

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Janne Immonen

Perävaunun lattiaelementin rakenteen optimointi

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2014



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2014**  
**Kone- ja tuotantotekniikan koulutus-**  
**ohjelma**  
Karjalankatuku 3  
80200 JOENSUU  
+358 50 2606800

**Tekijä**  
Janne Immonen

**Nimeke**  
Perävaunun lattiaelementin rakenteen optimointi

**Toimeksiantaja**  
Konepaja Antti Ranta/Antti Ranta

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja optimoida raskaankaluston perävaunun lattiaelementtiä. Konepaja Antti Rannan käyttämä lattiaelementti on kerroslevyrakenteella toteutettu itsekantava lattiaelementti. Tavoitteena oli analysoida perävaunun käyttäjiltä kerääntyneiden tietojen ja FEM-laskennan avulla rakenteen heikot kohdat ja kehittää niitä.

Työskentely aloitettiin selvittämällä vanhan rakenteen materiaalit ja rakenne. Samalla tutustuttiin kerroslevyrakentamisen periaatteisiin. Työskentelyyn kuului vauriomallien selvittäminen ja tilanteet, joista ne aiheutuivat. Näiden tietojen avulla selvitettiin kriittinen tilanne, jossa lattiaelementtiä simuloitiin. Mallinnukset ja FEM-analyysit toteutettiin Creo 2 -ohjelmistolla.

FEM-analyysien aikana ilmenneet mallinnustekniset ongelmat rajoittivat tulosten luotettavuutta ja kuluttivat työhön varattua aikaa. Nämä asiat käänivät opinnäytetyön painon rakenteen optimoinnista rakenteen FEM-analysointiin. Työn tuloksena saatiin tuotettua FEM-analyysi rakenteesta ja kehitysideoita rakenteeseen tulevaisuuden varalle. Tuloksena saatiin myös tiivis tietopaketti kerroslevyrakentamisesta ja niiden suunnittelemisesta.

**Kieli**  
suomi

Sivuja 77  
Liitteet 9  
Liitesivumäärä 21

**Asiasanat**  
FEM, raskas liikenne, rakenteiden kehittäminen



**Karelia**  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**THESIS**  
**June 2014**  
**Degree Programme in Mechanical and  
Production Engineering**  
Karjalankatu 3  
FI 80200 JOENSUU  
FINLAND  
+358 50 2606800

Author  
Janne Immonen

Title  
Optimization of Trailer Floor Panel

Commissioned by  
Konepaja Antti Ranta/Antti Ranta

Abstract

The goal of this study was to optimize a sandwich panel construction used by Konepaja Antti Ranta. The panel is used as a heavy truck trailer floor. Optimization included gathering information from trailer users and combining the data with FEM-analysis in order to create a better structure for the panel.

The work was started by studying the used structure and materials. In addition, a comprehensive knowledge from sandwich panels was acquired. The most common failure modes were detected from the customer information. Consequently, these failure modes were used in FEM-analysis to simulate the stresses affecting the floor panel. 3D modeling and FEM-analysis were carried out with CREO 2 -software.

Problems were discovered with FEM-analysis element creating during the study. These problems changed the emphasis of this study towards FEM-analyzing and created some reliability problems to the results. As a result, a FEM-analysis was made from the existing structure and some development ideas were proposed. Moreover, an information package about sandwich panels and designing of sandwich structures was compiled.

Language  
Finnish

Pages 77  
Appendices 9  
Pages of Appendices 21

Keywords

FEM, heavy traffic, development of structures

# Sisältö

## Tiivistelmä

## Abstract

1	Johdanto.....	6
1.1	Toimeksiantajan esittely.....	6
1.1.1	Konepaja Antti Ranta Oy.....	6
1.1.2	Konsernin muut yritykset.....	9
1.2	Toimeksiannon tausta.....	10
1.3	Tutkimuksen rajaus, haasteet ja eteneminen.....	12
2	Kerroslevyrakenteet raskaassa kalustossa.....	13
2.1	Kerroslevyjen käytön historia.....	13
2.2	Kerroslevyrakenteiden periaate.....	14
2.3	Kerroslevyjen ominaisuudet.....	15
2.3.1	Kerroslevyjen hyödyt ja haitat.....	16
2.3.2	Kerroslevyn suunnittelussa huomioitavat asiat.....	18
3	Materiaalit.....	21
3.1	Ydinaineet.....	21
3.1.1	Solumuovit.....	21
3.1.2	Epäorgaaniset ydinaineet.....	24
3.1.3	Kennoydinaineet.....	26
3.1.4	Syntaktiset ja luonnonydinaineet.....	27
3.2	Pintalevyt.....	27
3.2.1	Teräslevyt.....	28
3.2.2	Alumiini, kupari ja ruostumaton teräs.....	29
3.2.3	Puupohjaiset aineet.....	29
3.2.4	Lujitekuituiset muovikomposiitit.....	33
3.3	Jäykisteet.....	34
3.4	Liimat ja liimaus.....	35
4	Nykyisen rakenteen ratkaisut ja materiaalit.....	36
4.1	Nykyinen rakenne.....	36
4.2	Nykyiset materiaalit ja valmistus.....	38
4.3	Nykyisen rakenteen ratkaisut.....	39
4.4	Pohjaelementin asennus perävaunuun.....	40
5	FEM-mallinnus.....	41
5.1	FEM-mallinnuksessa ilmenneet ongelmat.....	42
5.2	3D-mallinnus.....	43
5.3	Materiaalitietojen syöttäminen.....	44
5.3.1	Isotrooppiset arvot.....	44
5.3.2	Ortotrooppiset arvot.....	45
5.4	Kuormitusten määrittäminen.....	46
5.5	Lattiaelementin verkotus.....	48
5.5.1	Prismaattiset elementit.....	49
5.5.2	Analyysissä käytetty verkotus.....	50
5.6	Lattiaelementin tuenta.....	51
6	FEM-analyysin tulokset ja niiden tulkinta.....	52
6.1	3D-mallin katkaiseminen.....	52
6.1.1	Jännitysten jakautuminen.....	53
6.1.2	Katkaistun mallin jännitykset.....	55
6.2	Rakenteen osien tarkastelu kriittisten jännitysten suhteen.....	56

6.2.1	Alapintalevyt.....	57
6.2.2	Alempi liimapuupalkkikehikko .....	59
6.2.3	Alemmat eristeet .....	60
6.2.4	4 mm paksuinen vaneri .....	62
6.2.5	Ylempi liimapuupalkkikehikko .....	62
6.2.6	Ylemmät eristeet .....	64
6.2.7	Yläpintalevyt.....	66
6.3	Ilman sivutuenta oleva lattiaelementti .....	67
6.4	Tuloksien yhteenveto.....	70
7	Tuloksien hyödyntäminen.....	71
7.1	Ongelmakohtien korjausehdotuksia .....	71
7.1.1	Ydinaineet.....	71
7.1.2	Lattiaelementin jäykkyys .....	72
8	Pohdinta .....	73
	Lähteet.....	76

## Liitteet

Liite 1	Metsäwood Kerto -liimapuupalkin mekaaniset ominaisuudet
Liite 2	Suomalaisen vanerin tekniset ominaisuudet
Liite 3	Brianza Plastica pintalevyjen tekniset ominaisuudet
Liite 4	Finnfoam lämmöneristyslevyjen tekniset ominaisuudet
Liite 5	Analyyseissä käytetyt ortotrooppiset materiaaliarvot
Liite 6	Kiilto Kestopur 200/90 -liiman tekniset ominaisuudet
Liite 7	Ydinaineen vaihdon jälkeiset kriittiset jännitykset
Liite 8	Kriittiset jännitykset tilanteessa, jossa alavahvikkeiden tiheyttä lisätty ja eriste vaihdettu
Liite 9	Teräslevyillä vahvistetun lattiaelementin kriittiset jännitykset

# 1 Johdanto

## 1.1 Toimeksiantajan esittely

Työn toimeksiantajana toimi Konepaja Antti Ranta Oy, joka kuuluu usean yrityksen konserniin. Muut konsernin yritykset ovat: Ratemex Oy, Vikmet Oy ja Rannan teollisuus-kone Oy. Yritysten toimitusjohtajana toimii Antti Ranta. Jokaisella toimipisteellä on oma henkilökuntansa ja johtonsa. Kaikki yritykset valmistavat toisistaan riippumattomia tuotteita. Konserni työllistää noin 80 henkilöä. (Ranta 2013.)

### 1.1.1 Konepaja Antti Ranta Oy

Konepaja Antti Ranta Oy on Liperin Ylämyllyllä toimiva konepajayritys, joka on erikoistunut LIPE-ketjupurku- ja sivukaatoperävaunujen ja päällirakenteiden (kuva 1) valmistukseen. Yritys on perustettu vuonna 1977. Yrityksen toimitusjohtajana toimii Antti Ranta, keneltä aihe opinnäytetyöhön tuli. Yrityksen liikevaihto oli vuonna 2013 noin 2,6 milj. € ja vakituisia työntekijöitä on tällä hetkellä 18. (Ranta 2013.)



Kuva 1. Lipe-päällirakenne ja perävaunu (Immonen 2013)

Konepaja valmistaa perävaunuja ja varustaa kuorma-autoja päällirakenteilla asiakkaan toiveiden mukaan. Jokainen yksikkö varustellaan ja rakennetaan asiakkaan kuljetustarpeisiin sopivaksi. Päävariaatioina yrityksen tuotekatalogissa ovat erilaiset muunneltavuudet kuljetusvälineissä. Sama kuljetusväline voidaan mm. muuntaa sopivaksi kappaletavaran kuljetukseen. Myös kuormanpurkutapoja on erilaisia. (Ranta 2013.) Seuraavassa esitellään yleisimmät variaatiot ja niiden edut.

Kiinteäseinäinen ketjupurku -ratkaisu (kuva 2) on tarkoitettu kuljetusvariaatioihin, joissa kuljetetaan vain irtonaista tavaraa, kuten esimerkiksi haketta tai turvetta. Kuorman purku kuormatilasta tapahtuu lattian ympäröivien ketjujen avulla. Ketjuihin on kiinnitetty kolia, joiden avulla kuorma purkautuu. Tällä kuormatilatyypillä saadaan hyvä hyötykuorma ja varmuus, koska tuote on rakennettu pelkästään irtotavaran ajoon. Muut kuljetusmahdollisuudet tosin ovat erittäin rajalliset.



Kuva 2. Lipe-ketjupurku (Zaitseva 2008)

Kuvassa 3 esiintyy aukeavasivuinen ketjupurkuperävaunu. Järjestelmän avulla vaunu tai kori voidaan valjastaa monipuolisempiin kuljetustehtäviin. Purkuketjut ovat upotettu lattiaan ja kolia purkuketjuissa sijaitsee vain puolella matkaa, jolloin ketjun upotessa lattian syvennykseen lattiasta saadaan tasainen ja kolat ovat lattian alapuolella piilossa. Tasainen lattia ja aukeava sivu mahdollistavat monenlaisten tavaroiden kuljetuksen ja erilaiset lastaustavat. Vaunun omamassa tietysti nousee osien lisääntyessä. Vaunun tai korin toimintavarmuus voi laskea rakenteiden monimutkaistuessa.



Kuva 3. Lipe-aukeavasivuinen vaunu (Zaitseva 2008)



Sivukaatavassa rakenteessa (kuva 4) kuormatila kippaa sivulle ja toinen sivuseinä aukeaa sivulle samankaltaisesti kuin aukeavasivuisessa ketjupurussa. Sivukaatavan rakenteen etuina ovat sen vähemmistä osista koostuva purkumekanismi yhdistettynä monikäyttöiseen rahtitilaan. Sivukaatavan rakenteen etu on myös irtotavara kuorman nopea purkaminen. Asiakkailta saatujen kokemusten perusteella monet irtokuormanpurkupaiikat ovat liian ahtaita sivukaatavalle rakenteelle (Ranta 2013).



Kuva 4. Lipe-sivukaatava yhdistelmä (Zaitseva 2008)

### 1.1.2 Konsernin muut yritykset

Ratemex Oy valmistaa ”AJO” ja ”LUMEXSYSTEMS”- merkkisiä tienhoitovälineitä, muun muassa auroja, siroittimia ja alusteriä. Yritys palvelee myös alihankkijana ja tarjoaa erilaisia koneistuspalveluja. Yritys sijaitsee Kiteen Tolosenmäessä ja työllistää 6 henkilöä. Yrityksen liikevaihto oli vuonna 2013 noin 0,5 milj. € (Ranta 2013.)

Rannan Teollisuuskoneella on kaksi toimipaikkaa, jotka sijaitsevat Vantaalla ja Leppävedellä Jyväskylän lähistöllä. Leppävedellä toimii tilauskonepaja, joka toimii alihankkijana monille teollisuuden yrityksille tuottaen erilaisia koneistus- ja hitsauspalveluja,

muun muassa MIG/MAG- ja TIG-hitsausta. Vantaalla toimii kokoonpanonotehdas. Yritykset työllistävät yhteensä noin 45–50 henkilöä ja yritysten yhteinen liikevaihto oli vuonna 2013 4,5 milj. € (Ranta 2013.) Vikmet Oy sijaitsee Vantaalla ja yritys valmistaa ja varustaa pääasiassa tienhoitokalustoa. Yritys työllistää 8 henkilöä ja liikevaihto vuonna 2013 oli 0,6 milj. € (Ranta 2013.)

## 1.2 Toimeksiannon tausta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella kerroslevyperiaatteella valmistetun raskaan kaluston perävaunun lattiaelementin (kuva 5) rakenteellisia ratkaisuja sekä etsiä vanhoihin ratkaisuihin vahvempia, kevyempiä ja mahdollisesti edullisempia vaihtoehtoja. Keveyttä ja edullisuutta ei kuitenkaan etsitä kestävyuden kustannuksella, koska luotettavuus on yksi suurimmista tekijöistä raskasta kalustoa hankittaessa ja käytettäessä.



Kuva 5. Kerroslevyrakenteinen lattiaelementti (Immonen 2014)

Kerroslevyelementtejä Konepaja Antti Rannalla on käytetty jo 1990-luvulta lähtien. Elementtien perusrakenne on pysynyt tämän ajan suunnilleen samana. Rakenteita ei ole tarkasteltu laskennallisesti tai kokeellisesti milloinkaan. Kaikki tieto perustuu asiakkailta tulleisiin palautteisiin ja elementinvalmistajilta saatuihin tietoihin. Tutkimus tarjoaisi paljon hyödyllistä tietoa perävaunun valmistajalle, koska nykyisessä rakenteessa on paljon yksityiskohtia, joiden vaikutusta vahvuuteen ei tiedetä. Näillä tiedoilla voidaan tehostaa elementtien valmistusta ja poistaa mahdollisia turhia kustannuksia sekä parantaa tuotteiden laatua.

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi 1.10.2013 voimaan tullut valtioneuvoston asetus 407/2013 asetti raskaankaluston päällirakentajat uuden haasteen eteen, kun yhdistelmien kokonaismassat ja mitat nousivat. Suurin mahdollinen korkeus nousi 4,2 metrillä 4,4 metriin. Yhdistelmän suurin kokonaismassa nousi 60 000 kg:sta 76 000 kg:aan. 76 000 kg kokonaismassa edellyttää yhdistelmältä yhteensä 9 akselia ja perävaunun tai perävaunujen massasta vähintään 65 % täytyy kohdistua paripyörille. Myös alle 65 % paripyöriä sisältävään yhdistelmään saa asetuksen mukaan 69 000 kg kokonaismassan, joka on jo 9 000 kg enemmän kuin aikaisemmin. Myös kuorma-autojen kokonaismassat nousivat 3- ja 4-akselisilla autoilla. (Valtioneuvoston asetus 407/2013.) Yhdistelmien uudet massat ja akselivaatimukset on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. 1.10.2013 voimaan astuneet yhdistelmien kokonaismassat. (Valtioneuvoston asetus 407/2013)

<b>Yhdistelmän kokonaismassa</b>	<b>Vaatimukset</b>
64 000 kg	Yhdistelmässä oltava 8 akselia.
68 000 kg	Yhdistelmässä oltava 8 akselia ja perävaunun tai perävaunujen massasta vähintään 65 % täytyy kohdistua paripyörille.
69 000 kg	Yhdistelmässä oltava 9 akselia.
76 000 kg	Yhdistelmässä oltava 9 akselia ja perävaunun tai perävaunujen massasta vähintään 65 % täytyy kohdistua paripyörille.

### 1.3 Tutkimuksen rajaus, haasteet ja eteneminen

Tässä opinnäytetyössä päädyttiin tarkastelemaan lattiaelementin rakennetta tietokonepohjaisen FEM-laskennan avulla ja tuloksia sovellettiin käytännössä havaittuihin ongelmiin. FEM-laskennan avulla voitiin simuloida erilaisia rakenteita ilman, että niitä tarvitsi rakentaa fyysisesti. FEM-laskennalla saatuja tuloksia sovellettiin uuden rakenteen aikaansaamiseksi. Tutkimuksessa otettiin kantaa lähinnä itse rakenteeseen, mutta myös muun muassa ympäristön ja käyttöolosuhteiden vaikutuksiin. Lisäksi materiaali- ja valintoihin otettiin kantaa, koska myös ne olivat suuressa roolissa kestävyuden kannalta rakenteita suunniteltaessa. Materiaalien osalta keskeiseen rooliin nousivat eri materiaalikerroksien suhde.

FEM-laskennassa haasteita aiheuttivat mekaanisesti vaikeasti määritettävät materiaalit kuten puu, jolle on erittäin vaikea antaa mekaanisia arvoja. Materiaalien toimittajia on monia, jolloin pelkästään materiaalitoyttajan valinta voi antaa erilaisia tuloksia. Haasteita aiheutti myös lattiaelementtiin kohdistuvien kuormitusten selvittäminen. Kuormitukset olivat suurimmaksi osaksi vaihtelevia, johtuen auton ja perävaunun liikkumisesta erilaisissa olosuhteissa muun muassa epätasaisessa maastossa. Lisäksi lattiaelementtiin kohdistui erilaisia paikallisia kuormia, jotka pystyvät aiheuttamaan rakenteisiin kriittisiä jännityksiä. Näitä olivat muun muassa perävaunun lastaus trukilla, jolloin trukin renkaidenkokoiselle alueelle aiheutui erittäin suuria jännityksiä. Myös kuormanpurun aikana aiheutuvia kuormituksia oli erittäin vaikea arvioida. Kuormanpurun aikana kuorma kasaantuu takaoven kehikkoon, jolloin purkautuva kuorma aiheuttaa kovan paineen lattiaan ja seiniin, aiheuttaen kovaa kuluttavaa kuormitusta. Lattian tuennan realistinen määrittäminen aiheutti myös haasteita, koska lattiaelementti oli kytköksissä moneen muuhunkin osaan.

Tutkiminen aloitettiin tekemällä kyselyjä kerroslevyjä valmistaviin yrityksiin. Heiltä hankittiin lattiaelementissä käytettyjen materiaalien materiaalitiedot, joita voitiin soveltaa FEM-laskennassa. Materiaalitiedot syötettiin CREO 2 -mallinnusohjelmaan, jolla kerroslevyrakenne mallinnettiin tarkasti. Materiaalien kanssa täytyi olla huolellinen, koska osa materiaaleista ei ollut isotrooppisia eli niiden lujuusominaisuudet eivät olleet samanlaiset kaikkiin suuntiin. Kun rakenne oli mallinnettu tarkasti, voitiin sitä tarkastella CREO 2 -ohjelman mekaniikkapuolella ja antaa lattiaelementille tuennat ja arvioidut

kuormat. Kaikkien arvojen ollessa kohdallaan, saatiin ohjelmalla ulos lattiaelementtiin kohdistuvat jännitykset ja kriittiset pisteet, joihin niitä kohdistuu. Malliin voitiin myös ajaa erilaisia arvoja, joiden avulla nähtiin, miten ne vaikuttivat kokonaisuuteen. Tämän jälkeen lattiaelementtiin voitiin vaihtaa materiaalipaksuuksia ja materiaaleja. Kokonaisuuteen vaikuttavia tekijöitä etsittiin ja niitä verrattiin asiakkailta käytännössä saatuihin kokemuksiin.

## 2 Kerroslevyrakenteet raskaassa kalustossa

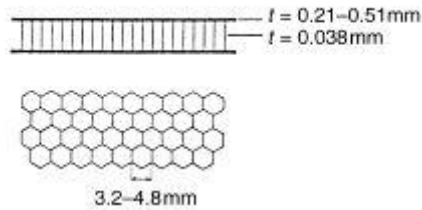
### 2.1 Kerroslevyjen käytön historia

Kerroslevyjen käyttö on ollut 1900-luvun alussa vain lentokoneiteollisuuden käyttämä tekniikka. 1960-luvulla kerroslevyrakentaminen oli jo levinnyt muille teollisuuden aloille kuten rakennus-, kylmätila-, laiva- ja autoteollisuuteen. Vuonna 1969 uudenlaista kerroslevyteknikkaa käytettiin tietokone- ja raketiteknikan ohella Apollo-kapselissa, joka laskeutui kuuhun. Kerroslevyteknikan avulla raketista saatiin tarpeeksi kevyt ja vahva kestäämään avaruusmatkan rasitukset. (Davies 2001, 17.)



Kuva 6. Apollo-avaruuskapselin kerroslevyrakenne (Davies 2001, 17)

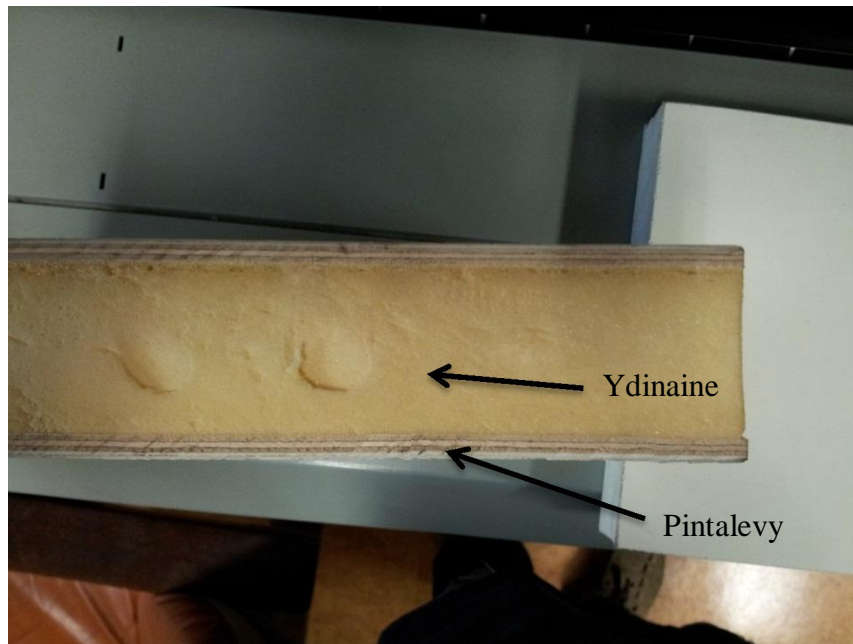
Kuvassa 6 on esitetty Apollo-kapselissa käytetty kerroslevyrakenne, joka koostui toisiinsa kiinnitetyistä kerroslevyrakenteista. Rakenteessa oli hyödynnetty hunajakennorakennetta, jossa pintalevyjen väliin oli sijoitettu kennomainen rakenne (kuva 7), joka piti pintalevyt erillään toisistaan. (Davies 2001, 17.)



Kuva 7. Apollo-kapselin ulkokuoren rakenne (Davies 2001, 17)

## 2.2 Kerroslevyrakenteiden periaate

Perinteinen kerroslevyrakentaminen seuraa yleisesti käytettyä kaavaa, jossa kahden pinnan väliin sijoitetaan ydinaine. Pinnat ovat kiinnitettynä ydinaineeseen liimaamalla. Pintamateriaalit ovat usein materiaaliteknisesti huomattavasti lujempia kuin ydinaineet. Pintamateriaaleja ja ydinainemateriaaleja voi yhdistellä lukemattomasti, jolloin saadaan halutut ominaisuudet kerroslevyiltä. Ydinainemateriaaleina voidaan käyttää esimerkiksi solumuoveja (muovivaahtoja) ja erilaisia kennoja. Pintalevymateriaaleina voidaan käyttää muovikomposiitteja, puuta tai metalleja. Kerroslevyjen suurimpana etuna voidaan pitää niiden jäykkyyden suhdetta keveyteen. (Davies 2001, 18–19.) Kerroslevyrakennetta onkin yleisesti verrattu I-palkkiin, jonka uuma on korvattu heikommalla, mutta koko palkin levyisellä ydinaineella (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars & Komppa 2003, 284).



Kuva 8. Kerroslevyrakenteen poikkileikkaus (Immonen 2014)

Kuvassa 8 on nimetty kerroslevyrakenteen osat, joita tullaan käyttämään tässä työssä jatkossa. Kuvassa 8 nähdään perinteinen kerroslevyn rakennustapa, jossa molemmiin puolin ydinainetta ovat lujat pintalevyt ja niiden pinnassa on ohut ja vahva komposiittimateriaali. Kuvan 8 kerroslevyyn on lisätty vaneria lisävahvikkeeksi. Jatkossa tullaan mainitsemaan erikseen vahvikkeet, joita käytetään ydinaineen tasossa lisäämään erityisesti rakenteen puristuslujuutta (Nuutamo 2014).

### 2.3 Kerroslevyjen ominaisuudet

Kerroslevyn ominaisuuksiin vaikuttavat rakenteen geometria sekä rakennekerrosten omat ominaisuudet. Ideaalisessa tapauksessa pintalevyt kantavat levytasossa vaikuttavat kuormat ja levyä rasittavat taivutusmomentit. Ydinaine kantaa levyä vastaan kohtisuorat leikkauskuormat. (Saarela, ym. 2003, 284.)

### 2.3.1 Kerroslevyjen hyödyt ja haitat

Kerroslevyjen käytöllä on hyviä ja huonoja puolia. Seuraavassa listauksessa on listattu niiden pääkohdat.

Kerroslevyrakentamisen hyötyinä voidaan pitää:

- suuri kuormankestävyys pienellä omamassalla
- hyvä eristävyys, jota on mahdollista säädellä kerrosten avulla
- vesi- ja höyrytiiviyys
- pinnoille saatava hyvä kulutuskestävyys oikeilla materiaalivalinnoilla
- helposti korjattavissa tai vaihdettavissa
- melko huoltovapaa
- muokattavuus tarpeiden mukaan (Davies 2001, 19).

Rakenteelle löytyy myös haittoja:

- käyttäytyminen tulipalossa
- muodonmuutokset toisen puolen altistuessa lämmölle
- hauraiden ydinaineiden viruminen jatkuvan kuorman vaikutuksesta
- alhainen lämpökapasiteetti (Davies 2001, 19).
- herkkä vaurioituminen pistekuormien ja iskujen voimasta
- laadun- ja vaurioiden tarkastelu vaikeaa
- liitoksien ja läpivientien hankaluus (Saarela 2003, 284).

Kuljetuskaluston kilpailukykyä ajatellen rakenteelle halutaan tietysti pieni omamassa, jolloin saadaan enemmän hyötykuormaa. Suurin osa kuljetusyrittäjistä saa maksunsa kuljetetun massan perusteella, joten suurin mahdollinen hyötykuorma on tuottavin. Kerroslevyjen hyvän eristävyys ansiosta rakenteesta saadaan melko helposti lämpöeristetty. Aikaisemmin käytössä olleen Valtioneuvoston asetuksen 670/1997 mukaan lämpöeristetty korirakenne vaatii vähintään 45 mm paksuiset yhtenäiset sivu- ja päätyrakent-

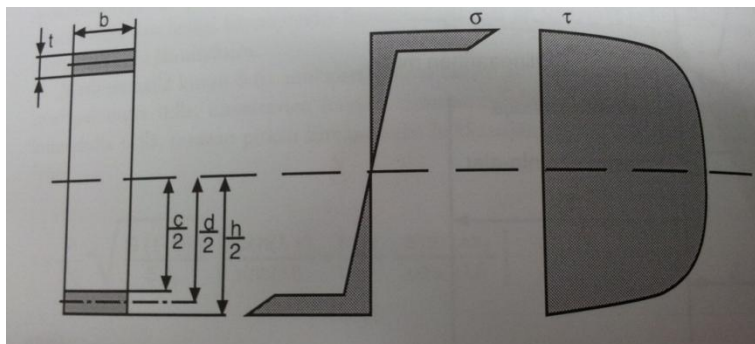


teet. Myös lattia- ja kattorakenteen täytyi olla eristetty. Lämpöeristyksestä ei ole syytä luopua tietyissä tapauksissa. Esimerkiksi ATP-sopimuksen alaiset kuljetukset joutuvat tietysti noudattamaan sopimuksen määrittelemiä ohjeita kuljetuskaluston ja laitteiston valinnassa. ATP-sopimus on helposti pilaantuvien elintarvikkeiden kansainvälisiä kuljetuksia ja tällaisissa kuljetuksissa käytettävää erityiskalustoa koskeva yleissopimus. (Evi-ra 2014.)

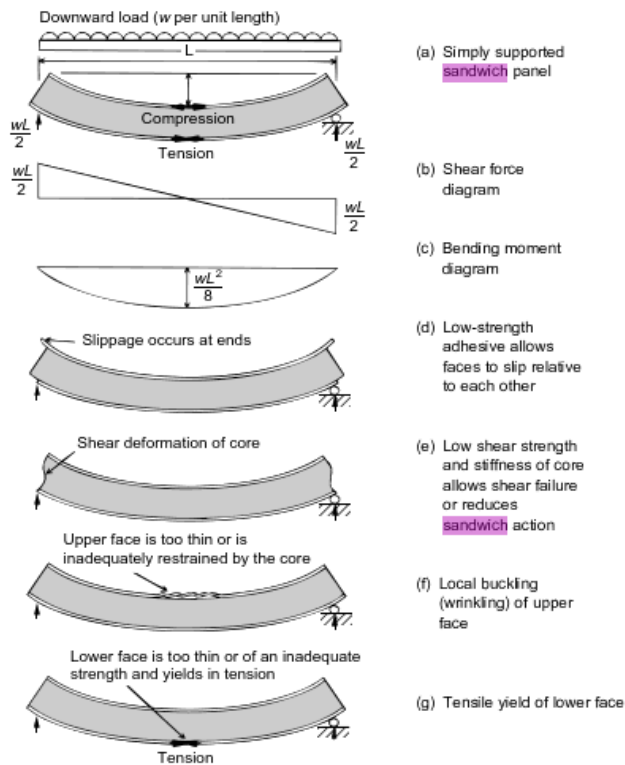
Lämpöeristys on tärkeä myös muunlaisissa kuljetuksissa. Suomen oloissa talvi aiheuttaa omat vaatimuksensa muun muassa jäätymistä vastaan suojautumisessa. Sama pätee myös vesi ja höyrytiiviyteen, kun kuljetetaan aineita, jotka ovat alttiita kosteudelle tai radikaaleille olosuhteiden vaihteluille. Muun muassa hakkeen tai turpeen kuljetuksessa on tärkeää, että kuorma ei jäädy konttiin kiinni, koska se on erittäin vaikea poistaa sen jälkeen. Pinnoille tarvitaan raskaassa kalustossa hyvää kulutuskestävyyttä, koska esimerkiksi lattian päällä voidaan liikutella isojakin massoja, jotka kuluttavat lattiaa paljon. Kerroslevyjen huonoja puolia käsitellään lisää myöhemmissä kappaleissa vauriovaariaatioiden yhteydessä.

### 2.3.2 Kerroslevyn suunnittelussa huomioitavat asiat

Kuvassa 9 on esitetty visuaalisesti, kuinka kerroslevyä taivutettaessa normaalijännitys  $\sigma$  on suurimmillaan pintalevyissä (kuva 9, paksuus  $t$ ) ja leikkausjännitys  $\tau$  ydinaineessa (Davies 2001, 11). Kerroslevyn taivutuskäyttäytymistä tarkastellessa on kuitenkin huomattava, että leikkauskuorma aiheuttaa ydinaineeseen liukumia. Liukumat ydinaineessa saavat ydinaineen pinnat liikkumaan eri suuntiin, joka voi aiheuttaa pahimmillaan pysyviä muodonmuutoksia aineeseen. Pysyvien muodonmuutosten takia ydinaine menettää rakenteellista lujuuttaan ja täten huonontaa koko kerroslevyrakenteen kestävyyttä. (Saarela, ym. 2003, 284.) Kerroslevyn oikean toiminnan tärkeä edellytys on, että liimasauamat pystyvät pitämään materiaalikerrokset yhdessä ja ne eivät pääse liukumaan toisiaan vasten.

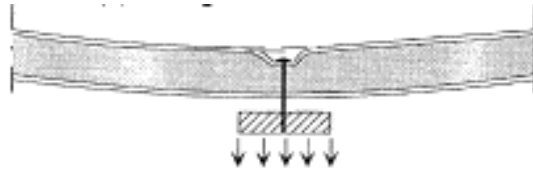


Kuva 9. Normaali- ja leikkausjännitys jakaumat, jotka vaikuttavat taivutetun kerroslevyrakenteen poikkileikkauksessa (Saarela, ym. 2003, 284)



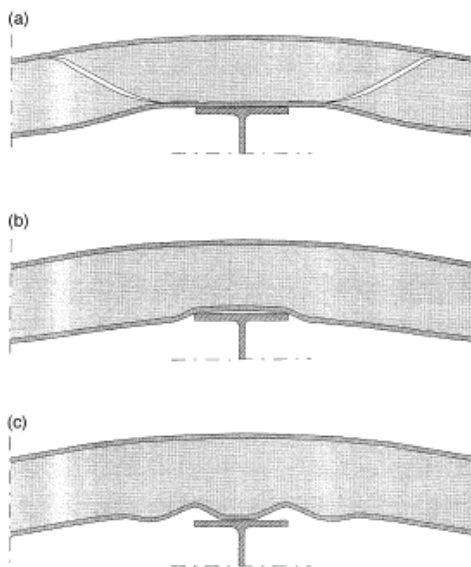
Kuva 10. Kerroslevyn käyttäytyminen, kun se on tuettu yksinkertaisesti (Davies 2001, 12)

Kuvassa 10 on esitetty yksinkertaisesti tuettu kerroslevypaneeli. Yksinkertaisesti tuetulla paneelilla tarkoitetaan molemmista päistä tuettua paneelia, jota kuormitetaan tasaisella kuormalla koko levyn matkalta. Kuvan 10 a-kohdassa on esitetty, kuinka kuorma aiheuttaa pintalevyihin jännitystä. Yläpuolen pintalevyyn syntyy kuormituksessa puristusjännitystä ja alapuolen pintalevyyn syntyy vetojännitystä. Kohdassa b on esitetty levyyn kohdistuva leikkausjännitys jakauma ja c-kohdassa on esitetty taivutusmomenttijakauma. Kohdassa d on esitetty, kuinka heikko liimasauma aiheuttaa materiaalien liukumista toisiinsa nähden. Liukuminen tapahtuu päistä. Kohdassa e ydinaineen ominaisuudet eivät ole riittävät, jolloin ydinaineessa tapahtuu leikkaantumista, jolloin pinnat pyrkivät erottumaan toisistaan. Kohdassa f on esitetty tapaus, jossa yläpinnan pintamateriaalin paksuus tai lujuus on riittämätön, jolloin pintalevyssä tapahtuu paikallista nurjahtamista. Tästä aiheutuu, että pintalevy menee rypylle ja irtoaa muista kerroksista. Kohdassa g on visualisoitu taas f-kohdan vastatilanne, jossa alapinnan materiaaliin kohdistuu liian suuri vetojännitys ja pintalevyt venyvät. (Davies 2001, 28.)



Kuva 11. Kerroslevyrakenne liitettynä muihin rakenteisiin (Davies 2001, 231)

Erityisesti kiinnityksissä on huomioitava kiinnittimen aiheuttamat kuormitukset (kuva 11). Ne aiheuttavat paljon leikkaus- ja puristusrasitusta. (Davies 2001, 230–231.)



Kuva 12. Kerroslevyrakenteen tuennasta aiheutuvia kuormituksia (Davies 2001, 238)

Kuvassa 12 on esitetty kerroslevyrakenteen yleisimmät hajoamistilanteet tuennan kohdalla. Kohdassa a tapahtuu leikkaantumisen. Kohdassa b tapahtuu ydinaineen romahtaminen ja c-kohdassa tapahtuu pintamateriaalin lommahtaminen ja venyminen. Vauriot voivat olla myös näiden vaurioiden yhdistelmiä. (Davies 2001, 237–238.)

Tuentakohdan kuormitusten jakaantuminen on riippuvainen tuen jäykkyydestä. Jäykkiä tukia käytettäessä kuormitus voidaan ajatella kahtena janana tuennan yläpinnan reunoilla. Betoni ja teräsprofiilit ovat esimerkkejä jäykistä tuennoista. Joustavia tuentoja käytettäessä kuormitus voidaan ajatella yhtenä janana tuennan vahvimmassa kohdassa. (Davies 2001, 238.) Esimerkiksi I-palkissa uuman kohdalla.

