



EMFi-kalvon käyttömahdollisuudet kuormakoneen kuorman valvonnassa

Erkki Välimaa

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2020

Konetekniikka
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Koneautomaatio

VÄLIMAA, ERKKI:

EMFi-kalvon käyttömahdollisuudet kuormakoneen kuorman valvonnassa

Opinnäytetyö 84 sivua, joista liitteitä 28 sivua
Huhtikuu 2020

Tämän opinnäytetyön tilaaja on John Deere Forestry Oy. Puutavaran metsäkuljetus on kustannustehokkainta, jos kuormakoneen kantavuus voidaan täysin hyödyntää jokaisen kuorman kohdalla ilman suuria ylikuormia. Puulajien tuoretiheyserojen ja useiden katkontamittojen vuoksi tähän ei kuitenkaan päästä. Luotettava kuormanvalvontajärjestelmä mahdollistaa suurien kuormatilojen käytön estäen silti ylikuormat.

Opinnäytetyössä tutkittiin sähkömekaanisen EMFi-kalvon (ElectroMechanical Film) käyttömahdollisuuksia kuormakoneen kuormakoon valvonnassa. Tarkoituksena oli löytää kuormanvalvonnan EMFi-kalvopohjaiseen anturointiin soveltuva sijoituspaikka, jossa virhedataa syntyy mahdollisimman vähän. Tämän avulla on mahdollista kehittää kuormakoneiden teknistä tasoa, pienentää ylläpitokustannuksia ja helpottaa koneenkuljettajan työtä. Työssä tutkittiin kolmea erilaista tapaa käyttää EMFi-kalvoa kuorman mittausanturina. Tutkimusvälineenä käytettiin ANSYS-simulointiohjelmaa, jolla mitattiin erikokoisten puutavarakuormien aiheuttamia muodonmuutoksia koneen takarungon länkilevyissä. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta asentaa EMFi-kalvoanturit pankkojen kiinnityslevyjen alle. EMFi-kalvoantureiden mitoitusperusteena käytettiin suurimman kuorman aiheuttamia voimia. Metsäkonerenkaan valmistusprosessiin tutustumalla tutkittiin mahdollisuutta asentaa EMFi-kalvo kuormantuntevaksi anturiksi renkaan kuluuspinnan alle.

Lopputuloksena saatiin selville, että kalvon renkaaseen asennus on mahdotonta toteuttaa EMFi-kalvon kestävyysrajoissa. Kahden muun vaihtoehdon havaittiin olevan toteuttamiskelpoisia, mutta ne vaativat jatkotutkimuksia. Näistä erityisesti länkilevyt mittauskohteena todettiin lisätutkimuksien arvoiseksi, kuten myös rungon ominaisvärähtelyn muutosten havainnointi eri kuormitustilanteissa EMFi-mikrofonilla. Opinnäytetyöllä tuotettiin John Deere Forestryn kuormakoneiden kuormanvalvontatutkimukselle hyvää pohjatietoa, jonka perusteella he pystyvät kehittämään kuormakoneidensa teknistä tasoa edelleen.

Opinnäytetyöstä tehtiin kaksi eri versiota eli julkinen ja vain työn tilaajalle tarkoitettu. Julkisesta versiosta poistettiin kaikki työn tilaajalta saatu luottamuksellinen aineisto sekä sen avulla tuotetut tutkimustulokset.

Asiasanat: emfi-kalvo, anturi, kuormakone, ansys

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

VÄLIMAA, ERKKI:
Possibilities of Using EMFi Film in Forwarder Load Monitoring

Bachelor's thesis 84 pages, appendices 28 pages
April 2020

This thesis was made for John Deere Forestry Ltd. Transporting timber from the woods is at its most cost-effective only if the load capacity of the forwarder can be fully utilized without major overruns. However, due to different tree species and cutting lengths, this is not possible. Reliable load monitoring system allows the use of larger load compartments while still preventing overloads.

