

Valtteri Kiiskilä

**HYBRIDIRAKENTEEN KÄYTTÖ BIOMASSAN  
TIEKULJETUKSISSA**

**HYBRIDIRAKENTEEEN  
TIEKULJETUKSISSA**

**KÄYTTÖ**

**BIOMASSAN**

Valtteri Kiiskilä  
Opinnäytetyö  
Kevät 2020  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaation suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Valtteri Kiiskilä

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Hybridirakenteen käyttö biomassan tiekuljetuksissa

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Use of Hybrid Construction in Biomass Road Transportation

Työn ohjaajat: Kai Jokinen, Jari Outinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2020

Sivumäärä: 71 + 7 liitettä

---

Työn aiheena oli KOME Oy:n ketjupurkavan biomassaperävaunun tuotekehitys. Tuotekehityksellä tähdättiin vaunun kokonaisrakenteen kevennykseen. Taustalla oli toimeksiantajayrityksen aiempi ajatus siitä, etteivät komposiittikuormakorisen perävaunun ominaisuudet ole vielä täysimääräisesti käytössä.

Työn perustana on tieliikennelaki ja vaunun käyttötarkoitus. Kuormakorin alustavat maksimitat laskettiin kuormattavan materiaalin teknisten tietojen avulla. Tämän jälkeen suoritettiin esisuunnittelu, jonka avulla valittiin kehitettävä pohjarakenne. Vielä ennen yksityiskohtaista suunnittelua syvennyttiin kuormakorin valmistusmateriaalin ominaisuuksiin. Vaikka kuormakorin valmistusmateriaalista ei tässä työssä suunnitella mitään, on sen ominaisuuksien tunteminen kriittistä, koska pohjarakenteen suunnittelu nojaa kuormakorin kestävyteen.

Esisuunnittelun jälkeen tehtiin yksityiskohtainen suunnittelu. Suunnittelun mallinnus suoritettiin SolidWorks-ohjelmistolla. Yksityiskohtaisen suunnittelun apuvälineenä käytettiin kokonaisrakenteen FEM-analyysiä. Rakenteen analysoinnin jälkeen tuloksia tutkittiin, niiden perusteella tehtiin havainnot ja päädyttiin tiettyyn johtopäätökseen.

Lopputuloksena työssä saatiin tietoa rakenteen kehitysmahdollisuuksista ja vaihtoehto kehittämisen toteutukselle. Lopullinen päätös kehittämisestä ja vaunun lopullinen kehitystyö jää toimeksiantajayrityksen vastuulle. Tätä työtä voidaan käyttää tarvittaessa kehitystyön pohjana. Työn varsinaisten tulosten ohessa saatiin muutakin käyttökelpoista tietoa yrityksen käyttöön sekä lukuisia jatkokehitysideoita.

Materiaalitietoja, malleja tai tuloksia ei tässä työssä salassapitosyistä julkaista.

---

Asiasanat: tuotekehitys, FEM, komposiitit, perävaunut, raskas liikenne

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Mechanical Engineering department

---

Author: Valtteri Kiiskilä

Title of thesis: Use of Hybrid Construction in Road Transportation of Biomass

Supervisors: Kai Jokinen, Jari Outinen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2020

Pages: 71 + 7 appendices

---

The subject of this thesis was product development of a biomass trailer made by KOMET Oy. The goal was to reduce the overall weight of the trailer.

The designing was based on the Finnish traffic law and the purpose of use of the trailer. After the requirements of the traffic law had been clarified, the preliminary design was started. The detailed design was carried out with the SolidWorks design software after the preliminary design had been completed. After the designing had been completed, the effects of the new design were studied. This was the most demanding part of the thesis as the material properties and strength theory of the material of the cargo container were challenging. The effects were studied with the SolidWorks FEM-analysis.

The results will be only for the use of the client and therefore will not be published in this thesis.

The results of this thesis gave an insight for further product development of the biomass trailer. This thesis and the results can be used as a basis for the development. The client has expressed an interest in a product development project on this subject.

---

Keywords: product development, FEM, composites, land transport, trailers

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 TARVEKARTOITUS	10
3 KEVENNYKSEN KOHDISTAMINEN	11
4 LAIN MUKAISET VAATIMUKSET	13
4.1 Massa	13
4.2 Pituus	15
4.3 Leveys ja korkeus	16
4.4 Kääntyvyys	17
5 SUUNNITELTAVAN KONTIN MAKSIMIMITAT	20
5.1 Hakkeen tekniset tiedot	20
5.2 Vaunun omamassa	23
5.3 Kontin mitat	23
5.3.1 Leveys ja korkeus	23
5.3.2 Massa	23
5.3.3 Pituus	23
6 ESISUUNNITTELU	26
6.1 Toimintorakenne	26
6.2 Ratkaisuvaihtoehdon valinta	27
6.2.1 Morfologinen taulukko	27
6.2.2 Kokonaisratkaisuvaihtoehdot	27
7 KOMPOSIITTIMATERIAALIN OMINAISUUKSIA	28
7.1 Komposiitin rakenne	28
7.2 Komposiittien yleiset lujuusominaisuudet	28
7.3 Laskennassa käytettävien lujuusarvojen määrittäminen	30
7.4 Komposiitin teknisiä tietoja	32
7.4.1 Kokeellisesti testatut lujuusarvot	32
7.4.2 Valmiin laskentamallin lujuusarvot	32

8	YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU	33
8.1	Suunnittelun pohjatyöt	33
8.2	Kevennys luonnoksen perusteella	33
9	FEM-ANALYYSI	34
9.1	Kuorman asettelu	34
9.2	Simulaation ehdot, verkotus ja tuenta	35
9.3	FEM-analyysin tulokset	35
9.3.1	Jännityskomponentit	36
9.3.2	Murtokriteeritarkastelu	36
9.3.3	Päätelmät	37
10	YHTEENVETO	38
	LÄHTEET	39
	LIITTEET	41

## SANASTO

alleajosuojat = Suojat, jotka peittävät perävaunun etu- ja taka-akselistojen väliin muodostuvan alueen ja estävät pääsyn perävaunun alle.

FEM-analyysi = Finite Element Method -analyysi on lujuuslaskennassa käytetty tietokoneavusteinen lujuusanalyysi, jossa tarkastellaan rasitusten vaikutuksia kappaleeseen elementtiverkon avulla.

insertti = Komposiittikorin sisään laitettava levy, johon voidaan ruuveilla kiinnittää komponentteja. Materiaalina yleisimmin alumiini, teräs tai puu.

siltasääntö = Raskaassa liikenteessä tietyn tarkasteluvälin äärimmäisten akselien välinen etäisyys ja tälle tarkasteluvälille sallittu kuorma. Esimerkiksi koko yhdistelmän äärimmäisten akselien etäisyys tai perävaunun takatelin äärimmäisten akselien etäisyys. Siltasääntö nimen nimi johtuu siitä, että sääntö perustuu maantiesiltojen kuormitukseen.

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaajayritys on Haapajärven KOME Oy, jäljempänä pelkkä KOME Oy. KOME Oy on suomalainen raskaan kaluston perävaunuihin erikoistunut kuljetusratkaisujen valmistaja. Yrityksellä on neljä toimipistettä ympäri Suomen: Haapajärvellä, Iisalmessa, Rautalammilla ja Mikkelissä. KOME Oy:n ydintuotteina ovat puutavaraperävaunut, sorayhdistelmät ja kuvan 1 kaltaiset biomassayhdistelmät. Sora- ja biomassatuotteissa yritys ei valmista autoja, ainoastaan autojen päällysrakenteita. Lisäksi KOME Oy valmistaa asiakkaan tarpeisiin räätälöityjä ratkaisuja. (KOME Oy, linkit Yritys.)



*KUVA 1. KOME Oy:n valmistama biomassayhdistelmä (KOME Oy, linkit Tuotteet -> Turve-haketuotteet -> Kuvat-turve-haketuotteet)*

Tässä opinnäytetyössä perehdytään KOME Oy:n komposiittirakenteisen ketjupurkuisen biomassaperävaunun kehittämiseen kevyemmäksi. Tämä opinnäytetyö ei ole ensimmäinen perehtyminen aiheeseen, vaan kehitysajatuksen taustalla on aikaisempi idea aiheesta. Aikaisemmin KOME Oy ja yritykselle alihankintana komposiittikoreja valmistanut yhtiö olivat sitä mieltä, että komposiittirakenteen hyötyjä ei ole vielä otettu täysimääräisesti käyttöön, ja siksi yritykset kehittivät yhdessä tulevaisuuden versiota komposiittikorisesta biomassaperävaunusta. Kehitystyö jäi kuitenkin silloin kesken, ja nyt KOME Oy:n



organisaatiomuutosten jälkeen yrityksessä haluttiin keskittyä katsomaan eteenpäin ja kehittämään tuotteita, joten aihe nousi jälleen ajankohtaiseksi.