### 3 Materiaalit

Tyypillisessä ja yksinkertaisessa kerroslevyrakenteessa on 3 kerrosta. Kahden lujan ja ohuen pintalevyn välissä on kevyempi ydinaine, joka jakaa kantaa suurimman osan rakenteeseen kohdistuvasta leikkausjännityksestä. Rakenteita voi olla monimutkaisempiakin. Raskaassa kalustossa rakenteisiin on yhdistelty erilaisia välikerroksia ja vahvikkeita. Koska elementtien rakenteet ovat monesti kantavia rakenteita, niiden täytyy kestää paljon räsitusta, verrattuna esimerkiksi julkisivurakentamiseen.

#### 3.1 Ydinaineet

Ydinaineen tehtävänä on antaa kerroslevyrakenteelle paksuutta ja pitää pintalevyt erillään toisistaan. Yleisimmät ydinainemateriaalit ovat erilaiset solumuovit, syntaktiset ydinaineet, epäorgaaniset ydinaineet, erilaiset kennostot ja luonnonydinaineet. (Saarela, ym. 2003, 116–113.) Ydinaineen tärkeimmät ominaisuudet keveyden lisäksi ovat puristus- ja leikkauslujuus.

Ydinaineet voidaan myös jakaa karkeasti itsestään laajeneviin ja valmiiksi valmistettuihin ydinaineisiin. Itsestään laajenevissa ydinaineissa nestemäiset komponentit sekoitetaan toisiinsa ja niiden annetaan laajeta pintamateriaalien välissä, jolloin ne muodostavat omat sidoksensa ilman erillistä liimausta ja täytemateriaalien käyttöä. (Davies 2001, 26.) Valmiiksi valmistettua ydinainetta eli palasahattua ydinainetta käytettäessä on erittäin tärkeää, että ydinaine on liimattu kunnolla muihin kerroksiin ja mahdolliset raot on täytetty asianmukaisesti. Täyttämiseen voi käyttää liimaa, johon on sekoitettu täyteainetta, esimerkiksi kevyttä täyteainetta kuten mikropalloja. Liimauksen kannalta on tärkeää, että liima ei vahingoita ydinainetta. (Saarela, ym. 2003, 106.)

##### 3.1.1 Solumuovit

Solumuovit ovat eniten käytettyjä kerroslevyjen ydinaineita. Solumuoviydinaineiden etuina ovat hyvä lämmöneristyskyky, suhteellisen pieni vesiabsorptio ja kohtuullinen

hinta. Solumuovit ovat myös helposti muovattavissa tarvittavaan käyttötarkoitukseen. Solumuoveja on saatavilla jäykkinä ja pehmeinä. Kerroslevyteollisuus suosii jäykkiä rakenteita. Solumuovit toimitetaan yleensä valmiiksi sahattuina levyinä, joista leikataan omaan käyttöön sopiva pala. (Saarela, ym. 2003, 106.)

Jäykkiä polyuretaanisolumuoveja on kahta perustyyppiä, polyisosyanuraatti- ja isosyanaattipolyuretaanisolumuoveja. (Saarela, ym. 2003, 106.) Polyuretaanisolumuovit ovat kertamuoveja eli niitä ei voi muovata lämmön avulla enää valmistuksen jälkeen. Kertamuovi muodostuu hartsin kovettumisreaktiossa, jolloin hartsin polymeeriketjut silloittuvat eli kytkeytyvät toisiinsa kemiallisin sidoksin verkkomaiseksi rakenteeksi. (Seppälä, 2005.) Polyisosyanuraattisolumuovit ovat kevyitä lämmöneristykseen käytettäviä ekstrudoimalla isoina lohkoina valmistettavia levyjä. Hyvä puristuslujuus, lämmöneristysominaisuudet ja 150 °C lämpötilan kesto ovat polyisosyanuraattisolumuovien hyviä puolia. Tiheydet ovat 30–100 kg/m<sup>3</sup>. Murenevuus kuitenkin rajoittaa näiden muovien käyttöä. Hauraus aiheuttaa pintalevyjen irtoamista ydinaineesta, kun solumuoviytimen pinta murentuu väsymisen seurauksena erityisesti värähtely- tai taivutuskuormituksessa. (Saarela 2003, 106–107.)

Enemmän kerroslevyissä käytetty isosyanaattipolyuretaanisolumuovi voidaan valmistaa ekstrudoimalla tai paisuttamalla muottiin. Muottiinpaisutustekniikassa muottiin voidaan sijoittaa pintalevyt valmiiksi, jolloin ydinaine pystytään ruiskuttamaan suoraan pintalevyjen väliin. Näin muotista saadaan suoraan ulos valmis kerroslevy. Muottiinpaisutettujen levyjen haittana on, että materiaali pakkautuu muotin pintoihin, jolloin keskusta jää tiheydeltään pienemmäksi. Isosyanaattipolyuretaanisolumuovien polymeerirakenne ei ole yhtä silloitettu kuin polyisosyanuraattisolumuoveissa. Tästä johtuen isosyanaattiset solumuovit ovat huomattavasti sitkeämpiä ja vähemmän murenevia kuin polyisosyanuraattisolumuovit. Tosin parempi sitkeys ja vähempi murenevuus on saavutettu kimmoduulin kustannuksella. Tiheydet ovat 30–800 kg/m<sup>3</sup>. Lämmönkesto on noin 135 °C. (Saarela 2003, 106–107.) Levyjen ominaisuudet voivat kuitenkin vaihdella paljon riippuen valmistuksessa käytetyistä materiaaleista tai valmistusprosessista. Edellä mainittuja polyuretaanityyppejä löytyy myös sekoitettuina. Tällä on pyritty vähentämään molempien polyuretaanityyppien huonoja ominaisuuksia. Näiden yhdistelmälevyjen tiheys on välillä 32–130 kg/m<sup>3</sup>.

Polyuretaanisolumuovit eivät vaadi erityistä pintakäsittelyä ennen liimausta. Pinnankarhennus on ainoa suositeltava työvaihe ennen pintalevyjen liimausta. (Saarela 2003, 106.) Liimauksessa ja ennakoivissa työvaiheissa kannattaa noudattaa ensisijaisesti materiaalitoimittajien ohjeita. Jäykkä polyuretaanilevy hajoaa helposti kuormanalaisena soluseinämän nurjahtaessa ja murtuessa. (Davies 2001, 30–31.)

Polystyreenisolumuoveja valmistetaan sekä ekstrudoimalla että paisutettuina. Se on yleisesti vähemmän käytetty materiaali kerroslevypaneelissa. Tämän valmistus paisutettuna on hiukan hankalampaa muun muassa kovan muottikutistuvuuden takia. Ekstrudoimalla valmistettuja levyjä voidaan käyttää yksinkertaisissa rakenteissa. (Davies 2001, 31–32.) Polystyreeni on kestoplast eli sitä pystytään muovaamaan lämmön avulla muotoonsa. Kestomuovien eli termoplastisten muovien molekyylit ovat pitkiä polymeeriketjuja, joiden välillä ei ole kemiallisia sidoksia. (Seppälä 2005, 27.) Pitkäaikaisen kuormituksen aiheuttamat virumat ovat suuria polystyreenissa. Polystyreeniä käytettäessä on aina käytettävä liimasaumaa, koska polystyreenillä ei ole kiinnittäviä ominaisuuksia. Myös liiman valinnassa on huomioitavaa. Liuotinpitoisten liimojen käyttöä tulisi välttää, koska polystyreeni ei kestä liuottimia. Myös polystyreenilevyjen pinta tulisi karhentaa ennen liimausta. (Davies 2001, 31–32.) Styreeniakryylinitriilisolumuovit ovat umpisoluisia ja ne on kehitetty veneteollisuuden käyttöön. Styreeniakryylinitriilisolumuovien staattiset lujuusominaisuudet ovat samankaltaiset kuin silloitetulla polyvinyylidikloridisolumuoveilla. (Saarela 2003, 108.)

Polyvinyylidikloridisolumuovit ovat polyvinyylidikloridin ja aromaattisen polyurean/polyamidin seos. Muoveilla on hyvät staattiset ja dynaamiset lujuusominaisuudet myös pitkäaikaisessa käytössä. Polyvinyylidikloridisolumuovit ovat hinnaltaan kalliimpia kuin edellä mainitut solumuovit, mutta niiden lujuus-painosuhte on parempi. PVC-solumuovit valmistetaan joko silloitetusta tai lineaarisesta PVC:stä. Lineaariset PVC-solumuovit soveltuvat erityisesti dynaamisesti kuormitettujen kerroslevyjen ydinaineeksi. Lisäksi ne ovat iskutkeämpiä ja omaavat paremman väsymiskestävyyden kuin silloitetut PVC-solumuovit. Linearisesta PVC:stä valmistetut levyt on aina pintakäsiteltävä ennen pintalevyjen liimaamista tai laminointia, jos liima tai hartsi sisältää styreeniä.

Silloitettujen PVC-solumuovien hyviä puolia ovat hyvä värähtelykestävyys sekä lujuus- ja jäykkyysominaisuudet. Ylin mahdollinen käyttölämpötila silloitetuilla PVC-

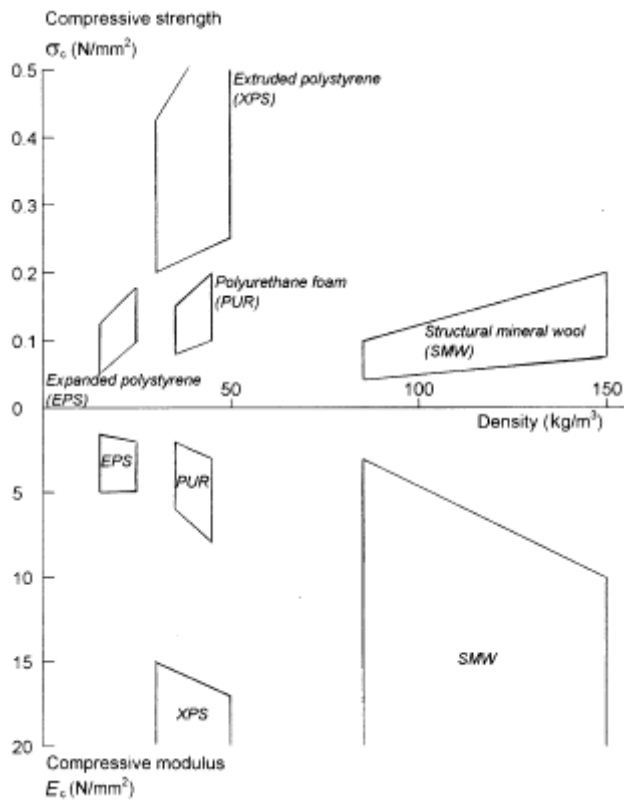
solumuoveilla on noin 120 °C, lineaarisilla solumuoveilla noin 60 °C. PVC-solumuovit soveltuvat hyvin staattisesti kuormitettujen kerroslevyjen ydinaineeksi. PVC-solumuoveja löytyy myös erilaisina seoksina, joilla on parannettu lujuusominaisuuksia ja mittapysyvyyttä. (Saarela 2003, 107–108.)

Muita käytettyjä kerroslevyjen solumuoviydinaineita ovat muun muassa: fenoli-, polyeetterisulfoni-, polyeetteri-imidi- ja polymetakryyli- imidisolumuovit. Näiden solumuovien suuria etuja ovat muun muassa parempi käyttäytyminen tulipalon sattuessa. Palaessa ei synny niin paljon myrkyllisiä tai korrodoivia kaasuja. Syttymisherkkyys on pienempi ja palaminen on hitaampaa. (Saarela 2003, 109; Davies 2001, 32.)

### **3.1.2 Epäorgaaniset ydinaineet**

Epäorgaanisten ydinaineiden avulla saadaan huomattavasti parempi paloturvallisuus verrattuna muihin ydinaineisiin ja saadaan täytettyä tiukempia paloturvallisuusmääräyksiä, koska nämä ydinaineet ovat yleensä syttymättömiä. Tärkeimpinä raaka-aineina näissä käytetään sulatettuja mineraaleja. Raaka-aineina käytetään muun muassa kiveä, lasia, tulipesäkuonaa, kivivillaa ja lasivillaa. Mineraalivillaydinaineilla on huomattavasti avonaisempi solurakenne ja suuri taivutuselastisuus pituussuunnassa verrattuna solumuoveihin. Mineraalivillat ovat herkempiä veden ja höyryn aiheuttamille haasteille. Oikeilla seostuksilla mineraalivillan vedenimukyky saadaan alennettua jopa alemmaksi kuin polystyreenilla. Mineraalivillojen lujuusominaisuudet paksuussuunnassa ovat melko huonot johtuen mineraalivillan sisäisestä rakenteesta. Mineraalivillojen lämmönjohtokyky on suurempi verrattuna solumuoveihin. Tämän vuoksi mineraalivilla on huomattavasti parempi lämmöneristin kuin umpisolainen rakenne. (Davies 2001, 36–38.)





Kuva 13. Erityyppisten solumuovien ja mineraalivillan puristuslujuus ja puristusmoduuli (Davies 2001, 28)

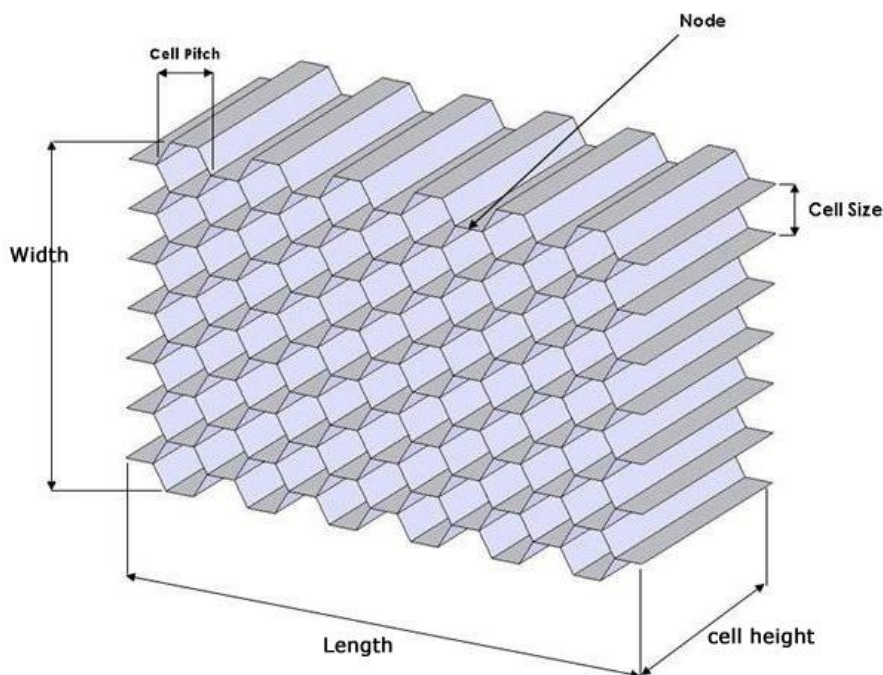
Kuvassa 13 on esitetty visuaalisesti, kuinka puristuslujuudet ja kimmomodulit eroavat toisistaan erityyppisissä ydinaineissa. Vaaka-akselina on materiaalin tiheys, sen yläpuolella on esitetty puristuslujuus ja alapuolella puristusmoduuli. (Davies 2001, 27–28.)

Lyhenteet tarkoittavat seuraavaa:

- XPS ekstrudoitu polystyreeni
- PUR polyuretaanivaaho
- EPS muottiin paisutettu polystyreeni
- SMW mineraalivilla (Davies 2001, 27–28).

### 3.1.3 Kennoydinaineet

Kennoydinaineita voidaan valmistaa lähes mistä vain ohuesta materiaalista. Ohuin käytetyin kennolevy on 2–3 mm paksu. Yleisimmät kennomuodot ovat kuusikulmio, yliavattu ja taipuisa. Kuusikulmaisessa kennossa leikkauslujuus ja liukumoduuli ovat tasan  $YZ$  noin kaksinkertaiset tason  $XZ$  arvoihin verrattuna suunnan  $X$  ollessa levyn pituussuunta,  $Y$  poikittaissuunta ja  $Z$  levytasoa vastaan kohtisuora suunta. Kennorakenteita pystytään myös muotoilemaan, riippuen kennotyypistä ja materiaalista. Kennoydinainemateriaalien liimaaminen pintalevyihin on huomattavasti vaikeampaa kuin esimerkiksi solumuovin, koska liimapinta-ala on huomattavasti pienempi. (Saarela 2003, 110–112.) Kuvassa 14 on esitetty kuusikulmainen kennorakenne.



Kuva 14. Kuusikulmainen kennorakenne (Aluminium-honeycomb-panel 2014)

### 3.1.4 Syntaktiset ja luonnonydinaineet

Syntaktisilla ydinaineilla tarkoitetaan ydinaineita, jotka valmistetaan tavallisesti muovista ja ontoista mikropalloista. Mikropallot sekoitetaan matriisimuoviin, minkä jälkeen seos kovetetaan. Prosessin aikana rakenteeseen jää paljon ilmakuplia. Tällöin rakenteen tiheys ja lujuus eivät ole haluttavia. Tämä ongelma voidaan ratkaista sekoittamalla komponentit esimerkiksi tyhjiössä, jolloin ilmakuplien syntyminen estetään. (Saarela 2003, 109.)

Luonnonydinaineista käytetyimpiä ovat balsa ja muut puulajit. Balsaydinaineen lujuusominaisuudet ovat painoon nähden huomattavasti paremmat kuin tavanomaisilla solumuoveilla. Balsapuun tiheydet ovat välillä 72–220 kg/m<sup>3</sup>. (Saarela 2003, 109–110.) Puumateriaalien käytöllä on myös omat ominaispiirteensä. Esimerkkejä tästä ovat puun voimakas vesiabsorptio ja lahoaminen. Voimakas vesiabsorptio näkyy myös muiden aineiden kuten liiman tai hartsin absorptioitumisena. Myös puumateriaalien lujuusominaisuudet ovat hyvin vaihtelevia. (Saarela 2003, 110.) Voimakas absorptioituminen aiheuttaa muun muassa painonnousua kerroslevyrakenteeseen, joka ei ole yleensä toivottua.

## 3.2 Pintalevyt

Pintalevyt ovat huomattavasti ohuempia kuin ydinainekerrokset. Pintalevyjen tehtävä on kantaa levyn tasossa vaikuttavat kuormat ja momentit, mutta pintalevyillä on muitakin tehtäviä. Ne suojaavat itse levyrakennetta ympäristön ja kuormien vaikutuksilta. (Davies 2001, 14–15.) Lisäksi pintalevyjen tehtävänä on näyttää hyvältä ja olla pintakäsiteltävissä muun muassa maalaamalla. Raskaan kaluston käytössä pintalevyllä täytyy myös olla muunkinlaisia ominaisuuksia. Kova kulutuskestävyys on yksi paljon haluttu ominaisuus raskaassa kalustossa. Lattiankin päällä voi olla esimerkiksi 30000 kg paino, jota voidaan vielä kuljettaa lattiaa pitkin (Ranta 2014). Teräslevyjen kohdalla tämä on tietysti helposti hoidettu ongelma, koska teräslevyissä on vaadittava kulutuskesto. Teräksen

huonoja puolia vastaavasti ovat korroosio ja paino. Komposiittirakenteita käytettäessä levyn kulumiskestävyys on erittäin kovilla.

### 3.2.1 Teräslevyt

Teräslevyt ovat yleisimpiä kerroslevyrakenteissa. Teräslevyjä käytettäessä niiden pitäisi olla aina korroosiosuojattu. Korroosiosuojaus on yleensä toteutettu levyn valmistusvaiheessa erilaisilla pinnoitteilla, kuten sinkillä. Monesti käytetään myös orgaanista pinnoitetta teräslevyn pinnassa. Pinnoittamatonta teräslevyä ei suositella käytettäväksi. Korroosiosuojauksen lisäksi teräslevy pitää myös pinnoittaa erilaisilla pohjustusaineilla, jolla varmistetaan muun muassa pintamateriaalin hyvä liimautuminen ydinaineeseen. Pintalevyjen paksuutta mitoittaessa murtolujuus ei ole tärkein tekijä. Pintalevyt hajoavat yleensä puristuksella olevan pinnan lommahtaessa, vedolla olevan pinnan leikkaantues- sa irti muusta rakenteesta tai teräslevyn vetolujuuden ylittyessä. Yleisesti käytettyjen teräslevyjen paksuudet liikkuvat 0,5–1,5 mm välissä. (Davies 2001, 15–20.) Taulukossa 2 on listattu teräslevyjä, joita suositellaan käytettäväksi kerroslevyjen pintamateriaaleina. Teräslevyt ovat EN-standardien mukaisia.

Taulukko 2. Kerroslevyissä yleisesti käytettävien teräslevyjen ominaisuudet ja pinnoitteet (Davies 2001, 17)

Low-carbon steel sheet EN 10142			Structural steel sheet EN 10147		
Steel grade	Yield strength <sup>a</sup> max. (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength <sup>b</sup> max. (N/mm <sup>2</sup> )	Steel grade	Yield strength min. (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength min. (N/mm <sup>2</sup> )
DX51D	—	500	S220GD	220	300
DX52D	300	420	S250GD	250	330
			S280GD	280	360
			S320GD	320	390
			S350GD	350	420
			S550GD	550	560
<sup>a</sup> A minimum value of 140 N/mm <sup>2</sup> may be expected					
<sup>b</sup> A minimum value of 270 N/mm <sup>2</sup> may be expected					
Available zinc coatings (EN 10142, EN 10147)					
Hot-dipped zinc	Total amount of zinc on both surfaces (g/m <sup>2</sup> )	Thickness of coating on one surface (µm)	Alloyed zinc	Total amount of zinc on both surfaces (g/m <sup>2</sup> )	Thickness of coating on one surface (µm)
Z100	100	7	ZF100	100	7
Z140	140	10	ZF140	140	10
Z200	200	14			
Z225	225	16			
Z275	275	19.5			
Z350	350	25			
Other available metallic coatings (EN 10214, EN 10215)					
Hot-dipped zinc–aluminium <sup>c</sup> EN 10214 (95% Zn, 5% Al)			Hot-dipped aluminium–zinc <sup>d</sup> EN 10215 (55% Al/1.5% Si/rest Zn)		
	Total amount of coating on both surfaces (g/m <sup>2</sup> )	Thickness of coating on one surface (µm)		Total amount of coating on both surfaces (g/m <sup>2</sup> )	Thickness of coating on one surface (µm)
ZA200	200	15	AZ150	150	20
ZA255	255	20	AZ185	185	25
ZA300	300	23			

<sup>c</sup> tradename Galvan <sup>d</sup> tradenames Aluzink, Galvalume, Aluzinc, Zahätte, Algafort

Suomessa esimerkiksi Ruukki tarjoaa erilaisia DX-luokan teräksiä (EN 10346), joihin on saatavilla ZF-pinnoitetta. ZF-pinnoite on sinkki-rautaseosta ja pinnoitepaksuus Ruukin tarjoamissa teräksissä on 7–9 µm. Ruukin valmistamien terästen myötölujuudet liikkuvat välillä 140–500 MPa. Ruukki tarjoaa myös rakenneteräksiä (EN 10346), joissa on sinkki-alumiiniseospinnoite. Rakenneterästen Galfan (ZA)-pinnoitteiden paksuudet ovat välillä 7–23 µm. (Ruukki, 2014.)

### **3.2.2 Alumiini, kupari ja ruostumaton teräs**

Joissain tapauksissa alumiinia voidaan käyttää pintamateriaalina. Alumiinia käytetään yleensä, kun halutaan levyille korroosionkestoa tai hyvää hygieniää. Alumiinilevyjen paksuudet liikkuvat välillä 0,7–1,2 mm. Suositellut alumiinilaadut ovat AlMn (mangaanilla seostettu alumiini), AlMg (magnesiumilla seostettu alumiini) ja näiden molempien seokset. Tyypillisen alumiiniseoksen murtolujuus on noin 200–250 MPa. Alumiinipinnalla on huono liimautuvuus ydinaineeseen, minkä takia alumiinin pinnat täytyy käsitellä ennen liimausta. Käsitely toteutetaan helpoimmillaan pohjustusaineella. (Davies 2001, 20–22.)

Hygieniää vaativissa paikoissa käytetään alumiinin lisäksi myös ruostumatonta terästä. Ruostumattoman teräksen ominaisuudet ovat hyvin samanlaiset kuin rakenneteräksellä. Ruostumatonta terästä käytettäessä ei tarvitse käyttää erillistä korroosiosuojausta. Kerroslevyissä käytetään joskus edellisten lisäksi myös kuparia, muttei kuitenkaan niinkään raskaan kaluston sovellutuksissa. Kuparilevyllä on erittäin hyvä korroosionkesto, mikä johtuu kuparin pintaan ajan kanssa muodostuvasta oksidikerroksesta. Ruostumattoman teräksen ja kuparin liimausominaisuudet ovat hyvin samanlaiset kuin normaalilla teräslevyllä. (Davies 2001, 22–24.)

### **3.2.3 Puupohjaiset aineet**

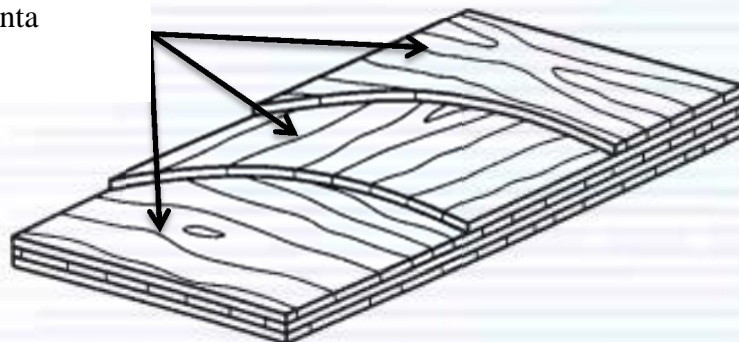
Puupohjaisia aineita voidaan myös käyttää kerroslevyrakenteiden pintamateriaaleina. Nämä materiaalit ovat erittäin soveliaita ympäristöihin, joissa ilmankosteus ei vaihdu jyrkästi. Puumateriaalien pitkäaikaisessa kuormituksessa puun viruminen ja samalla

ydinaineen viruminen kannattaa ottaa huomioon suunnittelussa. Valmistukselle aiheutuu haasteita käytettäessä puumateriaaleja, koska levy materiaalien koot ovat hyvin rajoittuneet (pituus ylittää harvoin 3600 mm), joten suoraa ydinaineen ruiskutusta pintamateriaalien väliin ei usein voida käyttää. Liimauksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota levyjen liitoksiin. (Davies 2001, 24.) Käytettävät levyt ovat ohuita, joten päittäisliitoksissa liimasauman pinta-ala jää pieneksi.

Vaneri on yksi paljon käytetty puuainekes pintalevyinä. Vaneri koostuu puusta tehdyistä viiluista, joita on liimattu päällekkäin. Kerrokset on pinottu erisuuntaisesti, jolloin puun syyt ovat eri suuntiin eri kerroksissa (kuva 15), joka antaa rakenteelle homogeenisemmän käyttäytymisen eli vanerilevyllä on levytasossa samanlaiset lujuusominaisuudet joka suuntaan. (Davies 2001, 24.) Suomalainen vaneri valmistetaan ristiinliimaamalla. Koivu- ja kuusiviulun nimellispaksuus on 1,4 mm. Suomalaisia vakiovanereita on neljää eri luokkaa: koivu-, combi-, peilikuvacombi- ja havuvaneri. Koivuvanerin valmistukseen käytetään ainoastaan koivupuuta. Combivanerissa pintaviilu ja sen alla oleva ensimmäinen liimaviilu ovat koivupuuta. Sisimmät kerrokset ovat vuorotellen koivu- ja havuviilua. Peilikuvacombianerissa pintaviilut ovat koivua ja sisimmät kerrokset ovat vuorotellen havu- ja koivuviilua. (Metsäteollisuus ry 2005, 9.)

Vanerit luokitellaan neljään eri luokkaan pintaviilun laadun perusteella. Luokissa vanerit luokitellaan pinnanlaadun perusteella. Pinnanlaatuun vaikuttavat oksien määrä, oksareikien määrä ja koko, pinnankarheet ja läpiliimaus. Vanerin laatuluokalla ei ole vaikutusta levyn lujuusominaisuuksiin. (SFS 2413 1971.)

Puun syiden suunta



Kuva 15. Ristiinliimatut vaneriviilut (Metsäteollisuus ry 2005, 9)

Vanereita on saatavissa myös erilaisilla pinnoitteilla. Paljon käytetty pinnoite on fenolifilmipinnoite (kuva 16), joka suojaa itse vaneria paremmin kulutukselta, kemikaaleilta, kosteudelta, hyönteisiltä ja sienikasvustolta. Fenolifilmipinnoitteinen vaneri voidaan valmistaa liukuestekuvioinnilla. Tällöin pinnoituksen yhteydessä vanerin pintaan kuumapuristetaan liukuestekuviointi. Kuviolla parannetaan huomattavasti levynpinnan kitkaominaisuuksia. Kuumapuristamalla fenolihartsista impregnoitua filmiä vanerinpintaan, saadaan aikaiseksi myös maalauskalvopohja. Pinnoitteen avulla saadaan kestävä ja sileä maalauspohja. Pinnoite vähentää tarvittavaa maalikerrosta ja ehkäisee puupinnan tyyppillistä hiushalkeilua. Vanereja on saatavana muovipinnoitteella, jolla lisätään vanerin kestävyttä. Melamiinihartsilla impregnoidulla filmillä pinnoitetut vanerilevyt ovat ulkonäöltään siistejä. Ne soveltuvat hyvin hygieenisyyttä vaativiin kohteisiin kuten esimerkiksi elintarviketeollisuuden sovellutuksiin. (Metsäteollisuus ry, 2005, 14–15.)

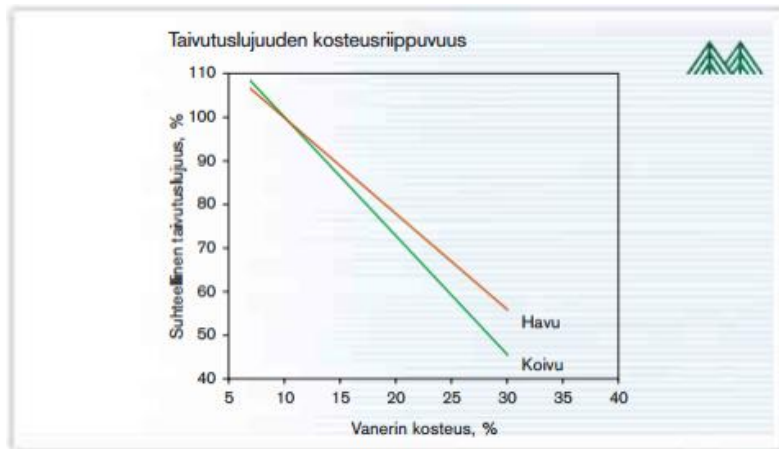


Kuva 16. Fenolifilmipintaista vaneria (Vaneri.eu 2014)

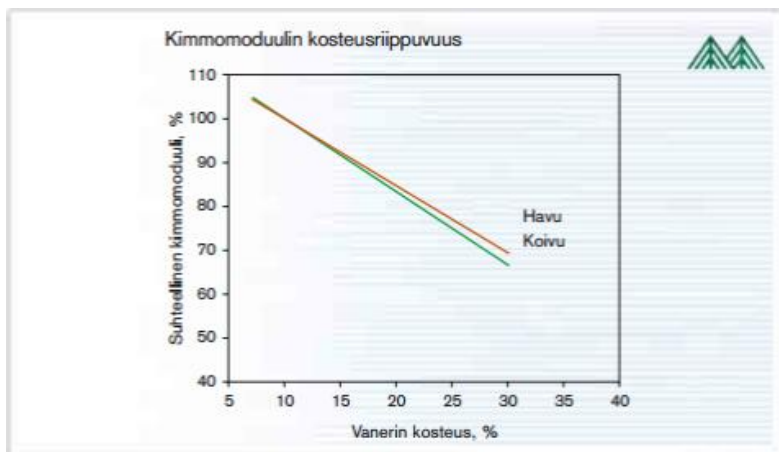
Kuljetusvälineteollisuudessa muovipinnoitettua vaneria käytetään viimeistelyä vaativissa pinnoissa kuten seinien ulkopinnoissa tai sisäverhoiluissa. Pinta on pinnoitteesta hieman riippuen kiiltävä, likaa hylkivä, säänkestävä, kevyt ja sileä. Fenolifilmipintaista vaneria käytetään kuljetusvälineteollisuudessa lattian pintamateriaalina. Vanerin pinnoite antaa vanerille kulutuskestävyyttä ja liukuestekuvioinnilla lattiasta saadaan pitävä. (Metsäwood, 2014.)

Suomalaisen vanerin suurin vakiolevykoko on 1525x3660 mm, mikä aiheuttaa omat vaatimuksensa vaneria käytettäessä. Vanerilla, niin kuin muillakin puumateriaaleilla, on tapana menettää lujuusominaisuuksiaan rakenteen kosteuden noustessa. Suomalaisen vanerin kosteus on tehtaalta toimitettaessa tavallisesti 7–12 %. Vaneri on myös muiden

puupohjaisten aineiden tavoin hygroskooppinen materiaali eli sen mitat muuttuvat kosteuden muuttuessa. (Metsäteollisuus ry 2005, 22–23.)



Kuva 17. Suomalaisen vanerin taivutuslujuuden kosteusriippuvuus (Metsäteollisuus ry 2005, 22)



Kuva 18. Suomalaisen vanerin kimmomoduulin kosteusriippuvuus (Metsäteollisuus ry 2005, 23)

Kuvissa 17–18 on esitetty kimmomoduulin ja taivutuslujuuden suhde vanerin kosteuteen. Vanerin kosteudenkesto-ominaisuuksiin vaikuttaa olennaisesti puulaji, josta vaneri on tehty. Asianmukaisilla päätyjen ja pintojen suojauksilla voidaan pidentää materiaalin elinikää. (Metsäteollisuus ry 2005, 24.)

Lastulevyt valmistetaan 0,2–0,4 mm paksuisista puulastuista, jotka liimataan yhteen paineen ja lämmön avulla. rakenteesta noin 10 % on yleensä liimaa. Kipsilevyt ovat lujuudeltaan yleensä heikkoja, mutta tarjoavat esimerkiksi hyvän palosuojan. Lastu- ja



kipsilevyt eivät sovellu ominaisuuksiensa vuoksi raskaankaluston sovellutuksiin. Erityisesti kipsilevyjen huono soveltuvuus kosteisiin tiloihin on poissulkeva ominaisuus. (Davies 2001, 24–25.)

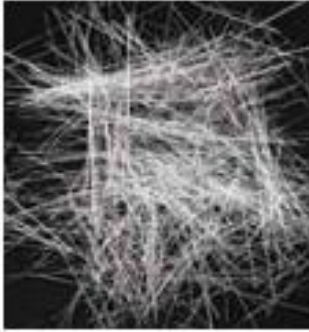
### 3.2.4 Lujitekuituiset muovikomposiitit

Muovikomposiiteissa käytettäviä kuitutyyppjä ovat lasi-, hiili-, aramidi-, polyeteeni-, boori-, piikarbidi- ja luonnonkuidut. Lasikuitu on ylivoimaisesti eniten käytetty lujitekuitu. Lujitekuitujen toiminta perustuu siihen, että matriisimuovi sitoo lujitteet toisiinsa, suojaa niitä ja siirtää kuormitukset niiden kannettaviksi. Lasikuidussa yleisin käytetty lasityyppi on E-lasi, jolla on hyvät sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä hyvä kemiallinen kestävyys. (Saarela, ym. 2005, 74–75.) Lasikuitulaminaatteja käytettäessä ominaisuuksien kannalta on tärkeää, miten lujitteet on sijoiteltu laminaattiin. Myös lujitteen määrä laminaatissa määrittelee levyn ominaisuuksia.

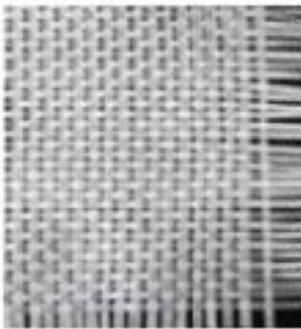
Kuvissa 19–21 on esitetty yleisimmät ja käytetyimmät lasikuitulujitetyypit. Brianza Plastica valmistamien lasikuitulaminaattien lujuudet liikkuvat välillä 60–120 MPa riippuen laminaatin paksuudesta ja pintakäsittelyistä. Lasikuitulaminaattien tiheydet ovat 1,4–1,5 g/cm<sup>3</sup>. (Brianza Plastica 2014.)



Kuva 19. Lasikuitumatto (Brianza Plastica 2014)



Kuva 20. Haketettu roving (Brianza Plastica 2014)



Kuva 21. Lasikuitukudos (Brianza Plastica 2014)

Laminaattien yhteydessä käytetään myös monesti erilaisia pinnoitusmenetelmiä. Eniten käytetään gelcoatia, joka antaa laminaatille paremman ulkonäön ja suojaa laminaattia säältä, kosteudelta ja kemikaaleilta. Gelcoat-kerroksen paksuus on yleisesti noin 0,4–0,7 mm, mikä vastaa gelcoat-hartsikulutusta 550–850 g/m<sup>2</sup>. Pinnat voidaan myös maalata, mutta muovituotteita maalatessa voidaan joutua käyttämään erilaisia pohjustus- ja hiontavärejä. Laminaatteja käytettäessä voidaan myös joutua käyttämään suojapinnoitetta (topcoat), mikä on parafiinia, tiksotropointiainetta ja mahdollista väriainetta sisältävä hartsi, joka kovettuu nopeasti. Topcoatilla voi myös suojata puupintoja kosteudelta, koska se luo pinnalle silkkimattaisen, likaa ja vettä hylkivän pinnan. (Saarela, ym. 2005, 100–101.)