The possibilities of using an electromechanical EMFi film in the monitoring of the load size of a forwarder were researched in this thesis. The purpose was to find a suitable location for the EMFi film sensor for load monitoring where as little error data is generated as possible. This makes it possible to improve the technical level of forwarders, reduce maintenance costs and make the driver's job easier. Three different ways of using an EMFi film as a load sensor were researched in this thesis. Deformations of the rear frame collar plates caused by different sizes of timber loads were simulated by ANSYS software. In addition, the surface area of the EMFi film was dimensioned by the force caused by the largest load when EMFi film sensors are installed under the load compartment. The feasibility of installing an EMFi film sensor under the tire tread was researched in the last stage.

As a conclusion, it was found that the mounting of EMFi film on the tire is impossible within the limits of the film's durability. The other two options were found to be feasible, but they require further research. Especially the collar plates as a measuring point were found to be worth further research, such as the observation of changes in the characteristic vibration of the frame in different load situations with an EMFi film microphone. The thesis provided John Deere Forestry with good basic knowledge that will enable them to further develop the technical level of their forwarders.

Two versions of this thesis were made. Public and intended only for the client. All confidential material was omitted from the public version of this thesis.

Key words: emfi film, sensor, forwarder, ansys

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tausta	7
1.2	Työn tavoite ja tarkoitus	8
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	9
2	JOHN DEERE FORESTRY OY	11
2.1	Yritys	11
2.2	Tuotteet.....	11
3	EMFI-KALVO	14
3.1	Yleistä EMFi-kalvosta.....	14
3.2	EMFi-kalvon ominaisuuksia	15
3.3	EMFi-kalvon valmistus	16
3.4	Mittausvahvistimet.....	17
4	KUORMITUSTAPAUKSET	20
4.1	Puulajit ja katkontamitat	20
4.2	Kuormien tilavuudet, massat ja painot	21
4.3	Kuormien tukivoimat.....	25
4.4	Kuormitustiedot.....	30
5	MALLINNUSTYÖKALUT	32
5.1	Siemens NX 12	32
5.2	ANSYS 2019 R3	32
6	LÄNKILEVYJEN ANTUROINTIMAHDOLLISUUS	34
6.1	CAD-mallin valmistelu	34
6.2	Simuloinnin valmistelut.....	35
6.3	Länkilevyjen muodonmuutokset.....	36
6.4	Paikkakohtaiset muodonmuutokset.....	38
6.5	Tarvittavat muutostyöt.....	40
7	PANKKOJEN ANTUROINTIMAHDOLLISUUS	41
7.1	EMFi-kalvon pinta-alatarve	41
7.2	EMFi-kalvoanturin mitoitus	42
8	RENKAIDEN ANTUROINTIMAHDOLLISUUS	43
8.1	EMFi-kalvo paperikoneen telassa	43
8.2	EMFi-kalvon asentaminen renkaan valmistusvaiheessa.....	43
8.3	EMFi-kalvon asentaminen renkaan pinnoitusvaiheessa	44
9	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	46
	LÄHTEET.....	48
	LIITTEET	50

Liite 1. Kuormitustapaukset.....	50
Liite 2. Kuormien sijainti pankoilla	53
Liite 3. Kuormien aiheuttamat tukivoimat	55
Liite 4. Referenssi- ja mittauspisteiden siirtymät	58
Liite 5. Länkilevyjen muodonmuutokset	59
Liite 6. Paikkakohtaiset muodonmuutokset.....	60
Liite 7. Muodonmuutoskaaviot	61
Liite 8. Vertailukuormien kaaviot	62