## **2 TARVEKARTOITUS**

Poistettu salassapitosyistä.

### 3 KEVENNYKSEN KOHDISTAMINEN

Poistettu salassapitosyistä.

#### Kevennyksen määrä ja hyöty

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Mikäli vaunun omamassaa voitaisiin keventää esimerkiksi 5 %, olisi sillä merkittäviä vaikutuksia kuljetusyrittäjille. Jos ajatellaan, että kuljetusyrittäjälle maksetaan kuorman kuljettamisesta  $X$  määrä euroja irtokuutiota kohden ja kuormia on vuodessa määrän  $Y$  verran, joista jokaiseen mahtuu  $N$  määrä kuutioita. Tällöin vuosittaiseksi tulokseksi  $T$  muodostuu kaavan 1 mukainen määrä.

$$T = X * N * Y \quad \text{KAAVA 1}$$

$X$  = hakkeen hinta irtokuutiolta

$N$  = kuormaan mahtuvat kuutiot

$Y$  = kuormien määrä vuodessa

Kaavasta 1 muokattuna tulos kevennetyllä vaunulla on kaavan 2 mukainen.

$$T_2 = X * (N + N_L) * Y \quad \text{KAAVA 2}$$

$N_L$  = kuormaan mahtuvat lisäkuutiot

Kun edellisissä kaavoissa käytetty muuttuja  $N$  voidaan kirjoittaa kaavan 3 mukaisesti.

$$N = \frac{(K - m_o)}{\rho_h} \quad \text{KAAVA 3}$$

$K$  = vaunun maksimikantavuus (kg)

$m_o$  = vaunun omamassa (kg)

$\rho_h$  = hakkeen tiheys (kg/i-m<sup>3</sup>)

Kaavan 3 avulla kaavat 1 ja 2 voidaan saattaa muotoon.

$$T = X * \left( \frac{K - m_o}{\rho_h} \right) * Y \quad \text{KAAVA 4}$$

ja

$$T_2 = X * \left( \frac{K - m_o + m_o - m_o * m_s \%}{\rho_h} \right) * Y$$

*KAAVA 5*

## 4 LAIN MUKAISET VAATIMUKSET

Tässä työssä käytetyt lakien ja asetusten vaatimukset ovat valtioneuvoston asetuksen 31/2019 mukaiset. Asetus on julkaistu 17.1.2019 ja on voimassa toistaiseksi. Asetuksessa tehdyt muutokset ovat tulossa tieliikennelakiin varsinaisena lakimuutoksena 1.6.2020. Asetuksessa määritellyt kohdat tulevat lakiin sisällöllisesti miltei sellaisenaan. Pieniä muutoksia on tulossa kirjoitusasuun ja joitain kohtia selvennetään. Suurin tulossa oleva muutos, joka mahdollisesti koskettaa tätä työtä on vetoauton viimeisen telin ja perävaunun ensimmäisen telin välinen siltasääntö. Huolimatta lakimuutoksesta tämä opinnäytetyö pystytään toteuttamaan valtioneuvoston asetuksen 31/2019 tiedoilla ilman, että tässä työssä tehty suunnittelu on vanhentunutta 1.6.2020.

### 4.1 Massa

Asetuksessa vetoauton kokonaismassa rajoitetaan 31 tonniin neliakselisena ja 42 tonniin viisiakselisena. Neliakselisen vetoauton kokonaismassa voi olla 35 tonnia, jos sen vetävä akseli on varustettu paripyörin ja ilmajousitettu tai varustettu ilmajousitusta vastaavaksi tunnustetulla jousituksella tai jos kukin vetävä taka-akseli on varustettu paripyörillä eikä yhdellekään akselille kohdistuva massa ylitä 10,5 tonnia. Varsinaiselle perävaunulle ei määritellä ehdotonta ylärajaa. Auton ja varsinaisen perävaunun muodostaman yhdistelmän maksimimassaksi määritellään kuitenkin 76 tonnia tietyillä akselimäärillä. 76 tonnin yhdistelmämassaan ylletään joko vähintään 11- tai 9-akselisena konfiguraationa, mikäli jälkimmäisessä vähintään 65 % perävaunun massasta kohdistuu akseleille, jotka on varustettu paripyörin. (Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 31/2019 31.1, 23.1§.)

Massoja määritellessä täytyy varsinaisten maksimimassojen lisäksi huomioida asetuksen asettamat säännöt akselivälien ja massan suhteelle. Sallittu maksimimassa riippuu äärimmäisten akselien välisestä etäisyydestä niin vetoautossa, perävaunussa kuin näiden yhdistelmässäkään. Tätä massan ja akselien etäisyyden välistä yhteyttä kutsutaan ns. siltasäännöksi.

Massan määrää rajoitetaan myös telikohtaisesti. Telikohtaiset massat määräytyvät auton, vaunun ja yhdistelmän tapaan akselien määrällä ja niiden välisellä etäisyydellä. Esimerkiksi perävaunun kolmiakselisen telin maksimikantavuus on 24 000 kg vain, jos peräkäisten akselien väli on yli 1,3 m. Näin ollen telimassat muodostavat ylärajan perävaunun kantavuudelle. Tietyistä akselikonfiguraatioista muodostuu 5-akselisen perävaunun suurimmaksi mahdolliseksi massaksi 42 000 kg ja 6-akselisen vaunun massaksi 48 000 kg. (A 31/2019 20.1, 20.2, 20.3 §:t.) Perävaunuissa ei ole käytössä samaa massan laskentatapaa kuin vetoautossa ja koko yhdistelmässä.

Asetus määrää vetoauton maksimimassaksi neliakselisena 31 tonnia ja viisiakselisena 42 tonnia. Lisäksi massa ei saa ylittää määrää, joka saadaan lisäämällä 20 tonniin jokaiselta 0,10 metriltä, jonka auton äärimmäisten akselien välinen etäisyys ylittää 1,80 metriä, 320 kilogrammaa, jos auto on neliakselinen ja 350 kilogrammaa, jos auto on viisiakselinen. (A 31/2019 21.2§.)

Varsinaisen perävaunun osalta määrätään, että varsinaisen perävaunun massa ei saa ylittää määrää, joka saadaan lisäämällä 20 tonniin 350 kilogrammaa jokaiselta 0,10 metriltä, jonka perävaunun äärimmäisten akselien välinen etäisyys ylittää 1,80 metriä (A 31/2019 22§).

Koko yhdistelmää koskeva sääntö kertoo, että massaltaan yli 44 tonnin ajoneuvoyhdistelmän massa ei saa ylittää määrää, joka saadaan lisäämällä 20 tonniin 320 kilogrammaa jokaiselta 0,10 metriltä, jonka ajoneuvoyhdistelmän äärimmäisten akselien väli ylittää 1,80 metriä (A 31/2019 23.4§).

Kaikkien tapausten sääntöjä voidaan kuvata samalla yhtälöllä, joka voidaan johtaa asetuksen 31/2019 tekstistä. Yhtälö on esitetty kaavassa 7.

$$m_{kok} = m_p + \frac{(l-1,8 m) \times m_l}{0,1 m} \quad \text{KAAVA 7}$$

$m_{kok}$  = suurin sallittu kokonaismassa (kg)

$m_p$  = perusmassa, jonka päälle lisäys tehdään (kg)

$m_l$  = tapauskohtaisesti lisättävä massa (kg)

$l$  = äärimmäisten akseleiden välinen etäisyys (m)

Kaavasta 7 voidaan järjestellä funktio kaavaan 8, jolla voidaan laskea suoraan äärimmäisten akselien välinen minimietäisyys tietylle kokonaismassalle.

$$l = \frac{(m_{kok} - m_p) \times 0,1 m + 1,8 m \times m_l}{m_l}$$

KAAVA 8

$l$  = äärimmäisten akselien välinen etäisyys (m)

$m_{kok}$  = suurin sallittu kokonaismassa (kg)

$m_p$  = perusmassa, jonka päälle lisäys tehdään (kg)

$m_l$  = tapauskohtaisesti lisättävä massa (kg)

Vetoauton massaa tarkastellessa saadaan kaavalla 8 laskettua neliakselisen auton 31 tonnin maksimimassalla minimiääriakseliväliksi 5,238 metriä. Viisiakselisen vetoauton 42 tonnin maksimimassalla ääriakseliväliksi saadaan 8,086 metriä. 76 tonnin kokonaismassaiselle ajoneuvoyhdistelmälle äärimmäisten akselien minimietäisyydeksi muodostuu 19,3 metriä.

