkkodokumentti. New soft and spongy resorcinol-formaldehyde aerogeelis. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844615301248>> 15.9.2015. Luettu 5.12.2017.
- 5 HexWeb™ HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY. 2000. HEXCEL COMPOSITES. <http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf> Luettu 7.11.2017.
- 6 What is sandwich panel. 2010. Verkkodokumentti. <http://www.sandwichpanels.org/articles/article_whatisasandwich.html> 2010. Luettu 15.1.2018.
- 7 What is sandwich structure? 2018. Verkoartikkeli. The welding institute. <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-a-sandwich-structure/>> 2018. Luettu 15.1.2018.
- 8 Kuva <<http://www.stress-tools.net/wp-content/uploads/besta11.png>> Luettu 15.1.2018.
- 9 Beams: Simple beam theory. 2015. Video. Monash University. <<https://www.youtube.com/watch?v=rbcNgIXxHFw>> 6.4.2015. Katsottu 5.12.2017.
- 10 How a Composite Sandwich Panel Works. 2010. Verkkodokumentti. http://www.sandwichpanels.org/articles/article_whatmakessandwich.html Luettu 7.11.2017.
- 11 Dodson, CTJ. 1997. Verkkodokumentti. A geometry view. <<http://www.maths.manchester.ac.uk/~kd/geomview/geometry.html>> 1997. Luettu 15.1.2018.

- 12 Euler Bernoulli Beam Theory. 2017. Verkkoartikkeli. HealthResearchFunding <<https://healthresearchfunding.org/euler-bernoulli-beam-theory-explained/>> 30.3.2017. Luettu 5.12.2017.
- 13 Woods, Tori. 2011. Verkkoartikkeli. Aerogeelis: Thinner, Lighter, Stronger. SGT Inc, NASA's Glenn Research Center. <<https://www.nasa.gov/topics/technology/features/aerogeelis.html>> 28.7.2011. Luettu 5.12.2017.
- 14 Arbaoui, Jamal; Schmitt, Yves; Pierrot, J-Luc; Royer, Francois-Xavier. 2014. Verkkodokumentti. Numerical simulation and experimental bending behavior of multi-layer sandwich structures. <<http://www.ptmts.org.pl/2014-2-arbaoui-in.pdf>> 2014. Luettu 13.12.2017.
- 15 Steeves, Crag A; Fleck, Norman A. 2004. Verkkodokumentti. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite face and a foam core, loaded in three-point bending. Part 1: analytical models and minimum weight design. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740304001031>> 10.6.2004. Luettu 7.12.2017.
- 16 Lockney, Dan. Durable Aerogeeli Technologies; For thermal insulation and lightweight structures. NASA's Glenn Research Center. <<https://technology.nasa.gov/patent/TOP3-411>> Luettu 5.12.2017.
- 17 Formula Student Rules 2018, version 1.0. 2017. Verkkodokumentti. <https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2018/rules/FS-Rules_2018_V1.0.pdf> Luettu 7.11.2017.
- 18 Pignacca, Luca. 2011. Speed and safety: composite materials in motorsport; Verkkoaineisto. Dallara Altair EHTC. <<https://www.slideshare.net/AltairHTC/speed-and-safety-composite-materials-in-motorsport>> 8.11.2011. Luettu 4.12.2017.
- 19 Hearle, JWS. Julkaistuverkossa 2013, alkuperäinen 2001. High performance fibers 2. Verkkoaineisto. <<https://www.slideshare.net/kabirasm07/lesson4-26809370>> 2.10.2013. Luettu 4.12.2017.
- 20 Zylon fibers. 2013. Verkkoaineisto. <<https://www.slideshare.net/sharifnejad/zylon-fibers>> 3.3.2013. Luettu 4.12.2017.
- 21 Technical Information (Revised 2005.6) Pro fiber ZYLON®. Verkkodokumentti. Toyobo CO. LTD. <<http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/zylon-p/busseip/technical.pdf>> 2005. Luettu 5.12.2017.
- 22 Lockney, Dan. Polymer Cross-Linked Aerogeelis (X-Aerogeelis); Improved environment durability and elasticity for aerospace and terrestrial applications. NASA's Glenn Research Center <<https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-20>> 5.12.2017.