### 3.3 Jäykisteet

Vahvikkeiden tarkoituksena on tukea rakennetta (antaa puristuslujuutta) ja antaa sille lisää jäykkyyttä. Vahvikkeet on yleensä sijoitettu ydinaineen tasoon. Käytettyjä vahvik-

keita ovat erilaiset teräsprofiilit (muun muassa RHS-putki), liimapuupalkit (esimerkiksi kertopuu), komposiitit ja muut metallit (esimerkiksi alumiini). Vahvikkeilla vahvistetaan myös kerroslevypaneelin reunoja. Paneelin reunapinnoille ei saa jättää ydinainetta, koska paneelin reuna tulee liian heikoksi. Rakenteiden valmistus on huomattavasti haastavampaa, kun rakenteeseen lisätään vahvikkeita. Puuvahvikkeita käytettäessä törmätään jälleen puun kosteuselämiseen ja lujuuden menettämiseen. Liimapuupalkkeja valmistaa esimerkiksi Metsäwood.

### 3.4 Liimat ja liimaus

Yksi- ja kaksikomponenttipolyuretaaniliimat ovat eniten käytettyjä liimoja kerroslevyjen liimauksessa. Käytetty liiman määrä on yleensä 200–350 g/m<sup>2</sup> per puoli. Kaksikomponenttiliimoja käytetään erityisesti jäykkien ydinaineiden kuten polystyreenin liimaukseen. Yksikomponenttiliimat ovat yleensä aktivoitavia. Liimat aktivoidaan yleensä vesisuihkulla, joka saa ne kovettumaan. (Davies 2001, 40–41.)

Ainekerrosten yhteenliimaamisessa täytyy huomioida eri kerrosten ja materiaalien vaatimukset kuten pinnan karhennukset ja pinnoitteet. Myös puristusaine ja liiman oikea määrä täytyy huomioida liittämisenä. Tarvittava puristusaine saadaan helpoimmillaan aikaiseksi painoilla. Korkeampi ja tasaisempi puristusaine saadaan aikaiseksi alipainesäkillä. Kerroslevyjä voidaan liimata monikerrospuristimella, jolloin saadaan työstettyä useampia levyjä yhdellä kertaa. Kaarevien kerroslevyjen liimaus vaatii joko korkean paineen sekä korkeamman lämpötilan tai ydinaineen esitaivutuksen. Valmiina saatavien ydinaineiden käyttö on etenkin sarjavalmistuksessa melko kallista ja aikaavievää. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää erilaisia muottiinvalettavia ydinaineita. (Saarela, ym. 2005, 191.)

## 4 Nykyisen rakenteen ratkaisut ja materiaalit

### 4.1 Nykyinen rakenne

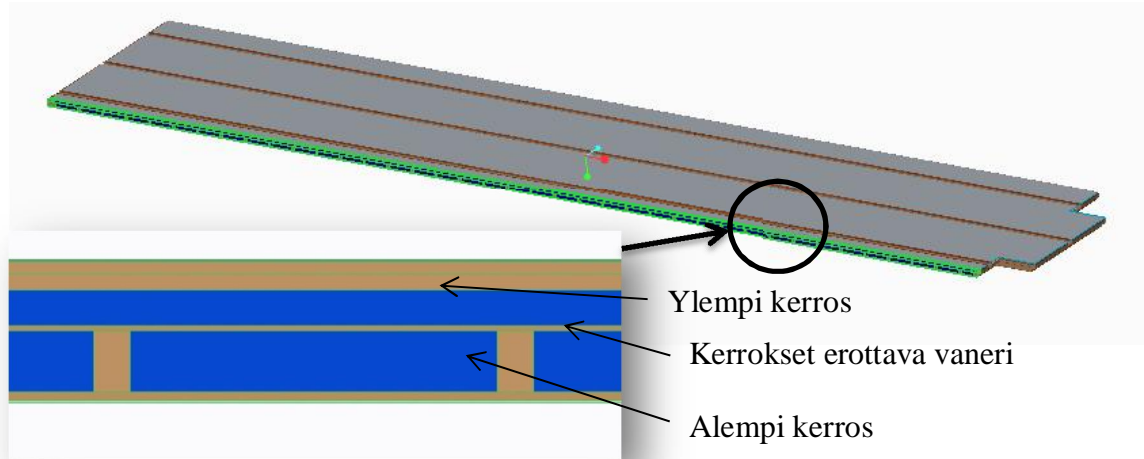
Konepaja Antti Rannan nykyisin käyttämä lattiarakenne on niin sanottu itsekantava kerroslevyelementti. Lattiaelementin rakennetta käytetään nousevaseinäisissä ketjupurkavissa perävaunujen ja kuorma-autojen päällirakenteissa. Lattiarakenteen erikoisuutena on lattiarakenteeseen upotetut purkuketjut, joihin on sijoitettu puolelle matkaa ketjusta kolia. Tämän ansiosta lattiasta saadaan tasainen, mikä mahdollistaa esimerkiksi trukilla liikkumisen kuormatilassa. Kuvassa 22 on kuormatila, missä on upotetut purkuketjut. Kuvassa kolat on ajettu lattian alle, jolloin pohja jää tasaiseksi.



Kuva 22. Nykyinen lattiarakenne käytössä (Immonen 2014)

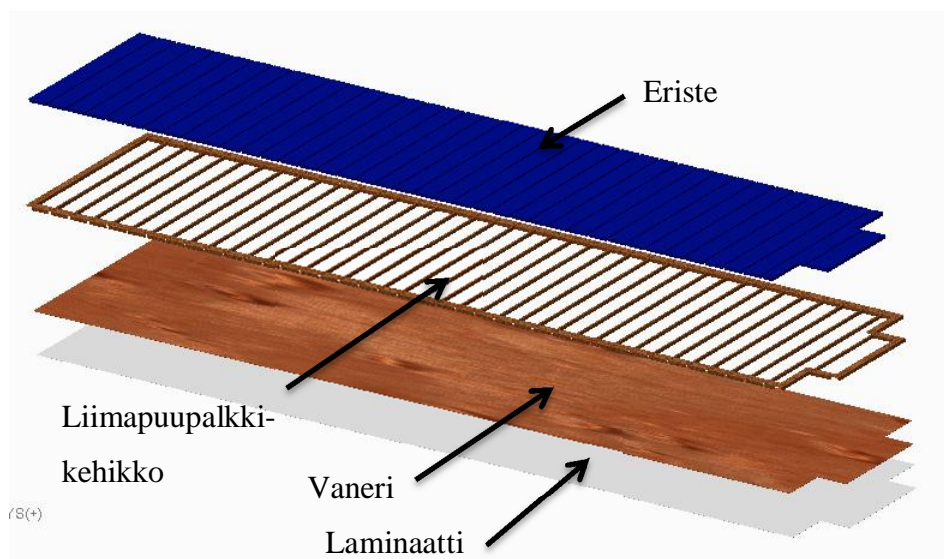
Käytössä olevan rakenteen analysointiin käytettiin vuonna 2014 valmistunutta perävaunun lattiarakennetta. Perävaunu on 13,6 m pitkä ja 2,6 m leveä. Tämänkaltainen rakenne on ollut käytössä useita vuosia, tietenkin pieniä muutoksia oli tehty vuosien saatossa.

Lattiaelementti voidaan jakaa ylempään ja alempaan kerrokseen. Rakenteessa on periaatteessa kaksi kerroslevyä päällekkäin, jotka on erotettu toisistaan vanerikerroksella. Kummallakin kerroksella on omanlaisensa rakenne. Rakenne on esitetty kuvassa 23.



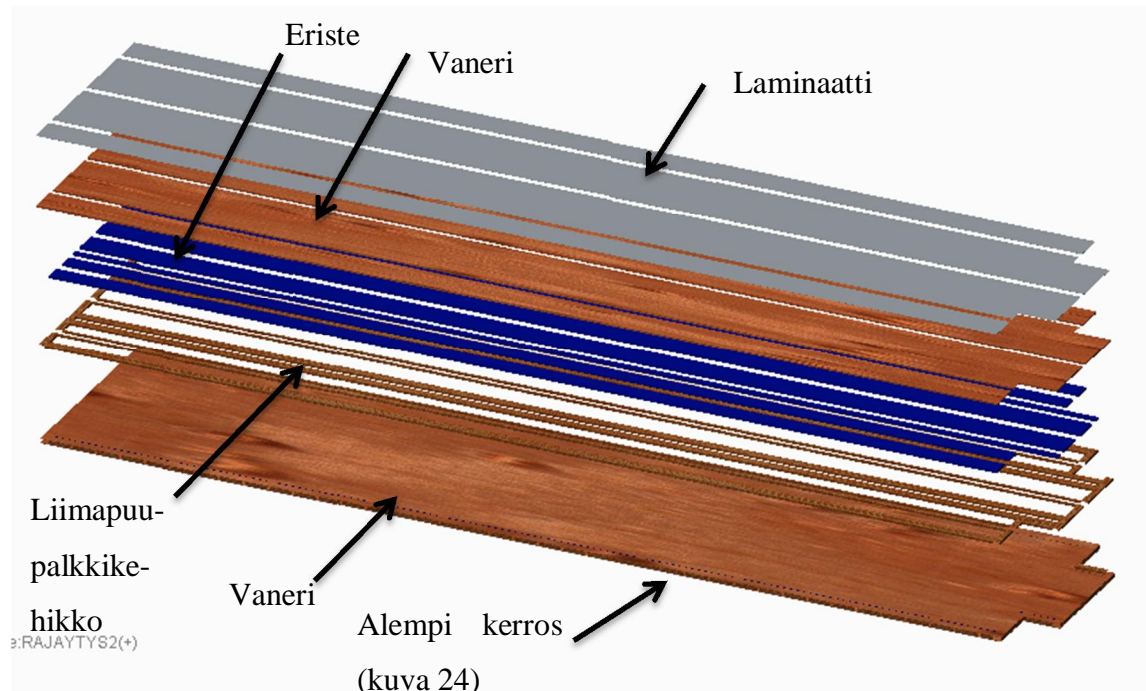
Kuva 23. Käytössä olevan kerroslevyrakenteen poikkileikkaus pituussuunnassa ja suurenna. Kuvassa siniset osiot ovat ydinainetta. (Immonen 2014)

Lattiaelementin alemman kerroksen rakenne koostuu pohjalla olevasta 2 mm paksusta haketetulla rovingilla lujitetusta laminaattilevystä. Levyn on valmistanut Italialainen Brianza Plastica. Pohjalevyn päällä on 6 mm paksuinen suomalainen koivuvaneri. Vanerin päälle on sijoitettu liimapuupalkkikehikko. Kehikkojen väliin on liimattu polystyreenieristelevyt. Liimapuupalkkikehikon ja eristeen paksuus 45 mm. Kuvassa 24 on esitetty alemman kerroksen rakenne.



Kuva 24. Alemman kerroksen rakenne (Immonen 2014)

Alemman ja ylemmän kerroksen väliin liimataan 4 mm paksuinen koivuvaneri. Vanerin yläpuolelle asennetaan liimapuupalkkikehikko ja kehikon välit on täytetty eristelevyillä. Liimapuupalkkikehikon ja eristelevyjen päälle asennetaan 21 mm vanerikerros. 21 mm vanerikerros on toteutettu asettamalla 9 ja 12 mm vanerit päällekkäin. Lopuksi päälle on asetettu vielä 2 mm laminaattilevy. Rakenne on esitetty kuvassa 25.



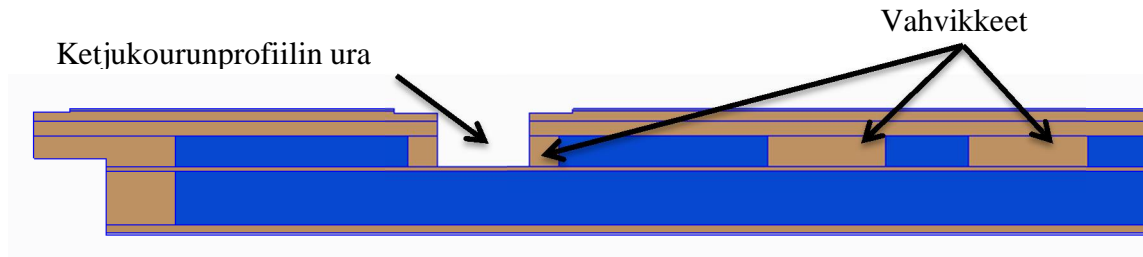
Kuva 25. Ylemmän kerroksen rakenne (Immonen 2014)

## 4.2 Nykyiset materiaalit ja valmistus

Elementin on valmistanut Eurocon Oy Tuusulassa. Liimapuupalkit ovat Metsä Woodin valmistamia Kerto-liimapuupalkkeja. Eriste on Finnfoamin valmistamaa eristyslevyä. Vanerit ovat suomalaista koivuvaneria. Kaikki pintalevymateriaalit ovat Brianza Plasticsin valmistamia. (Leino 2014.)

Ketjukurujen ympärille asennetaan pohjan suojaksi teräksestä valmistettu suoja profiili, joka upotetaan sille valmistettuun uraan. Teräsprofiili suojaa itse pohjaa purkuketjujen ympäristössä, koska purkuketjuista voi aiheutua osuessaan erittäin suuria kuluttavia voimia. Ketjukurujen urista aiheutuu myös isot rasiutukset, koska pohja on huomatta-

vasti ohuempi kourun kohdalta. Tämä tarkoittaa, että uran mitat ovat todella tärkeitä, koska profiilia jouduttaisiin muuttamaan, jos uran mitta muutettaisiin. Lattiaelementin oikeassa reunassa olevan uran muoto on sidottu siihen sijoitettavaan profiiliin. Kuvassa 26 on pohjajaelementin oikean puolen poikkileikkaus edestäpäin, jossa on nähtävissä edellä mainitut kohdat.



Kuva 26. Pohjajaelementin poikkileikkaus oikealta puolelta (Immonen 2014)

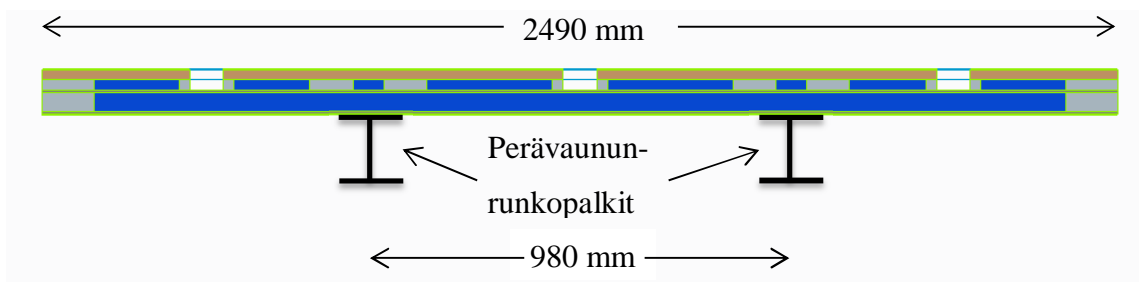
### 4.3 Nykyisen rakenteen ratkaisut

Pohjan valmistuksessa on huomioitu melko hyvin valmiiksi valmistetut kappalekoot, eli käytännössä vanerit ja pintamateriaalit ovat valmistajan katalogien vakiovalmistusmittoja (Brianza Plastica 2014; Metsäteollisuus ry 2005). Liimapuupalkkien osalta tämä on melkein toteutunut, mutta urien yläpuolelle valmistettavassa 26 mm paksuisessa kerroksessa vahvikkeita on jouduttu madaltamaan 1 mm valmistajan toimittamasta koosta, joka on 27 mm (Metsä Wood 2014). Finnfoamin saatavat paksuudet ovat FI-300-luokan Finnfoamilla 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ja 100 mm. Vahvemman FI-700-Finnfoam levyn saatava paksuus on 50 mm. (Finnfoam 2014.)

Lattiaelementin tuennan yläpuolelle on sijoitettu kaksi vahviketta (kuva 26) joiden tarkoitus on pienentää ydinaineeseen kohdistuvaa paikallista puristuskuormitusta. Puristuskuormituksen suuruudesta ei ollut saatavilla tarkempia arvoja. Ketjukourunprofiilin urissa uran reunankestävyyttä on vahvistettu liimapuupalkkivahvikkeilla. Kulutuspinna toimivan yläpinnan valintaan ovat vaikuttaneet eniten pinnankyky vastustaa kulumista (Ranta 2014).

#### 4.4 Pohjaelementin asennus perävaunuun

Pohjaelementti liimataan perävaununrungon päälle. Pohjaelementti lepää runkopalkkien päällä. Perävaununrunko on rakennettu kahdesta I-palkista, jotka on sidottu toisiinsa erilaisten vahvikkeiden avulla. Pohjaelementin runkoon kiinnittämisen jälkeen pohjaelementtiin kiinnitetään toinen sivuseinä ja etuseinä ruuveilla, liimalla ja kulmarauodoilla. Pohjaelementin takapää makaa purkukoneiston päällä, mikä tukee pohjaelementtiä koko leveydeltä takapästä. Etuseinän tuenta tukee pohjaelementtiä koko leveydeltä. Etuseinä on tuettu kokoleveydeltään perävaunun runkorakenteisiin.



Kuva 27. Pohjaelementin asennus perävaununrungon päälle (Immonen 2014)

Kuvassa 27 on esitetty, kuinka pohjaelementin poikkileikkaus on tuettu perävaunun runkoon nähden. Kyseisen aukeavasivuisen ketjupurkuperävaunun runkopalkkien väli on 980 mm.



Kuva 28. Valmis perävaununrunko pohjaelementin asennusta varten (Immonen 2014)

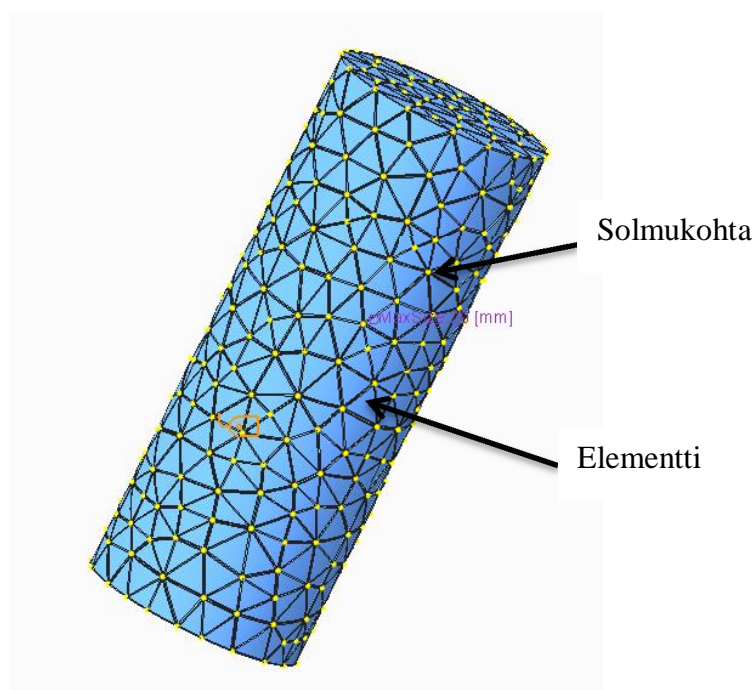
Kuvassa 28 on esitetty valmis perävaununrunko pohjaelementin asennusta varten. Kuvassa on esitetty, miten pohjaelementin takapää on tuettu purkukoneiston viereen ja on näin tuettu leveysuunnaltaan. Nähtävissä on myös etuseinän tuentajalusta.



## 5 FEM-mallinnus

FEM-laskennassa rakenne jaetaan pienempiin osiin eli elementteihin, jotka kytketään toisiinsa solmukohtissa (kuva 29). Elementtejä on erimuotoisia ja kokoisia. Elementtien ja solmukohtien avulla ohjelmisto muodostaa verkon, jota voidaan tihentää ja harventaa tulosten tarkkuuden parantamiseksi. Jokaista elementtiä voidaan pitää jousena, jotka muuttavat muotoaan niin kauan kuin systeemi on jälleen tasapainossa. Jokaiselle elementille voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälö, jotka yhdistetään solmupisteissä yhteensopivuusehtojen avulla. Materiaalien ominaisuuksien ja solmupisteiden koordinaattien avulla voidaan selvittää jokaisen solmupisteen siirtymä ja näiden avulla voidaan laskea syntyvät jännitykset. Tietokone on välttämätön työväline menetelmässä, koska yhtälöryhmiä voi syntyä tuhansia. (Hietikko 2004.)

Analysointi voidaan jakaa rakenteen idealisointiin (3D-mallinnus), elementtiverkon muodostamiseen, reunaehtojen eli tuentojen muodostamiseen, kuormitusten muodostamiseen, laskentaan ja tulosten tulkintaan. Rakenteen idealisoinnissa kannattaa hyödyntää mahdollisimman paljon symmetriaa. Symmetrian avulla analyysi voidaan rajata vain rakenteen toiselle puolelle tai tietylle osa-alueelle. (Hietikko 2004.)



Kuva 29. Elementtimalli (Immonen 2014)

## 5.1 FEM-mallinnuksessa ilmenneet ongelmat

Tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään katkaistua 3D-mallia. Lattiaelementtiä käsiteltiin lyhyessä osassa. Elementtiverkotuksen yhteydessä ilmeni niin paljon ongelmia, että nähtiin parhaaksi käsitellä lattiaelementtiä osassa. Tulosten tarkkuus on tietenkin huonompi, kun 3D-malli jaetaan osiin.

FEM-analyyseissa ongelmia aiheutti verkotuksessa ilmenneet verkotusongelmat. Tutkimusta varten lattiaelementin verkotusta yritettiin harventaa. Tämän työn tuloksena lattiaelementistä olisi voitu saada luotettavampia tuloksia analysoimalla oikean kokoinen malli.

Lattiaelementtiä yritettiin mallintaa alussa kokonaisena tässä onnistumatta, jonka jälkeen yritettiin käyttää keinoja elementtiverkon harventamiseksi. Menetelmiin kuuluivat muun muassa prismaattisten elementtien käyttö, elementtien rajakulmien säätö ja kuorimallien käyttö. Osittaiseksi ongelmaksi muodostui myös laskennassa käytettyjen tietokoneiden alhainen laskentateho.

Elementtiverkon harventamisen yrittämiseen kului erittäin paljon aikaa ja resursseja, joka näkyy myös työn lopputuloksissa. Elementtiverkon harvennuksen selvitykseen ja kokeiluun käytettiin aikaa noin kolme viikkoa. Aikaa kokeilussa ja selvittelyssä kului eniten odottaessa tietokoneen laskennan tuloksia.

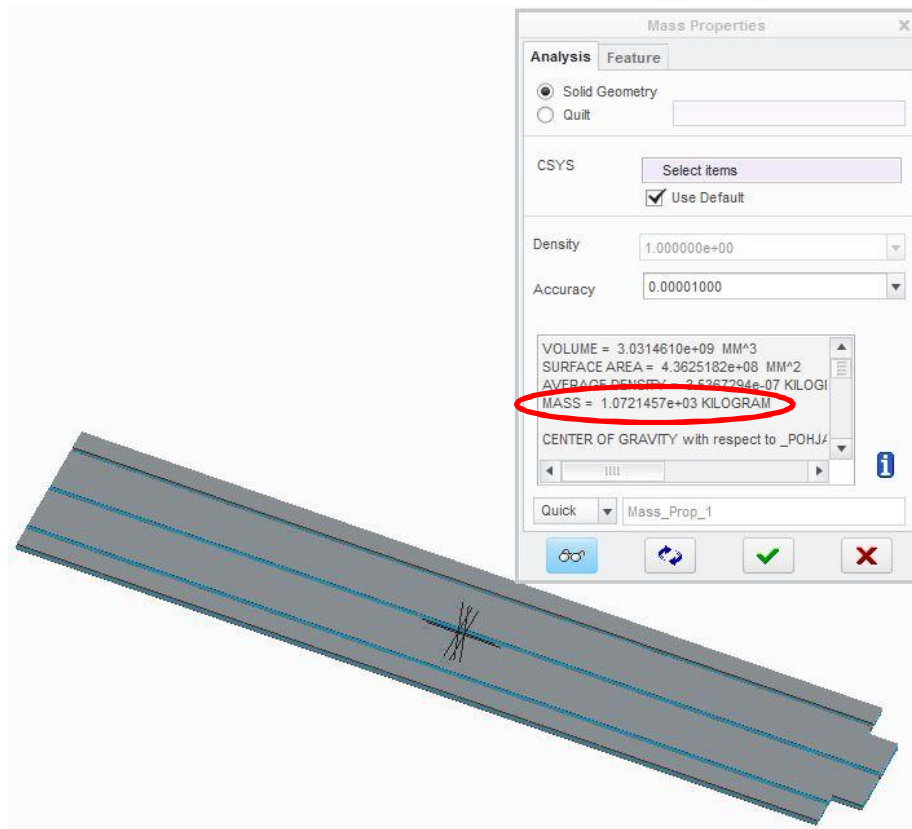
Tietokoneella saattoi mennä yhden elementtiverkon laskennan suorittamiseen 1–2 päivää. Tämän lisäksi moni verkotusmenetelmä vaati paljon mallinnustyötä pohjalle. Tästä esimerkkinä toimivat prismaattiset elementit, jotka vaativat paljon erilaisia mallinnuskomentoja ennen kuin niitä voitiin käyttää.

Aikataulullisten ongelmien painostaessa päätettiin täysikokoiseen malliin panostamisesta luopua. Samoja verkotuksen harvennustyökaluja oli mahdollista hyödyntää myös katkaisulla toteutettuun malliin. Joten elementtiverkon selvitystyöstä oli hyötyä työtä suoritettaessa.

## 5.2 3D-mallinnus

Pohjaelementin rasiusten selvittäminen aloitettiin mallintamalla pohjaelementti Creo 2 -mallinnusohjelmalla. Mallinnusta yksinkertaistettiin eli 3D-malliin ei tehty turhia ominaisuuksia, mitkä eivät olleet tärkeitä lopputuloksen kannalta. Tällaisia ominaisuuksia olivat muun muassa erilaiset loveukset profiileja varten, kuormalenkkiä sidontaurat ja pyöreät muodot. Jättämällä pois nämä turhat ominaisuudet, laskennasta saadaan huomattavasti nopeampaa.

Käytössä olleen pohjaelementin painoksi selvisi 1072 kg (kuva 30). Arvo on laskettu materiaalitoimittajien antamien materiaalien tiheyksien perusteella. Arvo vastaa normaalia perävaununlattiaelementin painoa. Perävaununlattiaelementin mitatut painot ovat olleet noin 1000 kg. (Ranta 2014.)



Kuva 30. 3D-mallinnettu pohjaelementti (Immonen 2014)

## 5.3 Materiaalitietojen syöttäminen

### 5.3.1 Isotrooppiset arvot

Analyysia varten materiaaleille täytyi määrittää tiettyjä ominaisuuksia laskentaa varten. Kaikki materiaalit paitsi eriste olivat ortotrooppisia eli niiden lujuusominaisuudet olivat erilaiset eri suuntiin. Ensimmäisiä laskentoja varten materiaaleille arvioitiin isotrooppisia arvoja edustavat arvot. Tämän toimenpiteen avulla voitiin mallista tehdä ensiksi toimiva, jonka jälkeen sitä voitiin monimutkaistaa. Laskentaa varten Creo 2 -ohjelma tarvitsi kimmomoduulin ja Poissonin luvun.

Kiinteän aineen kimmomoduulilla ( $E$ ) kuvataan jännityksen ja muodonmuutoksen välistä suhdetta niin sanotulla kimmoisella alueella. Materiaalin kimmomoduuli on suoraan verrannollinen rakenteen jäykkyyteen. Mutta rakenteen jäykkyys riippuu myös poikkipinta-alan suuruudesta ja muodosta. Liukumoduuli ( $G$ ) kuvaa leikkausjännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta. Poissonin luku ( $\nu$ ) on poikittais- ja pitkittäisvenymän suhde. (Airila, Ekman, Hautala, Kivioja, Kleimola, Martikka, Miettinen, Niemi, Ranta, Rinkinen, Salonen, Verho, Vilenius & Välimaa, 1995.)

Materiaaleille määritettiin taulukon 3 mukaiset arvot. Arvot olivat arvioituja arvoja ortotrooppisista arvoista.

Taulukko 3. Materiaaleille arvioidut isotrooppiset arvot (Immonen 2014)

	<b>E (Kimmomoduuli)</b>	<b><math>\nu</math> (Poissonin luku)</b>	<b><math>\rho</math> (Tiheys)</b>
<b>Finnfoam FI-300</b>	15 MPa	0,45	40 kg/m <sup>3</sup>
<b>Alapintalevy</b>	7,9 GPa	0,3	1,40 g/cm <sup>3</sup>
<b>Yläpintalevy</b>	8,8 GPa	0,3	1,50 g/cm <sup>3</sup>
<b>Vaneri (Koivu)</b>	9,8 GPa	0,01	680 kg/m <sup>3</sup>
<b>Liimapuupalkki</b>	11,6 GPa	0,01	510 kg/m <sup>3</sup>

### 5.3.2 Ortotrooppiset arvot

Tarkempien tulosten saavuttamiseksi materiaalitiedot täytyi päivittää vastaamaan todellisuutta. Materiaalien valmistajilta oli saatavilla lähes kaikki tarvittavat arvot. Vaikeuksia arvioissa tuottivat materiaalien liukumoduulit ja paksuussuuntaiset kimmomoduulit. Puuttuvia arvoja haettiin muun muassa ESAComp-ohjelmiston materiaalikirjastosta. ESAComp on komposiittien suunnitteluun ja analysointiin kehitetty ohjelmisto (ESAComp 2014).

Liimapuupalkkien kaikki tarvittavat ominaisuudet saatiin selvitettyä valmistajan tarjoamasta katalogista. Liimapuupalkkien mekaaniset ominaisuudet ovat liitteessä 1. ESAComp-ohjelmiston materiaalitietoja voitiin vertailla Vanerikäsikirjassa annettuihin arvoihin. Vanerikäsikirjan arvot poikkesivat jonkin verran ESAComp-ohjelmiston arvoista, mutta tutkimuksessa päädyttiin käyttämään ESAComp:in arvoja, koska kaikki tarvittavat arvot olivat tarjolla. Vanerikäsikirjan arvoista ei ollut saatavilla kaikkia tarvittavia arvoja kuten paksuussuuntaisia kimmo- ja liukumoduuleita. Vanerikäsikirjan suomalaisten vanerien mekaaniset ominaisuudet ovat liitteessä 2.

Pintalevyn ominaisuuksien määrittämisessä jouduttiin myös yhdistelemään erilaisia tietoja, koska valmistajan tiedoista ei selvinnyt kaikkia tarvittavia tietoja. Ongelmallisia olivat levyn paksuussuuntaiset ominaisuudet. Valmistajan määrittämät tiedot ovat liitteessä 3.

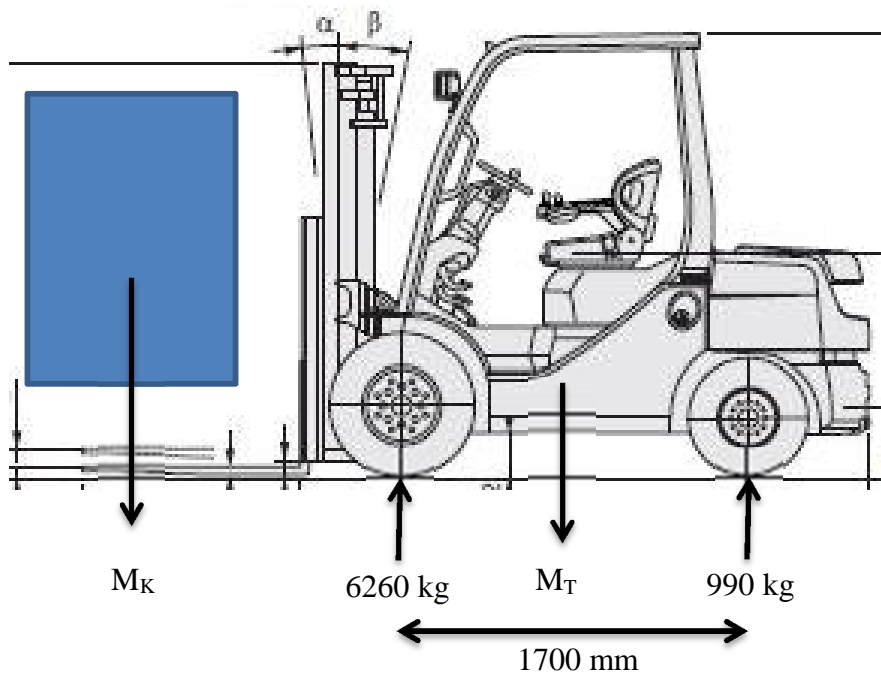
Finfoam-lämmöneristyslevyn mekaaniset ominaisuudet saatiin valmistajan tarjoamista teknisistä ominaisuuksista (liite 4). Valmistajan arvoista puuttuivat Poissonin luvut, jotka selvitettiin vastaavista polystyreenituotteista.

Analyyseissa käytettyjen materiaalien tekniset ominaisuudet on koostettu liitteessä 5. Tiedoissa on lueteltu materiaalien lujuudet, kimmomoduulit, liukumoduulit ja Poissonin luvut. Materiaalien ominaisuudet on lueteltu lattiaelementin kokoonpanon määrittämisessä koordinaattiakselin suunnissa.

#### 5.4 Kuormitusten määrittäminen

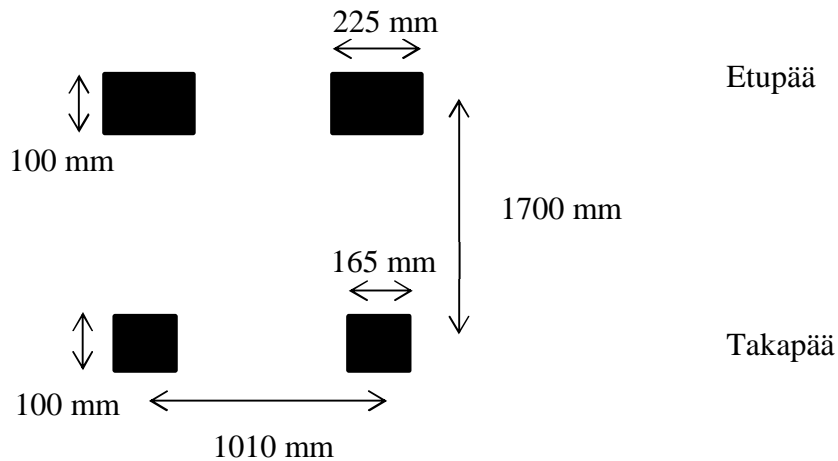
Lattiaelementtiin syntyviä jännityksiä lähdettiin selvittämään tilanteessa, jossa trukki ajaa kuorman kanssa lattian päälle. Erityisesti paperi- ja kartonkirullia kuljettaessa lattiaelementin kestävyys on ollut ongelmallista (Ranta 2014). Paperirullan tai kartonkirullan massaksi arvioitiin noin 3000 kg (Oinonen 2014). Trukin massa todettiin selaaamalla myytävien Toyota-trukkien teknisiä tietoja.

Kuvassa 31 on esitetty Toyota 8FDF30 vastapainotrukin akselimassat, kun trukkiin on kuormattu maksimimassa 3000 kg ( $M_K$ ). Trukin omamassa ( $M_T$ ) on 4250 kg.



Kuva 31. Toyota 8FDF30 vastapainotrukki (Toyota-forklifts 2014)

Kuvassa 32 on esitetty Toyota 8FDF30 vastapainotrukin raideväli ja renkaiden kosketuspinnat. Analyysseissa otettiin huomioon pelkästään trukin etuakselistosta aiheutuvia rasituksia. Eturenkaan leveydeksi Toyota oli ilmoittanut 225 mm ja renkaan kosketusalan pituudeksi arvioitiin 100 mm.

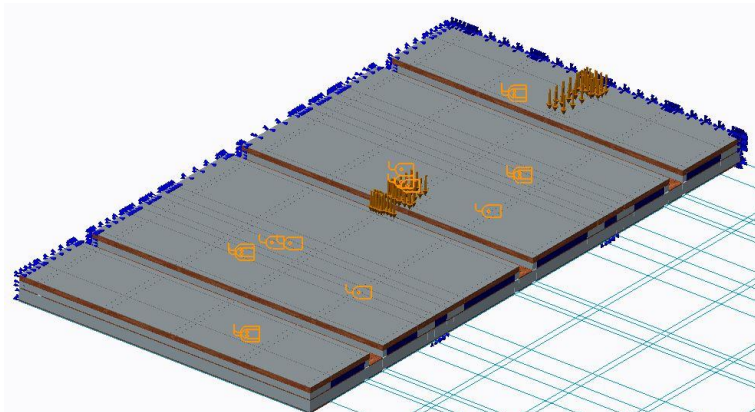


Kuva 32. Toyota 8FDF30 vastapainotrukin raideväli ja renkaiden kosketuspinnat (Toyota-forklifts 2014)

Etuakseliston massasta aiheutuvaksi painovoimaksi saatiin:

$$G = m * g \rightarrow G = 6260 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 61410 \text{ N (Valtanen 2010)}.$$

Saatu voima sijoitettiin kuvan 33 mukaisesti eturenkaiden kosketuspinnan kokoiselle pinnalle, joka simuloi eturenkaita. Voiman paikkaa vaihdeltiin, minkä avulla trukin liikkeitä lattiaelementillä saatiin simuloitua.