ERITYISSANASTO

Aktuaattori	toimilaite (tässä työssä kaiutin)
Elektreetti materiaali	materiaali, jolla on pysyvä sähkövaraus
Kokorunkomenetelmä	puunkorjuumenetelmä, jossa puun rungot katkastaan oikeisiin mittoihin vasta tehtaalla
Pankko	puutavaran kuljetukseen tarkoitetun ajoneuvon kuormatilan pystytolpat
Riipuke	välikappale, jolla puutavarakoura yhdistetään nosturin puomiin
Sermi	puutavaran kuljetukseen tarkoitetun kuormatilan etuseinä
Tavaralajimenetelmä	puunkorjuumenetelmä, jossa puun rungot katkaistaan oikeisiin mittoihin jo hakkuupaikalla

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on päätoimipaikkaansa Tampereella pitävä John Deere Forestry Oy. Työssä tutkitaan kolmea erilaista vaihtoehtoa toteuttaa EMFi-kalvopohjainen kuorman painoa mittaava anturointi toimeksiantajan valmistamissa kuormakoneissa. Toimintavarman ja edullisen anturointiratkaisun löytyminen olisi sekä konevalmistajan että loppukäyttäjän etu. Luotettavalla tiedolla koneen kuormatilassa olevan kuorman painosta voitaisiin kuljettajaa ohjata koneen oikeaoppiseen käyttöön. Näin kone olisi pitkäikäinen ja sen huolto- ja korjauskustannukset pysyisivät siedettävällä tasolla. Kohtuullisella ylikuormalla olisi mahdollista ensin varoittaa kuljettajaa ja tarvittaessa rajoittaa koneen maksimijonopeutta ja reilulla ylikuormalla koneen ohjausjärjestelmä voisi estää koneella ajamisen kokonaan. Länsimaisilla hakkuutyömailla ajettavat ylikuormat ovat vielä pieniä verrattuna eteläamerikkalaisilla eukalyptushakkuilla ajettaviin kuormiin.

Koneen kuormitushistorian keräämisellä ohjausjärjestelmän muistiin saisi valmistajan tuotekehitysosasto arvokasta tietoa kehitellessään entistä taloudellisempia ja kestävämpiä työkoneita. Koneen rakenteiden turha ylityö nostaa koneen valmistuskustannuksia ja kokonaispainoa, joka puolestaan pahentaa metsään jääviä ajourajälkiä. Mahdollisissa konerikkotapauksissa tulisi tieto koneen kuormitushistoriasta avuksi, kun pitää ratkaista, että kuuluuko vaurion korjaus takuun piiriin, vai onko konetta yksinkertaisesti kuormitettu toistuvasti liikaa.

Tehtävän tekee erityisen vaikeaksi se, että metsäkoneissa, niin kuorma- kuin hakkuukoneissa, ei ole jousitusta, jonka painumasta tai paineesta voitaisiin tulkata koneen senhetkinen paino. Oman lisävaikeutensa herkan anturoinnin toteuttamiselle tuovat olosuhteet, joissa koneella päivittäin työskennellään. Tarjolla on kovaa mekaanista rasitusta, likaa ja märkää sekä kylmää ja kuumaa. Konetta rasittava dynaaminen kuormitus ja iskut, koneen kääntö ja kallistelu sekä nosturin käyttö tuottavat paljon virhedataa huonosti toteutetussa anturointiratkaisussa.

Kaikesta virhedatasta ei varmasti päästä kokonaan eroon, mutta oikeaan paikkaan sijoitettu anturointi vähentää sitä merkittävästi.

Konevalmistajat pyrkivät ehkäisemään kohtuuttomia ylikuormia mitoittamalla koneidensa kuormatilat koneen kantavuuden mukaan. Tässä työssä tutkittavaan kuormakonemalliin on saatavilla kahta erikokoista kuormatilaa. Lisäksi tarjolla on myös kuormatila, jonka kokoa voidaan säätää hydraulisesti. Tilanne ei ole kuitenkaan niin yksinkertainen. Eri puulajien tuoretiheyksissä on suuria eroja ja käytössä olevien puutavaralaatujen katkontamitoissa pisimpien ja lyhimpien mittojen ero on yli kaksinkertainen. Tämä johtaa siihen, että keveimmillään täysi kuorma on reilusti alle koneen kantavuuden, mikä on urakoitsijalle epäedullista. Painavimmillaan kuorman paino ylittää merkittävästi koneen kantavuuden.