- 23 Eurenium, Carl Andersson; Danielsson, Niklas; Khokar, Aneesh; Krane, Erik; Olsson, Martin; Wass, Jacob. 2013. Verkkodokumentti. Analysis of composite chassis. The department of applied mechanics, Chalmers university of technology, Göteborg Sweden. <<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/191830/191830.pdf>> 2013. Luettu 16.1.2018.
- 24 ASTM D 5868 - 01. 2001. Verkkodokumentti. Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding. <<ftp://185.72.26.245/Astm/2/01/Section%2015/ASTM1506/PDF/D5868.pdf>> Toukokuu 2001. Luettu 4.12.2017.
- 25 Aerospace Infusion Resins. 2018. Verkkodokumentti. Renegade Materials Corporation <<http://www.renegadematerials.com/products/resins/>> 2018. Luettu 16.1.2018.
- 26 Google hakukone, kuva haku. <www.google.co.uk>
- 27 Timoshenko, Stephen P. 1952. e-kirja. History of Strength of Materials. McGraw-Hill Book Company. <<https://www.scribd.com/doc/153064630/History-of-Strength-of-Materials-Timoshenko>> joulukuu 1952. Luettu 5.12.2017.
- 28 Woods, Tori. 2011. Verkoartikkeli. Aerogeelis: Thinner, Lighter, Stronger. SGT Inc, NASA's Glenn Research Center. <<https://www.nasa.gov/topics/technology/features/aerogeelis.html>> 28.7.2011. Luettu 5.12.2017.
- 29 Ultralight Cellular Materials. Verkoartikkeli. Wadley Research group, university of Virginia engineering. <<http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/cellular-materials.html>> 20.1.2014. Luettu 5.12.2017.
- 30 Leventis, Nicholas. Verkkodokumentti. Mechanically strong lightweight materials for aerospace applications (x-aerogeelis). NASA Glenn Research Center. <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20060013346.pdf>> Luettu 5.12.2017.
- 31 Lee, L.J. 2005. Verkkodokumentti. Composites science and technology. <<https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiKm-ToxbHXAhVHL1AKHY-chBEIQFghaMAU&url=http%3A%2F%2Fweb.deu.edu.tr%2Fmetalurjimalzeme%2Fpdf%2Fmme4044PolymerApplications%2FPolymerFoamsLecture2-2015.pptx&usq=AOvVaw1vziumB3Ah-zfMTfhMn05F>> 2005. Luettu 16.1.2018.
- 32 Cunniff, Philip M; Auerbach, Margaret A. High performance "M5" fiber for ballistics/structural composites. <<http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf>> Luettu 4.12.2017.
- 33 Strong and Flexible Aerogeelis. Verkoartikkeli. Open Source Nanotech. <<http://www.aerogeeli.org/?p=1058>> Luettu 5.12.2017.