Kuva 33. Etuakselistosta aiheutuva voima FEM-mallissa (Immonen 2014)

## 5.5 Lattiaelementin verkotus

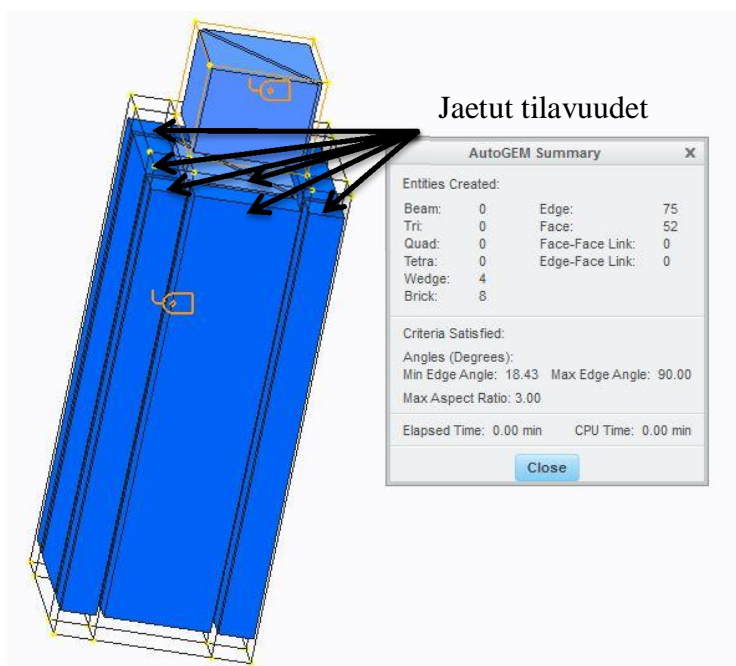
Lattiaelementti oli tarkoitus mallintaa kokonaisena FEM-laskentaa varten, mutta elementtien luominen paljastui haastavaksi. Ongelmia aiheutti lattiaelementin suuri fyysinen koko, josta seurasi, että elementtien lukumäärä mallissa nousi liian suureksi. Mallinnukseen etsittiin ratkaisuja Creo 2 -ohjelman teknisestä tuesta.

Tehokas tapa vähentää elementtejä oli käyttää prismaattisia eli tiilen ja kiilanmuotoisia elementtejä (Hinkkanen 2014). Tässä tapauksessa päädyttiin lopulta hyödyntämään symmetriaa ja kohdentamalla analyysi vain tietylle osalle lattiaelementtiä. Tällä tavalla laskenta-aika saatiin kohtuulliseksi.



### 5.5.1 Prismaattiset elementit

Oletusasetuksena Creo 2 -ohjelmisto käyttää tetranmuotoisia elementtejä. Tetranmuotoisilla elementeillä voidaan tehdä pyöreitä muotoja käyttämättä muunmuotoisia elementtejä. Prismaattisia elementtejä käytettäessä ohjelmisto muodostaa elementtiverkon kiilan ja tiilien muotoisilla elementeillä. Prismaattisissa elementeissä ohjelmisto joutuu lisäämään kiilanmuotoisia elementtejä pyöreisiin muotoihin. Käytettäessä elementtejä kokoonpanossa täytyy kokoonpanon osien tilavuuksien olla samankokoiset läpi koko kokoonpanon. Käytännössä osat täytyi jakaa erilaisiin tilavuuksiin, jotta niiden tilavuudet kohtasivat keskenään (kuva 34). Tällä tavoin elementtiverkkoa saadaan harvennettua paljon.



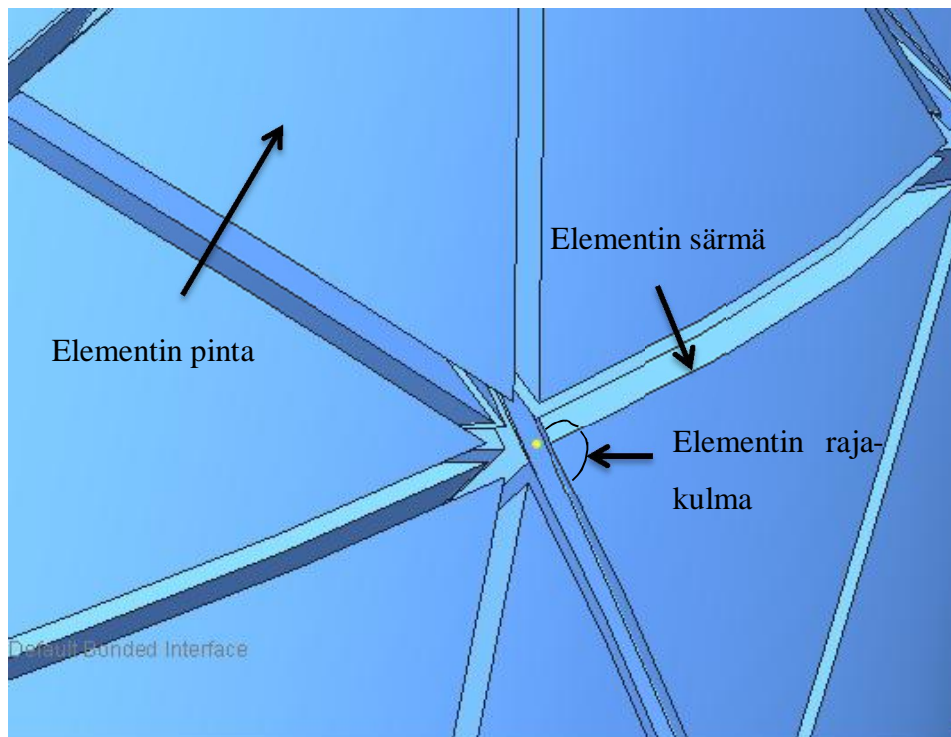
Kuva 34. Kappaleen tilavuuksiin jako verkotuksessa (Immonen 2014)

Prismaattisten elementtien käytöstä luovuttiin, koska toimintoa ei saatu otettua käyttöön. Toiminnon käyttöönottoon käytettiin paljon aikaa, joka näkyy itse työn tuloksiin käytetyssä ajassa ja luotettavuudessa. Aikaa kului liikaa työn yhteen osa-alueeseen

### 5.5.2 Analyysissä käytetty verkotus

Analyysissä päädyttiin käyttämään tetranmuotoisia elementtejä, koska prismaattisten elementtien luominen osoittautui vaikeaksi ja aikaa vieväksi. Elementtiverkon luomista säädettiin muokkaamalla elementtien rajakulmia. Elementtien määrä saatiin kohtuulliseksi niillä alueilla, missä niitä ei tarvittu.

Kuvassa 35 on esitetty pala elementtiverkkoa. Kuvaan on merkitty elementin rajakulmat. Kulmia voidaan säätää elementin särmien ja elementin pintojen kesken. Elementtiverkkoa tihennettiin myös manuaalisilla säädöillä. Elementtien reunanpituutta rajoitettiin kriittisillä pinnoilla ja särmillä. Tämän seurauksena ohjelmisto tuottaa tiheämpää elementtiverkkoa.

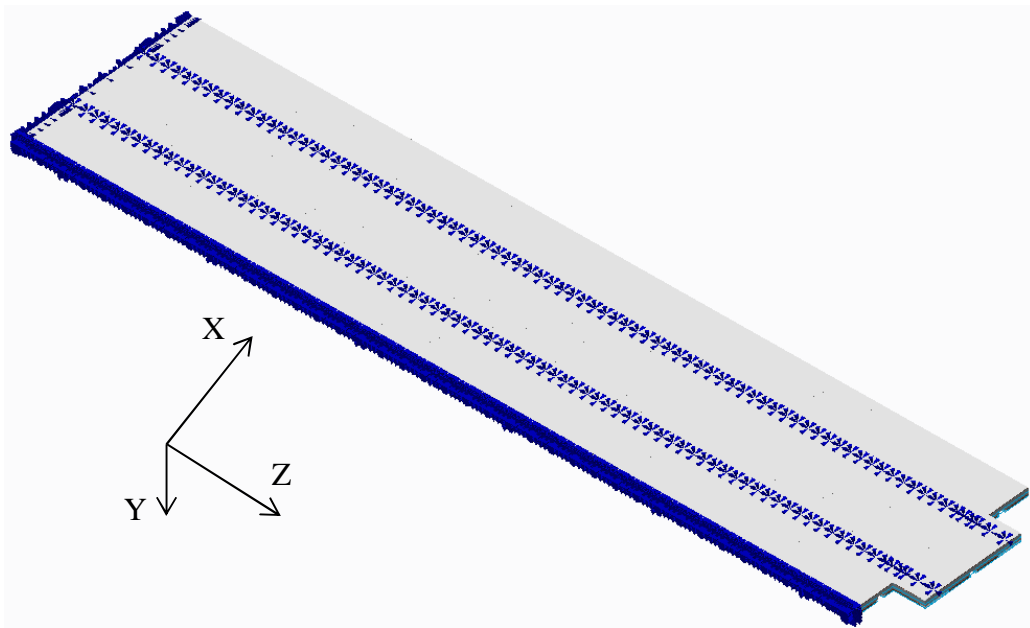


Kuva 35. Elementtiverkon solmukohta (Immonen 2014)

## 5.6 Lattiaelementin tuenta

Lattiaelementti oli kiinnitetty perävaununrunkoon runkopalkkien kohdasta ja etu-, sivu- ja takakohdista seiniin ja purkukoneistoon. FEM-mallissa kiinnitykset toteutettiin pintojen avulla. Runkopalkkien kohtaan mallinnettiin runkopalkkien laippojen kokoiset pinnat, joista lattiaelementti tuettiin XYZ-koordinaatiston jokaiseen suuntaan. Pohjalelementin toinen sivu on tuettu joka suuntaan XYZ-koordinaatistossa, koska sivuseinän oletetaan kannattelevan pohjaa reunoilta. Etupään kiinnityksen oletettiin olevan lukittu vain pohjalelementin pituussuuntaisessa Z-suunnassa. Takapään kiinnitys oletettiin joka suuntaan lukituksi, koska lattiaelementti makaa purkukoneiston päällä.

Kuvassa 36 on esitetty lattiaelementtiin sijoitetut tuennat alhaaltapäin kuvattuna. Tuetut kohdat näkyvät kuvassa sinisellä värillä. Sivu- ja päätypuoli on tuettu koko paksuudeltaan. Runkopalkkia kuvastava tuki on 150 mm leveä ja on koko lattiaelementin pituinen.



Kuva 36. Lattiaelementin tuenta alhaaltapäin kuvattuna (Immonen 2014)

## 6 FEM-analyysin tulokset ja niiden tulkinta

Mallissa on käytetty koordinaatistoa, jossa X-akseli on lattiaelementin leveysuuntainen, Y-akseli on lattiaelementin paksuussuuntainen ja Z-akseli on lattiaelementin pituussuuntainen. Jännityksiä kuvattiin näiden akselien suunnassa. Materiaalit on sijoitettu myös näiden akselien suhteen. Normaalijännityskuvissa negatiivisilla arvoilla kuvataan puristusjännitystä ja positiivisilla arvoilla vetojännitystä.

Tuloksissa on käytetty neljää erilaista analyysia. Ensimmäisessä analyysissa tarkistettiin koko lattiaelementin käyttäytyminen. Lattiaelementtiä oli yksinkertaistettu laskentanopeuden parantamiseksi. Seuraavissa katkaistuissa malleissa lattiaelementtiä oli kuormitettu kolmesta eri kohdasta. Lattiaelementin kriittisiä jännityksiä tarkasteltiin näiden kolmen kohdan perusteella. Kuormituskohdat olivat keskellä lattiaa, kiinteän seinän puolella ja lisäksi tapahtuma, jossa sivuseinä ei tukisi lattiaa ollenkaan.

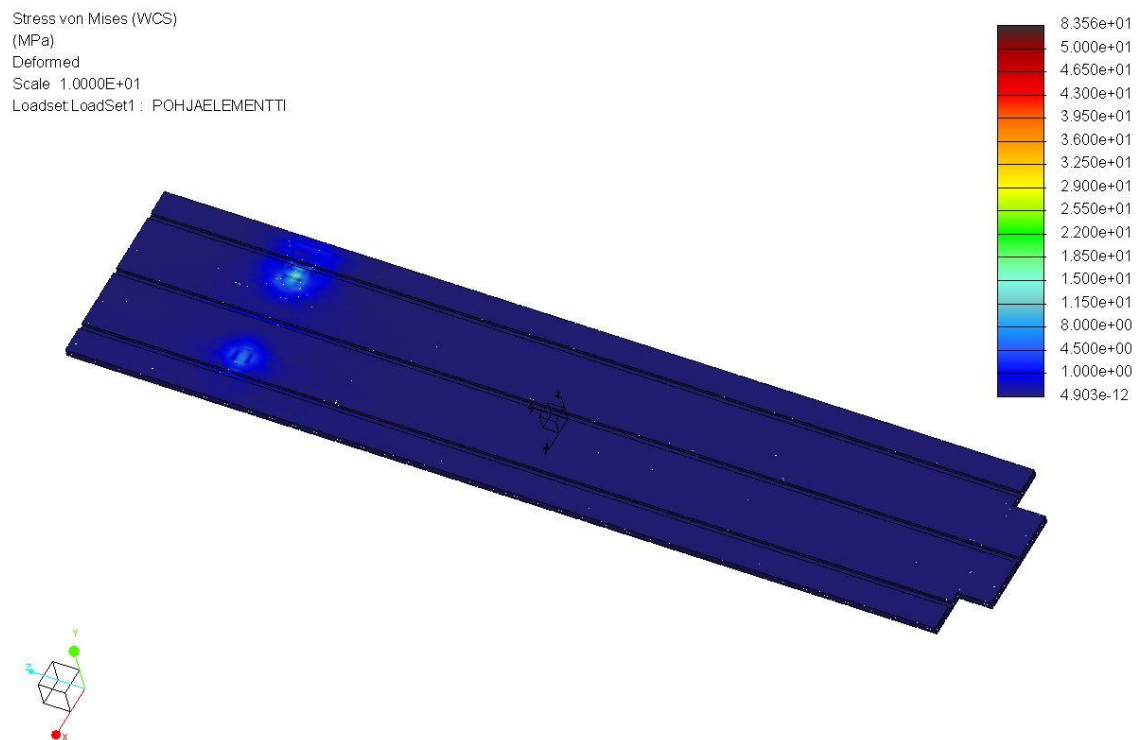
### 6.1 3D-mallin katkaiseminen

Analyysissa kuormituksena käytettiin kuvitellun trukin etuakselistosta aiheutuvaa painovoimaa. Voima sijoitettiin kahdelle renkaankokoiselle alueelle. Analyysit toteutettiin 1,3 m mittaiselle alueelle etupäässä lattiaelementtiä. Malliin oli määritelty ortotrooppiset materiaalitiedot.

Katkaistussa mallissa käytettiin realistisempia arvoja. Materiaalitiedot ja niiden suunnat oli huomioitu. Käytännössä puumateriaalien suuntaukset ja suunnat rakenteessa oli mallinnettu realistisesti. Laminaattilevyjen ortotrooppiset ominaisuudet oli huomioitu.

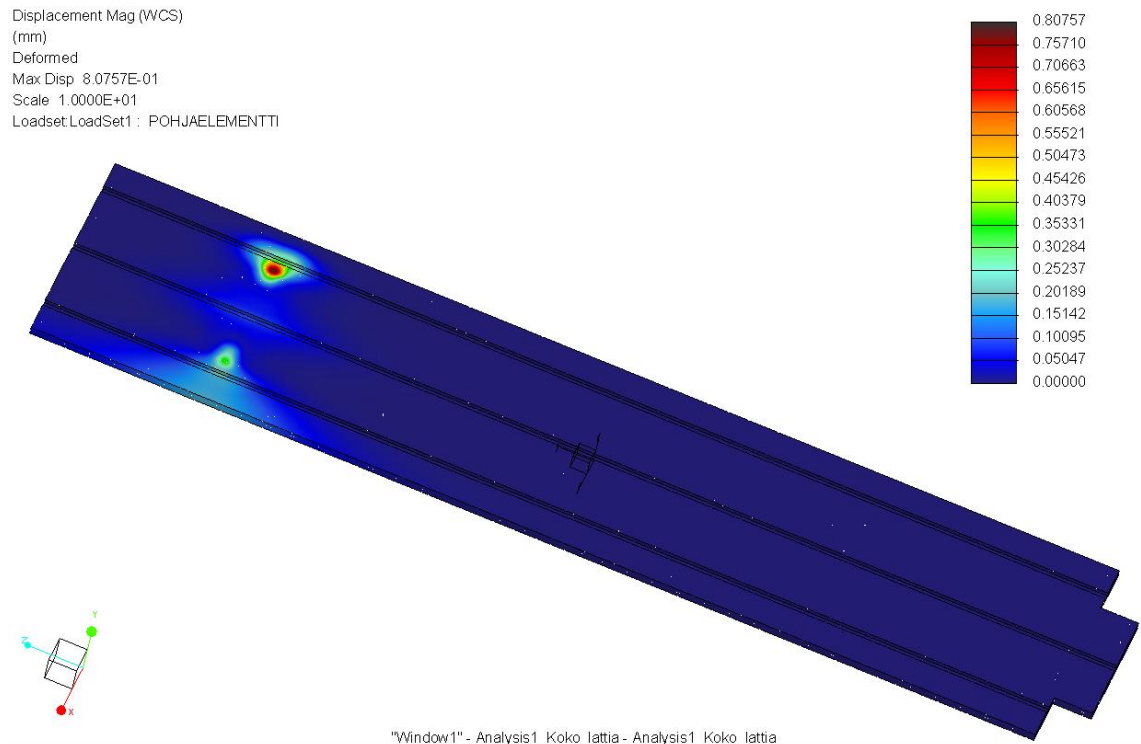
### 6.1.1 Jännitysten jakautuminen

Kuvasta 37 nähdään, kuinka von Mises-jännitykset olivat jakautuneet melko pienelle alueelle täysikokoisessa mallissa. Tilanteessa trukki kuviteltiin keskelle lattiaa. Tämän perusteella pääteltiin, että pienempi osa kokoonpanosta riitti tarvittavien tulosten saamiseen. Tätä koko lattiaelementistä tehtyä analyysia käytettiin vain jännitysten jakautumisen tarkasteluun. Mallista puuttuu purkuketju-urien teräsprofiilit ja runkopalkkeina toimivien I-palkkien käyttäytymistä ei huomioitu. Materiaalitiedot olivat isotrooppiset.



Kuva 37. Koko lattiaelementtiin syntyvät von Mises-jännitykset yläpinnalla (Immonen 2014)

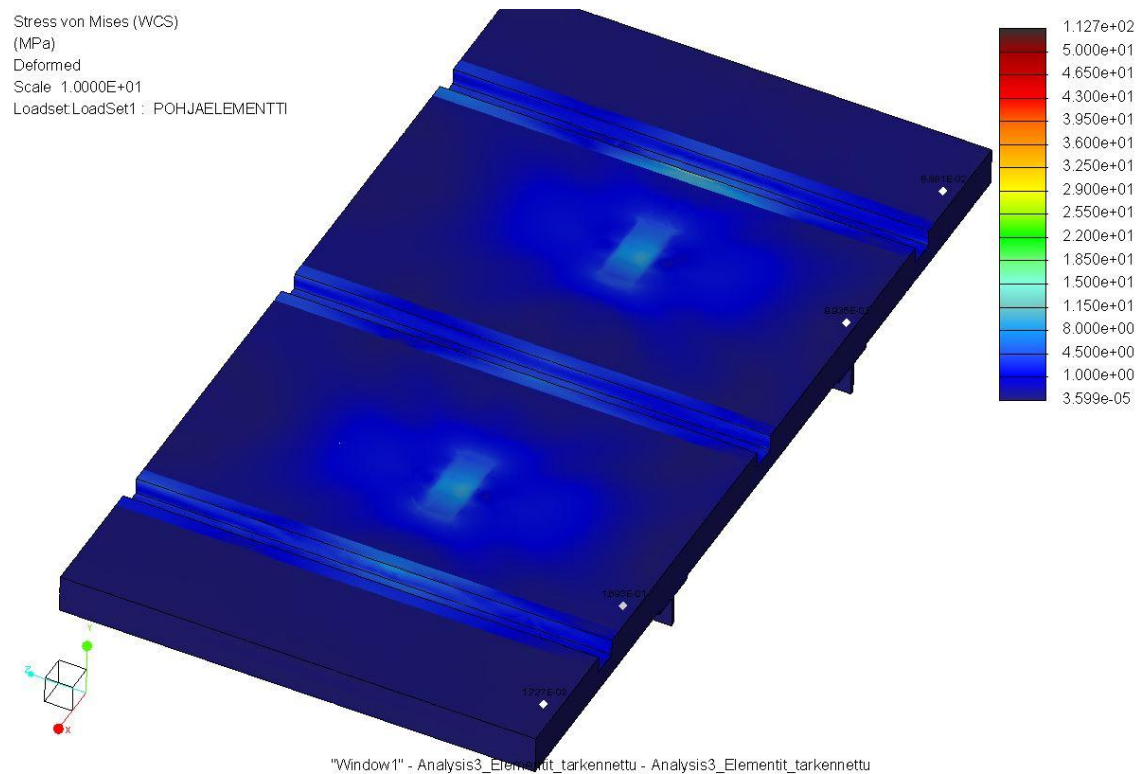
Kuvassa 38 on esitetty, kuinka lattiaelementtiin syntyy siirtymiä. Syntyneitä siirtymiä voitiin verrata katkaisemalla toteutettuun versioon.



Kuva 38. Lattiaelementin kokonaissiirtymät (Immonen 2014)

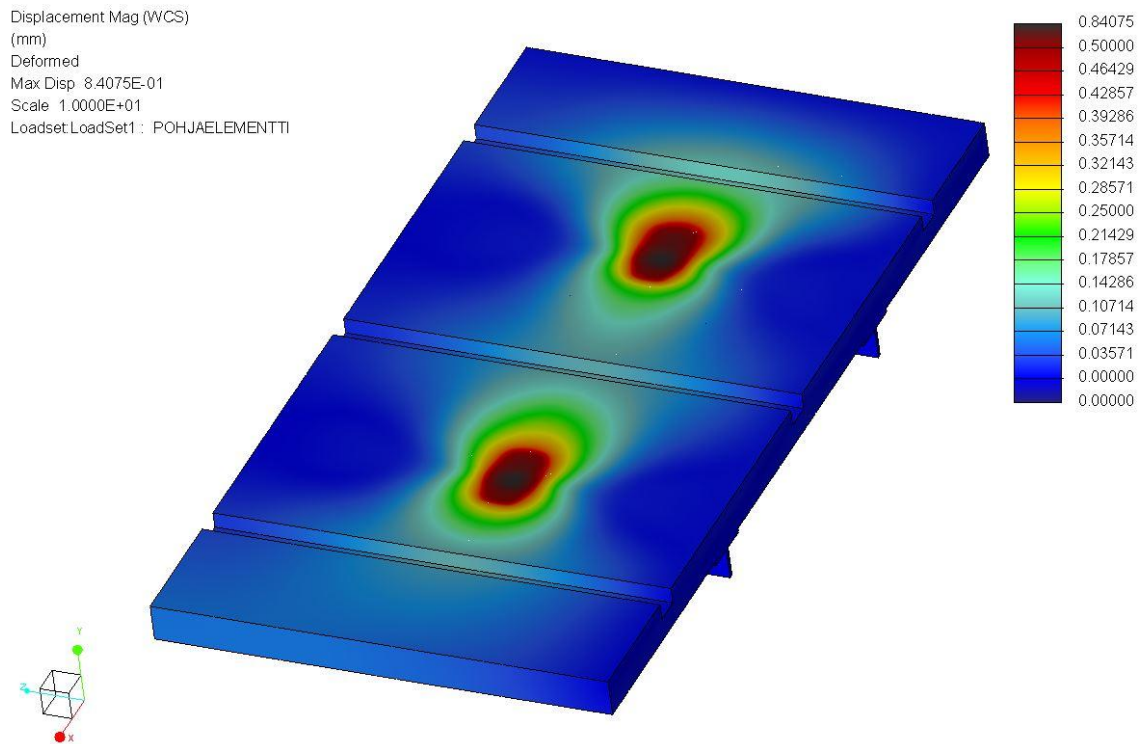
### 6.1.2 Katkaistun mallin jännitykset

Lattiaelementistä päädyttiin mallintamaan 1,3 m mittainen osa edestä. Tarvittavan osan pituus pääteltiin kokonaisesta mallista. Kuvassa 39 on esitetty lattiaelementin palaan kohdistuvat von Mises-jännitykset. Kuvasta selviää, kuinka jännitykset loppuivat ennen lattiaelementin katkaisukohtaa.



Kuva 39. 1,3 m mittaisen lattiaelementin von Mises-jännitykset yläpinnalla (Immonen 2014)

Kuvassa 40 nähtävät lattiaelementin kokonaissiirtymät rajoittuivat pienelle alueelle. Kuvan 38 ja 40 kokonaissiirtymiä voitiin verrata keskenään ja todeta, että siirtymät olivat samankokoisia. Kokonaissiirtymät olivat myös paikallisia ja loppuivat ennen lattiaelementin katkaisukohtaa. Näiden tulosten perusteella oletettiin, että muihinkin tuloksiin voitiin luottaa.



Kuva 40. Lattiaelementin kokonaissiirtymät (Immonen 2014)

## 6.2 Rakenteen osien tarkastelu kriittisten jännitysten suhteen

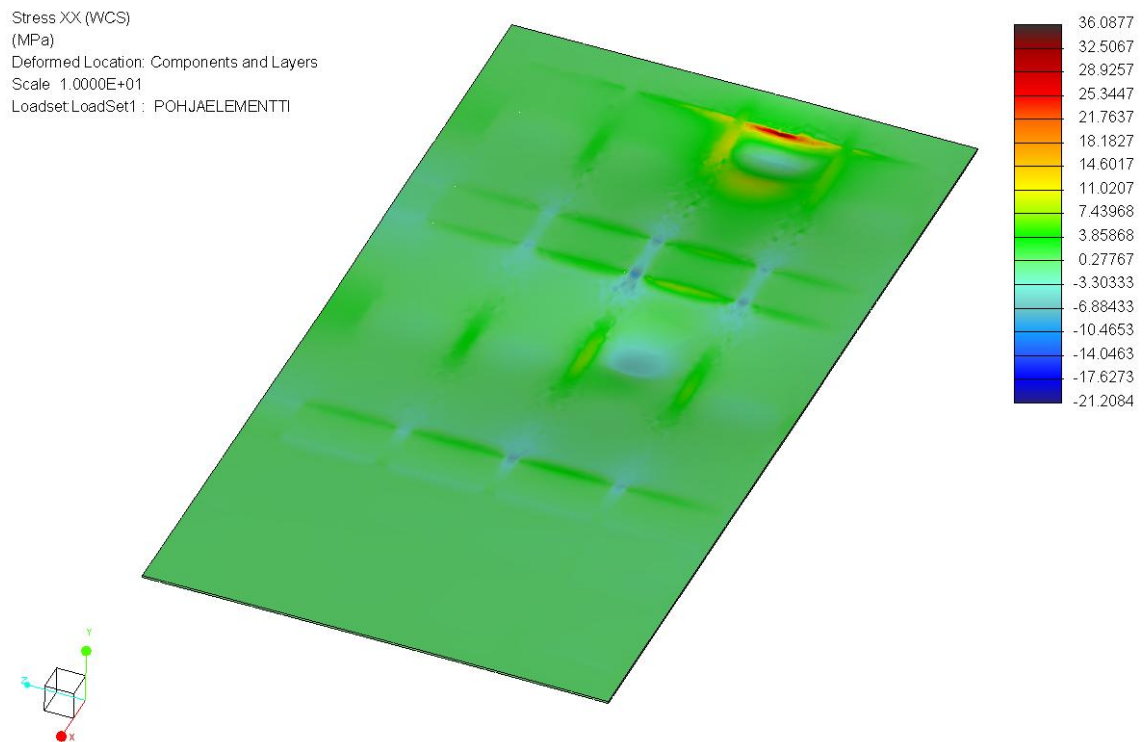
Kerroslevyrakenteen osia täytyi tarkastella komponenttitasolla, koska osien ja kerrosten ominaisuudet olivat erilaiset. Puumateriaaleilla oli toisistaan poikkeavat lujuusominaisuudet, kun tarkastelun suuntaa muutettiin. Myös laminaattipintalevyillä oli toisistaan poikkeavia lujuusarvoja pituus- ja poikittaissuunnassa. Liimasaumojen kestävyyttä voitiin verrata tarkastelemalla levyjen rajapinnoille syntyviä leikkausjännityksiä.

Tulosta ei voida kuitenkaan pitää erittäin luotettavana, koska liimasaumoja ei mallinnettu 3D-malliin. Myös liimalla on omanlaisensa materiaaliarvot, jotka määrittelevät liimasaumoihin kohdistuvat leikkaus- ja normaalijännitykset. (Nuutamo 2014.)



### 6.2.1 Alapintalevyt

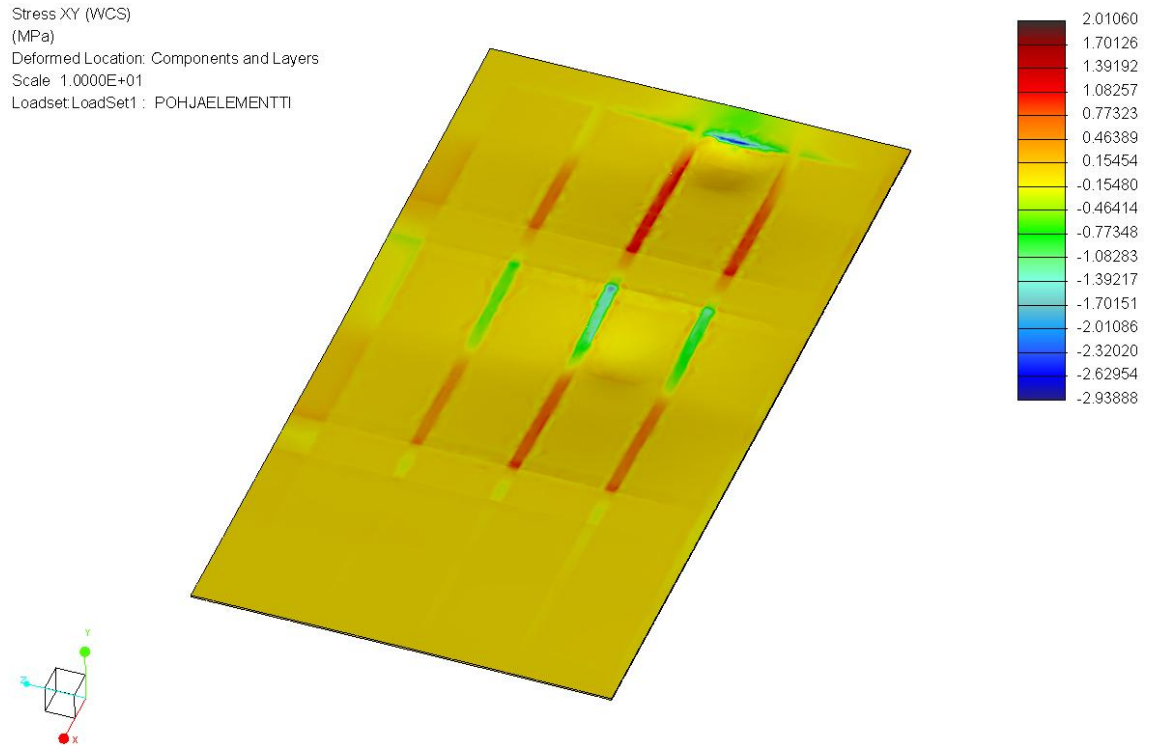
Alapintalevyissä jännitykset keskittyivät perävaununrunkopalkkien kosketuspintojen reunoihin. 2 mm paksun laminaattilevyn jännitykset olivat alle puolet sallituista arvoista. 6 mm:n paksuiseen vaneriin aiheutui leveysuuntaista normaalijännitystä ( $\sigma_{XX}$ ) (kuva 41), kun kuormitus tapahtui lattiaelementin reunalla.



Kuva 41. 6 mm:n paksuiseen vaneriin syntyvät lattiaelementin leveysuuntaiset normaalijännitykset ( $\sigma_{XX}$ ) reunalta kuormitettaessa (Immonen 2014)

Leveysuuntainen vetojännitys kuvassa 41 oli noin 36 MPa. 6 mm paksuisen vanerin suurin sallittu vetojännitys lattiaelementin leveysuunnassa oli 42,2 MPa (liite 5).

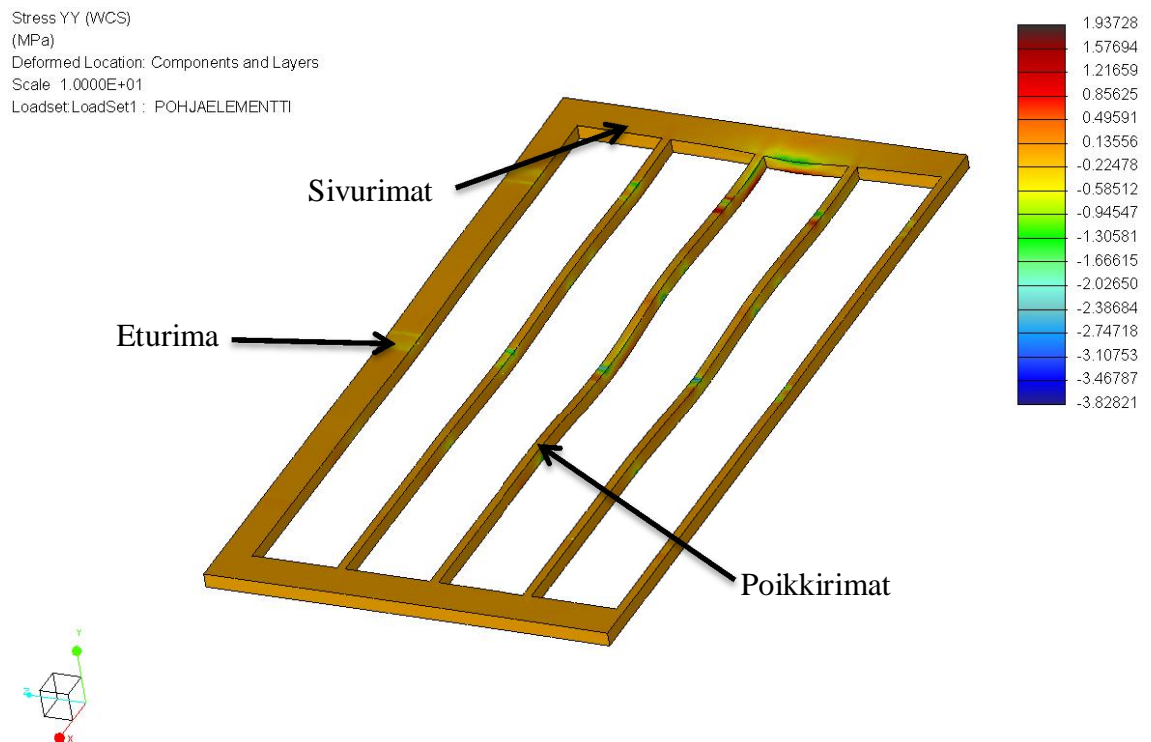
Kuvassa 42 on esitetty 6 mm paksuiseen vaneriin syntyvät leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Leikkausjännitykset tilanteessa olivat noin 2 MPa. Liimasauman kestävyys oli liimavalmistajan mukaan noin 10 MPa, riippuen liimattavasta materiaalista (liite 6).