Ajoneuvoyhdistelmän akselivälejä määrittää lisäksi vielä yksi sääntö, joka vaikuttaa vetoauton pituuteen ja vetolaitteiston sijoittamiseen. Mikäli yhdistelmän kokonaismassa on suurempi kuin 40 tonnia, auton takimmaisen ja massaltaan yli 10 tonnin perävaunun etummaisen akselin väli on oltava vähintään 3,0 metriä (A 31/2019 23.5§). Tähän kohtaan on mahdollisesti tulossa muutos 1.6.2020, jolloin 3,0 metrin kiinteä etäisyys vaihtuu samaan etäisyysmääritelmään kuin viisiakselisessa vetoautossa.

Kokonaismassa määrittää akselivälien lisäksi kuinka suuri osa massasta on kohdistuttava millekin akselille sekä sen, kuinka paljon tehoa auton moottorissa on oltava. Yli 68 tonnin yhdistelmissä yhdistelmän massasta 20 % on kohdistuttava vetäville akseleille ja 9 % ohjaaville akseleille. Moottoritehoa on oltava yli 44 tonnin ajoneuvoyhdistelmissä vähintään 5 kilowattia jokaista yhdistelmämassan tonnia kohti. (A 31/2019 23.6 ja 23.7 §:t).

## 4.2 Pituus

N3 -luokan, eli kokonaismassaltaan yli 12 tonnin, kuorma-auton ja yhden tai useamman perävaunun yhdistelmän maksimipituus on 34,50 metriä, mistä vetoauton ohjaamon takana olevien kuormatilojen sisäpituuksien summa saa olla maksimissaan 29,24 metriä (A

31/2019 24.2§). Huomioitavaa suunnittelussa on, että yli 28 metriä pitkiin ajoneuvoyhdistelmiin asetus velvoittaa tietyn lisälaitteiston. Yli 28 metriä pitkissä yhdistelmissä on täyttyvä seuraavat kohdat:

- epäsuoran näkemisen laitteet, joilla kuljettaja näkee koko yhdistelmän sisäkaarteiden puoleisen sivun ja sen läheisen alueen 26 §:n 2 tai 3 momentin mukaisessa käännöksessä molempiin suuntiin käännettäessä
- tietyissä tapauksissa vetoautossa kehittynyt hätäjarrutusjärjestelmä ja kaistavahtijärjestelmä
- elektroninen ajonvakautusjärjestelmä ja sähköohjatut jarrut kaikissa yhdistelmän ajoneuvoissa
- kuljettajalla tieto kullekin yksittäiselle akselille ja telille kohdistuvasta massasta; vetoajoneuvon osalta kuitenkin vain, jos akseli on ilmajousitettu. (A 31/2019 33.2§.)

Tässä työssä keskitytään vetoauton ja yhden varsinaisen perävaunun yhdistelmään, jolloin vetoauton maksimimita on 13,00 metriä ja yli 22 metrin pituisessa ajoneuvoyhdistelmässä käytetyn varsinaisen perävaunun maksimimita on 16,00 metriä etuakseliston kääntöpisteestä perävaunun takimmaiseen osaan. On lisäksi huomioitava 2,04 metrin etäisyys mihin tahansa etuakseliston kääntöpisteen etupuolella olevaan kohtaan pois lukien vetoaisa. (A 31/2019 24.1, 24.2 §:t.) Edellä mainitut vaatimukset huomioon ottaen perävaunun teoreettinen maksimimita on 18,04 metriä.

### **4.3 Leveys ja korkeus**

Auton ja perävaunun suuri sallittu korkeus on 4,40 metriä. Kyseinen mita ei saa ylittyä ajoneuvon ollessa kuormaamaton tai akselinnostolaitteiden ollessa yläasennossa. (Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä 4.12.1992/1257 4:25.1§.)

Samana pykälän 2 momentissa määritellään ajoneuvon suurin sallittu leveys, joka on 2,60 metriä. Kiinteältä rakenteeltaan yli 22,00 metrin pituisessa yhdistelmässä käytettävän muun kuin lämpöeristetyn ajoneuvon sekä linja-auton suurin sallittu leveys on 2,55 metriä.

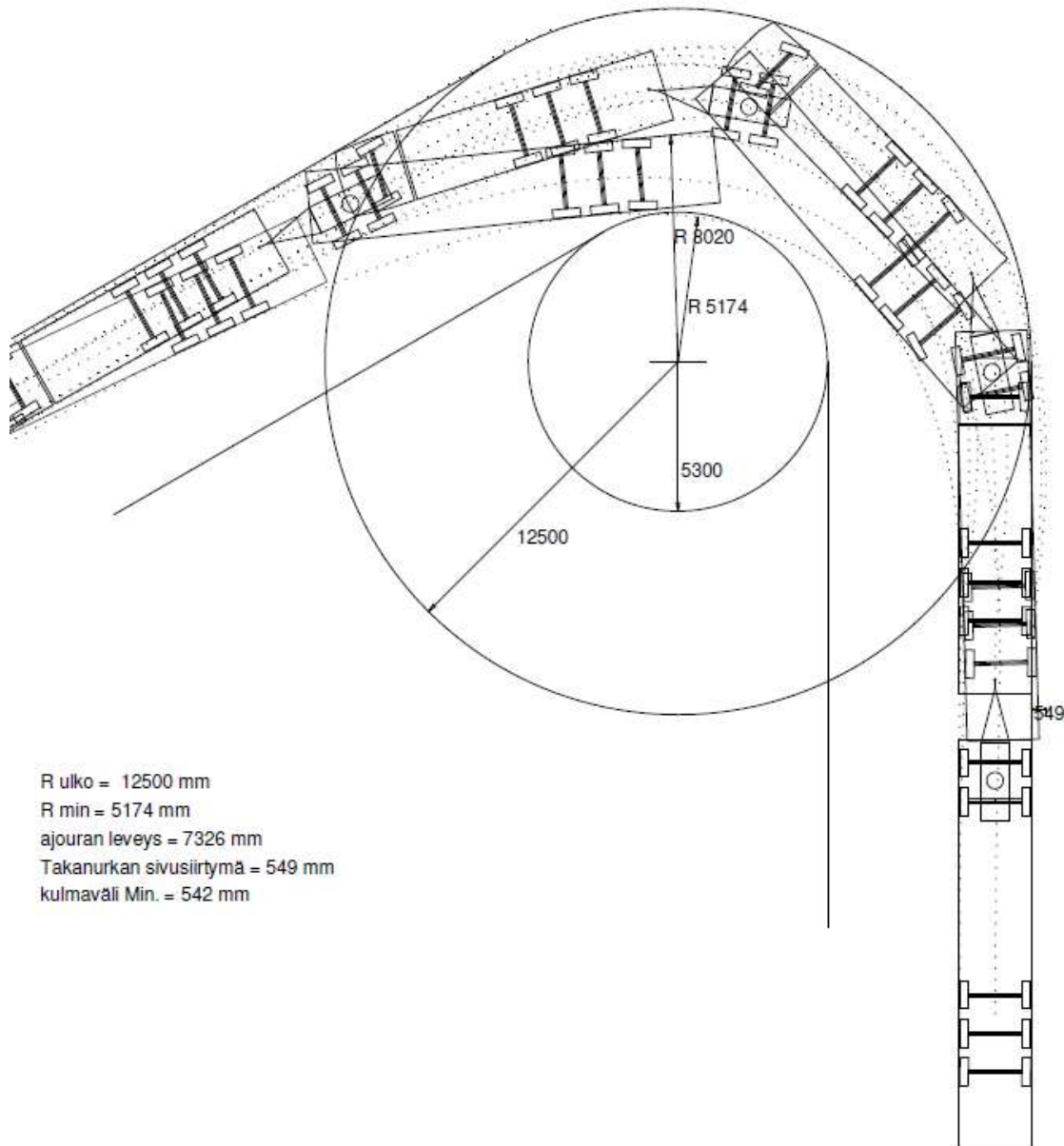


#### 4.4 Kääntyvyys

Pitkissä yhdistelmissä tarkkaillaan pituuden lisäksi yhdistelmän kääntyvyyttä. Yli 18,75 metriä pitkän auton ja yhden tai kahden perävaunun muodostaman yhdistelmän tulee olla siten kääntyvä, että uloimman etukulman kulkiessa 12,50 metrin säteistä ympyrän kaarta pitkin sisäsivu kulkee vähintään 2,00 metrin säteistä kaarta pitkin. Tällaisessa yhdistelmässä käytettävässä varsinaisessa perävaunussa etäisyys etuakseliston kääntöpis- teestä taka-akseliston ohjautumattomien akselien keskiviivaan saa olla enintään 8,15 metriä. (A 31/2019 26.2§.)