Kuormakoneen kuorman reaaliaikainen seuranta on mahdollista toteuttaa myös koneen nosturiin asennettavalla kuormainvaa'alla. Järjestelmän vaatima anturointi on asennettu vaakakäyttöä varten muokattuun riipukkeeseen, joka vaihdetaan nosturin alkuperäisen riipukkeen tilalle. Mittaus perustuu joko venymäliuskaanturiin tai öljynpaineen mittaukseen riipukkeen öljytilassa. Parhaan mahdollisen punnitustuloksen saaminen edellyttää kuljettajakohtaisten asetusten tekemistä, sillä jokaisella kuljettajalla on omanlaisensa tyyli käyttää nosturia.

Tästä opinnäytetyöstä laaditaan kaksi versiota eli julkinen versio ja vain työn tilaajalle tarkoitettu versio. Julkisesta versiosta poistetaan kaikki työn tilaajalta saatu luottamuksellinen aineisto sekä sen avulla tuotetut tutkimustulokset.

1.2 Työn tavoite ja tarkoitus

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää John Deeren kuormakoneiden teknistä tasoa, jonka avulla koneiden luotettavuus ja markkina-arvo kasvavat. Tutkimustulosten avulla on myös mahdollista alentaa kuormakoneiden huolto- ja korjauskustannuksia sekä helpottaa koneenkuljettajan työtä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia EMFi-kalvon käyttömahdollisuuksia kuormakoneen kuormakoon valvonnassa. Tarkoituksena on löytää kuormanvalvonnan EMFi-kalvopohjaiseen anturointiin soveltuva sijoituspaikka, jossa virhe-dataa syntyy mahdollisimman vähän. Mittaustarkkuuden tulisi riittää vähintään ylikuormatietoon. Kuormanvalvonta saisi olla jälkiasennettavissa vanhoihinkin koneisiin, joten myös vaadittavia muutoksia jo olemassa oleviin rakenteisiin tutkitaan.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tämä opinnäytetyö on tutkimustyyppinen työ, joka on empiiristä analyysia ja perustuu mittaustuloksiin, tekstiaineistoon ja asiantuntijahaastatteluihin. Aluksi lasketaan erilaisten kuormitustapausten konetta kuormittavat voimat sekä niistä syntyvät tukivoimat. Kuormitustapausten laskennassa käytetään puulajeina kuusta, mäntyä, koivua sekä eukalyptusta. Katkontamitat asettuvat välille 3,0 – 7,2 metriä. Kuormitustapaukset lasketaan kahdella erikokoisella kuormatilalla, joten erilaisia tapauksia kertyy kaikkiaan 16 kappaletta. Lisäksi lasketaan vielä yksi kuormitustapaus, jonka avulla voidaan vertailla kahden samanpainoisen mutta erimittaisesta puutavarasta koostuvan kuorman aiheuttamia muodonmuutoksia koneen rungossa.

Kuormitustapausten tukivoimia käytetään voimina elementtimenetelmään perustuvassa muodonmuutoslaskennassa. Muodonmuutosten tutkimisessa keskitytään koneen takarungon länkilevyissä tapahtuviin muodonmuutoksiin. Länkilevyt ovat rungossa se kohta mihin akselisto kiinnitetään. Länkilevyistä etsitään kohtaa, jossa tapahtuu muodonmuutoksia eri kuormitustilanteissa, mutta muiden koneen runkoa kuormittavien voimien vaikutus olisi mahdollisimman vähäinen. Kuvassa 1 on nähtävillä yksi koneen neljästä länkilevystä.