Kuva 42. 6 mm:n paksuiseen vaneriin syntyvät leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ) reunalta kuormitettaessa (Immonen 2014)

## 6.2.2 Alempi liimapuupalkkikehikko

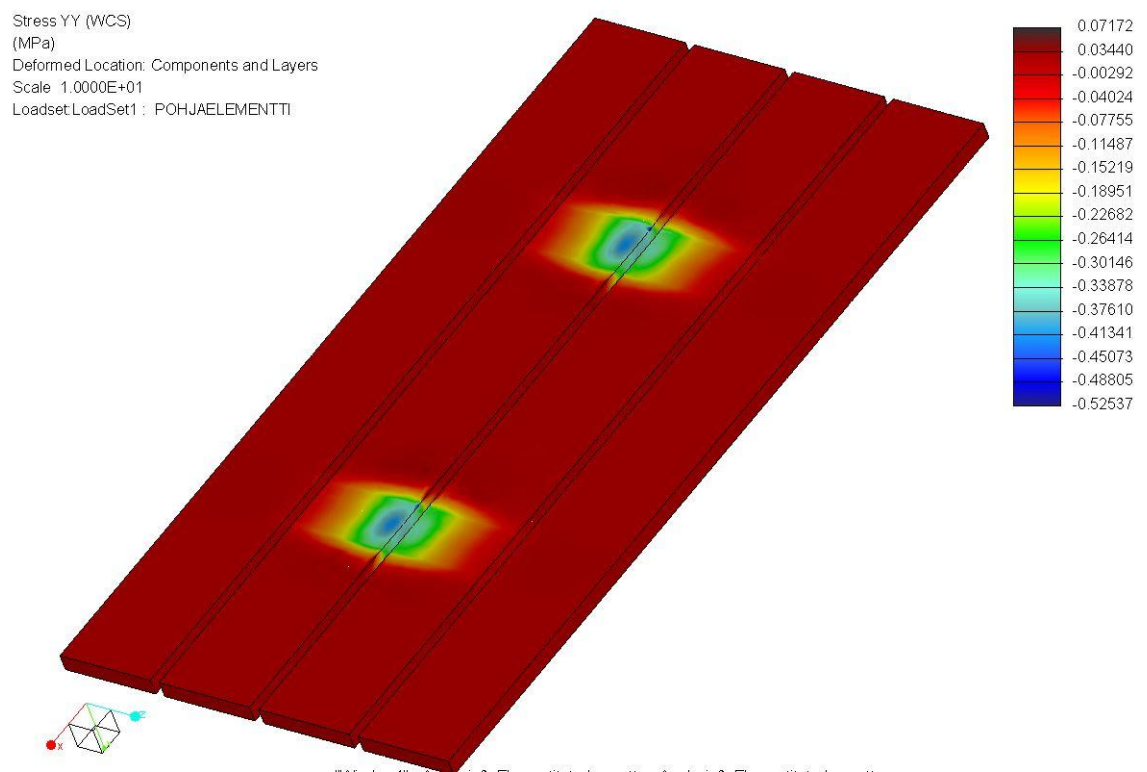
Tarkastellessa kehikkoa paksuussuunnassa oli poikkirimojen puristusjännitys noin 3,5 MPa (kuva 43). Poikkirimojen puristuslujuus lattiaelementin paksuussuunnassa oli 6,0 MPa (liite 1). Sivuriman nurkkaan kohdistuvan jännityksen suuruus oli noin 1,3 MPa. Sivuriman puristuslujuus paksuussuunnassa oli 1,8 MPa (liite 1).



Kuva 43. Alempaan liimapuupalkkikehikkoon kohdistuvat paksuussuuntaiset normaali-jännitykset ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui tilanteessa reunalta. (Immonen 2014)

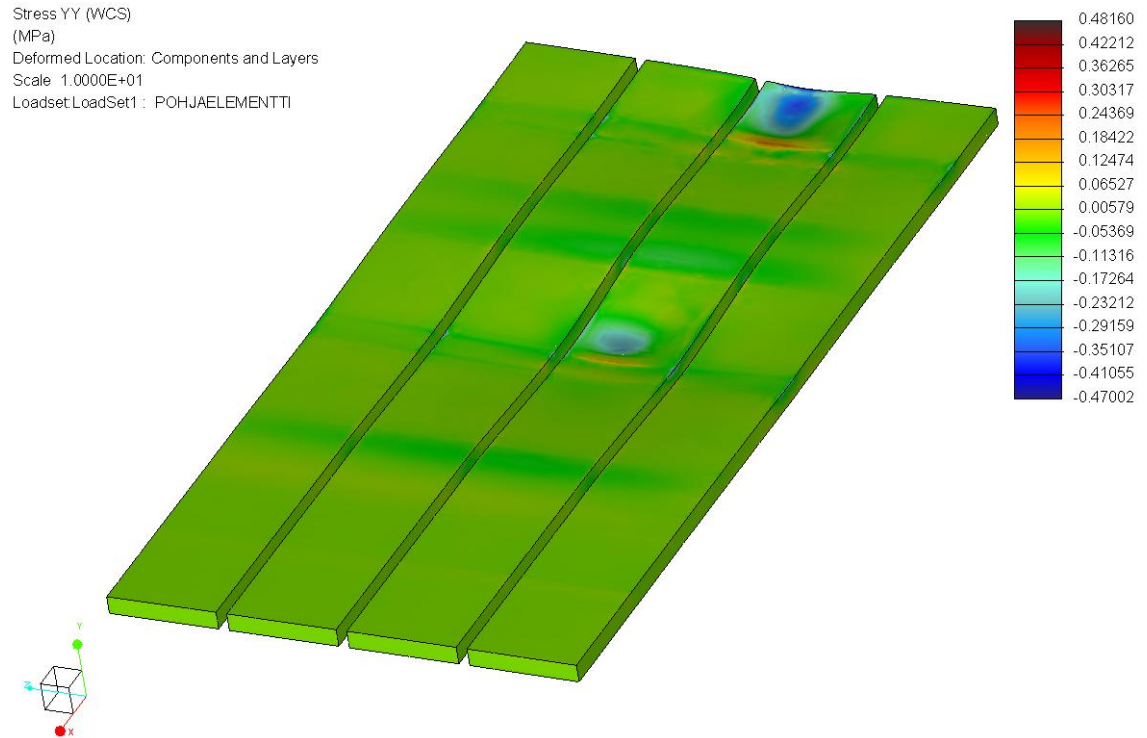
### 6.2.3 Alemmat eristeet

Alempaan eristekerrokseen syntyvät jännityskeskittymät ylittävät eristelevyvalmistajan antamat lujuusarvot. Kuvassa 44 on esitetty, kuinka eristelevyihin syntyi noin 0,5 MPa suuruinen paksuussuuntainen puristusjännitys. Käytetyn eristeen (Finnfoam FI-300) puristuslujuus oli 0,3 MPa (liite 4). Ydinaineen lujuus ylittyy tilanteessa, jolloin on mahdollista, että ydinaineeseen syntyy muodonmuutoksia tai kerrosten irtoamista.



Kuva 44. Alempaan eristekerrokseen syntyvät paksuussuuntaiset normaalijännitykset ( $\sigma_{YY}$ ) keskeltä kuormitettaessa (Immonen 2014)

Kuvassa 45 on esitetty, kuinka alempaan eristekerrokseen syntyy paksuussuuntaisia normaaliännityksiä. Tilanteessa lattiaelementtiä oli kuormitettu reunalta. Veto- ja puristusjäännitykset olivat noin 0,4 MPa.

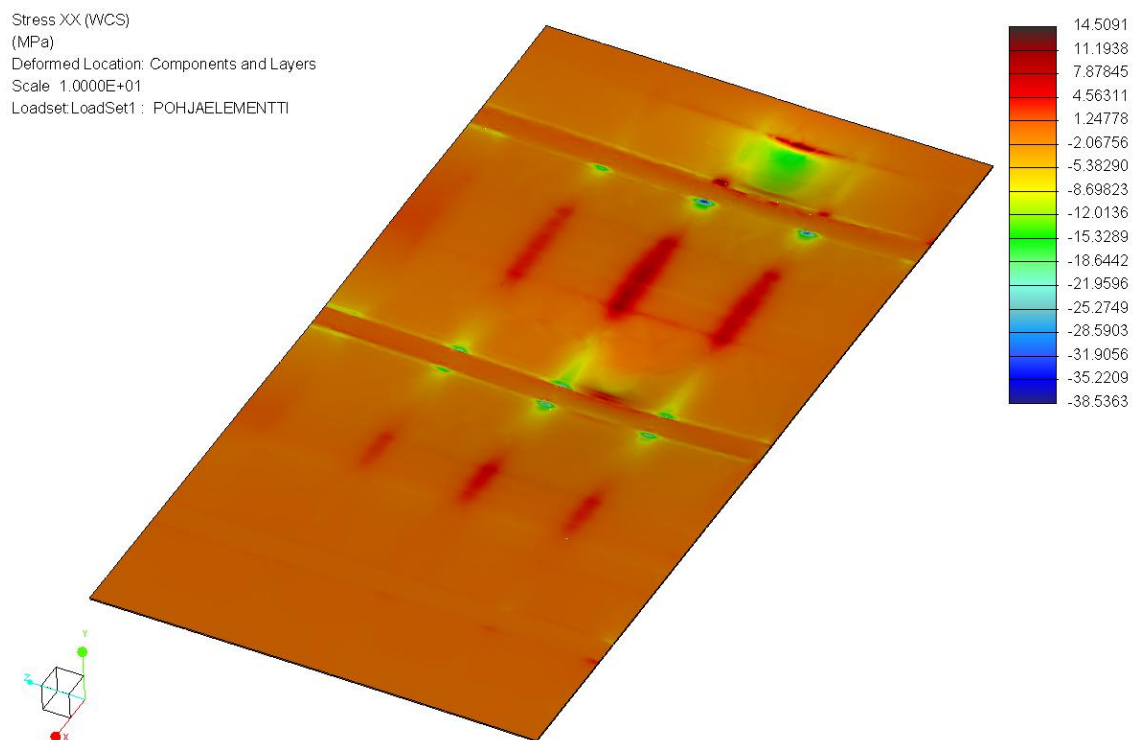


Kuva 45. Alempaan eristekerroksen paksuussuuntaiset normaaliännitykset ( $\sigma_{YY}$ ).

Kuormitus tapahtui reunalta. (Immonen 2014)

### 6.2.4 4 mm paksuinen vaneri

Kuvassa 46 on esitetty 4 mm paksuun vaneriin syntyneet normaalijännitykset leveysuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ). Levyyn syntyi 36 MPa suuruinen puristusjännitys alapinnalle. Levyn suurin sallittu puristuslujuus leveysuunnassa oli 31,8 MPa (liite 5). Levyä kuormitettiin tilanteessa reunalta.

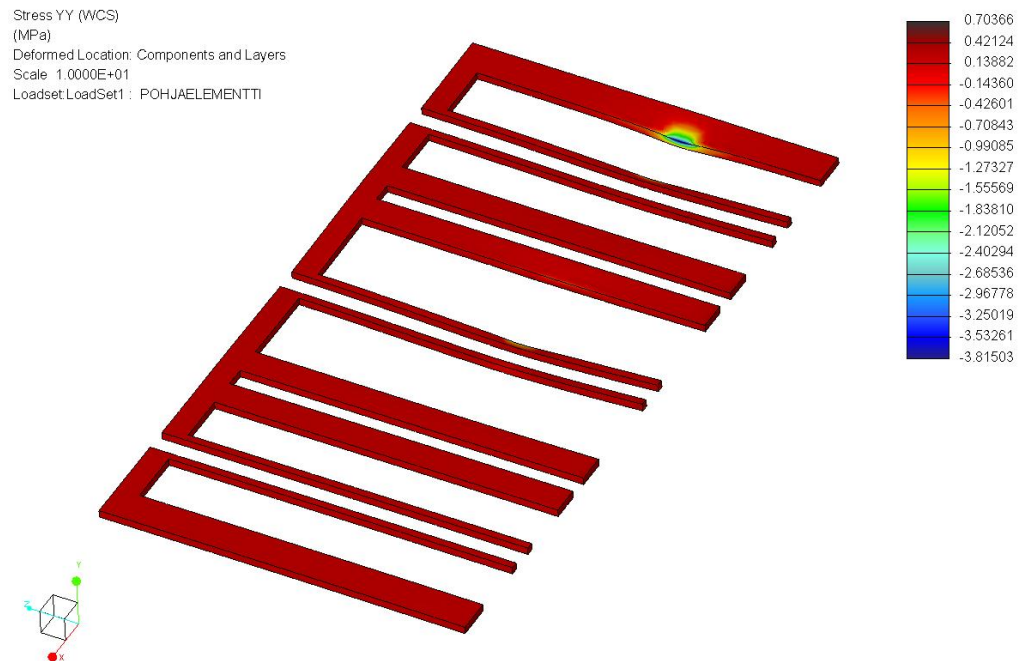


Kuva 46. 4 mm paksuun vaneriin syntyvät normaalijännitykset leveysuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ). Kuormitus tapahtui tilanteessa reunalta. (Immonen 2014)

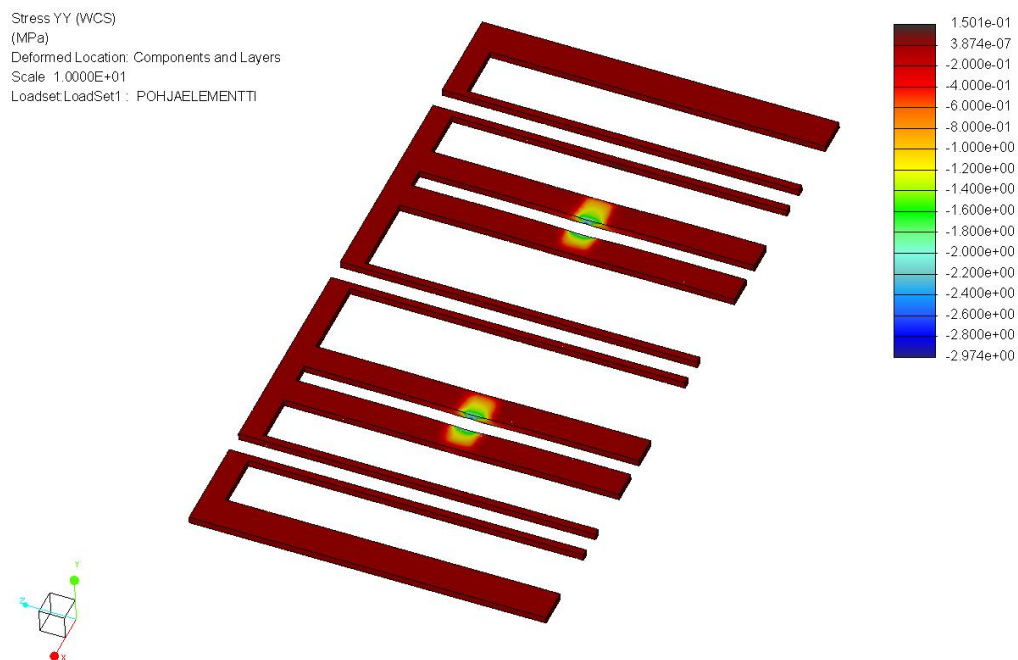
### 6.2.5 Ylempi liimapuupalkkikehikko

Ylempään liimapuupalkkikehikkoon kohdistui kuvan 47 mukaiset normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ). Sivuvahvikkeeseen kohdistui noin 3,5 MPa suuruinen puristusjännitys. Jännitys aiheutui tilanteessa, jossa lattiaelementtiä kuormitettiin reunalta. Jännitys aiheutuu paikallisesti suoraan kuormituskohdan alapuolelle.

Ylemmän liimapuupalkkikehikon puristusjännitys ylittyi myös tilanteessa, jossa kuormitus tapahtui lattiaelementin keskeltä (kuva 48). Paksuussuunnassa syntyvät puristusjännitykset olivat noin 3 MPa. Liimapuupalkin suurin sallittu puristuslujuus paksuussuunnassa oli 1,8 MPa (liite 1).



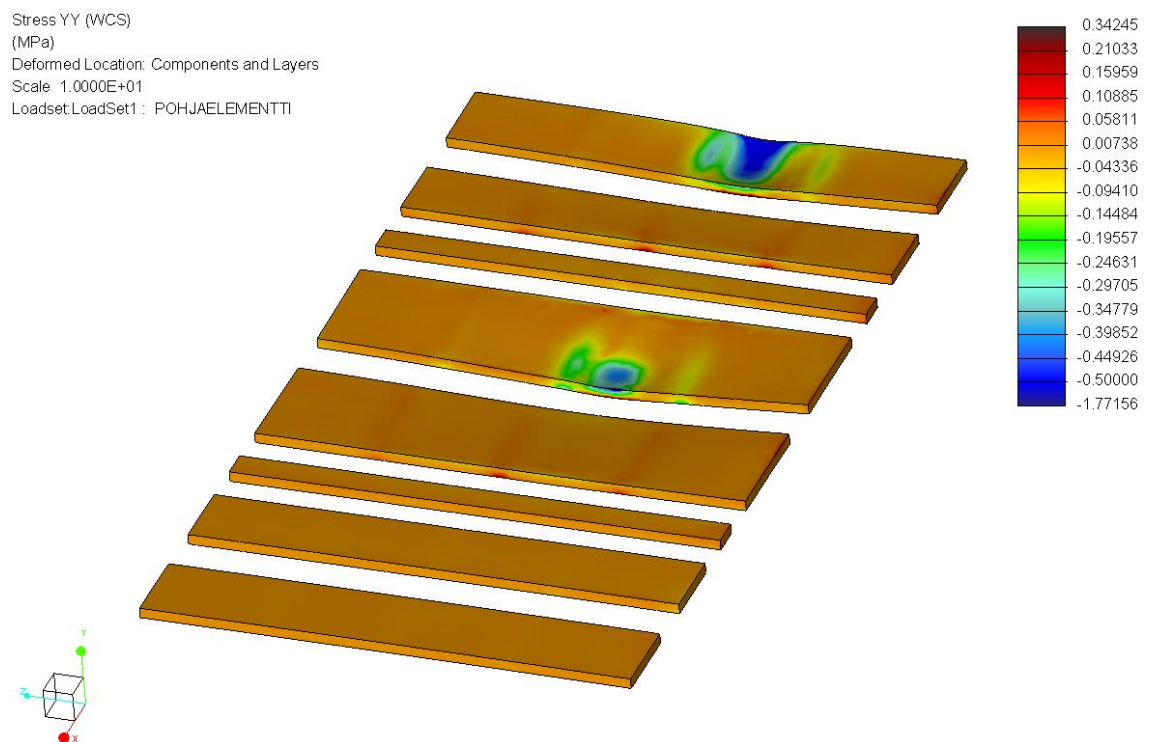
Kuva 47. Ylempään liimapuupalkkikehikkoon kohdistuneet paksuussuuntaiset normaali-jännitykset ( $\sigma_{YY}$ ) kuormituksen tapahtuessa reunalta (Immonen 2014)



Kuva 48. Keskeltä kuormitettu ylempi liimapuupalkkikehikko, normaali-jännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ) (Immonen 2014)

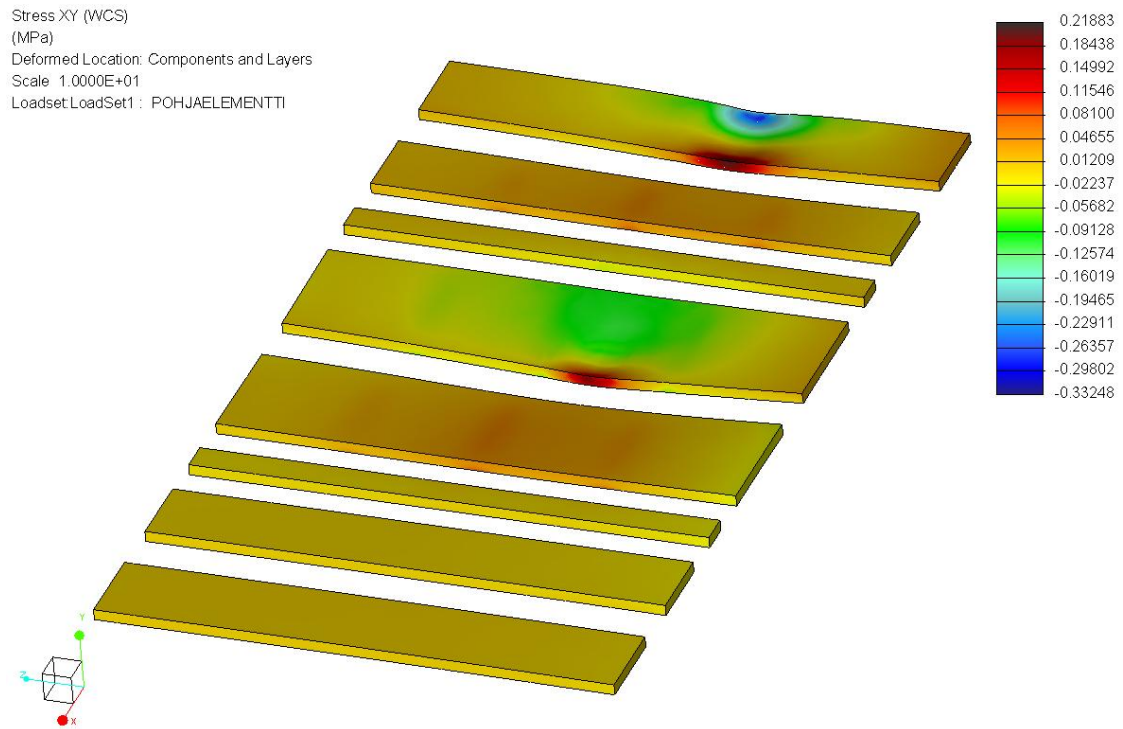
### 6.2.6 Ylemmät eristeet

Kuvassa 49 on esitetty ylempään eristekerrokseen syntyvät normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ). Tilanteessa kuormitus oli lattiaelementin reunalla. Eristelevyn puristuslujuus ylittyi tilanteessa. Eristelevyn puristuslujuus oli 0,3 MPa (liite 4) ja tilanteessa syntynyt jännitys oli yli 0,5 MPa. Myös eristelevyn leikkauslujuus ( $\tau_{XY}$ ) ylittyi. Kuvasta 50 voidaan todeta, kuinka leikkausjännitys ( $\tau_{XY}$ ) tilanteessa oli noin 0,35 MPa. Eristelevyn leikkauslujuus oli 0,3 MPa (liite 4).



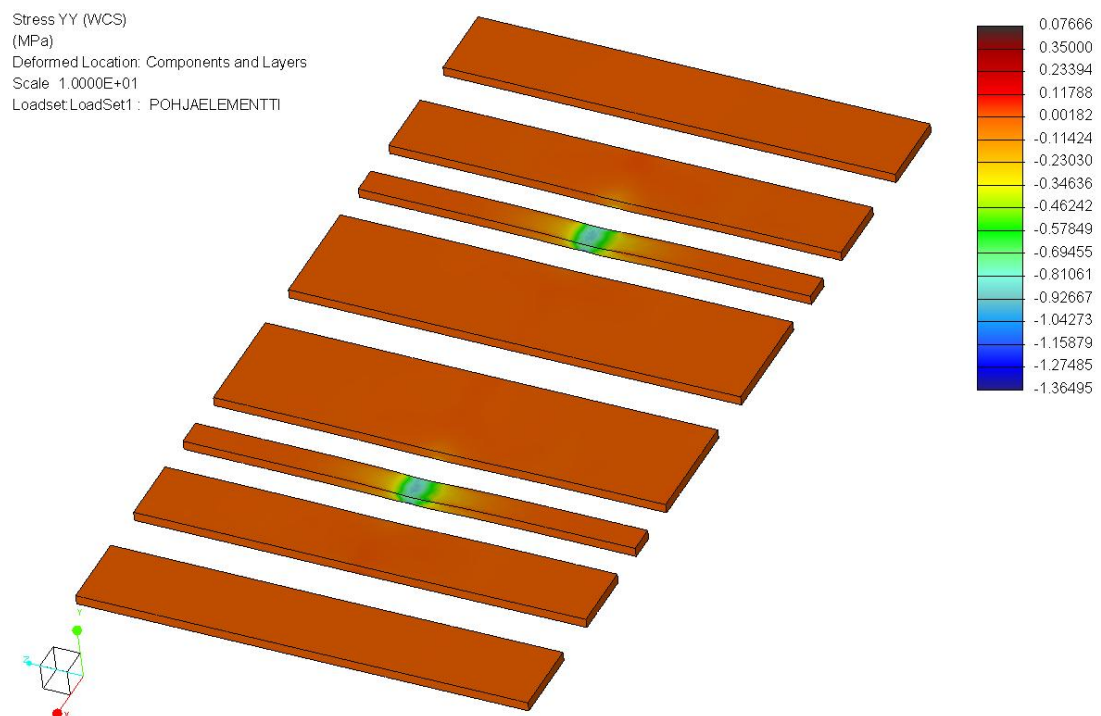
Kuva 49. Ylempään eristekerrokseen syntyneet normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ) (Immonen 2014)





Kuva 50. Ylempään eristelevyyn syntyneet leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ) (Immonen 2014)

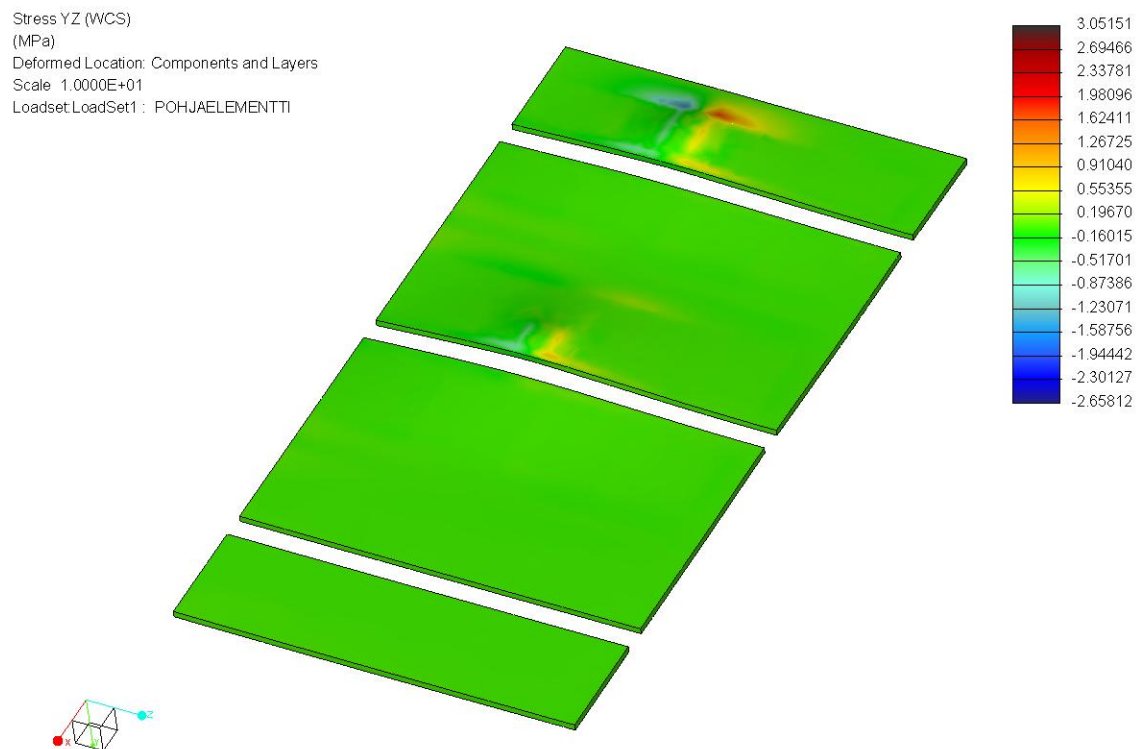
Eristelevyn puristuslujuus ylittyi myös tilanteessa, jossa kuormitus kohdistui keskelle lattiaa. Kuvasta 51 voidaan nähdä, kuinka puristusjännitykset olivat noin 0,8 MPa.



Kuva 51. Ylempään eristelevyyn syntyneet normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ), kuormitus keskellä lattiaa (Immonen 2014)

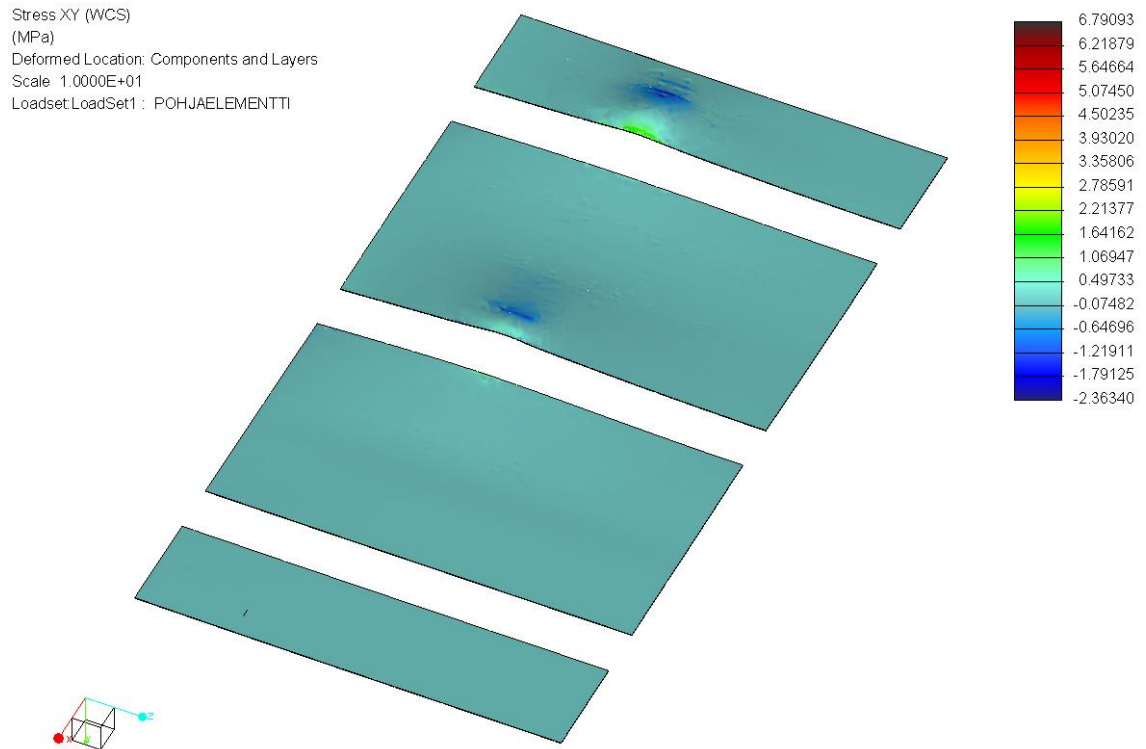
### 6.2.7 Yläpintalevyt

Kuvassa 52 on esitetty 21 mm paksun vanerikerroksen alapintaan kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{YZ}$ ). Leikkausjännitykset olivat reunaa kuormitettaessa noin 3 MPa. Liimanvalmistajan lupaama lujuus liimalle oli noin 10 MPa, riippuen liimattavasta materiaalista (liite 6).



Kuva 52. 21 mm paksun vanerin alapinnalle kohdistuneet leikkausjännitykset ( $\tau_{YZ}$ ).  
Kuormitus tapahtui reunalta. (Immonen 2014)

Kuvassa 53 on esitetty 2 mm laminaatin ja 21 mm vanerikerroksen rajapinnoille syntyvät leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Leikkausjännitykset olivat suuruudeltaan 2–3 MPa. Liimasauman lujuus on liimanvalmistajan mukaan noin 10 MPa, riippuen liimattavasta materiaalista (liite 6).

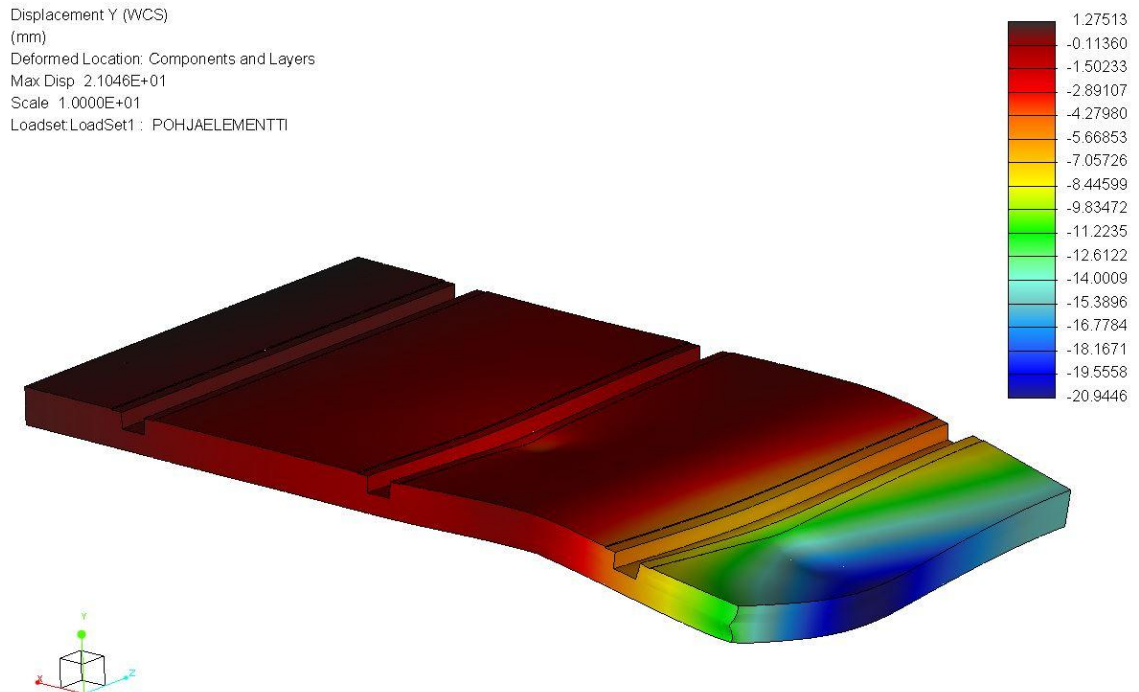


Kuva 53. 2 mm paksun laminaattilevyyn alapinnalle kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ) (Immonen 2014)

### 6.3 Ilman sivutuenta oleva lattiaelementti

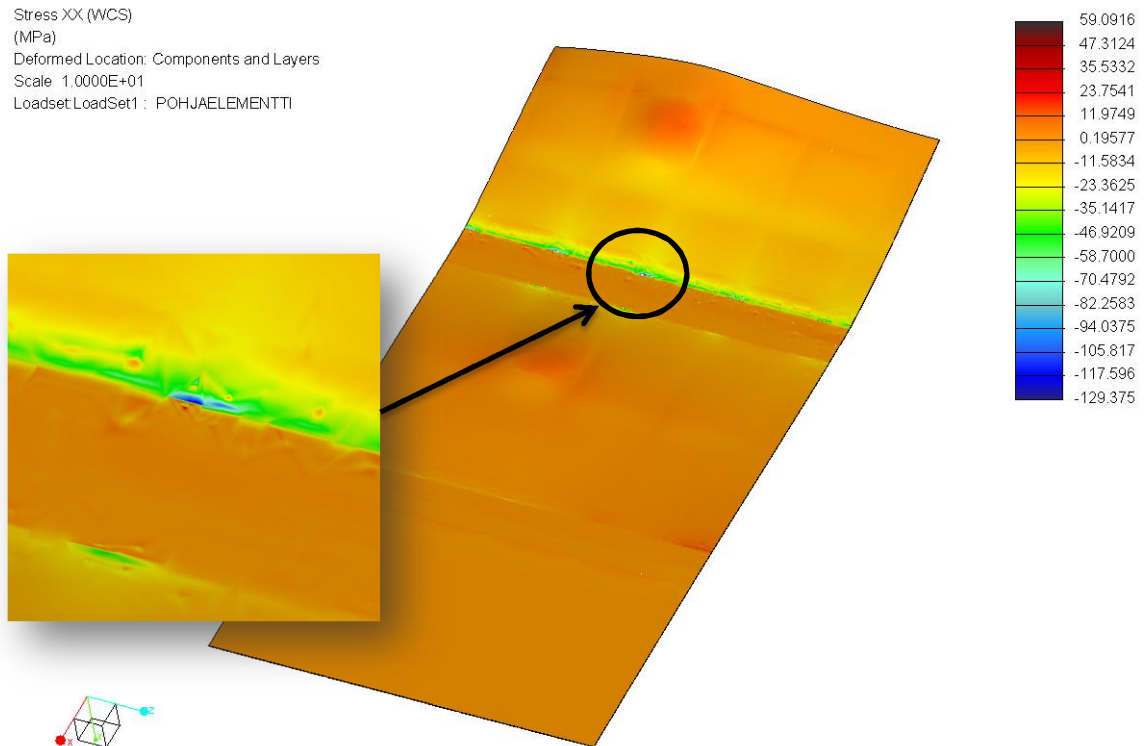
Lattiaelementin käyttäytyminen haluttiin tarkastaa myös tilanteessa, jossa trukki kuviteltiin lattianreunalle aukeavan sivuseinän ollessa avoinna. Sivuseinän ollessa auki häviää lattiaelementin sivulla oleva tuenta. Tällöin lattiaelementin leveysuuntainen reuna pääsee painumaan vapaasti.

Tilanteessa kuormitus ja kuormituksen sijainti olivat samat kuin aiemmissa tilanteissa. Kuvasta 54 nähdään lattiaelementin siirtymät paksuussuunnassa. Suurin siirtymä tilanteessa oli 20 mm.