Samana pykälän kolmannessa momentissa määrätään, että sen estämättä, mitä 2 mo- mentissa säädetään, auton ja yhden tai useamman perävaunun yli 18,75 metriä pitkän yhdistelmä saa olla siten kääntyvä, että uloimman etukulman kulkiessa 12,50 metrin sä- teisen ympyrän kaarta pitkin 120 asteen käännöksen ja ajoneuvoyhdistelmän jatkaessa suoraan yhdistelmän sisäsivu kulkee vähintään 4,0 metrin säteistä kaarta pitkin. Mikään perävaunun takakulma ei saa siirtyä yli 0,80 metriä ulkokaarten suuntaan lähdetessä tähän käännökseen. Jos edellä tarkoitettu perävaunun sivusiirtymä on alle 0,80 metriä, saa yhdistelmän sisäsivu kulkea sen erotuksen verran 4,00 metrin säteistä kaarta pie- nempisäteistä kaarta pitkin, kuin mitä takakulman sivusiirtymä alittaa 0,80 metriä. Yhdis- telmän sisäsivun tulee kuitenkin kulkea vähintään 3,7 metrin säteistä kaarta pitkin. (A 31/2019 26.3§.)

Kuvassa 2 on havainnollistettu 120 asteen käännös. Kuvassa on erään yhdistelmän käännös, joka täyttää asetuksen kriteerit, koska pienemmän käänntöympyrän halkaisija jää 5174 millimetriin ja maksimiperäylitys on 549 mm.



*KUVA 2. Erään yhdistelmän 120 asteen käännös*

Kääntyvyys ehdot rajoittavat yhdistelmässä käytettäviä mittoja, ja ne täytyy huomioida tarkasti. Jos esimerkiksi pitkässä varsinaisessa perävaunussa täytyisi asetuksen 31/2019 26:n pykälän 2 momentin ehdot, täytyy sen lisäksi täyttää kolmannessakin momentissa säädetyn takanurkan sivusiirtymän vaatimukset. Sivusiirtymän rajoitukset estävät esimerkiksi sen, että voisi suunnitella 16 metriä pitkän varsinaisen perävaunun, missä akselit ovat toisen momentin mukaisesti sijoitettu ja peräylitystä jäisi useita metrejä. Tässä tapauksessa takanurkan siirtymä ei välttämättä pysyisi sallituissa rajoissa ja perävaunun mittaa lyhentämällä takanurkan siirtymä saataisiin rajojen sisäpuolelle.

Auton ja varsinaisen perävaunun yhdistelmässä perävaunun takanurkan sivusiirtymälle on olemassa laskukaava (kaava 9). Kyseinen kaava on määritelty Liikenteen turvallisuusviraston määräyksessä ajoneuvoyhdistelmien teknisistä vaatimuksista (TRAFI/47451/03.04.03.00/2018, 4).

$$S = -1125 + 0,1347 \times A_{vk} + 0,2844 \times P_{ty} - 0,01198 \times A_{av} - 0,007485 \times P_{am} - 0,02246 \times P_{op}$$

KAAVA 9

$S$  = perävaunun takanurkan sivusiirtymä

$A_{vk}$  = auton takatelin kääntöpisteen ja vetokytkimen välinen etäisyys [mm]

$P_{ty}$  = perävaunun takatelin kääntöpisteen ja taaimmaisen kohdan välinen etäisyys [mm]

$A_{av}$  = auton ensimmäisen akselin ja auton takatelin kääntöpisteen välinen etäisyys [mm]

$P_{am}$  = perävaunun A-mitta eli etutelin keskipisteen ja vetosilmukan välinen etäisyys [mm]

$P_{op}$  = perävaunun etutelin kääntöpisteen ja takatelin kääntöpisteen välinen etäisyys [mm]

Kaavan 9 muuttujia tarkastellessa huomataan, että perävaunun takanurkan sivusiirtymä riippuu perävaunun ominaisuuksien lisäksi vetoauton ominaisuuksista. Tästä syystä perävaunulle ei voida määrittää yhtä absoluuttista pituutta, jolla se olisi aina lain mukainen, vaan on huomioitava, minkälaisen vetoauton perään vaunu on tarkoitus kiinnittää.

## 5 SUUNNITELTAVAN KONTIN MAKSIMIMITAT

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Luvun 4 mukaisten määritysten avulla voidaan alkaa määrittelemään tämän opinnäytetyön suunnittelussa tarvittavia mittoja. Koko kontin tarvittavia äärimittoja voidaan arvioida laskemalla kuljetettavan biomassan arvoilla tarvittava tilavuus maksimikuormalle. Biomassakontit on suunniteltu pääasiallisesti hakkeen tai turpeen ajoon, joten näiden materiaalien tietoja käytetään mitoituksen perusteena. Biomassan vaatimia tarpeita voidaan laskennan jälkeen vertailla lain vaatimuksiin.

### 5.1 Hakkeen tekniset tiedot

Laskettaessa hakekuorman massaa on huomioitava hakkeen kosteus ja tiiviys. Hakkeen tiivydellä osoitetaan, kuinka paljon kiintokuutioita tulee yhdestä irtokuutiosta. Hakkeen tiivyyteen vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat palakoko, palan muoto, puulaji, oksat, kosteus, vuodenaika, kuormausmenetelmä ja painuminen. (Alakangas – Hurskainen – Laatikainen-Luntama – Korhonen 2016, 67.) Hakkeen irtotiheys voidaan laskea kaavalla 10 (Härkönen 2012, 19).

$$\rho_{irto} = \rho_m * v$$

KAAVA 10

$\rho_m$  = kostean puuaineksen märkätiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = hakkeen tiiviys (m<sup>3</sup>/i-m<sup>3</sup>)

Kostean puuaineksen märkätiheys saadaan kaavalla 11 (Härkönen 2012, 15).

$$\rho_m = \frac{\rho_{kt}}{(1-X)}, \text{ kun } X > 23\%$$

KAAVA 11

$\rho_{kt}$  = puuaineksen kuiva-tuoretiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$X$  = kosteusprosentti

Kaavoista 10 ja 11 voidaan johtaa kaava 12, joka yhdistää kosteuden ja tiivyyden vaikutuksen irtotiheyteen.

$$\rho_{irto} = \frac{\rho_{kt}}{(1-X)} * v$$

## KAAVA 12

Koska hakkeen tiiviyslukuun vaikuttavia tekijöitä on useita, käytetään tässä työssä hakkeelle yleisesti käytettyä tiiviyslukua 0,4 (Alakangas ym. 2016, 68).

Hakkeen kosteus on muiden arvojen tapaan riippuvainen monesta eri asiasta. Lauri Jylänki on opinnäytetyössään (2010) tutkinut rankahakkeen tunnuslukujen määrittelyä sekä tiiviyskertoimia. Jylänki on mitannut Naistenlahden voimalaitokselle tulleista haketoimituseristä kosteusprosentteja. Mittaustuloksissa on saatu 15 toimituserän kosteuden keskiarvoksi noin 42,4 % tekijän mittaamana. Suurin kosteusprosentti on ollut kuormasta mitattaessa 62,9 % ja pienin 33,1 %. Mainittakoon, että kyseisessä tutkimuksessa hake oli rankahaketta ja kosteuksia mitattiin talvella. Tutkimuksessa kuormat olivat terminaalihaakettuja ja terminaalihakkeen ajossa on yleensä käytössä isommat yhdistelmät, joten tutkimuksen tulosten käyttö on linjassa tämän työn kanssa.

Taulukossa 1 on useiden eri puulaatujen kuiva-tuoretiheyksiä (Alakangas ym. 2016, 65). Kuiva-tuoretiheyksille on laskettu irtotiheydet eri kosteusprosentteilla (Jylänki 2010, 33) käyttäen kaavaa 12.