- 34 Zu, Guoqing; Shen, Jun; Wang, Wenqin; Zou, Liping; Lian, Ya; Zhang, Zhihua; Liu, Bin; Zhang, Fan. 2014. Verkkodokumentti. Robust, Highly Thermally Stable, Core-Shell Nanostructured Metal Oxide Aerogel as High-Temperature Thermal Superinsulators, Adsorbents, and catalysts. <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cm502886t>> 22.9.2014. Luettu 5.12.2017.
- 35 Fenech, Justine; Viazzi, Céline; Bonino, Jean-Pierre; Ansart, Florence; Barnabé, Antoine. 2009. Verkkodokumentti. Morphology and structure of YSZ powders: Comparison between xerogel and aerogel. *Ceramics International*, vol 35 (n°8). 3427-3433 .ISSN 0272-8842. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884209002673?via%3Dihub>> 7.7.2009. Luettu 16.1.2018.
- 36 Leventis, Nicholas; Sotiriou-Leventis, Chariklia; Zhang, Guohui; Rawashdeh, Abdel-Monem M. 2002. Verkkodokumentti. Nanoengineering Strong Silica Aerogel. <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/nl025690e>> 2.8.2002. Luettu 5.12.2017.
- 37 What is Aerogel? Verkkootikkeli. Open source Nanotech. <<http://www.aerogel.org/?p=3>> Luettu 5.12.2017.
- 38 Matisons, J; Hartman-Thompson, C. 2011. e-kirja. Applications of Polyhedral Oligomeric Silsesquioxanes. Springer. Michigan Molecular Institute, USA. <[https://books.google.fi/books?id=A9sVCrxi-FPwC&pg=PA18&lpg=PA18&dq=cross+linked+polyhedral+oligomeric+silsesquioxane,+octa-\(aminophenyl\)silsesquioxane&source=bl&ots=3xg5fj1jQI&sig=I0JPeCk13G5Z2Fr9XqWMZSoF99E&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwjv-NXlgcPXAhXJIJoKHQ2RC5QQ6AEIwJAF#v=onepage&q=cross%20linked%20polyhedral%20oligomeric%20silsesquioxane%20octa-\(aminophenyl\)silsesquioxane&f=false](https://books.google.fi/books?id=A9sVCrxi-FPwC&pg=PA18&lpg=PA18&dq=cross+linked+polyhedral+oligomeric+silsesquioxane,+octa-(aminophenyl)silsesquioxane&source=bl&ots=3xg5fj1jQI&sig=I0JPeCk13G5Z2Fr9XqWMZSoF99E&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwjv-NXlgcPXAhXJIJoKHQ2RC5QQ6AEIwJAF#v=onepage&q=cross%20linked%20polyhedral%20oligomeric%20silsesquioxane%20octa-(aminophenyl)silsesquioxane&f=false)> 2011. Luettu 5.12.2017.
- 39 Zhang, Tianyi; Zhao, Yan; Wang, Kai. 2017. Verkkodokumentti. Polyimide Aerogel Cross-Linked with Aminated Ag Nanowires: Mechanically Strong and Tough. *Beihang University of Beijing*. <<http://www.mdpi.com/2073-4360/9/10/530>> 19.10.2017. Luettu 5.12.2017.
- 40 Aerogel and aerogel composites. Verkkootikkeli. Institute of Materials Research, German Aerospace Center. <http://www.dlr.de/wf/en/desktopdefault.aspx/tabid-9788/16788_read-40746/> Luettu 5.12.2017.
- 41 O'Masta, Mark R; Wadley, Haydn N.G. 2013. Patentti, julkinen osa. Multi-Functional Hybrid Panel For Blast and Impact Mitigation and Method of Manufacture. University Of Virginia Patent Foundation. <<https://www.google.com/patents/US20130263727>> 10.10.2013. Luettu 5.12.2017.
- 42 Tainio, Andreas. 2014. Alumiini- ja lujitemuovikappaleiden liimaus venetuotannossa; opinnäytetyö. Verkkodokumentti. Theseus-tietokanta.