KUVA 1. Länkilevy

Kuormitustapausten suurinta tukivoimaa käytetään maksimivoimana laskettaessa vaadittavaa EMFi-kalvon pinta-alaa, mikäli kuorman painoa valvottaisiin pankkojen alle sijoitetuilla EMFi-kalvoantureilla. Viimeisenä tutkimuskohteena perehdytään metsäkoneen renkaan valmistusprosessiin. Tällä selvitetään mahdollisuutta asentaa EMFi-kalvo kuormantuntevaksi anturiksi kulutuspinnan alle jo renkaan valmistusvaiheessa.

2 JOHN DEERE FORESTRY OY

2.1 Yritys

John Deere Forestry Oy on suomalaistaustainen metsäkoneita suunnitteleva, valmistava ja jälleenmyyvä yritys. Yrityksen pääkonttori, tuotekehitys- ja suunnitteluosasto sijaitsevat Tampereella. Tavaralajimenetelmän koneet valmistetaan Joensuun tehtaalla. Yrityksellä on Suomessa kuusi asiakaspalvelukeskusta, joista löytyy varaosamyynti, huoltopalvelut ja tekninen tuki (John Deere 2020).

John Deere Forestryn historia alkaa oikeastaan jo vuonna 1915, jolloin Oy Lokomo Ab perustettiin. Useiden kansainvälisten yritysostojen ja yhteenliittymien jälkeen v. 1990 yrityksen nimeksi vaihtui FMG Timberjack. (Drushka & Konttinen 1997, 251.) Vuonna 2000 Metso Oyj myi omistamansa Timberjackin yhdysvaltalaiselle traktori- ja metsäkonevalmistaja John Deerelle. Timberjack-nimi vaihtui John Deere Forestryksi vasta 1.6.2005. Samalla metsäkonebrändi Timberjack korvautui John Deere -nimellä ja koneiden ulkoasukin muuttui vihreäkeltaiseksi amerikkalaisomistajansa mukaan. (Markkinointi&Mainonta 2005.) Vuonna 2018 John Deere siirsi kokorunkomenetelmäkoneidensa tuotekehitystä Pohjois-Amerikasta Tampereelle. Muutos koski erityisesti kaatokoneiden, telaharvesterien ja juontokoneiden automaatio- ja ohjausjärjestelmien kehitystä. (Koskinen 2018.)

2.2 Tuotteet

John Deere Forestryn tunnetuimpia tuotteita ovat kuormatraktorit ja harvesterit. Kuormatraktorista käytetään useasti muitakin nimiä, esimerkiksi ajokone tai metsätraktori. Tässä opinnäytetyössä se on nimetty kuormakoneeksi. Kuormakonetta käytetään valmiiksi katkotun puutavaran ajoon hakkuutyömaalta metsäautotien varteen pinolle. John Deere Forestry valmistaa kuormakoneita montaa eri kokoluokkaa kantavuudeltaan 9000 – 19000 kg. Kuvassa 2 on malliston suurin kuormakone, joka on kantavuudeltaan 19 000 kg. Se on myös tämän opinnäytetyön tutkimuksen kohde. (John Deere 2020.)



KUVA 2. John Deere 1910G kuormakone (John Deere 2020)

Harvesteria sanotaan myös hakkuukoneeksi tai motoksi. Sen tehtävä metsässä on kaataa, karsia ja katkoa puut määrämittaan. Harvestereita valmistetaan neljää eri mallia. Malliston pienimmät koneet ovat sopivimmillaan harvennustyössä ja suurimmat mallit ovat tehokkaita päätehakuukoneita. Lisäksi John Deere Forestryltä on saatavissa kattava valikoima erikokoisia harvesteripäitä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Kuva 3 esittelee harvesterimalliston toiseksi pienimmän koneen. (John Deere 2020.)