TAULUKKO 1. Eri hakelaatujen tiheyksiä

	Hakkeen tiiviyys (m <sup>3</sup> /i-m <sup>3</sup> )	Kuiva-tuo- retiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Irtotiheys (kg/i-m <sup>3</sup> ) 33,1 %	Irtotiheys (kg/i-m <sup>3</sup> ) 42,4 %	Irtotiheys (kg/i-m <sup>3</sup> ) 62,9 %
Kuorellinen kuitupuu, mänty	0,4	390	233,2	270,8	420,5
Kuorellinen kuitupuu, kuusi	0,4	380	227,2	263,9	409,7
Kuorellinen kuitupuu, koivu	0,4	490	293,0	340,3	528,3
Harvennus- ten kokopuu- hake, mänty	0,4	385	230,2	267,4	415,1
Harvennus- ten kokopuu- hake, kuusi	0,4	400	239,2	277,8	431,3
Harvennus- ten kokopuu- hake, koivu	0,4	475	284,0	329,9	512,1
Viherainee- ton hakkuu- tähdde, mänty	0,4	405	242,2	281,3	436,7
Viherainee- ton hakkuu- tähdde, kuusi	0,4	465	278,0	322,9	501,3
Viherainee- ton hakkuu- tähdde, koivu	0,4	500	299,0	347,2	539,1
Viheraineelli- nen hakkuu- tähdde, mänty	0,4	395	236,2	274,3	425,9
Viheraineelli- nen hakkuu- tähdde, kuusi	0,4	425	254,1	295,1	458,2
Kuorellinen sahausjäte, havupuu	0,4	415	248,1	288,2	447,4
<b>Keskiarvo</b>	<b>0,4</b>	<b>427,1</b>	<b>255,4</b>	<b>296,6</b>	<b>460,5</b>

Toisen tämän työn kannalta tärkeimmän biomassalaadun eli turpeen tiheyden arvo saapumistilassa on 313–385 kg/m<sup>3</sup>. Turpeen tiheyden arvoissa Alakangas ym. (2016, 112) viittaavat lähteisiin Electrowatt-Ekono 1999 a ja b, Vapo Oy:n tiedot toimitettujen turpeiden ominaisuudet vuosina 2010-2014 ja sisäinen turvetietokanta 2001–2014. Tiheys on hieman pienempi jyrshinturpeella kuin palaturpeella. Pienin tiheys on Vapon mittaamalla jyrshinturpeella ja suurin Ekonon palaturpeella. Arvoista huomataan, että tarkastellut biomassat eivät poikkea irtotiheyden puolesta merkittävästi toisistaan. Tämän vuoksi niitä voidaan käsitellä yhteisesti tässä työssä, eikä tarvita eri laskelmia turpeelle ja hakkeelle.

## **5.2 Vaunun omamassa**

Poistettu salassapitosyistä.

## **5.3 Kontin mitat**

### **5.3.1 Leveys ja korkeus**

Poistettu salassapitosyistä.

### **5.3.2 Massa**

Perävaunun maksimikokonaismassaksi valitaan tässä työssä 42 000 kg. Kyseisellä maksimimassalla koko yhdistelmän maksimimassa tasapainottuu paremmin vetoauton ja perävaunun välille. Vetoautolle jää kokonaismassaa käytettäväksi 34 000 kg, jolloin luvussa 4.1 mainittu 35 000 kg:n maksimimassainen vetoauto on optimaalinen.

### **5.3.3 Pituus**

#### **Kuorman vaatima pituus**

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Laskemalla keskiarvo taulukon 1 eri kosteusprosentteilla lasketuista keskiarvotiheyksistä, hakkeen keskiarvoiseksi irtotiheydeksi saadaan 337,5 kg/i-m<sup>3</sup>. Saatu tiheys asettuu myös toimitustilaisen turpeen tiheyden vaihteluväliin. Kun korin leveys ja korkeus tiedetään ja

ne pidetään vakioina kaikissa tapauksissa, voidaan korin pituus laskea tiettyä massaa vastaavaksi kaavalla 13.

$$l_k = \frac{m_{max} - m_o}{\rho_{irto} * w_k * h_k}$$

KAAVA 13

$l_k$  = korin pituus (m)

$m_{max}$  = vaunun suurin sallittu kokonaismassa (kg)

$m_o$  = vaunun omamassa (kg)

$\rho_{irto}$  = materiaalin irtotiheys (kg/i-m<sup>3</sup>)

$w_k$  = korin sisäleveys (m)

$h_k$  = korin sisäkorkeus (m)

### Perävaunun siltasäännön tarkistus

Koska yhdistelmä tulee olemaan pidempi kuin 18,75 m, perävaunun etutelin kääntöpisteestä etäisyys takatelin kääntymättömien akseleiden keskiviivaan saa olla 8,15 m. Normaalilla akselivälillä, joka on 1 360 mm, etuvaunun etummainen akseli on 680 mm kääntöpisteen etupuolella. Vaunun oletetaan olevan kolmella paripyörin varustetulla taka-akselilla, joiden välinen etäisyys on normaali 1 360 mm. Tällöin vaunun etummaisen ja takimmaisen akselin välinen etäisyys on 10 190 mm. Jos vaunun viimeinen akseli on ohjaava ja akseliväli pysyy samana, kasvaa äärimmäisten akseleiden maksimipituus 10 870 mm:iin.

Muokataan luvussa 4.1 mainittua kaavaa 8, niin, että sillä voidaan laskea maksimimassa halutulle akseleiden välimatkalle.

$$m_{kok} = m_p + \frac{(l - 1,8m) * m_l}{0,1m}$$

KAAVA 14

$m_{kok}$  = suurin sallittu kokonaismassa (kg)

$l$  = äärimmäisten akseleiden maksimietäisyys (m)

$m_l$  = tapauskohtaisesti 0,1 metriä kohti lisättävä massa (kg)

$m_p$  = pohjassa, johon lisäys tehdään (kg)

Lasketaan kääntymättömällä taka-akselilla varustetun vaunun maksimikokonaismassa, jonka siltasääntö sallii.



$$m_{kok.jäykkä} = 20000kg + \frac{(10,19m-1,8m)*350kg}{0,1m} = 49365 kg$$

Siltasääntö sallii viisiakseliselle, jäykällä viimeisellä akselilla varustetulle perävaunulle maksimimassan, joka ylittää jopa kuusiakselisen vaunun suurimman sallitun 48 000 kg:n telimassan. Tässä tapauksessa käytetään suunnittelussa telimassojen määräämää kokonaisuutta.

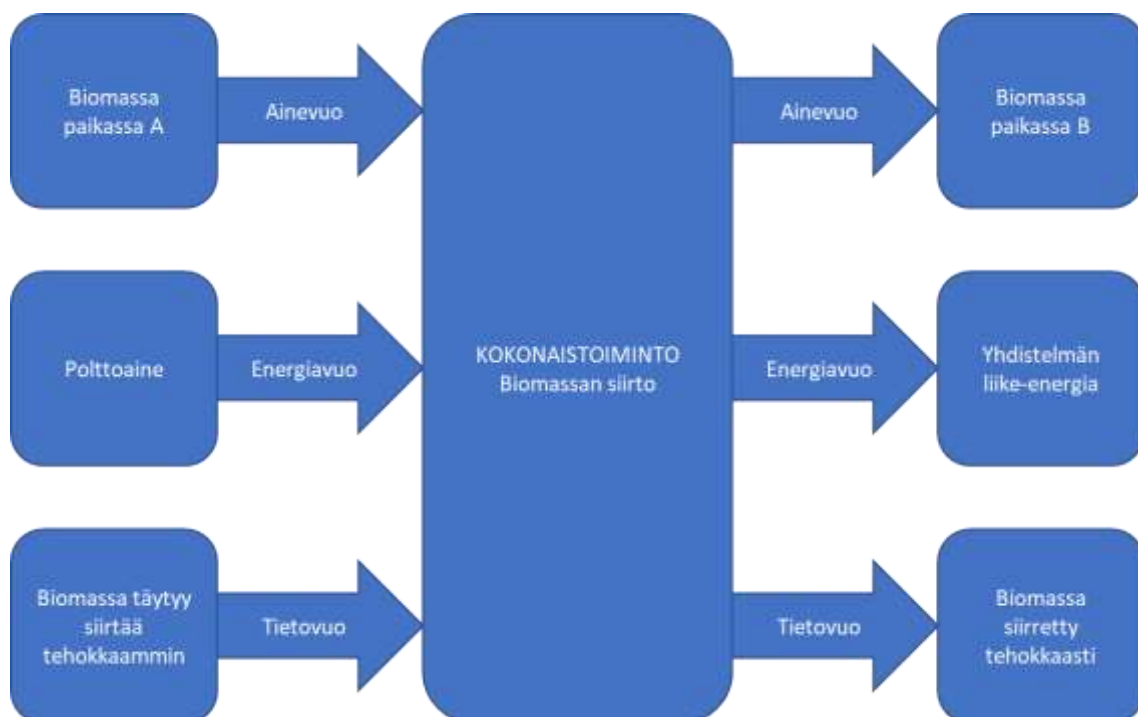
## 6 ESISUUNNITTELU

Esisuunnittelu on aloitettu abstrahoinnalla aihe, mikä tarkoittaa aiheen yleistämistä niin pitkälle, ettei sitä voi suoraan yhdistää kehitettävään kohteeseen. Abstrahoinnissa tämä opinnäytetyö muuttuu muotoon: ”Entistä kevyemmän perävaunun kehittäminen”. Ydinasiana on siis vaunun omamassan vähentäminen. Ydinasiaa ei ole kuormatilan kasvataminen. Kuormatilan kasvattamista käsitellään aiemmin tässä työssä sen takia, että hyötykuorma tarvitsee mahdollisesti lisää tilaa vaunun keventyessä ja mahdollisuus lisätä kuormatilaa täytyy selvittää.