- 43 Ayres, Tom James. 2010. Verkkoaineisto. Design and Construction of Formula SAE Composite Chassis. <https://www.slideshare.net/ThomasAyres/final-chassis-report-2010?next_slideshow=1> 11.1.2010. Luettu 4.12.2017.
- 44 Redux® Bonging Technology. 2003. Verkkodokumentti. HEXCEL Composites. <http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Adhesive_Bonding_Technology.pdf> Heinäkuu 2003. Luettu 7.12.2017.
- 45 Lei, Jincheng; Hu, Jianying; Liu, Zishun. 2013. Verkkodokumentti. Mechanical Properties of Silica Aerogeli - A Molecular Dynamics Study. <http://www.iasem.org/publication_conf/ase13/068.M3B.2.MS534_592F.pdf> 12.9.2013. Luettu 13.12.2017.
- 46 Kitagawa, Tooru; Ishitobi, Michio; Yabuki, Kazuyuki. 2000. Verkkodokumentti. An analysis of deformation process on poly-p-phenylenebenzobisoxazole fiber and a structural study of the new high-modulus type PBO HM+ fiber. <[http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(20000615\)38:12%3C1605::AID-POLB50%3E3.0.CO;2-Z/full](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-0488(20000615)38:12%3C1605::AID-POLB50%3E3.0.CO;2-Z/full)> 16.3.2000. Luettu 13.12.2017.
- 47 Arbaoui, Jamal; Schmitt, Yves; Pierrot, J-Luc; Royer, Francois-Xavier. 2014. Verkkodokumentti. Numerical simulation and experimental bending behavior of multi-layer sandwich structures. <<http://www.ptmts.org.pl/2014-2-arbaoui-in.pdf>> 2014. Luettu 13.12.2017.
- 48 Kratz, R; Wyder, P. 2002. E-kirja. Principles of Pulsed Magnet Design. <<https://books.google.fi/books?id=liddo2XHk0C&pg=PA126&lpg=PA126&dq=zylon+yield+strength&source=bl&ots=tHlk-Blvz&sig=HJUf98fWLaryls2xyu1FACvMtRM&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwjspr26IbYAhXFK5oKHfmAD384ChDoAQhSMAU#v=onepage&q=zylon%20yield%20strength&f=false>> 2002. Luettu 13.12.2017.
- 49 Properties of Selected Fibres. Verkkodokumentti. <<http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/props.html>> Luettu 13.12.2017.
- 50 Other Resins. Verkkodokumentti. NetComposites. <<https://netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/other-resins/>> Luettu 13.12.2017.
- 51 Ayres, Tom James. 2010. Verkkoaineisto. Design and Construction of Formula SAE Composite Chassis. <https://www.slideshare.net/ThomasAyres/final-chassis-report-2010?next_slideshow=1> 11.1.2010. Luettu 4.12.2017.
- 52 Hearle, JWS. Julkaistu verkossa 2013, alkuperäinen 2001. Verkkoaineisto. High performance. <<https://www.slideshare.net/kabirasm07/high-performance-fibres>> 2.10.2013. Luettu 4.12.2017.
- 53 O'Masta, Mark R; Wadley, Haydn N.G. 2013. Patentti. Multi-Functional Hybrid Panel For Blast and Impact Mitigation and Method of Manufacture. University

Of Virginia Patent Foundation. <<https://www.google.com/patents/US20130263727>> 10.10.2013. Luettu 5.12.2017.

- 54 Toyobo Zylon® HM Fiber/Epoxy Matrix Unidirectional Composite. Verkkodokumentti. Toyobo CO LTD. <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=1a5f4985c8fb449da6edaec7813acf70&ckck=1>> Luettu 17.1.2018.

Liite 1 Kevlar-, Nomex- ja alumiinikenojen lujuus-tiheysvertailu

Taulukko 1. Kevlar-kennon lujuus-tiheysvertailu.

Mesikö muunnokset ja järjestäminen	Kellar	50								
	tiheys (kg/m ³)	solunakselia (mm)	Puristuslujuus (MPa)	↳suunta, leikkaislujuus (MPa)	↳suunta, leikkaismoduuli (GPa)	W suunta, leikkaismoduuli (GPa)	W suunta, lujuus (MPa)	↳suunta, leikkaismoduuli (GPa)		
15217	4005	3,18	1,55	1,31	0,79	0,83	0,83	0,06		
	4805	3,18	2,17	1,65	0,97	1,07	1,07	0,08		
	6407	3,18	4,14	2,76	1,38	1,52	1,52	0,10		
11212	4805	4,76	2,28	1,83	0,83	1,10	1,10	0,08		
	6407	4,76	3,45	2,62	1,03	1,38	1,38	0,09		
	6407	6,35	3,79	2,55	0,86	1,31	1,31	0,07		
Kevlar® (3,18)	5072		2,62	1,91	1,05	1,14	1,14	0,08		
Kevlar® (4,76)	5606		2,87	2,23	0,93	1,24	1,24	0,09		
Kevlar® (6,35)	6407		3,79	2,55	0,86	1,31	1,31	0,07		
Thiess/aurustuslujuus (3,18)	19,96									
Thiess/aurustuslujuus (4,76)	19,57									
Thiess/aurustuslujuus (6,35)	16,91									
Thiess/leikkauslujuus L (3,18)	26,60									
Thiess/leikkauslujuus L (4,76)	25,20									
Thiess/leikkauslujuus L (6,35)	25,13									
Thiess/leikkauslujuus W (3,18)	44,49									
Thiess/leikkauslujuus W (4,76)	45,21									
Thiess/leikkauslujuus W (6,35)	48,91									