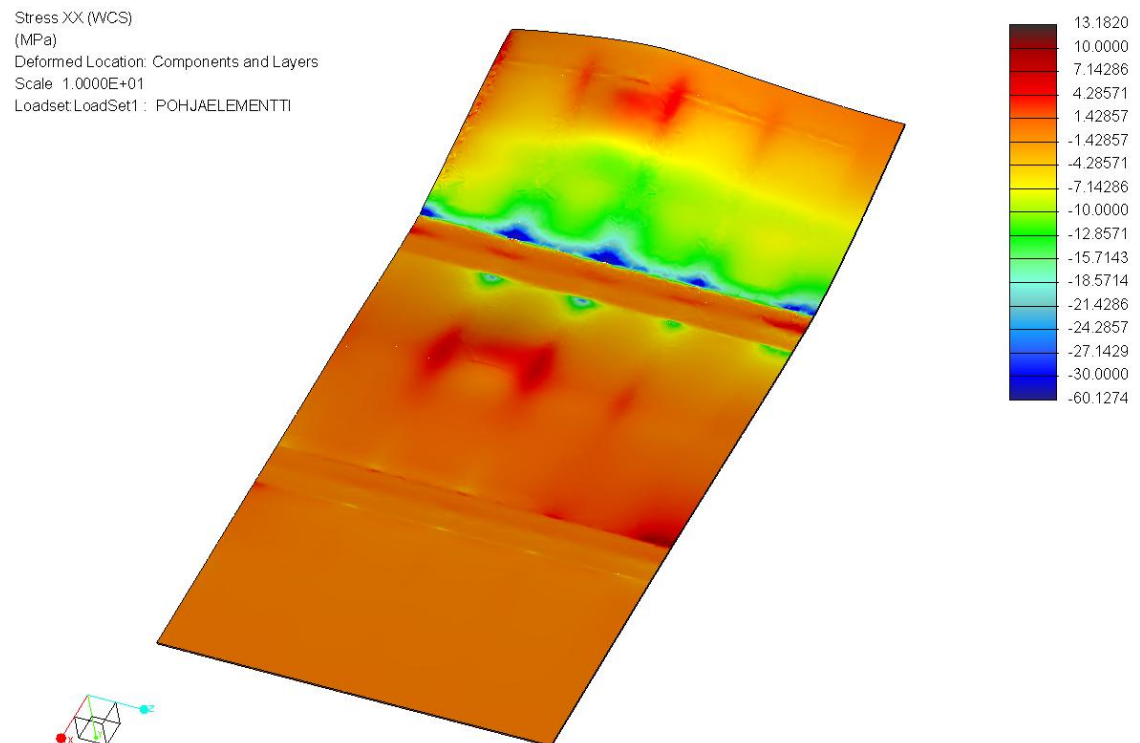


Kuva 54. Ilman sivutuenta olevan lattiaelementin paksuussuuntaiset siirtymät (Immonen 2014)

Kriittiset jännitykset syntyivät samoihin kohtiin kuin reunalta tuetussa versiossa. Reunan suuri siirtymä tosin aiheutti eristeisiin ja vahvikkeisiin paljon rasituksia. Suurimpana yksittäisenä ongelmana oli jälleen eristemateriaalin lujuuden riittämättömyys. Runkopalkkien tuennan juuri tuli myös kriittisemmäksi, koska lattiaelementti taipuu runkopalkin ympäri. Kuvassa 55 on esitetty alapintalevyyn syntyvät normaalijännitykset leveyssuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ). Jännityskeskittymät tuennan juuressa olivat noin 120 MPa. 6 mm paksuun vaneriin syntyi myös suuria normaalijännityksiä leveyssuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ) (kuva 56), jotka ylittivät paikallisesti vanerilevyn puristuslujuuden 29,3 MPa. Alapintalevyjen liimasaumat olivat vaarassa leikkaantua myös tässä kuormitustilanteessa.



Kuva 55. 2 mm paksuisen alapintalevyn alapinnalle syntyvät normaalijännitykset leveysuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ). Kuormitus tapahtui vapaana olevalle reunalle. (Immonen 2014)



Kuva 56. 6 mm paksuiseen vaneriin syntyvät leveysuuntaiset normaalijännitykset ( $\sigma_{XX}$ ). Kuormitus tapahtui vapaana olevalle reunalle. (Immonen 2014)

## 6.4 Tuloksien yhteenveto

Tuloksia vertailtaessa oli mahdollista huomata, kuinka kuormitukset olivat hyvin paikallisia. Aiheutuneet jännitykset olivat hyvin pienelle alueelle rajoittuneita, joka kertoo myös kuormien paikallisuudesta, joka aiheuttaa myös tietenkin paikallisia vaurioita. Tuloksista pystyttiin kuitenkin löytämään yhteisiä tekijöitä, jotka nousivat esiin jokaisessa simuloitussa tilanteessa.

Eristekerrosten ongelmaksi nousi puristuslujuuden kestäminen, vaikka eristekerroksen ensisijainen tehtävä onkin toimia ydinaineena ja kantaa leikkauskuormitusta kerroslevyrakenteessa. Puristuslujuuksien selvä ylittyminen voi johtaa pahimmillaan ydinaineen romahtamiseen, mikä voi aiheuttaa koko rakenteeseen muodonmuutoksia.

Pintalevyihin syntyvät jännitykset olivat hyvin paikallisia. Jännitykset keskittyivät enimmäkseen kuormitusten ja tuentojen reunoihin. Ongelmaksi ei muodostunut taipuudesta johtuva nurjahdus tai vetojännityksen nouseminen liian suureksi.

Pintalevyissä ongelmalliseksi nousi myös levyjen liimasaumojen lujuus. Liimasaumoihin muodostuneet jännitykset olivat joissakin tilanteissa liiman valmistajan lupaaman kestävyuden rajoilla. Ongelma korostui pintalevyinä toimivien vanerin ja laminaattilevyn saumassa. Ongelman aiheuttaa erityisesti tilanne, jossa kaksi materiaalia erilaisilla ominaisuuksilla liitetään toisiinsa ja niitä kuormitetaan samanlaisilla kuormituksilla. Tässä tapauksessa ongelman aiheutti puumateriaali ja laminaattilevy.

Liimapuupalkkikehikkoihin kohdistuneet kriittiset jännitykset olivat suurimmalta osalta paikallisia jännityksiä. Jännitykset syntyivät kuormituskohdan alle. Jännitykset kohdissa pääsivät nousemaan valmistajan ilmoittamien lujuuksien tasolle. Alempaan liimapuupalkkikehikkoon kohdistui tilanteissa paljon leikkausta. Tilanne pääsi muodostumaan erityisesti silloin, kun lattiaelementti pääsi taipumaan paljon leveysuunnassa.

## **7 Tuloksien hyödyntäminen**

Tässä osiossa on tarkoitus esitellä lyhyesti mahdollisia ratkaisuehdotuksia lattiaelementin kriittisten jännitysten ongelmakohtien poistamiseksi. Tämän osion tulokset jäivät odotettua vähemmiksi mallinnuksessa ilmenneiden ongelmien vuoksi. Osiossa tarjotaan lähinnä ideoita jatkokehityksen kannalta. Vanhasta rakenteesta tehdyt analyysit voidaan hyödyntää tarkemmin myöhemmissä tuotekehitysvaiheissa.

### **7.1 Ongelmakohtien korjausehdotuksia**

#### **7.1.1 Ydinaineet**

Ydinainekerroksien puristuslujuuden ylittyminen voidaan estää ydinainemateriaalia vaihtamalla. Samoista materiaaleista on myös saatavilla erilaisilla lujuusominaisuuksilla olevia versioita. Finnfoam-lämmöneristyslevystä on muun muassa saatavilla eri lujuuksilla olevia versioita. Vahvempia lämmöneristyslevyjä ovat esimerkiksi Finnfoam FI-500 tai -FI-700. Näiden eristyslevyjen puristuslujuudet ovat 500 kPa ja 700 kPa. Vahvempien levyjen kimmomoduulit ovat myös suuremmat, joten ne ovat käytössä jäykemmät, sillä ehdolla, että osan poikkipinta-ala pysyy samana.

Ydinaineen vaihtoa testattiin yhdellä analyysillä, jossa ydinaineeksi vaihdettiin Finnfoam FI-500-eristelevy. Saadut tulokset on koostettu liitteessä 7. Pelkällä ydinaineen vaihdolla ei ollut selkeää merkitystä lattiarakenteen jäykkyyteen, vaikka FI-500-levyn kimmomoduuli on korkeampi. Eristelevyn veto-, puristus- ja leikkauslujuus ovat tosin parempia, mikä voi parantaa kestävyyttä.

Tuloksesta selvisi, että pelkällä ydinaineen vaihdolla ei välttämättä vähennetä ydinaineeseen kohdistuvaa rasitusta merkittävästi.

### 7.1.2 Lattiaelementin jäykkyys

Paksuussuuntainen taipuma aiheutti liimapuupalkkeihin ja pintalevyihin kriittisiä jännityksiä. Taipumaa vähentämällä jännityksiä saataisiin vähennettyä. Taipuma nousi suureksi erityisesti nousevanseinän ollessa auki ja kuormitettaessa pohjaelementin reunaa.

Lattiaelementin jäykkyyttä voidaan parantaa helpoiten lisäämällä alempaan liimapuupalkkikerrokseen poikittaisvahvikkeita. Tämä toimenpide vähentäisi myös alempaan ydinainekerrokseen syntyviä puristusjännityksiä, koska poikittaisvahvikkeet kantaisivat osan puristuskuormasta. Jäykistämateriaalien vaihtoa on myös mahdollista miettiä paremmin jäykistäviin. Materiaalien liimasaumat on tosin tarkastettava leikkautumisen varalta.

Liitteessä 8 on tulokset analyysistä, jossa on testattu lattiaelementtirakennetta. Rakenteessa alemman liimapuupalkkikerroksen poikittaisvahvikkeiden määrää on lisätty. Myös ydinaine on vaihdettu vahvempaan FI-500-eristelevyyn. Toimenpide vähensi myös eristeisiin kohdistunutta kuormitusta.

Lattiaelementin jäykkyyttä saadaan myös parannettua lisäämällä pintalevyjen jäykkyyttä. Pintalevyjen ominaisuuksien vaihtoa on jo käytetty Antti Rannan Konepajalla. Lattiaelementissä ylemmän liimapuupalkkikerroksen paksuutta on kasvatettu 1 mm, jolloin on päästy eroon turhasta työstämisestä valmistuksen yhteydessä, koska liimapuupalkin yksi toimitusmitta on 27 mm. Kokoonpanossa alapintalevy ja 4 mm vaneri on korvattu 1,3 mm teräslevyllä. Analyysin (liite 9) mukaan pintalevyjen vaihto parantaa lattiaelementin jäykkyyttä huomattavasti. Tämä on pääteltävissä paksuussuuntaisista siirtymisistä, jotka olivat melkein puolet vähemmän kuin alkuperäisellä rakenteella. Teräslevyjen liimasaumoihin tosin kohdistuu analyysin mukaan suuri leikkausjännitys ( $\tau_{XY}$ ).

Vahvempien materiaalien liittäminen rakenteeseen ei ole aina varma keino parantaa rakenteen vahvuutta. Materiaalien erilaiset ominaisuudet aiheuttavat rajapinnoille paljon jännitystä, koska materiaaleihin syntyy erilaiset jännitykset saman siirtymän aiheutuksesta. Tällöin rakenneosat pyrkivät eroamaan toisistaan.



## 8 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli analysoida FEM-laskennan avulla Konepaja Antti Rannan käyttämä raskaankaluston perävaunun lattiaelementti. Analyysin tuloksien avulla perävaunun lattiaelementtiä pystyttäisiin kehittämään helpommin oikeaan suuntaan. Oikealla suunnalla tarkoitetaan kustannustehokkaampia ratkaisuja. Rakenne ei saisi olla liian raskas ja ylimitoitettu, koska paino ja ylimitoitus tarkoittavat yleensä turhia osia. Turhat osat taas tietävät aina kustannusten nousua. Kustannusten nousua tietävät myös liian heikot osat, koska niitä joudutaan korjaamaan mahdollisesti jälkepäin.

Työn tuloksena onnistuttiin tuottamaan FEM-analyysi käytössä olevasta rakenteesta. Jälkikehitysideoita tosin jäivät hyvin pinnallisiksi ja ehdotuksen tasolle. Työn tavoitteisiin kuului lattiarakenteen optimointi, mutta aikataulullisista ja mallinnusteknisistä ongelmista johtuen työ jouduttiin keskittämään enemmän FEM-analyysin luontiin. Mallinnustekniset ongelmat loivat tulosten luotettavuuteen myös pohdinnan arvoisia asioita.

Mallinnustekniset asiat paljastuivat erittäin yllättäviksi, koska rakenteen mallintamisesta ei osattu odottaa niin haastavaa. Haasteiden tuomaan resurssienkulutukseen pitäisi tosin osata varautua jo suunnitteluvaiheessa, joten suunnittelu- ja aikataulutuvaiheessa on tullut arviointivirheitä. Myös aiheenrajausta olisi voinut miettiä tarkemmin näin loppuajasta. Koska aikatauluongelmia ei pitäisi ilmetä, vaikka haasteet olisivatkin isoja.

Myös tavoitteista jääminen kertoo joistain ongelmista prosessin aikana. Vaikka työ itsessään sujui melko kivuttomasti, kertoo tavoitteista jääminen mahdollisesta aiheen laajuuden rajoittamisesta. Mahdollinen aiheen tarkempi ja pienemmälle alueelle rajaaminen olisi voinut tuoda paremman tuloksen itse opinnäytetyöprosessin kannalta. Koska tutkimustuloksien pohdinta syvällisemmin mielestäni kuuluu opinnäytetyöprosessiin, on opinnäytetyöprosessi jäänyt aavistuksen väärin resursoiduksi.

Myös vaihtoehtoisten menetelmien käytönmahdollisuudet jäivät selvittämättä. Mahdollisten eri ohjelmistojen käyttö mallinnuksessa olisi voinut tuoda paremman tuloksen mallinnusongelmiin. Uuden ohjelmiston omaksuminen olisi ollut oman jatkokehityksen

kannalta hyödyllistä. Työskentelyn olisi voinut aloittaa esimerkiksi selvittämällä työskentelyssä tulevat ongelmat ja valita työvälaineet niiden mukaan.

Työnaihe itsessään oli mielestäni mielenkiintoinen perinteinen insinööritehtävä, missä tarkoituksena oli kehittää uusia rakenteita tai tuotteita. Rakenteidensuunnittelu on mielestäni erittäin suuren kokonaisuuden hallintaa, missä täytyy hallita materiaalinvalinta, lujuuksien laskenta, käyttöympäristöjen- ja käyttäjien hallinta. Kokemuksen tuoma pelisilmä tilanteissa auttaa suunnittelussa, koska monesti joudutaan tekemään kompromisseja rakenteiden suhteen.

Aiheen valinta itsessään sisälsi paljon aiheen opiskelua. Rakenteeseen syventyminen vaati myös kerroslevyrakentamiseen syventymistä. Rakenteen analysointi vaati kerroslevyrakentamisen perustuntemuksen ja materiaaleihin perehtymisen. Aihe vaati myös tuntemusta itse tuotteen loppusijoituksesta. Lattiaelementin analyysien tuentojen arvioinnissa täytyi osata arvioida, kuinka lattiaelementti kiinnittyy muihin komponentteihin.

Opinnäytetyöprosessin aikana on oppinut verkostoitumaan eri lailla kuin kontaktiopeuksen aikana. Verkostoituminen ja sosialisoituminen ovat olleet opinnäytetyön aikana paljon työelämäläheisempää. Asia johtuu suuresti myös aiheen suuresta työelämään korreloitumisesta.

Prosessin aikana opettavaista teknisessä mielessä oli 3d-mallinnukseen syventyminen. Erityisesti FEM-laskennan osioon syventyminen oli erittäin kehittävää, koska FEM-laskennan käyttö lujuuslaskennassa on kasvanut hurjasti viime vuosina. Johtuen suuresti tietokoneiden laskentatehon kasvusta, joka tuo laskentamahdollisuudet mahdolliseksi yhä useammalle käyttäjälle.

FEM-analyysien tuloksiin täytyy aina suhtautua varauksella, koska pienetkin virheet mallinnuksessa tai ehdoissa voivat muuttaa tuloksia merkittävästi. FEM-laskennan tuloksia pitäisi aina pystyä vertailemaan muuhun tietopohjaan kuten käsinlaskentaan tai testituloksiin. (Hietikko 2004.) Tässä tutkimuksessa vertauskohdat olivat kokemusperäisiä ja yhtä selvää ongelmaa ei ollut nimettävissä. FEM-analyysien tuloksissakaan ei ollut luettavissa yhtä selvää ongelmaa, joka voisi aiheuttaa lattiaelementtiin ongelmia. Analyysit olivat staattisia analyysseja, joten ne eivät huomioi esimerkiksi vaihtelevia

kuormituksia tai väsymisen aiheuttamia vaurioita. Kosteuden aiheuttamat muutokset puurakenteiden lujuuteen ovat myös eräs jatkotutkimuksen aihe, johon olisi mahdollista syventyä tulosten tarkentamiseksi.

Tuloksien arvoihin vaikuttavat suuresti myös materiaalitiedot, mitä käytetään analyyseissa. Verratessa vanerien arvoja ESAComp-ohjelmistosta (liite 5) Vanerikäsikirjan arvoihin (liite 2), voitiin huomata, että arvot olivat toisistaan poikkeavia. Myös esimerkiksi laminaattilevyn teknisistä tiedoista (liite 3) on huomattavissa tiedoissa annettu  $\pm 15\%$  virhearviointi materiaalien lujuuksissa ja kimmomoduuleissa.

Mallinnuksessa käytettyyn yksinkertaistukseen täytyy myös suhtautua varauksella. Katkaisemalla toteutetussa mallissa jännitysten jakautuminen saattaa ulottua katkaisukohtaan asti. Tämä aiheuttaa virheellisiä tuloksia, koska kerroslevyrakenne ei käyttäydy realistisesti, jos rakenteen ominaisuudet loppuvat kesken. Tilanne korostui eritoten tilanteessa, jossa kuormitettiin nousevan seinän reunaa seinän ollessa yläasennossa.

Analyyseja tarkastellessa täytyy tuloksista myös osata erottaa mahdollisia virheellisiä tietoja. Esimerkiksi paikallisia suuria jännityksiä, jotka syntyvät joihinkin nurkkiin. Tilanteisiin voi törmätä, jos pyöristyyksiä ei huomioida, koska mikään rakenne ei ole täysin terävä.

Kerroslevyistä kertovan teoriaosuuden toivotaan olevan toimiva apuväline kerroslevyrakenteita suunniteltaessa. Osion toivotaan tarjoavan tiiviin tietopaketin kerroslevyistä ja antavan tietoa vaatimuksista ja tarjolla olevista materiaaleista. FEM-analyyseiden kanssa niiden toivotaan antavan ymmärrystä, kuinka kerroslevyrakenteen tulisi toimia ja kuinka eri osat vaikuttavat sen toimintaan.

Opinnäytetyön toivotaan antavan hyödyllistä tietoa myös jatkokehityksen kannalta. Tarkemmin käsittelemällä käyttäjiltä saatuja tietoja ja yhdistämällä ne FEM-analyyseilla saatuihin tietoihin, voitaisiin rakenteesta mahdollisesti paikantaa viat tarkemmin. Mallinnuksessa ilmenneitä ongelmia olisi mahdollista yrittää poistaa tarkemmalla perehtymisellä itse ohjelmistojen ominaisuuksiin.

## Lähteet

- Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J. Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M. & Välimaa, V. 1995. Koneenosien suunnittelu. Porvoo, Helsinki, Juva: Werner Söderström osakeyhtiö.
- Aluminium-honeycomb-panel. 2014. Aluminum Honeycomb Core.  
<http://www.aluminum-honeycomb-panel.com/images/honeycomb-core-terminology.jpg> Kuva otettu 18.2.2014
- Brianza Plastica. 2014. Products.  
[http://www.brianzaplastica.it/inglese/prodotti\\_download.asp](http://www.brianzaplastica.it/inglese/prodotti_download.asp)
- Davies, J.M. 2001. Lightweight sandwich construction. Published on behalf of CIB Working Commission W056 Sandwich Panels (joint CIB-ECCS commission). Oxford: Blackwell Science Ltd
- ESAComp, 2014. ESAComp Overview. <https://www.esacomp.com/overview/what-is-esacomp> Katsottu 1.5.2014.
- Evira, 2014. ATP-sopimus.  
<http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/valmistus+ja+myynti/kuljetus+ja+logistiikka/kansainvaliset+kuljetukset/atp-sopimus/>
- Finnfoam, 2014. Ominaisuudet. <http://www.finnfoam.fi/finnfoam-eristelevyt/ominaisuudet/>. Katsottu 4.3.2014.
- Hietikko, E. 2004. PALKKI lujuuslaskennan perusteet. Helsinki: Otava.
- Hinkkanen, M. 2014. CAE-ohjelmistoasiantuntija. Convia Oy. Puhelinkeskustelu 4/2014 & sähköpostikeskustelu kevät 2014.
- Leino, J. 2014. Suunnittelija. Eurocon Oy puhelinkeskustelu 3–4/2014
- Metsäteollisuus ry, Schauman Wood Oy, Finnforest Oyj, Koskisen Oy, Visuvesi Oy. 2005. Vanerikäsikirja. Helsinki: Metsäteollisuus ry.
- Metsä Wood, 2014. Kerto-S palkkien toimitusmitat.  
<http://www.metsawood.fi/tuotteet/kerto/Pages/Kerto-S.aspx> Katsottu 4.3.2014.  
 Finnforest vanerituotteet 2011.  
[http://www.metsawood.fi/SiteCollectionDocuments/Finnforest\\_vanerituotteet\\_2011.pdf](http://www.metsawood.fi/SiteCollectionDocuments/Finnforest_vanerituotteet_2011.pdf) Katsottu. 22.4.2014
- Nuutamo, V. 2014. Lehtori. Karelia-ammattikorkeakoulu. Keskustelu kevät 2014.
- Oinonen, S. 2014. Vuoro esimies. Pankaboard Oy. Keskustelu 4/2014.
- Ranta, A. 2013. Toimitusjohtaja. Konepaja Antti Ranta -konserni. Haastattelu kevät 2014
- Rautaruukki. 2014. Metallipinnoitetut teräkset. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-jaratkaisut/Terastuotteet/Metallipinnoitetut-terakset>, 20.2.2014,
- Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M., Komppa, V. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry.
- Seppälä, J. 2005. Polymeeriteknologia Perusteet. Helsinki: Oy Yliopistokustannus/Otatieto
- Suomen Standardoimisliitto Ry. Koivuviilun ulkonäköön perustuvat laatuvaatimukset (SFS 2413 1971). Katsottu 3/2014.
- Valtioneuvoston asetus 407/2013.
- Vaneri.eu, 2014. Filmivaneri. [http://www.vaneri.eu/images/filmfaced\\_02.jpg](http://www.vaneri.eu/images/filmfaced_02.jpg). Kuva otettu 24.2.2014

Toyota-forklifts, 2014. Vastapainotrukit. <http://www.toyota-forklifts.fi/fi/products/ic-counterbalanced-trucks/pages/default.aspx> Katsottu 28.4.2014.

Zaitseva, K., 2014. Myynti. Antti Ranta Oy.

<http://picasaweb.google.com/110820849660385440317/LIPEKetjupurkuChainLoad?gsessionid=nlt9aMspLKtJxVtyXfJtSw#> Päivitetty 11.11.2008.

Kuva otettu 29.1.2014,

<http://picasaweb.google.com/110820849660385440317/LIPEKetjupurkuChainLoad?gsessionid=HAiqqTtQiywZakZO4dEISg#5269563284420649538>

Kuva otettu 29.1.2014,

<http://picasaweb.google.com/110820849660385440317/LIPESivukaatoSideLIPESiv#5174513195632249650> Kuva otettu 29.1.2014

## Metsäwood Kerto -liimapuupalkin mekaaniset ominaisuudet

### MEKAANISET OMINAISUUDET

Arvot on annettu standardin EN 14374 mukaan ja suunnitteluarvot standardin EN 1995:2004 mukaan.

#### MATERIAALIARVOT

Ominaisarvot taulukoissa 1, 2 ja 3 on annettu 20 °C lämpötilassa ja 65 % suhteellisessa kosteudessa 5 minuuttia kestävässä kuormituksessa. Taulukko 1 esittää Kerto-tuotteiden mekaaniset ominaisuudet ja kuva 1 havainnollistaa kuormitus suunnat.



TAULUKKO 1. ERIPAKSUISTEN KERTO-TUOTTEIDEN SUUNNITTELUARVOT

Ominaisuus	Symboli	Kuva 1	Kerto-S 21 - 90 mm	Kerto-Q 21 - 24 mm	Kerto-Q 27 - 69 mm	Kerto-T 27 - 75 mm	Kerto-QP 39-51 mm	Kerto-QP 54-69 mm
<b>Ominaisarvot [N/mm<sup>2</sup>]</b>								
Talvutuslujuus: Syrjällään (korkeus 300 mm)	$f_{m,0,edge,k}$	A	44,0	28,0	32,0	$(300/h)^{0,27}$	36,0	38,0
Talvutuslujuus: Kokovaiikutuseksponentti	s	A	0,12	0,12	0,12	0,15	0,12	0,12
Talvutuslujuus: Lappeellaan, syiden suuntaan	$f_{m,0,flat,k}$	B	50,0	32,0	36,0	32	36,0	36,0
Talvutuslujuus: Lappeellaan, kohtisuoraan syytä vastaan	$f_{m,90,flat,k}$	C	-	ks. taul. 4	8,0	-	7,5	6,5
Vetolujuus: Syiden suuntaan (pituus 3000 mm)	$f_{t,0,k}$	D	35,0	19,0	26,0	$(3000/L)^{0,24}$	28,0	30,0
Vetolujuus: Kohtisuoraan syytä vastaan, syrjällään	$f_{t,90,edge,k}$	E	0,8	6,0	6,0	-	3,0	2,5
Vetolujuus: Kohtisuoraan syytä vastaan, lappeellaan	$f_{t,90,flat,k}$	F	-	-	-	-	-	-
Puristuslujuus: Syiden suuntaan	$f_{c,0,k}$	G	35,0	19,0	26,0	26,0	28,0	30,0
Puristuslujuus: Kohtisuoraan syytä vastaan, syrjällään	$f_{c,90,edge,k}$	H	6,0	9,0	9,0	4,0	6,0	6,0
Puristuslujuus: Kohtisuoraan syytä vastaan, lappeellaan	$f_{c,90,flat,k}$	I	1,8	2,2	2,2	1,0	1,8	1,8
Leikkauslujuus: Syrjällään	$f_{v,0,edge,k}$	J	4,1	4,5	4,5	2,4	4,1	4,1
Leikkauslujuus: Lappeellaan, syiden suuntaan	$f_{v,0,flat,k}$	K	2,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Leikkauslujuus: Lappeellaan, kohtisuoraan syytä vastaan	$f_{v,90,flat,k}$	L	-	0,6	0,6	-	-	-

Lähde: Kerto-S ja Kerto-Q: VTT:n sertifiointi 184/03 (päivitetty 2009)  
Kerto-T: VTT-C-1781-21-07  
Kerto-QP: VTT-S-05156-11

## Metsäwood Kerto -liimapuupalkin mekaaniset ominaisuudet

TAULUKKO 2. ERIPAKSUISTEN KERTO-TUOTTEIDEN JÄYKKYYSOMINAISUUDET

Ominaisuus	Symboli	Kuva 1	Kerto-S 21 - 90 mm	Kerto-Q 21 - 24 mm	Kerto-Q 27 - 69 mm	Kerto-T 27 - 75 mm	Kerto-QP 39-51 mm	Kerto-QP 54-69mm
<b>Ominaisarvot [N/mm<sup>2</sup>]</b>								
Kimmokerroin: Syiden suuntaan	$E_{0,k}$	A B D G	11 600	8 300	8 800	8 800	9800	10300
Kimmokerroin: Puristus kohtisuoraan syytä vastaan, syrjällään	$E_{c,90,edge,k}$	H	350	2 000	2 000	-	350	350
Kimmokerroin: Puristus kohtisuoraan syytä vastaan, lappeellaan	$E_{c,90,flat,k}$	I	100	100	100	-	100	100
Kimmokerroin: Talvutus kohtisuoraan pintavillun syytä vastaan	$E_{m,90,k}$	C	-	ks. taul. 4	1 700	-	1 700	1 700
Liukkerroin: Syrjällään	$G_{0,edge,k}$	J	400	400	400	-	400	400
Liukkerroin: Lappeellaan, syiden suuntaan	$G_{0,flat,k}$	K	400	60	100	-	180	340
Liukkerroin: Lappeellaan, kohtisuoraan syytä vastaan	$G_{90,flat,k}$	L	-	16	16	-	14	15
<b>Keskiarvot [N/mm<sup>2</sup>]</b>								
Kimmokerroin: Syiden suuntaan	$E_{0,mean}$	A B D G	13 800	10 000	10 500	10 000	11 700	12 300
Kimmokerroin: Puristus, kohtisuoraan syytä vastaan, syrjällään	$E_{c,90,edge,mean}$	H	430	2 400	2 400	-	430	430
Kimmokerroin: Puristus, kohtisuoraan syytä vastaan, lappeellaan	$E_{c,90,flat,mean}$	I	130	130	130	-	130	130
Kimmokerroin: Talvutus, kohtisuoraan pintavillun syytä vastaan	$E_{m,90,mean}$	C	-	ks. taul. 4	2 000	-	2 000	2 000
Liukkerroin: Syrjällään	$G_{0,edge,mean}$	J	600	600	600	400	600	600
Liukkerroin: Lappeellaan, syiden suuntaan	$G_{0,flat,mean}$	K	600	60	120	400	220	520
Liukkerroin: Lappeellaan, kohtisuoraan syytä vastaan	$G_{90,flat,mean}$	L	-	22	22	-	20	22

Lähde: Kerto-S ja Kerto-Q: VTT:n sertifikaatti 184/03 (päivitetty 2009)  
Kerto-T: VTT-C-1781-21-07  
Kerto-QP: VTT-S-05156-11

TAULUKKO 3. ERIPAKSUISTEN KERTO-TUOTTEIDEN TIHEYDOMINAISUUDET

Ominaisuus	Symboli	Kuva 1	Kerto-S 21 - 90 mm	Kerto-Q 21 - 24 mm	Kerto-Q 27 - 69 mm	Kerto-T 27 - 75 mm	Kerto-QP 39 - 51 mm	Kerto-QP 54 - 69 mm
<b>Tiheys [kg/m<sup>3</sup>]</b>								
Ominaisihteys	$\rho_k$	-	480	480	480	410	480	480
Keskimääräinen tiheys	$\rho_{mean}$	-	510	510	510	440	510	510

Lähde: Kerto-S ja Kerto-Q: VTT:n sertifikaatti 184/03 (päivitetty 2009)  
Kerto-T: VTT-C-1781-21-07  
Kerto-QP: VTT-S-05156-11

TAULUKKO 4. KERTO-Q 21-24 MM, OMINAISUUDET KOHTISUORAAN PINTAVILLUN SUUNTAAN

Ominaisuus	Symboli	Yksikkö	21 mm I-II-I	21 mm II-I-II	24 mm II-II-II	Kuva 1
Ominaislujuus: lappeellaan, kohtisuoraan syytä vastaan	$f_{m,90,flat,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,0	8,0	8,0	C
Ominaiskimmokerroin: talvutus kohtisuoraan syytä vastaan	$E_{m,90,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2 900	1 000	1 700	C
Keskiarvokimmokerroin: talvutus kohtisuoraan syytä vastaan	$E_{m,90,mean}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	3 300	1 200	2 000	C

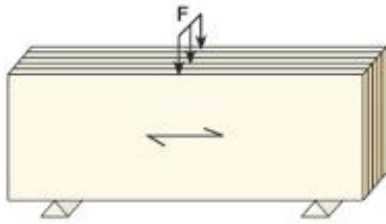
Lähde: VTT:n sertifikaatti 184/03 (päivitetty 2009)

**HUOM.** Taulukoiden 1, 2, 3 ja 4 ominaisarvoja voidaan käyttää alle 50°C lämpötiloissa pitkäaikaiselle kuormitukselle.

**HUOM.** Kyllästetyn Kerto-Q -tuotteen lujuusmitoitus tehdään Eurokoodi 5:n käyttöluokassa 3 poikkileikkauksen nimellimitoilla.

## Metsäwood Kerto -liimapuupalkin mekaaniset ominaisuudet

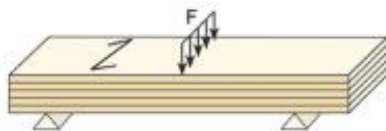
Kuva 1. Periaatekuva kuormitus suunnista, (pintaviilun syysuunta  $\leftrightarrow$ )



**A** Taivutus syrjällään, syiden suuntaan (m,0,edge)



**B** Taivutus lappeellaan, syiden suuntaan (m,0,flat)



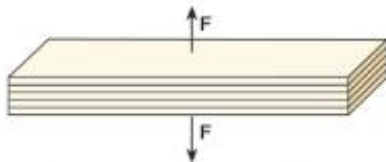
**C** Taivutus lappeellaan, kohtisuoraan syitä vastaan (m,90,flat)



**D** Veto, syiden suuntaan (t,0)



**E** Veto syrjällään, kohtisuoraan syitä vastaan (t,90, edge)



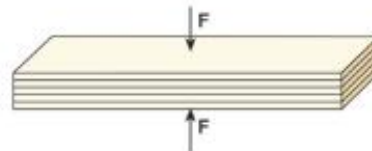
**F** Veto lappeellaan, kohtisuoraan syitä vastaan (t,90,flat)



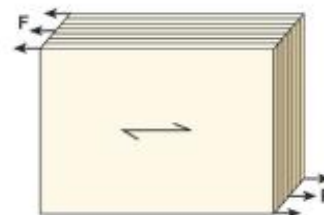
**G** Puristus, syiden suuntaan (c,0)



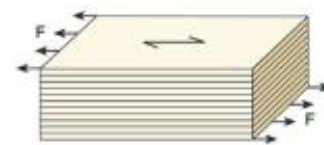
**H** Puristus syrjällään, kohtisuoraan syitä vastaan (c,90,edge)



**I** Puristus lappeellaan, kohtisuoraan syitä vastaan (c,90,flat)



**J** Liukukerroin syrjällään, syiden suuntaan (v,0,edge,k)



**K** Liukukerroin lappeellaan, syiden suuntaan (v,0,flat,k)



**L** Liukukerroin lappeellaan, kohtisuoraan syitä vastaan (v,90,flat,k)



## Suomalaisen vanerin tekniset ominaisuudet

Taivutuksen, vedon ja puristuksen keskimääräisten kimmomoduulien ja ominaislujuuksien arvot esitetään taulukoissa 3-2...3-6. Arvot on ilmoitettu sekä vanerin pintavilujen syiden suunnassa että syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Paneeli- ja tasoleikkauksen keskimääräiset liukumoduulit ja ominaislujuuden arvot esitetään taulukoissa 3-7...3-11.

Taulukko 3-1. Suunnittelussa käytettävät vanerien tiheysarvot.  
Arvot on määritetty ilman 65 %:n suhteellisessa kosteudessa.