### 6.1 Toimintorakenne

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Abstrahoinnin ja ydinasian selvittämisen jälkeen muodostetaan kehitettävästä kokonaisuudesta kokonaistoimintorakenne. Kokonaistoimintorakenteen muodostaminen auttaa hahmottamaan kehitettävän asiakokonaisuuden. Tässä työssä kokonaistoimintorakenne rakentuu biomassan kuljetuksesta (kuva 3).



KUVA 3 Kokonaistoimintorakenne

## **6.2 Ratkaisuvaihtoehdon valinta**

Poistettu salassapitosyistä.

### **6.2.1 Morfologinen taulukko**

Poistettu salassapitosyistä.

### **6.2.2 Kokonaisratkaisuvaihtoehdot**

Poistettu salassapitosyistä.

## **7 KOMPOSIITTIMATERIAALIN OMINAISUUKSIA**

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Ennen yksityiskohtaista suunnittelua ja lujuustarkastelua täytyy määritellä komposiittirakenteen tiedot. Tässä työssä tutkittavana ja kehitettävänä oleva komposiittirakenne on tiettävästi ainutlaatuinen. Suomessa ei ole tiedossa toista samanlaisen rakenteen valmistajaa. Rakenteessa ei ole ainutlaatuista ainoastaan sen rakenne vaan myös valmistus tässä mittakaavassa.

### **7.1 Komposiitin rakenne**

Poistettu salassapitosyistä.

### **7.2 Komposiittien yleiset lujuusominaisuudet**

Muovikomposiittien mekaanisten ominaisuuksien arviointiin on kehitetty erilaisia laskentamalleja. Mikään laskentamalli ei kuitenkaan pysty ottamaan huomioon kaikkia ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä, mistä syystä tärkeimmät ominaisuudet on syytä varmistaa kokeellisesti (Airasmaa ym.1991, 304).

Kuitulujitteisten laminaattien käyttäytymistä kuvaavat laskentamallit on jaettu kahteen ryhmään, mikromekaanisiin ja makromekaanisiin. Mikromekaanisilla malleilla voidaan arvioida rakenteeltaan yksinkertaisen laminaatin ominaisuuksia, kun laminaatin koostumus ja seosaineiden ominaisuudet tunnetaan. Makromekaanisilla malleilla voidaan arvioida mielivaltaisen laminaatin ominaisuuksia, kun laminaatin muodostavien kerrosten käyttäytyminen tunnetaan. (Airasmaa ym. 1991, 304.)

Muovikomposiitit ovat mikroskooppisesti tarkasteltuna epähomogeenisiä ja anisotrooppisia, eli niiden rakenne, ominaisuudet ja käyttäytyminen ovat eri kohdissa materiaalia ja eri kuormitussuunnissa erilaiset. Makroskooppisesti tarkasteltuna komposiittilaminaattikerros voidaan kuitenkin ajatella homogeeniseksi, jos se on materiaaleiltaan, seossuh-

teiltaan ja rakenteeltaan kaikkialta samanlainen. Samoin se voidaan ajatella isotrooppiseksi, jos seosaineena on hienopartikkelinen täyteaine tai satunnaisesti suuntautunut lujite. (Airasmaa ym. 1991, 308.)

Makromekaanisissa laskentamalleissa, tavanomaisen lujuuslaskennan tapaan, muodonmuutokset ja venymät oletetaan pieniksi. Lisäksi tehdään seuraavat oletukset:

- Kerrokset ovat ortotrooppisia.
- Ominaisuudet ovat samanlaiset läpi kerroksen. Oletus ei täysin vastaa todellisuutta, mutta ohuilla kerroksilla virhe on pieni.
- Kerrokset ja laminaatti ovat tasojännitystilassa, jolloin vain laminaattitasossa jännityskomponentit saavat nollasta poikkeavia arvoja. Oletus vastaa hyvin todellisuutta ohuissa rakenteissa. Laskentamallit eivät pysty kuvaamaan laminaattien reunoilla esiintyviä tasoa vastaan kohtisuoria normaali- ja leikkausjännityksiä.
- Kerrokset käyttäytyvät lineaarisesti ja kimmoisesti.
- Kerrokset ovat täydellisesti toisiinsa kiinnittyneet eli laminaattien tasovenymien oletetaan muuttuvan lineaarisesti laminaatin paksuussuunnassa. (Airasmaa ym. 1991, 313.)

Kuitulujitteisen laminaatin lujuutta voidaan arvioida murtokriteerien avulla. Yksinkertaisimmat murtokriteerit, esimerkiksi maksimijännityskriteeri tai maksimivenymäkriteeri, ovat niin sanottuja riippumattomia kriteerejä. Riippumattomat kriteerit tarkastelevat jännitys- ja venymäkomponentteja eri kerroksissa omissa koordinaatiostoissaan eivätkä huomioi eri jännityskomponenttien vuorovaikutuksia ja voivat sen takia yliarvioida lujuutta. Tämän takia on kehitetty yhdistettyjä eli vuorovaikutteisia murtokriteerejä. Yleisimmät kuitulujitteisten materiaalien laskennassa käytetyt vuorovaikutteiset murtokriteerit ovat Tsai-Hill- tai Tsai-Wu-kriteeri. Tsai-Hill- ja Tsai-Wu-kriteeri ovat niin sanottuja täysin interaktiivisia murtokriteerejä. On olemassa myös osittain interaktiivisia kriteerejä, jotka ovat sekoituksia riippumattomista ja interaktiivisista murtokriteereistä. (Airasmaa ym. 1991, 332–334, Saarela – Airasmaa – Kokko – Skrivfars – Komppa 2007, 354–357.)

Murtokriteerit esitetään matemaattisesti murtofunktion avulla. Murtofunktio mallintaa kerroslevyn maksimaalista kuormitusta. Kun funktion arvo on 0, kerros on kuormittama-

ton. Funktion arvo 1 vastaa tilannetta, jolloin kerroslevy juuri pettää. Esimerkiksi maksimijännityskriteerin mukainen murtofunktiio on esitetty kaavassa 15. (Saarela ym. 2007, 354–355.)

$$f = \max \left\{ \left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right| \right\}$$

KAAVA 15

$\sigma_1$  = jännitys tasossa 1

$\sigma_2$  = jännitys tasossa 2

$\tau_{12}$  = leikkausjännitys tasossa 12

X = murtojännitys akselin 1 suuntaisessa kuormituksessa

Y = murtojännitys akselin 2 suuntaisessa kuormituksessa

S = murtojännitys 12-tason leikkauskuormituksessa

Riippumattomat murtokriteerit antavat ennusteen kerroksen pettämistavasta, koska jännitys- ja venymäkomponentteja tarkastellaan omissa koordinaatistoissaan. Pettämistapa johdetaan oletuksesta, että kerros pettää silloin, kun jokin jännitys- tai venymäkomponenteista ylittää määritellyn murtorajan. Interaktiiviset kriteerit eivät ilmaise murtumistapaa suoraan, joten niilläkin murtumistapa määritellään riippumattomien kriteerien avulla. (Saarela ym. 2007, 358.)

Kerroslevyjen mekaniikkaa voidaan kuvata makromekaanisilla malleilla, kun kerroslevyä kuormitetaan levytasossa. Kerroslevyrakenteen lujuutta voidaan arvioida tarkastelemalla yleisen periaatteen mukaisia murtokriteerejä. Kerroslevyn käyttäytyminen eroaa kuitulujitteisesta kerroksesta taivutuskuormituksessa. Taivutuksessa normaalin kerroslevyn ydinmateriaaliin syntyy suuria liukumia, joiden takia taipuma on suurempi kuin yleisen taivutusteorian mukainen taipuma. (Airasmaa ym. 1991, 336–337.)