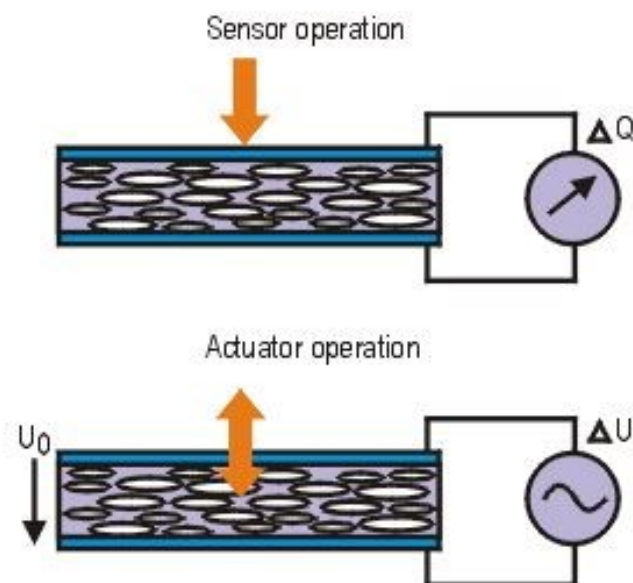
KUVA 3. John Deere 1170G harvesteri (John Deere 2020)

John Deere Forestry tarjoaa myös metsäammattilaisten työtä helpottavia sähköisiä palveluita kuten TimberMatic Kartat ja TimberManager. Näiden avulla koko toimitusketju saa reaaliaikaista tietoa työmaiden tilanteesta ja koneiden sijainnista. TimberMatic Karttojen avulla kuormakoneen kuljettaja saa tietää yksittäisen pölkyn tarkkuudella ajettujen ja ajamattomien puulajien sijainnit ja määrät. TimberManager-järjestelmästä taas näkyy havainnollisesti työmaan eteneminen kuutioina ja prosentteina. Tieto varastopaikalla olevan puutavaran määrästä helpottaa jatkokuljetuksen suunnittelua. (John Deere 2020.)

3 EMFI-KALVO

3.1 Yleistä EMFi-kalvosta

EMFi-kalvo on ohut ja huokoinen kahteen suuntaan venytetty polypropeenista (PP) valmistettu sähkömekaaninen kalvo. EMFi-kalvo on elektreetti materiaali, jolla on suuri resistiivisyys ja lehtevä rakenne, minkä vuoksi se pystyy varastoi-
maan itseensä suuren pysyvän sähkövarauksen. Kalvo on metalloitu molemmilta puolilta. Kalvoa voidaan käyttää sekä anturina että aktuaattorina. Kalvoon kohdistuva puristus voidaan havaita jännitevaihteluna kalvon metalloiduilta pinnoilta mitattuna. Kalvoon syötettävä vaihtojännite saa kalvon värähtelemään tuottaen ääntä. (Kirjavainen, Leikkala & Paajanen 2000, 95 – 96.) Kuvassa 4 on esitettyä EMFi-kalvon toimintaperiaate anturi- ja aktuaattorikäytössä (AZoM 2001).



KUVA 4. EMFi-kalvon toiminta anturina ja aktuaattorina (AZoM 2001)

EMFi-kalvo on suomalainen maailmanlaajuisesti patentoitu keksintö, jonka kehitti keksijä Kari Kirjavainen 1980-luvulla. Kalvoa ovat tutkineet monet yritykset ja sille on löytynyt monia sovelluskohteita sekä anturi- että aktuaattoripuolelta. Tunnetuimpia EMFi-kalvoa käyttäviä yrityksiä ovat suomalaiset PanPhonics, Emfit ja Screentec. (AZoM 2001.)