<http://www.corcomposites.com/products/nomexcom/kevlarnomexcom.html>

Taulukko 2. Nomex-kennon lujuus-tiheysvertailu.

	Nomex	50								
	tiheys (kg/m ³)	souhkeikasja (mm)	Sou konfiguraatio	Puristuslujuus (MPa)	L suunta, leikkaisuus (MPa)	L suunta, kimmoisuus (GPa)	W suunta, lujuus (MPa)	L suunta, kimmoisuus (GPa)		
	96,11	3,18	Regular hex	6,08	2,34	0,08	0,99	0,08	0,05	
	48,06	3,18	Regular hex	1,93	1,34	0,04	0,66	0,02	0,02	
	48,06	3,18	Partial over-expanded	1,76	1,10	0,03	0,76	0,03	0,03	
	64,07	3,18	Regular hex	3,38	1,83	0,06	0,73	0,06	0,03	
	64,07	3,18	Partial over-expanded	3,31	1,55	0,05	0,79	0,05	0,05	
	80,09	3,18	Regular hex	4,62	2,14	0,07	0,85	0,07	0,04	
	32,04	4,76	Regular hex	0,83	0,62	0,03	0,35	0,03	0,02	
	32,04	4,76	Over expanded	0,76	0,45	0,16	0,45	0,16	0,03	
	40,05	4,76	Over expanded	1,31	0,62	0,02	0,66	0,02	0,03	
	48,06	4,76	Regular hex	1,99	1,21	0,04	0,72	0,04	0,03	
	48,06	4,76	Over expanded	1,86	0,76	0,02	0,90	0,02	0,04	
	64,07	4,76	Regular hex	3,38	1,52	0,05	0,73	0,05	0,04	
	64,07	4,76	Over expanded	3,24	1,03	0,03	0,85	0,03	0,06	
	96,11	4,76	Regular hex	6,45	1,97	0,07	0,99	0,07	0,05	
	48,06	6,35	Regular hex	1,86	1,17	0,04	0,72	0,04	0,03	
	64,07	6,35	Regular hex	3,24	1,55	0,05	0,86	0,05	0,04	
Kestiano (3,18)	66,74			3,51	1,72	0,06	0,80	0,06	0,04	
Kestiano (4,76)	53,06			2,48	1,02	0,05	0,71	0,05	0,04	
Kestiano (6,35)	56,07			2,55	1,36	0,05	0,79	0,05	0,04	
Thies/puristuslujuus (3,18)	19,00									
Thies/puristuslujuus (4,76)	21,42									
Thies/puristuslujuus (6,35)	21,99									
Thies/leikkaisuus L (3,18)	38,88									
Thies/leikkaisuus L (4,76)	51,89									
Thies/leikkaisuus L (6,35)	41,22									
Thies/leikkaisuus W (3,18)	83,78									
Thies/leikkaisuus W (4,76)	75,13									
Thies/leikkaisuus W (6,35)	70,97									
http://www.composites.com/products/honeycomb/honeycomb.html										