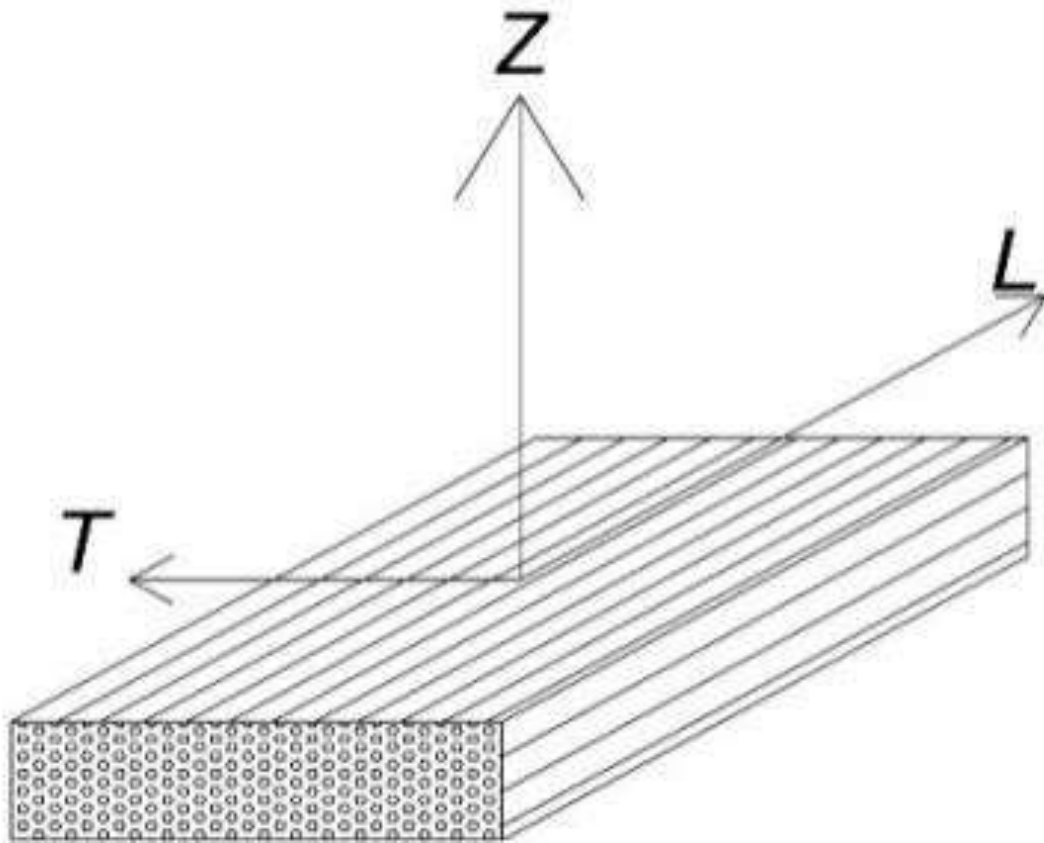
### 7.3 Laskennassa käytettävien lujuusarvojen määrittäminen

Moniakksiaalisten kuormitusten ja kuitulujitteisten rakenteiden lujuuslaskennan haastavuuden takia työssä ei ole tarkoitus laskea käsin rasiusten aiheuttamia reaktioita komposiittimateriaalissa, vaan tutkia reaktioita tietokoneavusteisesti käyttäen SolidWorksin simulaatiotyökalun FEM-analyysiä.

Lujuustarkasteluun on kaksi vaihtoehtoa. Komposiitille on suoritettu materiaalitestausta, jonka perusteella tietyille komposiittirakenteelle on määritetty lujuusarvot. Laskennassa voi käyttää näitä arvoja vertailuarvoina ja ajatella, että laskettava rakenne on homogeeninen ja isotrooppinen.

Toinen vaihtoehto on tarkastella rakennetta makromekaanisen mallin näkökulmasta. Eräästä komposiittikorista on tehty laskentamalli, johon lujuusarvot on määritetty ortotrooppisesti. Ortotrooppisuus tarkoittaa, että laminaatin eri kerrosten ominaisuudet vaihtelevat eri suunnissa ollen kuitenkin symmetriset kolmen toisiaan vastaan kohtisuoran tason suhteen (Airasmaa ym. 1991, 309). Symmetrian takia ortotrooppisen rakenteen lineaarisesti kimmoisen käyttäytymisen kuvaamiseen tarvitaan vain 9 riippumatonta materiaalivakiota. Kohdassa 7.4.2 määritellyt lujuusarvot eri komposiittimateriaalin osille on määritetty tällä tavalla. Materiaalivakiot ovat kuvan 4 mallikuvan koordinaatiston perusteella seuraavat:

- Kimmomodulit  $E_L$ ,  $E_T$  ja  $E_z$ , jotka ilmaisevat veto- ja puristusjäykkyyden pääsuunnissa.
- Poissonin vakiot  $\nu_{ij}$ ;  $ij = LT, LZ$  ja  $TZ$ , jotka kuvaavat, paljonko rakenne supistuu tai laajenee suunnassa  $j$ , kun veto tai puristus kohdistuu suunnassa  $i$ .
- Liukumodulit  $G_{LT}$ ,  $G_{LZ}$  ja  $G_{TZ}$ , jotka ilmaisevat leikkausjäykkyyden, kun kuorma vaikuttaa tasoissa  $LT$ ,  $LZ$  ja  $TZ$ . (Airasmaa ym. 1991, 309.)



*KUVA 4. Ortotrooppinen laminaattikerros ja pääsuunnat*

Tässä työssä lujuustarkastelu suoritetaan 2. vaihtoehdon tapaan, koska se on mahdollista ortotrooppisten lujuustietojen saatavuuden takia. Lujuustarkastelun toinen vaihtoehto antaa enemmän tietoa rakenteen kestävydestä muun muassa siten, että voidaan tarkastella missä kerroksessa suurimmat riskit ovat. Vanhasta laskentamallista otetuissa arvoissa voi olla eroja nykyään käytössä oleviin, koska kuitumatot ja lujitteet ovat voineet kehittyä, joten tuloksiin täytyy suhtautua tämän huomioiden.

#### **7.4 Komposiitin teknisiä tietoja**

##### **7.4.1 Kokeellisesti testatut lujuusarvot**

Poistettu salassapitosyistä.

##### **7.4.2 Valmiin laskentamallin lujuusarvot**

Poistettu salassapitosyistä.



## **8 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU**

Poistettu salassapitosyistä.

### **8.1 Suunnittelun pohjatyöt**

Poistettu salassapitosyistä.

### **8.2 Kevennys luonnoksen perusteella**

Poistettu salassapitosyistä.

## 9 FEM-ANALYYSI

Poistettu salassapitosyistä.

### 9.1 Kuorman asettelu

Kuormien asettelussa kuormattavan materiaalin ajatellaan käyttäytyvän nesteen tavoin. Kuorma muodostaa kuormatilaan hydrostaattisen paineen tavoin korkeuden funktiona vaihtelevan paineen. Kuorman ajatellaan jakautuvan tasaisesti yläreunaa myöden muodostaen pohjalle suurimman paineen, joka pienenee ylöspäin. Hydrostaattinen paine lasketaan kaavalla 16 (Valtanen 2016, 185).

$$p = \rho \times g \times h \quad \text{KAAVA 16}$$

$p$  = hydrostaattinen paine (Pa)

$\rho$  = aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = putoamiskiihtyvyyys (m/s<sup>2</sup>)

$h$  = ainespatjan korkeus (m)

Käytettäessä luvussa 5.3.3.1 määriteltyä hakkeen keskiarvotiheyttä 337,5 kg/i-m<sup>3</sup> ja kuormatilan korkeuden ollessa 2 993 mm hydrostaattisen paineen arvoksi kaavalla 14 saadaan.

$$p = 337,5 \frac{\text{kg}}{\text{i-m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 2,993 \text{ m} \approx 9909,45 \text{ Pa} \approx 0,00991 \text{ MPa}$$

Luvussa 5.1 määritetyllä kosteimmalla hakkeella, jonka tiheys on 460,5 kg/i-m<sup>3</sup>, kaavalla 14 hydrostaattisen paineen arvoksi saadaan.

$$p = 460,5 \frac{\text{kg}}{\text{i-m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 2,993 \text{ m} \approx 13520,89 \text{ Pa} \approx 0,0135 \text{ MPa}$$

Simulaatiotyökalussa paine täytyy asetella noudattamaan kaavaa 17, että ohjelma huomioi paineen vaikutuksen oikein.

$$p_{\text{simulaatio}} = p * \left( \frac{y}{h_k} \right) * 1 \quad \text{KAAVA 17}$$

$p_{\text{simulaatio}}$  = simulaatioissa käytettävä hydrostaattinen paine (MPa)

$p$  = kaavalla 14 laskettu hydrostaattinen paine (MPa)

$y$  = tarkasteltavan pisteen korkeus pohjasta (m)

$h_k$  = kuormatilan sisäkorkeus (m)

## 9.2 Simulaation ehdot, verkotus ja tuenta

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Simulaatiossa on määriteltävä kontaktiehto kokoonpanon eri osien välille. Näissä analyysissä kontaktiehdoksi määritellään "Bonded". Bonded-kontaktiehto tarkoittaa sitä, että simulaatio-ohjelma käsittää osien olevan kuin liimattuna toisiinsa, jolloin ne toimivat yhtenä kappaleena eivätkä liiku toistensa suhteen. Kuitulujitteisten laminaattien lujuuslaskennassa eri kerrosten oletetaan toimivan juuri tällä tavalla, minkä takia Bonded-kontaktiehto on oikea valinta.