Vaneri	Keskittiheys kg/m <sup>3</sup>	Ominaisitiheys kg/m <sup>3</sup>
Koivu, 1,4 mm viilut	680	630
Combi, 1,4 mm viilut	620	560
Havu, ohutviluinen	520	480
Havu, paksuviluinen	460	400



Taulukoissa 3-2...3-11 käytetyt merkinnät

t = paksuus	$f_t$ = vetolujuus	$G_r$ = tasoleikkauksen liukumoduuli
A = poikkileikkausala	$f_c$ = puristuslujuus	= koivuviilu levyn poikkisuunnassa
W = taivutusvastus	$f_v$ = paneelileikkaukslujuus	— = koivuviilu levyn pituussuunnassa
I = jäyhyysmomentti	$f_r$ = tasoleikkaukslujuus	= kuusiviilu poikkisuunnassa
II = pintavilujen syiden suunnassa	$E_m$ = taivutuskimmomoduuli	— = kuusiviilu pituussuunnassa
⊥ = pintavilujen syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa	$E_t$ = vetokimmomoduuli	
$f_m$ = taivutuslujuus	$E_c$ = puristuskimmomoduuli	
	$G_v$ = paneelileikkauksen liukumoduuli	

## Suomalaisen vanerin tekniset ominaisuudet











MITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT HIOTTUJEN VANERIJEN RAKENTEET, PAKSUUDET, POIKKIPINTA-ALAT, TAIVUTUSVASTUKSET JA JÄYHYYSMOMENTIT SEKÄ TAIVUTUS-, VETO- JA PURISTUSOMINAISUUDET. ARVOT LASKETTU KOKO POIKKIPINNALLE

















Taulukko 3-2. Koivuvaneri							Ominaisuus						Keskimääräinen kimmomoduuli			
Rakenne	Poikkileikkauksuureet						Taivutus		Puristus		Veto		Taivutus		Veto ja puristus	
	Nimellis-paksuus	Väijien lukumääri	l keskim. mm	A mm <sup>2</sup> /mm	W mm <sup>3</sup> /mm	I mm <sup>4</sup> /mm	$f_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{y/c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{y/c,I}$ N/mm <sup>2</sup>
	4	3	3.6	3.6	2.18	3.89	65.9	10.6	31.8	20.2	45.8	29.2	16471	1029	10694	886
	6.5	5	6.4	6.4	6.83	21.8	50.9	29.0	29.3	22.8	42.2	32.8	12737	4763	9844	766
	9	7	9.2	9.2	14.1	64.9	45.8	32.1	28.3	23.7	40.8	34.2	11395	6105	9511	798
	12	9	12.0	12.0	24.0	144	42.9	33.2	27.7	24.3	40.0	35.0	10719	6781	9333	817
	15	11	14.8	14.8	36.5	270	41.3	33.8	27.4	24.8	39.5	35.5	10316	7184	9223	8277
	18	13	17.6	17.6	51.6	454	40.2	34.1	27.2	24.8	39.2	35.8	10048	7452	9148	8352
	21	15	20.4	20.4	69.4	707	39.4	34.3	27.0	25.0	39.0	36.0	9858	7642	9093	8407
	24	17	23.2	23.2	89.7	1041	38.9	34.4	26.9	25.1	38.8	36.2	9717	7783	9052	8448
	27	19	26.0	26.0	113	1465	38.4	34.5	26.8	25.2	38.7	36.3	9607	7893	9019	8481
	30	21	28.8	28.8	138	1991	38.1	34.6	26.7	25.3	38.5	36.5	9519	7981	8993	8507
	35	25	34.4	34.4	197	3392	37.6	34.7	26.6	25.4	38.4	36.6	9389	8111	8953	8547
	40	29	40.0	40.0	267	5333	37.2	34.7	26.5	25.5	38.3	36.8	9296	8204	8925	8575
	45	32	44.2	44.2	328	7198	37.0	34.7	26.5	25.5	38.2	36.8	9259	8241	8914	8586
	50	35	48.4	48.4	390	9448	36.8	34.8	26.4	25.6	38.1	36.9	9198	8302	8895	8605

Taulukko 3-3. Combivaneri							Ominaisuus						Keskimääräinen kimmomoduuli			
Rakenne	Poikkileikkauksuureet						Taivutus		Puristus		Veto		Taivutus		Veto ja puristus	
	Nimellis-paksuus	Väijien lukumääri	l keskim. mm	A mm <sup>2</sup> /mm	W mm <sup>3</sup> /mm	I mm <sup>4</sup> /mm	$f_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{y/c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{y/c,I}$ N/mm <sup>2</sup>
	6.5	5	6.4	6.4	6.83	21.8	50.8	29.0	34.5	22.8	19.1	32.8	12690	4763	8859	766
	9	7	9.2	9.2	14.1	64.9	43.9	32.1	22.5	23.7	17.5	34.2	10983	6105	8141	798
	12	9	12.0	12.0	24.0	144	40.0	33.2	21.5	24.3	16.7	35.0	10012	6781	7758	817
	15	11	14.8	14.8	36.5	270	37.5	33.8	20.8	24.6	16.2	35.5	9386	7184	7520	8277
	18	13	17.6	17.6	51.6	454	35.8	34.1	20.4	24.8	15.8	35.8	8950	7452	7368	8352
	21	15	20.4	20.4	69.4	707	34.5	34.3	20.0	25.0	15.6	36.0	8628	7642	7240	8407
	24	17	23.2	23.2	89.7	1041	32.9	34.4	19.8	25.1	15.4	36.2	8381	7783	7151	8448
	27	19	26.0	26.0	113	1465	31.2	34.5	19.6	25.2	15.3	36.3	8185	7893	7081	8481
	30	21	28.8	28.8	138	1991	29.9	34.6	19.5	25.3	15.1	36.5	8026	7981	7024	8507

Taulukko 3-4. Poikkuvacombivaneri							Ominaisuus						Keskimääräinen kimmomoduuli			
Rakenne	Poikkileikkauksuureet						Taivutus		Puristus		Veto		Taivutus		Veto ja puristus	
	Nimellis-paksuus	Väijien lukumääri	l keskim. mm	A mm <sup>2</sup> /mm	W mm <sup>3</sup> /mm	I mm <sup>4</sup> /mm	$f_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{y/c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{y/c,I}$ N/mm <sup>2</sup>
	6.5	5	6.4	6.4	6.83	21.8	50.9	16.6	29.3	15.8	42.2	12.3	12737	3538	9844	588
	9	7	9.2	9.2	14.1	64.9	45.8	18.3	28.3	16.4	40.8	12.8	11395	4535	9511	593
	12	9	12.0	12.0	24.0	144	42.9	19.0	27.7	16.8	40.0	13.1	10719	5037	9333	607
	15	11	14.8	14.8	36.5	270	41.3	19.3	27.4	17.0	39.5	13.2	10316	5337	9223	6149
	18	13	17.6	17.6	51.6	454	40.2	19.5	27.2	17.2	39.2	13.4	10048	5536	9148	6205
	21	15	20.4	20.4	69.4	707	39.4	19.6	27.0	17.3	39.0	13.5	9858	5677	9093	6245
	24	17	23.2	23.2	89.7	1041	38.9	19.7	26.9	17.4	38.8	13.5	9717	5783	9052	6276
	27	19	26.0	26.0	113	1465	38.4	19.7	26.8	17.4	38.7	13.6	9607	5863	9019	6300
	30	21	28.8	28.8	138	1991	38.1	19.8	26.7	17.5	38.5	13.6	9519	5928	8993	6319

## Suomalaisen vanerin tekniset ominaisuudet

Taulukko 3-5. Havuvaneri, ohutvilluinen							Ominaislujuus						Keskimääräinen kimmomoduuli			
Rakenne	Poikkileikkaussuureet						Taivutus		Puristus		Veto		Taivutus		Veto ja puristus	
	Nimellispaksuus	Väljen lukumääriä	t keskim. mm	A mm <sup>2</sup> /mm	W mm <sup>3</sup> /mm	I mm <sup>4</sup> /mm	$f_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{v,c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{v,c,I}$ N/mm <sup>2</sup>
	4	3	3,6	3,6	2,16	3,89	37,6	6,0	23,0	14,0	17,1	10,9	12235	765	7944	5056
	6,5	5	6,4	6,4	6,80	21,8	29,1	16,8	30,3	15,8	15,8	12,9	9462	3538	7313	5688
	9	7	9,2	9,2	14,1	64,9	26,0	18,3	19,6	16,4	15,2	12,8	8465	4535	7065	5935
	12	9	12,0	12,0	24,0	144	24,5	19,0	19,2	16,8	14,9	13,1	7963	5037	6933	6067
	15	11	14,8	14,8	36,5	270	23,6	19,3	19,0	17,0	14,8	13,2	7663	5337	6651	6149
	18	13	17,6	17,6	51,6	454	23,0	19,5	18,8	17,2	14,6	13,4	7464	5536	6795	6205
	21	15	20,4	20,4	69,4	707	22,5	19,6	18,7	17,3	14,5	13,5	7323	5677	6755	6245
	24	17	23,2	23,2	89,7	1041	22,2	19,7	18,6	17,4	14,5	13,5	7218	5782	6724	6276
	27	19	26,0	26,0	113	1465	22,0	19,7	18,6	17,4	14,4	13,6	7157	5863	6700	6300
	30	21	28,8	28,8	138	1991	21,8	19,8	18,5	17,5	14,4	13,6	7072	5928	6681	6319

Taulukko 3-6. Havuvaneri, paksuvilluinen							Ominaislujuus						Keskimääräinen kimmomoduuli				
Rakenne	Tyyppi	Poikkileikkaussuureet					Taivutus		Puristus		Veto		Taivutus		Veto ja puristus		
		Nimellispaksuus	Väljen lukumääriä	t keskim. mm	A mm <sup>2</sup> /mm	W mm <sup>3</sup> /mm	I mm <sup>4</sup> /mm	$f_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{v,c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{v,c,I}$ N/mm <sup>2</sup>
	9/3-3.0	9	3	8,4	8,4	11,8	49,4	26,6	3,8	19,3	10,7	11,6	6,4	11453	547	7714	4286
	9/3-3.2	9	3	9,0	9,0	13,5	60,6	26,7	3,8	19,3	10,7	11,6	6,4	11461	539	7733	4267
	12/4-3.0	12	4	11,4	11,4	21,7	123	25,6	8,3	14,2	15,8	8,5	9,5	10250	1750	5684	6316
	12/5-2.6	12	5	12,4	12,4	25,6	159	22,8	11,4	17,4	12,6	10,5	7,5	9124	2876	6968	5032
	15/5-3.0	15	5	14,4	14,4	34,8	249	22,9	11,3	17,5	12,5	10,5	7,5	9179	2821	7000	5000
	15/5-3.2	15	5	15,4	15,4	39,8	304	23,0	11,2	17,5	12,5	10,5	7,5	9201	2799	7013	4987
	18/6-3.0	18	6	17,4	17,4	50,5	439	21,4	12,5	19,7	10,3	11,8	6,2	8956	3444	7862	4138
	18/7-2.6	18	7	17,6	17,6	51,6	454	20,4	13,0	16,7	13,3	10,0	8,0	8170	3630	6682	5318
	21/7-3.0	21	7	20,4	20,4	69,4	707	20,6	12,8	16,8	13,2	10,1	7,9	8222	3776	6706	5294
	21/7-3.2	21	7	20,6	20,6	70,7	726	20,6	12,8	16,8	13,2	10,1	7,9	8243	3757	6716	5282
	24/8-3.0	24	8	23,4	23,4	91,3	1068	20,4	12,5	22,3	7,7	13,4	4,6	8156	3844	6923	3077
	24/9-2.6	24	9	22,8	22,8	86,6	985	19,1	13,6	16,3	13,7	9,8	8,2	7658	4342	6526	5474
	27/9-3.0	27	9	26,4	26,4	116	1533	19,3	13,5	16,4	13,6	9,8	8,2	7703	4297	6545	5456
	27/11-3.6	27	11	25,6	25,6	109	1398	14,8	16,7	14,8	15,2	8,9	9,1	5903	6097	5906	6094
	30/10-3.0	30	10	29,4	29,4	144	2118	18,8	13,7	17,8	12,2	10,7	7,3	7512	4488	7102	4898
	30/13-3.6	30	13	30,8	30,8	156	2435	14,7	16,4	14,8	15,2	8,9	9,1	5893	6107	6022	6078

MITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT HIOTTUJEN VANERIEEN LEIKKAUSOMINAISUUDET. ARVOT LASKETTU KOKO POIKKIPINNALLE

Taulukko 3-7. Koivuvaneri								
Nimellispaksuus	Ominaislujuus				Keskimääräinen lukumoduuli			
	Paneelileikkaus		Tasoleikkaus		Paneelileikkaus		Tasoleikkaus	
mm	$f_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{c,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{c,I}$ N/mm <sup>2</sup>
4	9,5	9,5	2,77	-	620	620	169	-
6,5	9,5	9,5	3,20	1,76	620	620	169	123
9	9,5	9,5	2,68	2,35	620	620	206	155
12	9,5	9,5	2,78	2,22	620	620	207	170
15	9,5	9,5	2,62	2,39	620	620	207	176
18	9,5	9,5	2,67	2,34	620	620	206	183
21	9,5	9,5	2,59	2,41	620	620	206	186
24	9,5	9,5	2,62	2,39	620	620	206	189
27	9,5	9,5	2,57	2,43	620	620	205	190
30	9,5	9,5	2,59	2,41	620	620	205	192
36	9,5	9,5	2,57	2,43	620	620	204	193
40	9,5	9,5	2,56	2,44	620	620	204	195
45	9,5	9,5	2,55	2,46	620	620	203	196
50	9,5	9,5	2,54	2,46	620	620	203	196

## Suomalaisen vanerin tekniset ominaisuudet

**Taulukko 3-8. Combivaneri**

Nimellispaksuus	Ominaislujuus				Keskimääräinen lukumoduuli			
	Paneelileikkaus		Tasoleikkaus		Paneelileikkaus		Tasoleikkaus	
	$f_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>
6,5	7,0	7,0	3,20	1,14	600	600	169	41
9	7,0	7,0	2,88	1,51	593	593	206	52
12	7,0	7,0	2,78	1,42	589	589	207	57
15	7,0	7,0	2,62	1,53	586	586	207	59
18	7,0	7,0	2,67	1,50	584	584	206	61
21	7,0	7,0	2,59	1,55	583	583	206	62
24	7,0	7,0	2,62	1,53	582	582	206	63
27	7,0	7,0	2,57	1,56	581	581	205	63
30	7,0	7,0	2,59	1,54	581	581	205	64

**Taulukko 3-9. Peilikuva-combivaneri**

Nimellispaksuus	Ominaislujuus				Keskimääräinen lukumoduuli			
	Paneelileikkaus		Tasoleikkaus		Paneelileikkaus		Tasoleikkaus	
	$f_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>
6,5	7,0	7,0	2,05	1,78	581	581	66	123
9	7,0	7,0	1,72	2,35	579	579	69	155
12	7,0	7,0	1,78	2,22	578	578	69	170
15	7,0	7,0	1,68	2,39	577	577	69	178
18	7,0	7,0	1,71	2,34	577	577	69	183
21	7,0	7,0	1,66	2,41	577	577	69	186
24	7,0	7,0	1,68	2,39	577	577	69	189
27	7,0	7,0	1,65	2,43	576	576	68	190
30	7,0	7,0	1,66	2,41	576	576	68	192

**Taulukko 3-10. Havuvaneri, ohutviilinen**

Nimellispaksuus	Ominaislujuus				Keskimääräinen lukumoduuli			
	Paneelileikkaus		Tasoleikkaus		Paneelileikkaus		Tasoleikkaus	
	$f_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>
4	7,0	7,0	1,77	-	530	530	56	-
6,5	7,0	7,0	2,05	1,14	530	530	66	41
9	7,0	7,0	1,72	1,51	530	530	69	52
12	7,0	7,0	1,78	1,42	530	530	69	57
15	7,0	7,0	1,68	1,53	530	530	69	59
18	7,0	7,0	1,71	1,50	530	530	69	61
21	7,0	7,0	1,66	1,55	530	530	69	62
24	7,0	7,0	1,68	1,53	530	530	69	63
27	7,0	7,0	1,65	1,56	530	530	68	63
30	7,0	7,0	1,66	1,54	530	530	68	64

**Taulukko 3-11. Havuvaneri, paksuviilinen**













Nimellispaksuus	Ominaislujuus				Keskimääräinen lukumoduuli			
	Paneelileikkaus		Tasoleikkaus		Paneelileikkaus		Tasoleikkaus	
	Typi	$f_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,II}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{v,I}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{r,II}$ N/mm <sup>2</sup>
9/3-3.0	3,5	3,5	0,98	-	350	350	45	-
9/3-3.2	3,5	3,5	0,98	-	350	350	45	-
12/4-3.0	3,5	3,5	0,95	-	350	350	35	-
12/5-2.6	3,5	3,5	1,13	0,61	350	350	50	30
15/5-3.0	3,5	3,5	1,13	0,61	350	350	50	29
15/5-3.2	3,5	3,5	1,13	0,61	350	350	51	29
18/6-3.0	3,5	3,5	1,22	0,64	350	350	71	25
18/7-2.6	3,5	3,5	0,97	0,82	350	350	52	38
21/7-3.0	3,5	3,5	0,98	0,82	350	350	52	38
21/7-3.2	3,5	3,5	0,98	0,82	350	350	51	40
24/8-3.0	3,5	3,5	1,50	-	350	350	144	25
24/9-2.6	3,5	3,5	1,01	0,78	350	350	52	42
27/9-3.0	3,5	3,5	1,01	0,78	350	350	52	41
27/11-2.6	3,5	3,5	0,90	0,92	350	350	52	48
30/10-3.0	3,5	3,5	1,04	0,72	350	350	63	35
30/13-2.6	3,5	3,5	0,92	0,89	350	350	51	49





## Finnfoam lämmöneristyslevyjien tekniset ominaisuudet

## Finnfoam-lämmöneristyslevyjien tekniset tiedot

	FL300	FL300	FK300	FL400	FL400	FL500	FL700	CW-300	FL400 ura	FLK600	FK600	FLK900
Paksuus	20, 30, 40, 50 60, 70, 80, 100	50, 60, 70 80, 100	30, 50	30, 40, 50, 60, 70, 80, 100	50, 60, 70 80, 100, 120	50, 60, 70 80, 100	50	100	50, 70 80, 100	140, 210	210	210
Pituus x Leveys	2500 x 600	2485 x 585	2500 x 600	2500 x 600	2485 x 585	2500 x 600	2500 x 600	2500 x 600	2500 x 600	2600 x 600	2600 x 600	2600 x 900
Reunamuoto												
Lämmönjohtavuus [W/(m K)]	<70mm 0,035	<70mm 0,035	30 mm 0,032	<70mm 0,035	<70mm 0,035	<70mm 0,035			<70mm 0,035			
A <sub>Desired</sub>	0,035	0,037	0,032	0,035	0,037	0,035	0,035	0,037	0,035	0,035	0,035	0,035
A <sub>Design</sub> ns. kuvat osuhteet <sup>1)</sup>	0,035	0,037	0,035	0,035	0,037	0,035	0,035	0,037	0,035	0,035	0,035	0,035
A <sub>Design</sub> ns. kuvat osuhteet <sup>1)</sup>	0,035	0,037	0,035	0,035	0,037	0,035	0,035	0,037	0,035	0,035	0,035	0,035
A <sub>Design</sub> Routaeriste (salojittettu) <sup>2)</sup>	0,034	0,036	0,032	0,034	0,036	0,034	0,034	0,036	0,034	0,036	0,036	0,036
A <sub>Design</sub> Routaeriste (salojittamaton)	0,034	0,036	0,032	0,034	0,036	0,034	0,034	0,036	0,034	0,036	0,036	0,036
A <sub>10</sub>	0,029...0,035	0,030...0,035	0,032	0,029...0,035	0,030...0,035	0,030...0,035	0,033	0,030...0,035	0,030...0,035	0,033	0,033	0,033
Puristuslujuus (lyhytaikainen) (kPa)	300	300	300	400	400	500	700	300	400	300	300	300
Puristuslujuus (lyhytaikainen 45 vrk:n iässä) (kPa)	250	250	250	300	300	400	400	300	400	300	300	300
Puristuslujuus pitkäaikainen (kPa)	150	150	150	200	200	250	300	150	200	150	150	150
Kimmonmoduuli (kPa)	15000	15000	15000	25000	25000	30000	40000	15000	25000	15000	15000	15000
Leikkaislujuus (kPa)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Taivutuslujuus (kPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Vetolujuus (kPa)	300	300	300	350	350	400	500	300	350	300	300	300
Veden imeytyminen 28 vrk. (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Uopous- ja jäädytys (2 vuotta) (%)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
CE-määrin mukainen (%)	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7
Vesihöyryn läpäisevyys [kg/(m <sup>2</sup> s Pa)]	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>	<1,3 x 10 <sup>-12</sup>	<1,3 x 10 <sup>-12</sup>	<1,0 x 10 <sup>-12</sup>	<1,0 x 10 <sup>-12</sup>	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>	<1,3 x 10 <sup>-12</sup>	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>	<1,5 x 10 <sup>-12</sup>
Kapillaarisuus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Paloluokka	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Lämpölaajeneminen [mm/(m K)]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Sisällän päästöluokka	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1
Käyttölämpötila kuormittuna (C°)	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75

1) Eristeet muodostavat yhtenäisen rakenteen saunamaahdollia tiivistetyinä tai eristeseen on valettu tiivis pinta esim. maanvarainen laatta.

2) Käytetessä routaeristeenä keskilämpötila on -5 C°.

## Analyseissä käytetyt ortotrooppiset materiaaliarvot

Käytetyt materiaalitiedot										
Materiaali	E_1	E_2	E_3	G_12	G_31	G_23	nu_12	nu_13	nu_23	
Vaneri 4 mm koivu	9,0899 GPa	5,7851 GPa	3 GPa	0,403 GPa	0,10985 GPa	0,07 GPa	0,05	0,01	0,01	ESAComp
Vaneri 6 mm koivu	8,3674 GPa	6,5076 GPa	3 GPa	0,403 GPa	0,10985 GPa	0,07995 GPa	0,05	0,01	0,01	ESAComp
Vaneri 9+12 mm koivu	8,0089 GPa	6,863 GPa	3 GPa	0,403 GPa	0,13423 GPa	0,10563 GPa	0,05	0,01	0,01	ESAComp
Kertopuu S 21-90 mm	13,8 GPa	0,43 GPa	0,13 GPa	0,6 GPa	0,6 GPa	0,015 GPa	0,01	0,01	0,01	Metsäwood
Alapintalevy R2 2,0 mm	7,87 GPa	7,45 GPa	4 GPa	3,06154 GPa	2 GPa	2 GPa	0,3	0,3	0,3	Brianza Plastica & ES
Yläpintalevy WR 2,0 mm	7,95 GPa	7,55 GPa	4 GPa	3 GPa	2 GPa	2 GPa	0,3	0,3	0,3	Brianza Plastica & ES
	E	n	Vetolujuus	Puristuslujuus	Leikkauslujuus					
Finnfoam FI-300	0,015 GPa	0,45	300 KPa	300 KPa	300 KPa	Finnfoam & narvioitu				
	Veto/Puristus (MPa)			Leikkaus (MPa)						
Lattiaelementin suunta	X	Y	Z	12	23	31	ESAComp			
Vaneri 4 mm koivu	45,8/-31,8	9/-9	29,8/-20,2	9,5		2,77	ESAComp			
Vaneri 6 mm koivu	42,2/-29,3	9/-9	32,8/-22,8	9,5	1,78	3,2	ESAComp			
Vaneri 9+12 mm koivu	37/-28	9/-9	34,5/-24	9,5	2,3	2,75	ESAComp			
Alapintalevy R2 2,0 mm	90	40	100				Brianza Plastica & ESAComp			
Yläpintalevy WR 2,0 mm	113	40	114				Brianza Plastica & ESAComp			



## Kiilto Kestopur 200/90 -liiman tekniset ominaisuudet



## KESTOPUR 200/90

### 2-komponenttinen polyuretaaniliima

**OMINAISUUDET** Kestopur 200/90 on 2-komponenttinen, luotinvapaa polyuretaaniliima, joka muodostaa erittäin lujan, mutta silti elastisen ilmasauman. Kestopur 200/90 soveltuu hyvin sekä käsin- että koneelliseen levitykseen. Kovetteena käytetään Kestopur 200/S -kovetetta. Liima täyttää rakennusmateriaalin M1-päästöluokituksen.

**KÄYTTÖALA** Kestopur 200/90 soveltuu mm. puun, metallien, eristemateriaalien, PVC:n, polystyreenin, lasin, lasikuidun ja betonin ilmaukseen.

**TEKNISET TIEDOT \* JA SUOSITELTAVAT KÄYTTÖOLO-SUHTEET**

Ilmatyyppi	Polyuretaaniliima
Väri	belge
Viskositeetti (Brookfield RVT 20°C)	Hartsit: n. 17 000 mPas Kovete: n. 200 mPas
	Seos: n. 6900 mPas
Minäispaino	Hartsit: n. 1.60 kg/dm <sup>3</sup> Kovete: n. 1.20 kg/dm <sup>3</sup>
Shore D -kovuus <sup>1</sup>	60
Murtovenymä (DIN 53504) <sup>1</sup>	50 %
Murtolujuus (DIN 53504) <sup>1</sup>	5 N/mm <sup>2</sup>
Vetoleikkaisuus <sup>1</sup> :	
-punapyökki	15 N/mm <sup>2</sup>
-käsittämätön alumiini	7 N/mm <sup>2</sup>
-RST	13 N/mm <sup>2</sup>
Pot life (120 g:lla mitattuna)	n. 80 min
Avoin aika	max. 2 h sekoituksesta (23° C, RH 50 %)
Puristus aika	8 h 30 min / 20°C
Levitysmenetelmät	käsinlevitys tai 2-komponenttilaite
Levitysmäärä	200...600 g/m <sup>2</sup> materiaalista riippuen

**SEKOITUSSUHDE** 5 paino-osaa Kestopur 200/90 -hartsia + 1 paino-osa Kestopur 200/S -kovetetta

**KÄYTTÖOHJE** Liimattavien pintojen tulee olla puhtaat ja kuivat. Liimattavat pinnat puhdistetaan hapettumista hionalla, rasvasta ym. ilasta Kiilto Surface Cleanerilla. Huolellisesti puhdistettu pinta voidaan karhentaa ja primeroida Kiilto Cleaning Primerilla tarttuvuuden parantamiseksi. Hiontapöly on poistettava huolellisesti ennen ilmausta. Kestopur 200/90 -hartsit sekoitetaan ennen käyttöä. Kestopur 200/S -kovete lisätään hartsiin ja sekoitetaan, kunnes liima on väriltään tasaista. Liima levitetään lastalla tai muulla levityslaitteella toiseen tai molempiin liimattaviin pintoihin. Tuoreet ilmatähdät poistetaan kuivalla rievulla ja pinnat puhdistetaan Kesto Surface Cleanerilla tai 2K Cleanerilla. Kovettunut liima voidaan poistaa ainoastaan mekaanisesti. Suosittelemme ilmausta tehtäväksi huoneenlämpötilassa. Liiman avoimeen aikaan vaikuttavat lämpötila ja ilmankosteus. Liimaus voidaan tehdä myös kylmemmissä (jopa +10 °C), mutta tällöin puristus aika pidentyy oleellisesti ja levitettävyyttä heikkenee. Vastaavasti korotettu puristuslämpötila lyhentää puristus aikaa.

JATKUU

**Kiilto Kestopur 200/90 -liiman tekniset ominaisuudet**

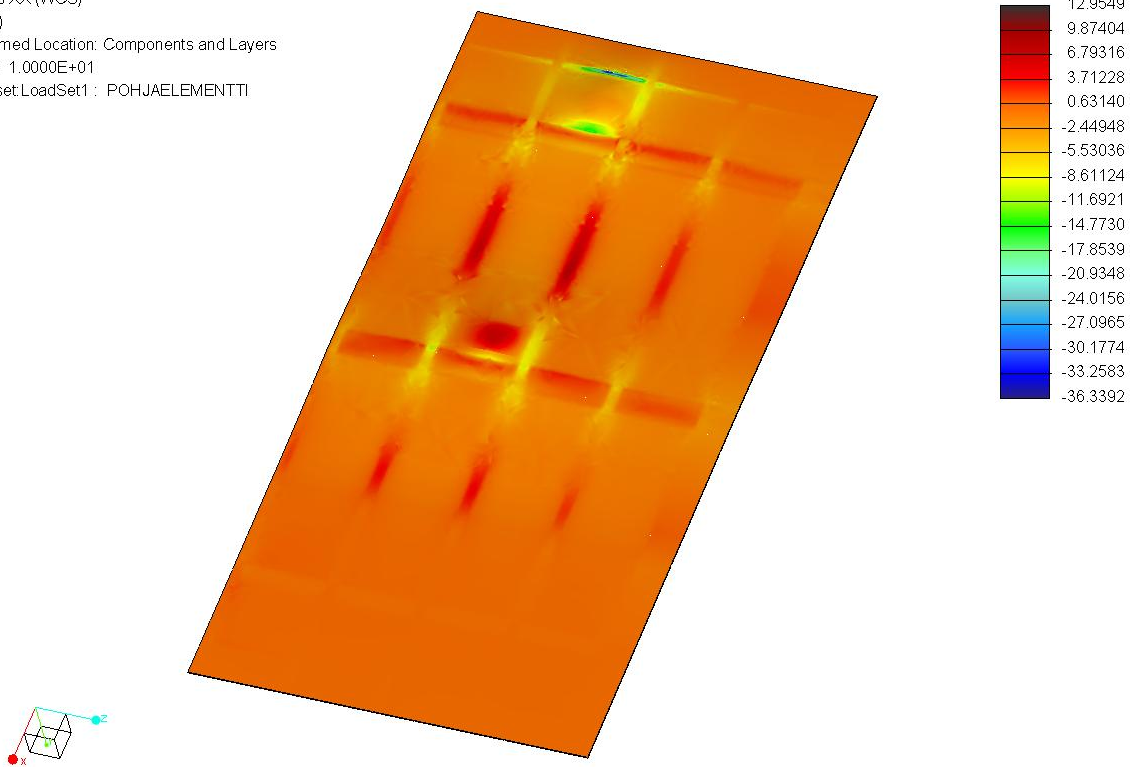
sivu 2

**KESTOPUR 200/90**

<b>KÄYTTÖ- JA YMPÄRISTÖ-TURVALLISUUS</b>	<p>Kestopur 200/90 -hartsi ei ole terveydelle haitallista. Kovete ja ilmseos ovat haitallisia. Kestopur 200/S -kovetetta ja ilmseosta käsiteltäessä on käytettävä riittävää henkilökohtaista suojavarustusta. Ruiskutettaessa ja yli +40 °C lämpötilassa on käytettävä hengityssuojainta ja huolehdittava riittävästä ilmanvaihdosta.</p> <p>Kestopur 200/S -kovetetta eikä ilmseosta saa päästää viemäriin. Pienet määrät kovetetta ja hartsia voidaan sekoittaa keskenään oikeassa suhteessa ja toimittaa kovettuneena kaatopaikalle. Suuret määrät tuotetta hävitetään toimittamalla se ongelmajättilden vastaanottopaikkaan.</p> <p>Tuotteesta on saatavissa käyttöturvallisuustiedote.</p>
<b>VARASTOINTI</b>	<p>Kestopur 200/90 -hartsi säilyy tiiviisti suljetussa alkuperäisastiassa +10 °C...+25 °C lämpötilassa kontissa (1000 l) 6 kk, pienemmissä astioissa 12 kk.</p> <p>Suojeltava jäätymiseltä. Pitkän varastoinnin jälkeen hartsi on sekoitettava ennen käyttöä.</p>
<b>LISÄTIETOJA</b>	<p>Suosituksemme perustuvat suorittamiimme kokeisiin sekä parhaisiin tietoihimme ja kansainvälisen tavan mukaan vastaamme vain tuotteen tasalaatuisuudesta.</p> <p>Lopputuloks on aina riippuvainen käytön alkaisista olosuhteista kuten materiaalien ja ilman kosteudesta sekä lämpötilasta, levitysmäärästä ja materiaalien esikäsittelyistä ja siksi antamiimme arvoja voidaan pitää vain lähtökohtana. Toimivuuden varmistamiseksi ja etenkin uusia materiaaleja, tuotantotaitteita tai menetelmiä käyttöönotettaessa on tehtävä asiaankuuluvat testit ennen tuotantomittakaavaista käyttöä.</p>
9/13	<p>Epäselvissä tapauksissa tehtaamme tekninen neuvonta on käytettävissänne.</p>

## Ydinaineen vaihdon jälkeiset kriittiset jännitykset

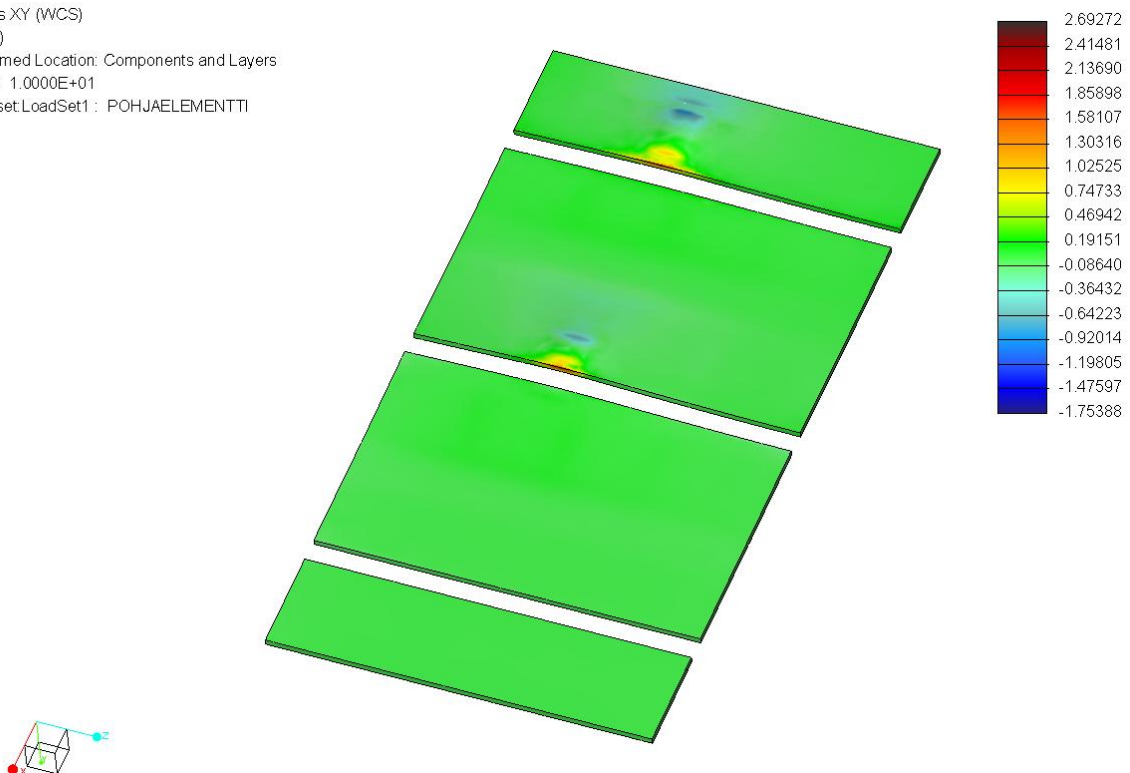
Stress XX (WCS)  
(MPa)  
Deformed Location: Components and Layers  
Scale 1.0000E+01  
Loadset: LoadSet1 : POHJAELEMENTTI



Kuva 1. 4 mm paksun vanerin alapinnalle kohdistuvat normaali-jännitykset leveysuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ).