PanPhonics on merkittävä suuntaääniratkaisujen valmistaja. Suuntaäänellä tarkoitetaan äänilähdettä, jonka äänisäteiden leveyttä voidaan rajoittaa. Suuntaäänikaiuttimilla on mahdollista luoda rajattuja alueita, joiden välissä on hiljaisia- ja äänialueita. (PanPhonics 2016.) Emfit suunnittelee ja valmistaa monenlaisia ihmisen elintoimintoja mittaavia laitteita. Tällaisia ovat esimerkiksi aktiivisille liikkujille suunnattu lepo- ja palautumismittari sekä vanhusten unen- ja terveydentilan valvontaan tarkoitettu patjan alle sijoitettava mittalaite. Molemmissa mittalaitteissa ihmisen ballistokardiografiaa eli sydämen pumppausvoimaa seuraa hyvin herkkä EMFi-kalvoanturi. (Emfit 2019.) Screentecin tuotteita ovat mm. äärimmäisiin oloihin suunnitellut ja äärimmäistä kulutusta kestävät näppäimistöt sekä elintoimintojen mittaamiseen ja terveydenhoitoon suunnatut lääketieteelliset elektrodit. (Screentec 2020.)

3.2 EMFi-kalvon ominaisuuksia

EMFi-kalvon raaka-aineena käytettävä polypropeeni on hyvin halpaa materiaalia, jota käytetään esimerkiksi elintarvikepakkauksissa. EMFi-kalvosta voidaan helposti leikata halutun muotoisia kappaleita, kalvon sähköisten ominaisuuksien kuitenkaan muuttumatta. EMFi-kalvoa on kahta perustyyppiä, O01-tyyppinen kalvo sekä paksumpi ja herkempi HS01-tyyppinen kalvo. Kalvo koostuu kahdesta sileästä ja homogeenisestä pintakerroksesta sekä paksummasta keskiosasta, joka muodostuu lehtevistä polypropeenikerroksista. Molempien kalvotyyppien keskiosat sisältävät saman verran polypropeenia, mutta paksumpaa kalvoa on venytetty enemmän. Näin on saatu polypropeeniin syntyvien huokosten määrää lisättyä, mikä taas parantaa kalvon herkkyyttä. (Kirjavainen ym. 2000, 95.)

Huokosten leveys on 10 – 100 µm ja korkeus vain muutamia mikrometrejä. Tämä ominaisuus tekee kalvon hyvin herkäksi pystysuuntaiselle kuormitukselle, mutta tunteettomaksi sivusuuntaisille voimille. Pinoamalla useita kalvokerroksia päällekkäin voidaan EMFi-kalvoanturin herkkyyttä parantaa entisestään. EMFi-kalvon herkkyys riippuu kuitenkin paljon kalvon kuormituksesta, mikä tekee anturin tarikan kalibroinnin vaikeaksi. Kun kalvoa puristetaan, niin sen ilmahuokokset pienevät ja paine niissä nousee, mikä puolestaan tekee kalvon puristamisen vaikeammaksi. (Akhbardeh, Junnila & Värri 2008, 309 – 310.)

EMFi-kalvon käyttöalue rajoittuu sovelluksiin, joissa vaadittu lämpötilankesto on alle 60 °C. Tämä lämpötilaraja estää EMFi-kalvon käyttämisen monissa kone- ja ajoneuvotekniikan sovelluksissa. VTT:n uuden DURASMART-hankkeessa kehittämän sähkömekaanisen kalvon lämpötilankesto on yli 110 °C. Tämä on minimilämpötila, joka monien kone- ja prosessitekniikan laitteiden on kestettävä. (Heiska 2004.) EMFi-kalvotyyppien tärkeimpiä ominaisuuksia esitellään taulukossa 1. Nykyään kalvoja on monenlaisia, sillä valmistajat ovat muokanneet kalvon ominaisuuksia paremmin omiin tarpeisiinsa sopiviksi.