Mallien kerrosten ohuuden takia elementtiverkosta joutuu tekemään melko tiheän. Suuremmalla elementtikoolla verkotus ei onnistu. Verkotusparametrit eroavat hieman toisistaan eri kuormakorien välillä, mutta samasta kuormakorista tehdyt eri analyysit käyttävät keskenään samanlaista elementtiverkkoa. Tiheällä elementtiverkolla voi olla vaikutusta tulosten paikkansapitävyyteen, mistä SolidWorks varoittaa tiheää elementtiverkkoa tehdessä. Vaikka tulosten oikeellisuus kärsisikin elementtiverkon tiheyden takia, saa tiheälläkin verkolla keskenään vertailukelpoisia tuloksia mallin eri kuormitus- ja tuentavariaatioiden välillä, kunhan verkotusparametrit pysyvät samoina.

Yhden korin tuennoista on ohjelmiston toiminnan kannalta oltava ankkuroitu eli muotoa "Fixed". Mikäli ankkuroitua tukea ei ole, kori pääsee vapaasti liikkumaan ja simulaatiota ei voi toteuttaa.

Kappale poistettu salassapitosyistä.

## 9.3 FEM-analyysin tulokset

Poistettu salassapitosyistä.

### 9.3.1 Jännityskomponentit

Poistettu salassapitosyistä.

### 9.3.2 Murtokriteeritarkastelu

Jännityskomponentit itsessään eivät kerro rakenteen kestävydestä, joten niitä täytyy verrata vertailujännityksiin. Vertailujännitykset on määritelty aiemman laskentamallin perusteella luvussa 7.4.2. Jännityksiä on tarkasteltu maksimijännityskriteerillä sekä Tsai-Hill-murtokriteerillä. Jännityksiä on tarkasteltu kahdella eri murtokriteerillä vertailun vuoksi sekä siksi, että kaikki murtokriteerit antavat hyvin koetuloksia vastaavia arvoja, kun yksi jännityskomponentti on hallitseva, mutta Tsai-Hill-murtokriteerin on tutkittu vastaavan parhaiten koetuloksia, kun kerrokseen kohdistuu kaksi merkittävän suurta jännityskomponenttia (Saarela ym. 2007, 361).

#### Maksimijännityskriteeri

Jännityskomponentteja on vertailtu ensimmäisenä ns. maksimijännityskriteerin mukaisella murtofunktiolla, joka on esitetty kaavalla 15 luvussa 7.2 ja uudelleen alla.

$$f = \max \left\{ \left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right| \right\} \quad \text{KAAVA 15}$$

$\sigma_1$  = jännitys tasossa 1

$\sigma_2$  = jännitys tasossa 2

$\tau_{12}$  = leikkausjännitys tasossa 12

X = murtojännitys akselin 1 suuntaisessa kuormituksessa

Y = murtojännitys akselin 2 suuntaisessa kuormituksessa

S = murtojännitys 12-tason leikkauskuormituksessa

Maksimijännityskriteeri on riippumaton murtokriteeri, joka tarkastelee jännityskomponentteja eri suunnissa toisistaan riippumatta. Murtofunktio saa arvonsa jännityksellä, joka on vallitsevista jännityksistä suurin riippumatta suunnasta. Maksimijännityskriteerin avulla voidaan lisäksi arvioida kerroksen pettämistapaa, kuten luvussa 7.2 mainittiin. Maksimijännityskriteerin mukaiset tulokset ovat liitteessä 6. Liitteessä 6/2 maksimijännityskriteerin tulokset on väriskaalalla visualisoitu tietyn kerroksen maksimiarvon korostamiseksi.

## Tsai-Hill-murtokriteeri

Maksimijännityskriteerin lisäksi jännitysten vertailussa käytettiin Tsai-Hill-murtokriteeriä, jonka soveltamisen tulokset ovat liitteessä 7. Tsai-Hill-murtokriteeri on niin sanottu täysin interaktiivinen kriteeri, joka ottaa huomioon erisuuntaisten jännityskomponenttien yhteisvaikutuksen. Tsai-Hill-murtokriteeri on interaktiivisista murtokriteereistä yleisin (Saarela ym. 2007, 355). Tsai-Hill-murtokriteerin murtofunktio esitetään muodossa

$$f = \frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} \quad \text{KAAVA 18}$$

$\sigma_1$  = jännityskomponentti tasossa 1

$\sigma_2$  = jännityskomponentti tasossa 2

$\tau_{12}$  = leikkausjännitys tasossa 12

X = kerroksen veto- tai puristuslujuus suunnassa 1, riippuen vaikuttavasta jännityksestä

Y = kerroksen veto- tai puristuslujuus suunnassa 2, riippuen vaikuttavasta jännityksestä

S = murtojännitys 12-tason leikkauskuormituksessa

### 9.3.3 Päätelmät

Poistettu salassapitosyistä.

## 10 YHTEENVETO

Osa tekstistä poistettu salassapitosyistä.

Työtä aloitettaessa oli suunnitelmana optimoida perävaunun pituus lain sallimien mitoitusehtojen mukaiseksi. Ajatuksena oli, että tehtäessä suunnittelutyö mahdollisimman pitkälle vaunulle, olisi konsepti toimivasti monistettavissa lyhyemmille vaunuille. Työn edetessä huomattiin kuitenkin perävaunun mitoitukseen vaikuttavan niin monta tekijää, ettei optimointi ollut järkevä idea. Viimeistään siinä vaiheessa tehtiin päätös pituuden optimoinnin hylkäämisestä, kun huomattiin, että perävaunun mitoitukseen vaikuttavat myös vetoauton tekniset mitat. Siksi lopulta päädyttiin vaihtoehtoon, jossa käytettiin jo valmistuneita perävaunuja yksityiskohtaisen suunnittelun perustana.

Kappale poistettu salassapitosyistä.

Kappale poistettu salassapitosyistä.

Tämän työn perusteella syntyi tulosten lisäksi useita jatkokehityksiä. Osan näistä aiheista pystyisi toteuttamaan esimerkiksi opinnäytetyönä. Osaa aiheista mahdollisesti työstetään yrityksen sisäisesti.

Työ oli äärimmäisen mielenkiintoinen niin tekijän kuin toimeksiantajayrityksenkin puolesta. Työn haastavuuden takia tekijä joutui suurelta osin työtä tehdessä liikkumaan osamisensa ylärajoilla ja pyrkiä hallitsemaan alati laajenevaa kokonaisuutta, mutta lopputuloksena on positiivinen signaali työn jatkokehitystä varten. Toimeksiantajayrityksen suunnasta viesti on ollut sellainen, että tämän työn pohjalta aiotaan mahdollisesti käynnistää tuotekehityshanke. Tämän työn tuloksia voidaan käyttää antamaan suuntaviivoja tulevalle kehitystyölle.

## LÄHTEET

- A 4.12.1992/1257. Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä.
- A 17.1.2019 31/2019. Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta.
- Alakangas, Eija – Hurskainen, Markus – Laatikainen-Luntama, Jaana – Korhonen, Jaana 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Tampere: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>. Hakupäivä 3.10.2019.
- Airasmaa, Ilkka – Kokko, Juha – Komppa, Veikko – Saarela, Olli 1991. Muovikomposiitit. Jyväskylä: Muoviyhdistys Ry.
- TRAFI/47451/03.04.03.00/2018 Ajoneuvoyhdistelmien tekniset vaatimukset 2019. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/454001/44847> Hakupäivä 14.1.2020.
- Härkönen, Martti 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. C: Centria tutkimus ja kehitys. Kokkola: Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/41034>. Hakupäivä 3.10.2019.
- Jylänki, Lauri 2010. Rankahakkeen tunnuslukujen määrittäminen ja näytteenottotapojen vertailu. Tutkintotyö. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15096/Jylänki\\_Lauri.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15096/Jylänki_Lauri.pdf?sequence=1). Hakupäivä 8.10.2019.
- KOME Oy. Saatavissa: <http://www.kome.fi/>. Hakupäivä 4.2.2020.
- Nylund, Nils-Olof 2006. Raskaan ajoneuvokaluston energiakäytön tehostaminen – Yhteenvetoraportti 2003-2005. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Espoo. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/1026/HDEnergia\\_yhteenvetoraportti\\_lopullinen\\_viim.pdf](https://www.motiva.fi/files/1026/HDEnergia_yhteenvetoraportti_lopullinen_viim.pdf). Hakupäivä 4.2.2020.
- Saarela, Olli – Airasmaa, Ilkka – Kokko, Juha – Skrifars, Mikael – Komppa, Veikko 2007. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys Ry.

Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja. Genesis-Kirjat Oy.



## **LIITTEET**

Liitteet poistettu salassapitosyistä.

Liite 1

Liite 2

Liite 3

Liite 4

Liite 5

Liite 6

Liite 7