Taulukko 3. Alumiinikennon lujuus-tiheysvertailu

	Alumiini 5052 laatu				Lujuus (MPa)		Kimmomoduli (GPa)		
	Normaalitiheys (kg/m ³)	Souhkealaisia (mm)	Metallivyn paksumus (mm)	Puristuslujuus (MPa)	Kimmomoduli (GPa)	L	V	L	V
	49,66	3,18	0,078	186	0,52	1,45	0,89	720,83	362,41
	72,08	3,18	0,250	3,59	1,03	2,34	1,52	1121,29	496,57
	97,71	3,18	0,038	5,99	1,65	3,48	2,21	1569,81	666,76
	129,75	3,18	0,051	9,65	2,41	4,99	3,14	2162,49	884,99
	49,66	4,76	0,025	186	0,52	1,45	0,89	720,83	362,41
	70,48	4,76	0,038	3,45	0,99	2,28	1,48	1089,26	480,55
	91,31	4,76	0,051	5,31	1,52	3,17	2,07	1441,66	608,70
	110,53	4,76	0,064	7,45	1,97	4,07	2,59	1826,11	738,85
	129,75	4,76	0,076	9,65	2,41	4,99	3,14	2162,49	884,99
	25,63	6,35	0,078	0,59	0,14	0,59	0,35	336,39	178,20
	36,84	6,35	0,025	1,14	0,31	0,97	0,59	512,59	256,30
	54,46	6,35	0,038	2,21	0,62	1,62	1,03	800,92	384,44
	68,88	6,35	0,051	3,31	0,97	2,21	1,45	1057,22	464,54
	83,30	6,35	0,064	4,62	1,31	2,83	1,83	1318,51	580,65
	96,11	6,35	0,076	5,86	1,62	3,41	2,17	1537,77	640,74
	126,55	6,35	0,100	9,38	2,34	4,83	3,03	2082,40	832,96
	16,02	9,53	0,078	0,21	0,069	0,31	0,21	182,22	112,13
	36,84	9,53	0,038	1,14	0,31	0,97	0,59	512,59	256,30
	48,06	9,53	0,051	1,79	0,48	1,38	0,86	688,79	336,39
	59,27	9,53	0,064	2,55	0,72	1,79	1,17	881,02	416,48
	67,28	9,53	0,076	3,17	0,93	2,14	1,38	1041,20	464,54
	86,50	9,53	0,100	4,96	1,38	2,96	1,93	1377,59	576,65
Keskiverto (3,18)	87,30			5,27	1,40	3,07	1,94	1393,61	592,68
Keskiverto (4,76)	90,35			5,54	1,48	3,19	2,03	1448,07	608,70
Keskiverto (6,35)	70,25			3,87	1,04	2,35	1,49	1091,54	473,69
Keskiverto (9,53)	52,33			2,30	0,65	1,59	1,02	782,24	360,42
Thesispuristuslujuus (3,18)	16,56								
Thesispuristuslujuus (4,76)	16,30								
Thesispuristuslujuus (6,35)	18,14								
Thesispuristuslujuus (9,53)	22,72								
Thesislaukkauseisälujuus L (3,18)	28,48								
Thesislaukkauseisälujuus L (4,76)	28,30								
Thesislaukkauseisälujuus L (6,35)	29,88								
Thesislaukkauseisälujuus L (9,53)	32,88								
Thesislaukkauseisälujuus W (3,18)	45,00								
Thesislaukkauseisälujuus W (4,76)	44,42								
Thesislaukkauseisälujuus W (6,35)	47,06								
Thesislaukkauseisälujuus W (9,53)	51,14								

https://www.plascore.com/download/datasheet/homecomb_data_sheet/Plascore_5052.pdf

Taulukko 4. Kevlar-, Nomex- ja alumiinikenojen vertailu ja analyysi.