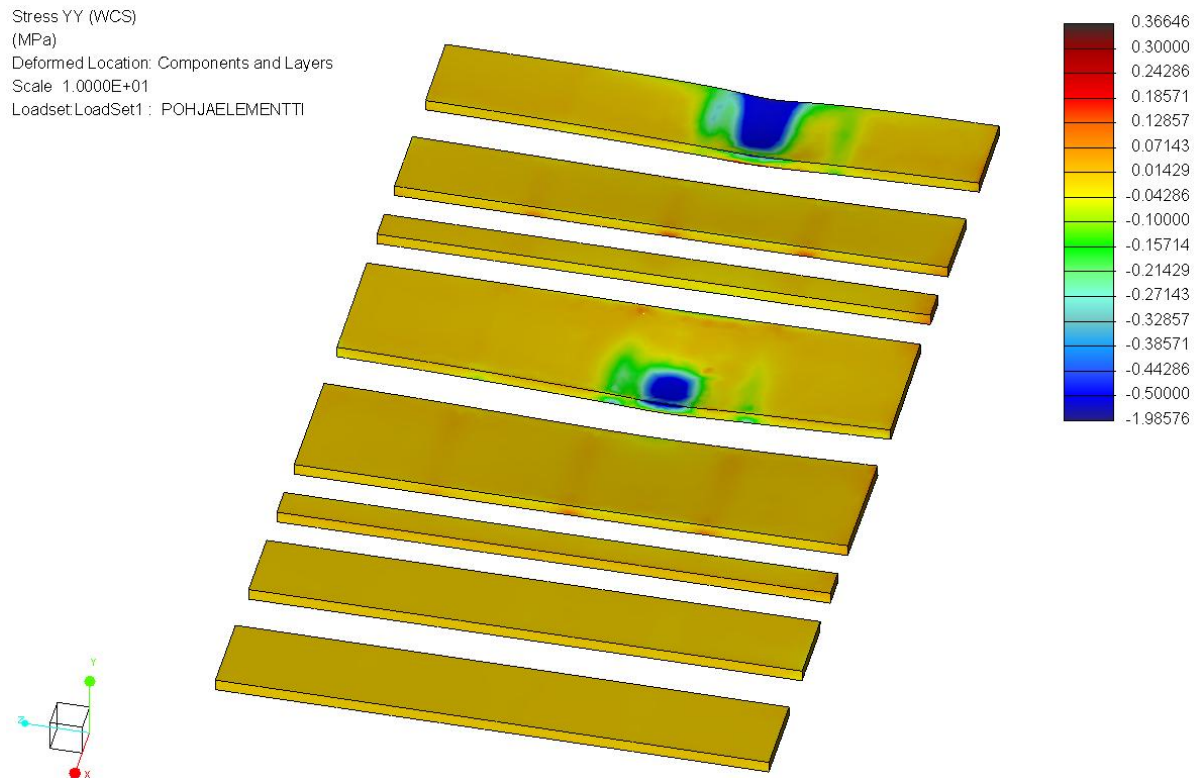
Kuormitus tapahtui reunalta. (Immonen 2014)

Stress XY (WCS)  
(MPa)  
Deformed Location: Components and Layers  
Scale 1.0000E+01  
Loadset: LoadSet1 : POHJAELEMENTTI

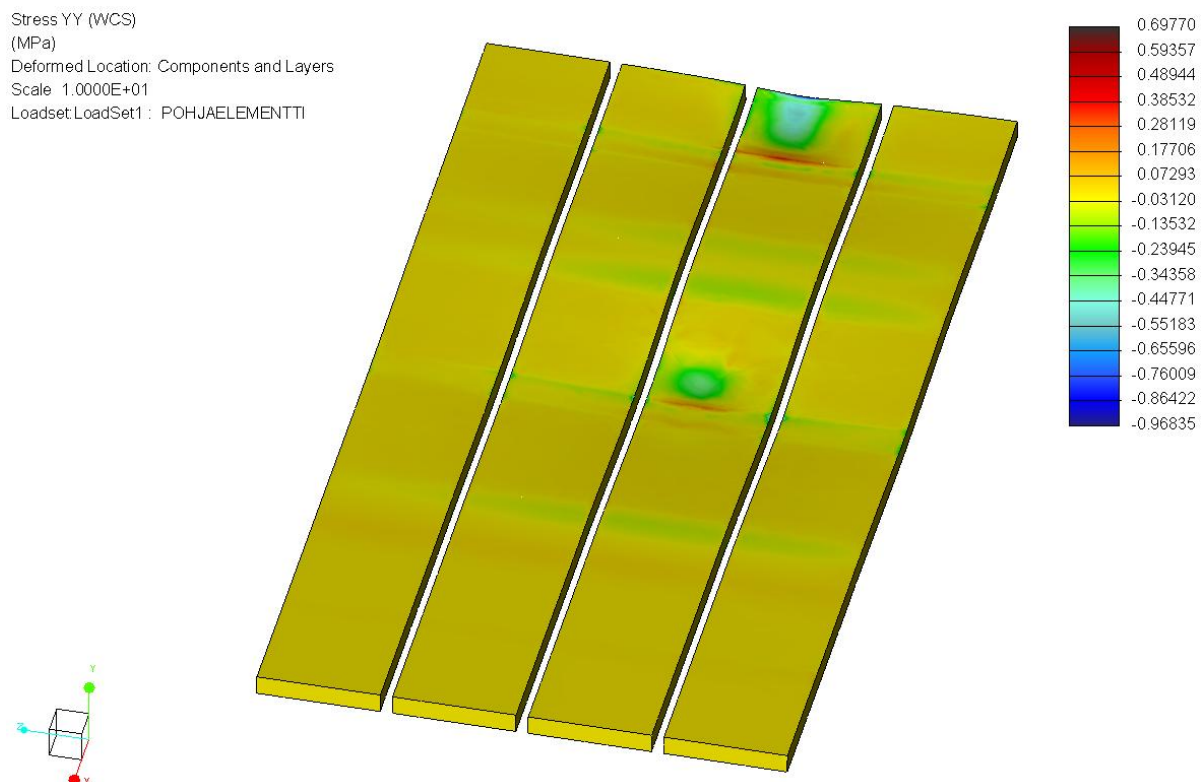


Kuva 2. 21 mm paksun vanerin alapinnalle kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Kuormitus tapahtui reunalta. (Immonen 2014)

### Ydinaineen vaihdon jälkeiset kriittiset jännitykset



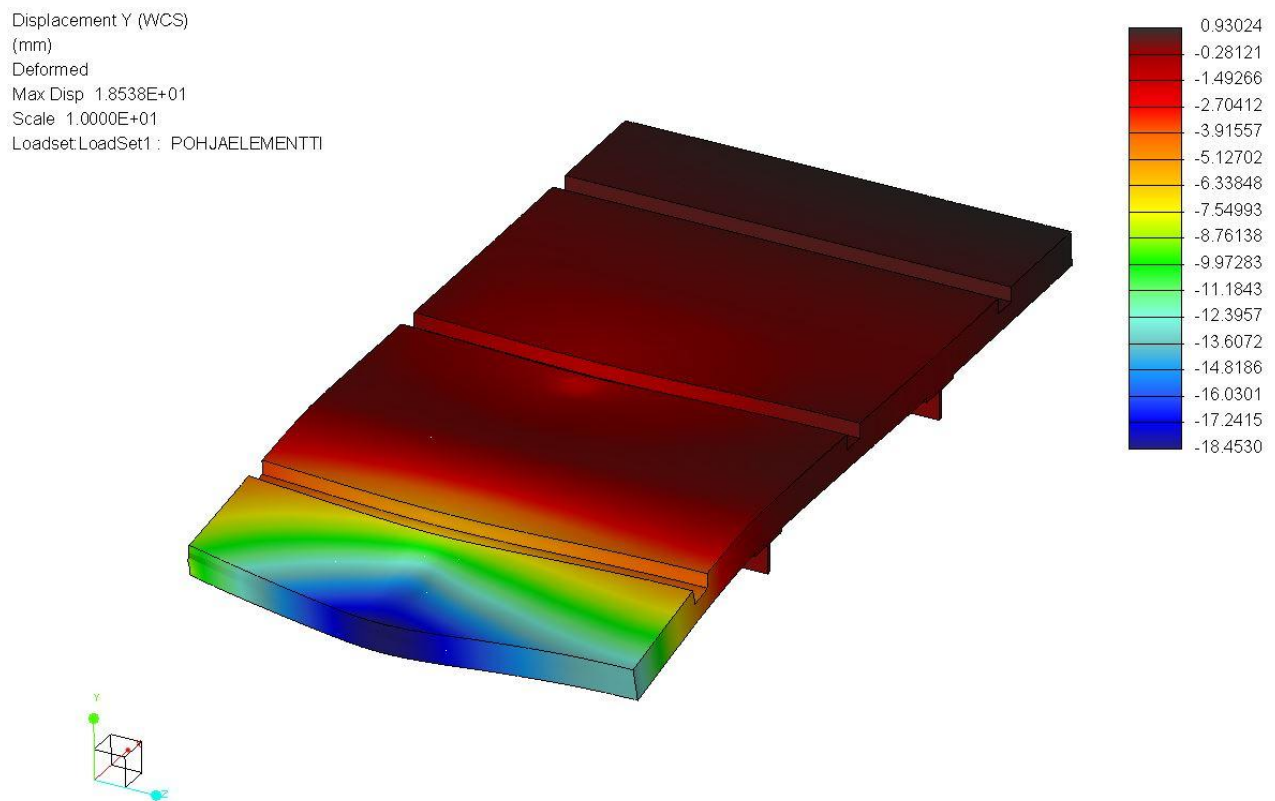
Kuva 3. Ylempiin eristeisiin kohdistuvat normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui reunalta. (Immonen 2014)



Kuva 4. Alempiin eristeisiin kohdistuvat normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui reunalta. (Immonen 2014)

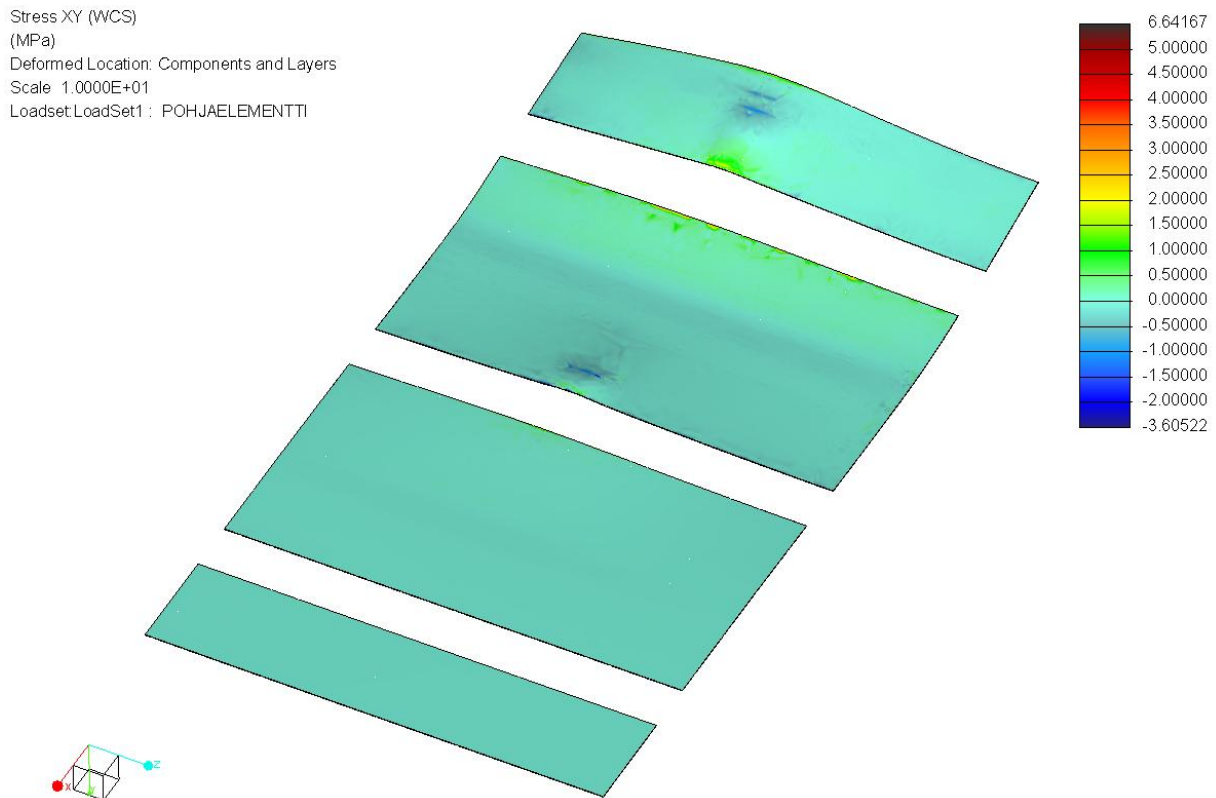
**Kriittiset jännitykset tilanteessa, jossa alavahvikkeiden tiheyttä lisätty ja eriste vaihdettu**

Kuormitus tapahtui nousevan seinänsivulle tilanteessa, jossa seinä oli avoinna.

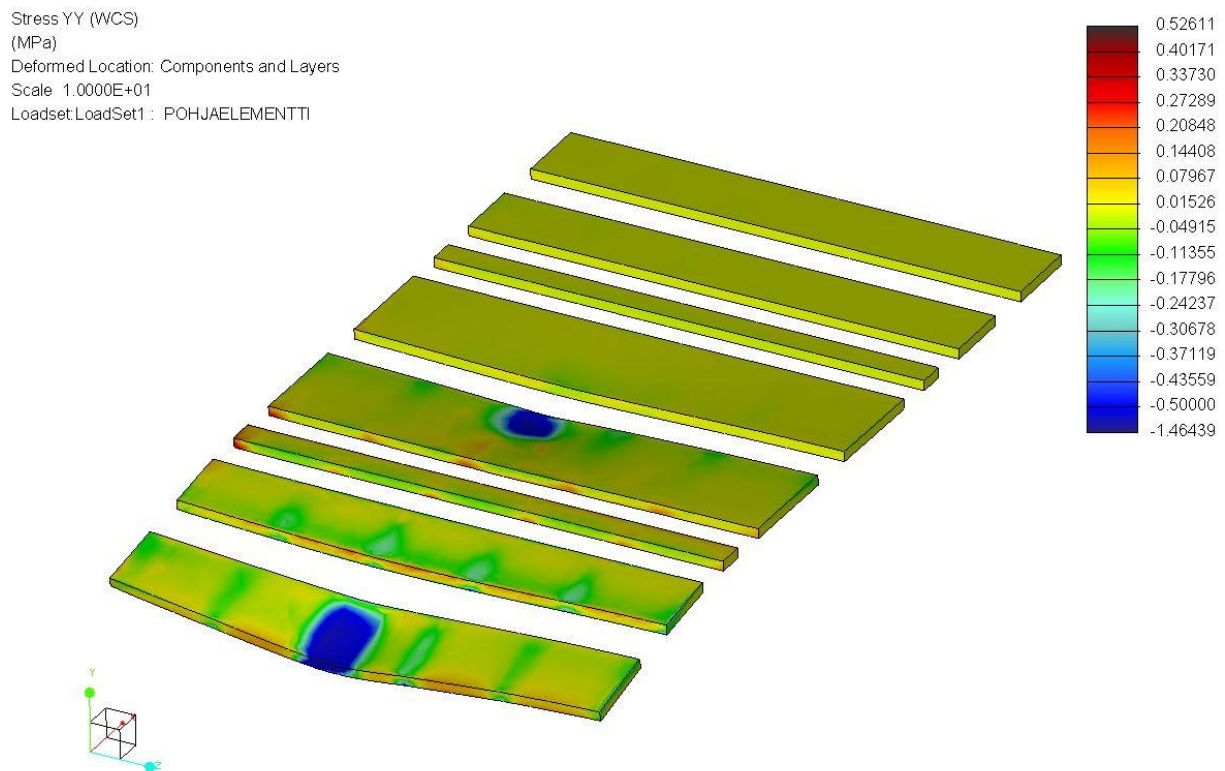


Kuva 1. Elementin siirtymät paksuussuunnassa. Kuormitus tapahtui nousevan seinän sivulta. (Immonen 2014)

### Kriittiset jännitykset tilanteessa, jossa alavahvikkeiden tiheyttä lisätty ja eriste vaihdettu

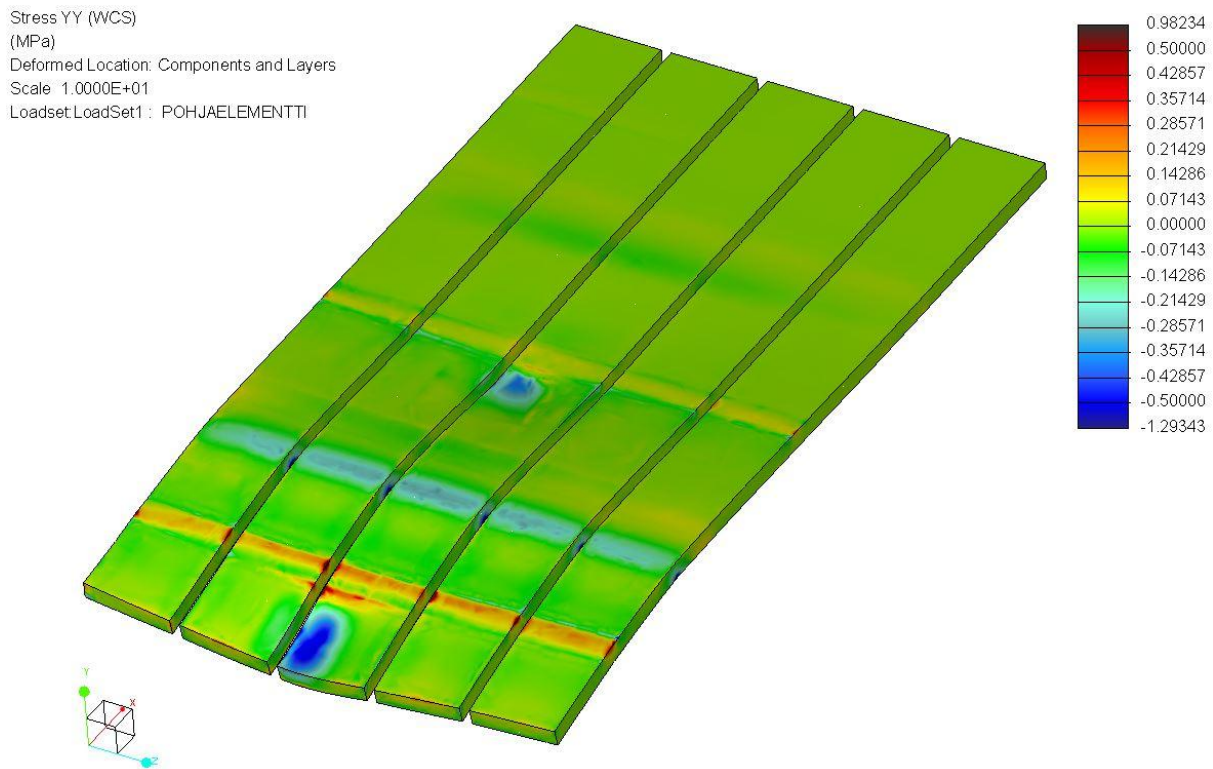


Kuva 2. 2 mm alalaminaattilevyyn kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän sivulta. (Immonen 2014)

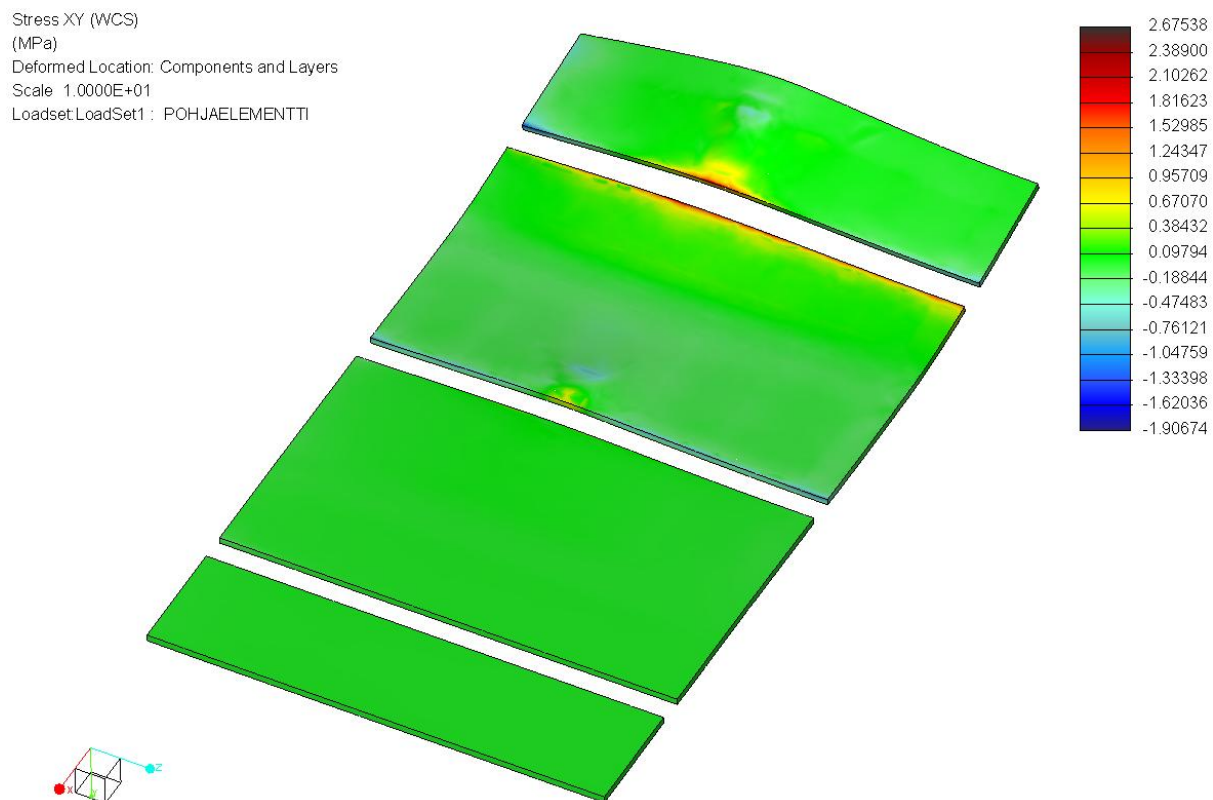


Kuva 3. Ylempiin eristeisiin kohdistuvat paksuussuuntaiset normaalijännitykset ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelta. (Immonen 2014)

### Kriittiset jännitykset tilanteessa, jossa alavahvikkeiden tiheyttä lisätty ja eriste vaihdettu



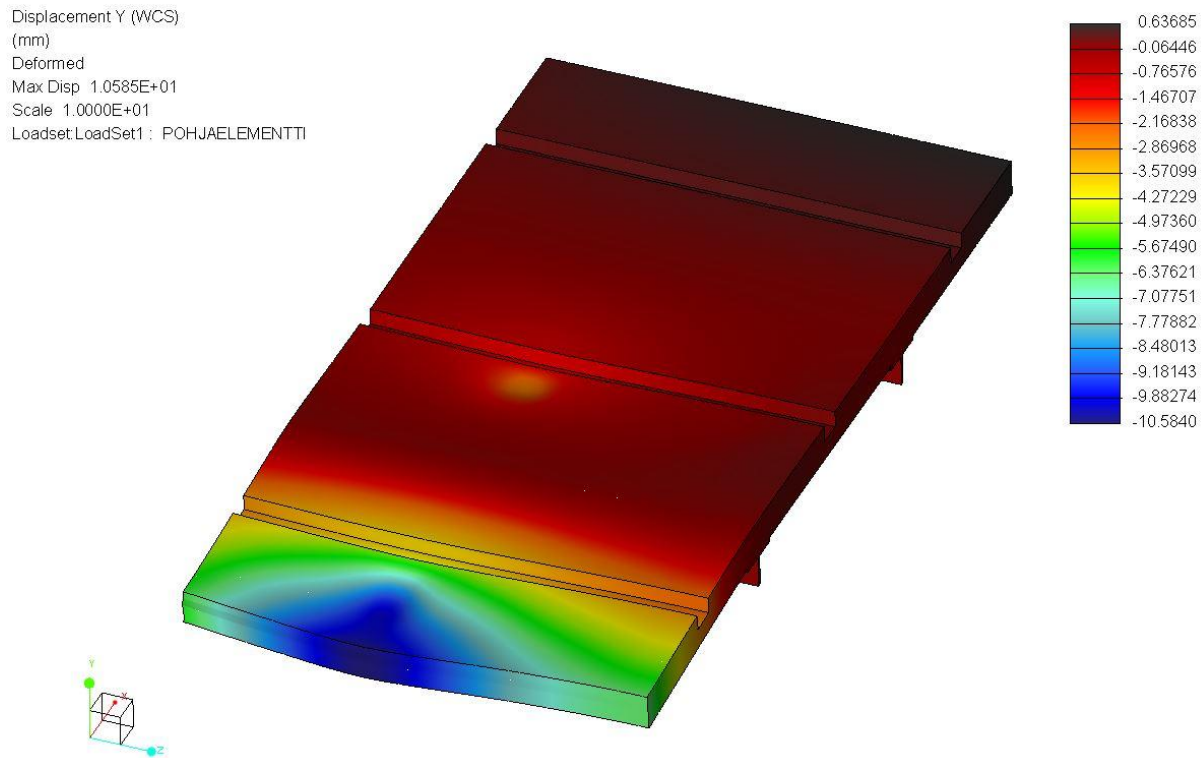
Kuva 4. Alempiin eristeisiin kohdistuvat normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelta. (Immonen 2014)



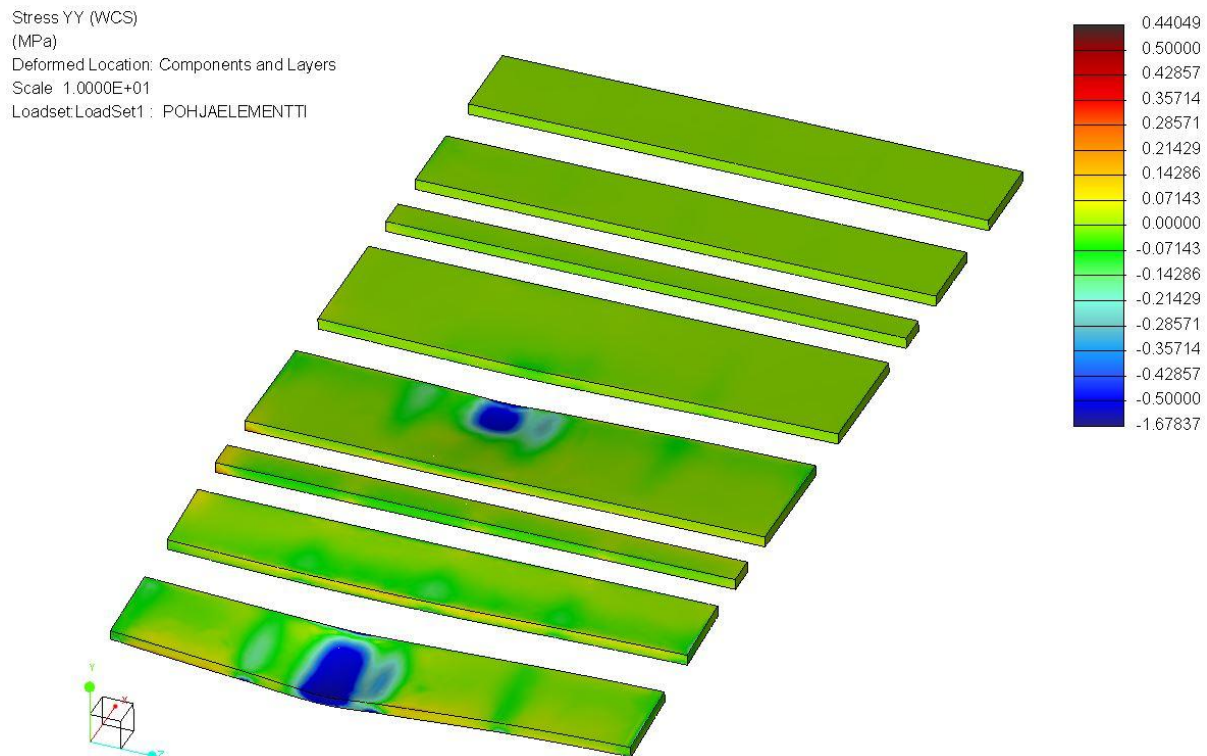
Kuva 5. 21 mm paksun vanerin alapinnalle kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelta. (Immonen 2014)

## Teräslevyillä vahvistetun lattiaelementin kriittiset jännitykset

Lattiaelementtiä kuormitettiin reunasta. Tilanne simuloitiin aukeavanseinän ollessa auki.



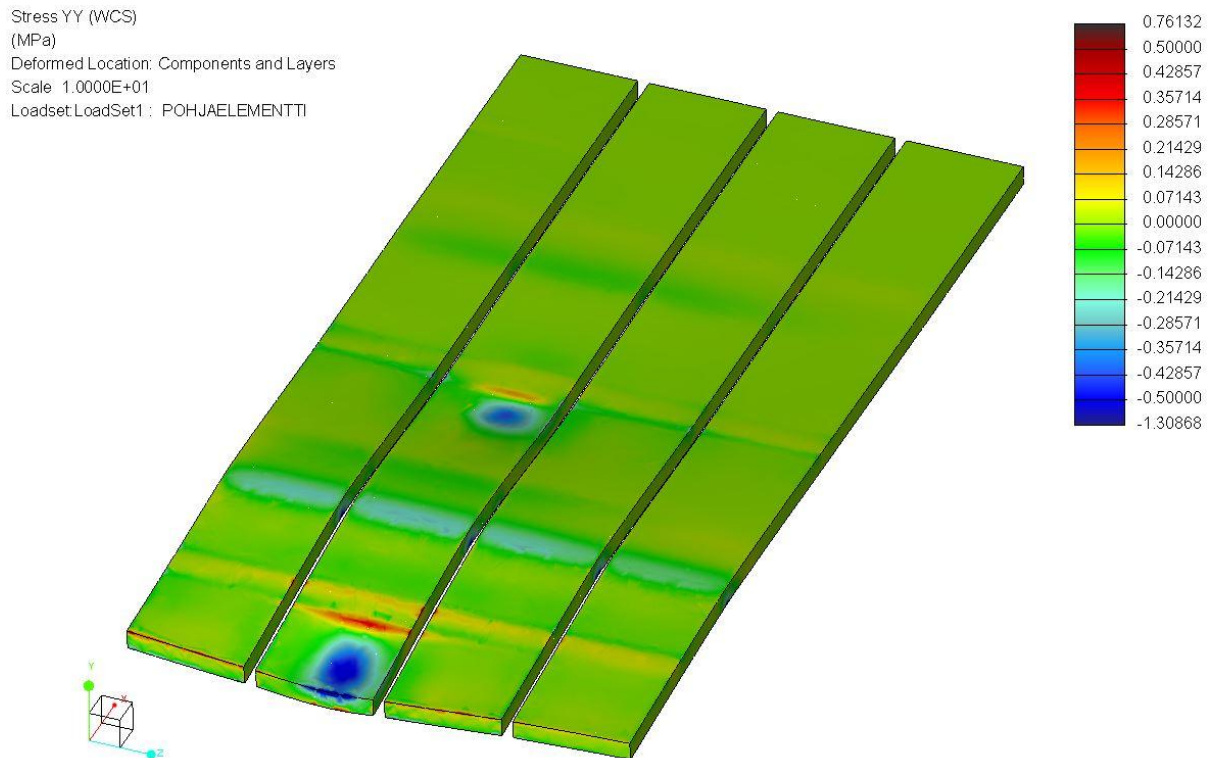
Kuva 1. Lattiaelementin siirtymät paksuussuunnassa. Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelta. (Immonen 2014)



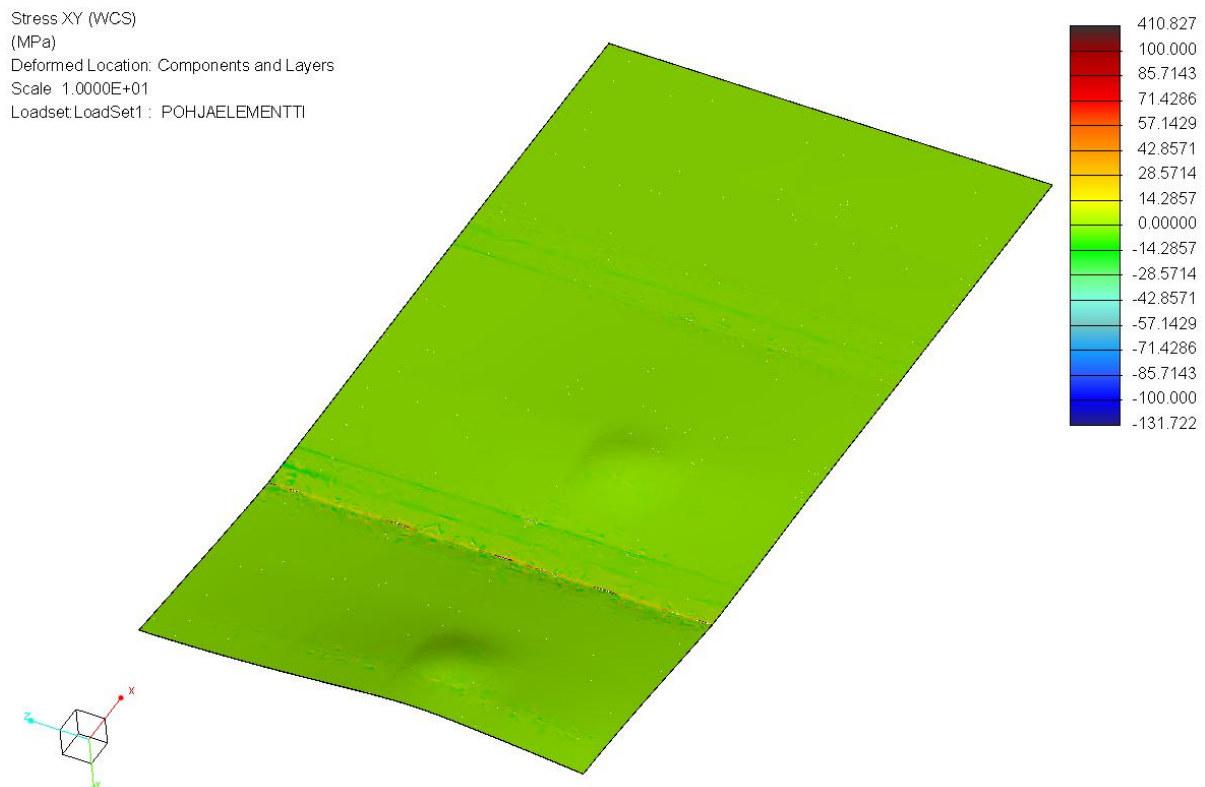
Kuva 2. Ylempiin eristeisiin kohdistuvat paksuussuuntaiset normaalijännitykset ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelta. (Immonen 2014)



### Teräslevyillä vahvistetun lattiaelementin kriittiset jännitykset

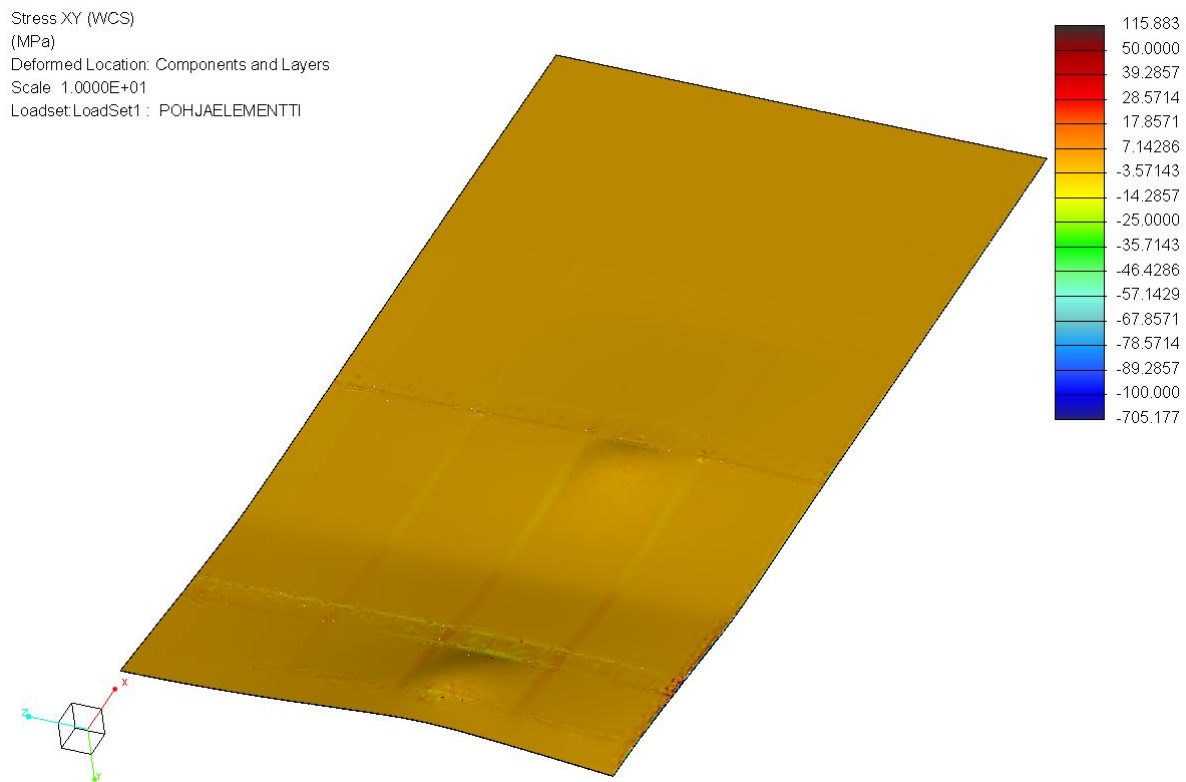


Kuva 3. Alempiin eristeisiin kohdistuvat normaalijännitykset paksuussuunnassa ( $\sigma_{YY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelle. (Immonen 2014)

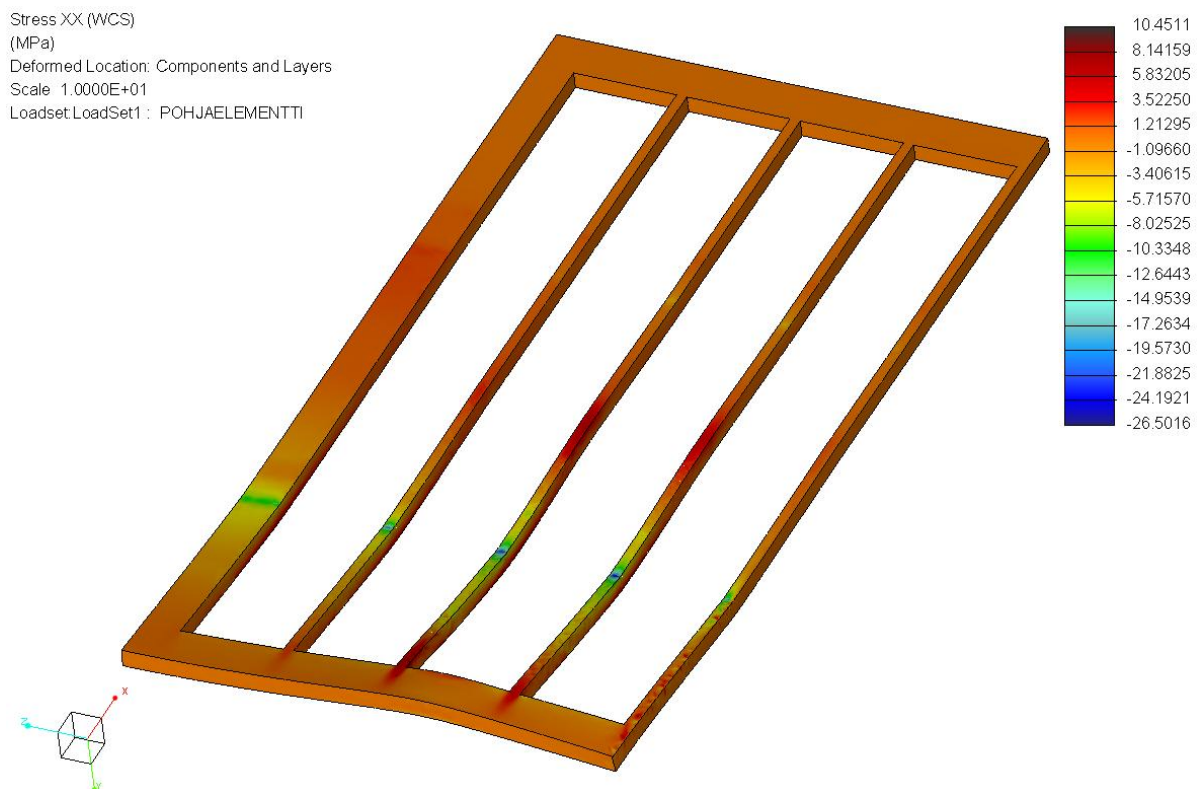


Kuva 4. Alapintalevyn alapinnalle kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelle. (Immonen 2014)

## Teräslevyillä vahvistetun lattiaelementin kriittiset jännitykset



Kuva 5. Välilevyn alapinnalle kohdistuvat leikkausjännitykset ( $\tau_{XY}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelle. (Immonen 2014)



Kuva 6. Alempaan liimapuupalkkikehikkoon kohdistuvat normaalijännitykset leveysuunnassa ( $\sigma_{XX}$ ). Kuormitus tapahtui nousevanseinän puolelta. (Immonen 2014)