	Kevlar	Nomex	Alumiini	Analyyssi:	Suuri t/l = pieni tiheys, pieni t/l = suuri tiheys	Mikäli halutaan huokan enemmän L-juuttia,
Thyey/puristuslujuus (3,18)	19,36	19,00	16,56	Mikäli tiheyttä painotetaan enemmän, kuin lujuutta, niin optimaalisimaksi jäisi kevlar 3,18		Mikäli halutaan huokan enemmän L-juuttia, niin paras olisi valita suurempi tiheyksinen kevlar 4,76 (tiheys 56,06 kg/m ³ ; L-juutus 2,23 GPa).
Thyey/puristuslujuus (4,76)	19,57	21,42	16,30	Näin siksi, että kevlar 3,18 on näistä materiaaleista keventä (50,72 kg/m ³), mutta myös lujuudestaan helikopta 1,91MPa.		
Thyey/puristuslujuus (6,35)	16,91	21,99	18,14			
Thyey/puristuslujuus (9,53)	-	-	22,72			
Thyey/leikkauslujuus L (3,18)	26,60	38,88	28,48	Kevlarin 3,18 tiheyden suhde lujuuteen on 14% suurempi, kuin alumiinin 3,18		näin tulisi valikoda alumiini vähintään 70,25 kg/m ³ :n tiheydellä (L-juutus 2,35 GPa)
Thyey/leikkauslujuus L (4,76)	25,20	51,89	28,30			
Thyey/leikkauslujuus L (6,35)	25,13	41,22	29,88			
Thyey/leikkauslujuus L (9,53)	-	-	32,88			
Thyey/leikkauslujuus W (3,18)	44,49	83,78	45,00	Mikäli tiheyttä painotetaan enemmän, kuin lujuutta, niin optimaalisimaksi jäisi kevlar 3,18.		
Thyey/leikkauslujuus W (4,76)	45,21	75,13	44,42	Näin siksi, että kevlar 3,18 on näistä materiaaleista keventä (50,72 kg/m ³), mutta L-juuudestaan vähintä 1,91 MPa) pienimmällä materiaalkohtaisella tiheydellä.		
Thyey/leikkauslujuus W (6,35)	48,91	70,97	47,06			
Thyey/leikkauslujuus W (9,53)	-	-	51,14	Kevlarin 3,18 tiheyden suhde lujuuteen on 27% pienempi, kuin alumiinin 3,18		
	alk	nk	ahn			
	3,18	14%	2%	13%		
	4,76	17%	9%	24%	Mikäli tiheyttä painotetaan enemmän, kuin lujuutta, niin optimaalisimaksi jäisi kevlar 3,18	
	3,18	27%	32%	45%	Näin siksi, että kevlar 3,18 on näistä materiaaleista keventä (50,72 kg/m ³), mutta W-juuudestaan vähintä 1,14 MPa) pienimmällä materiaalkohtaisella tiheydellä.	
	3,18	1%	47%	46%	Kevlarin 3,18 tiheyden suhde lujuuteen on 1% pienempi, kuin alumiinin 3,18	
					Kevlarin 3,18 tiheyden suhde lujuuteen on 47% pienempi, kuin nomexin 3,18	
Kevlarille ja Nomexille ei ollut saatavilla teknistä dataa solu koolla 9,53						
					Mikäli halutaan huokan enemmän lujuutta, niin Nomex 4,76 toimisi hyvin.	
					Näin siksi, että Nomex 4,76 on tiheydeltään 59,06 kg/m ³ , mikä on 4,5% suurempi, kuin kevlar 3,18 (50,72 kg/m ³).	
					Lisäksi Nomex 4,76 lujuus (3,51 MPa) on 25,4% suurempi, kuin kevlar 3,18 lujuus (2,62 MPa)	
					Toisaalta alumiinin 9,53 tiheys (52,33 kg/m ³) sijoittuisi Nomexin 4,76 ja kevlarin 3,18 väliin, mutta sen lujuus (2,30 MPa) on pienempi, kuin kummankaan komposiitti materiaalin.	
					Nomexin 4,76 tiheyden suhde lujuuteen on 9% suurempi, kuin kevlarin 4,76.	
					Nomexin 4,76 tiheyden suhde lujuuteen 24% suurempi, kuin alumiinin 4,76.	