TAULUKKO 1. EMFi-kalvojen ominaisuuksia (Kirjavainen ym. 2000, 96)

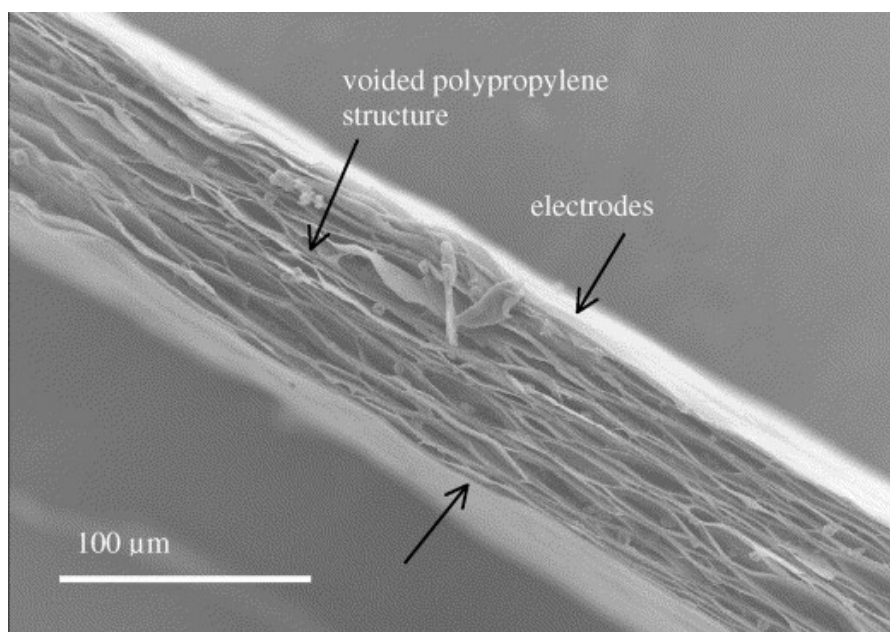
Ominaisuus	O01-kalvo	HS01-kalvo
Paksuus (s)	37 μm	70 μm
Herkkyys (S_q)	30 pC/N	170 pC/N
Lämpötila-alue (T_r)	-40 – +50 °C	-40 – +50 °C

3.3 EMFi-kalvon valmistus

EMFi-kalvo valmistetaan jatkuvassa monivaiheisessa prosessissa. Kalvon valmistus alkaa polypropeenin sulatuksella ja vaahdotuksella, jonka jälkeen sula massa suulakepuristetaan oikeaan muotoon. Suulakepuristuksen jälkeen kalvoaiho jäähdytetään kiteytymislämpötilaan ja kuumennetaan orientaatiolämpötilaan. Tässä lämpötilassa kalvolle tehdään biaksiaalinen orientaatio, joka tarkoittaa kalvon venyttämistä kahteen toisiaan vastaan kohtisuoraan suuntaan. Tällä toimenpiteellä saadaan aikaiseksi kalvon lehtevä rakenne. Tämän jälkeen kalvoon ladataan sähkövaraus koronapurkausmenetelmällä ja pinta viimeistellään sähköä johtavilla elektrodikerroksilla. (Kirjavainen ym. 2000, 95.)

Koronapurkauslaitteisto on kaksielektrodijärjestelmä, jossa on muutaman sentin päähän tasoelektrodista nostettu piikkielektrodiryhmä. Tasoelektrodina toimii maapotentiaaliin kytketty metallitela, jonka pyörimisnopeus määrää kalvon varausajan. Latausjännitteenä EMFi-kalvolle käytetään 20 – 30 kV:n jännitettä, jolloin varausaika on noin pari sekuntia. Kalvon pintaan vaadittavien johtavien elekt-

rodikerrosten kiinnittämiseen voidaan käyttää eri menetelmiä, kuten tyhjiöhöyrytämistä, silkkipainatusta tai laminointia. (Kirjavainen ym. 2000, 96.) Yksinkertaisimmillaan kalvon pintaan voidaan kiinnittää alumiinifoliot liimaamalla tai käyttää alumiinipintaista teippiä. Kuvassa 5 on nähtävillä HS01-tyyppin kalvosta pyyhkäisyelektronimikroskoopilla otettu poikkileikkauskuva (Lekkala, Paajanen & Välimäki 2000, 194).



KUVA 5. Poikkileikkauskuva HS01-tyyppin EMFi-kalvosta (Lekkala ym. 2000, 194)

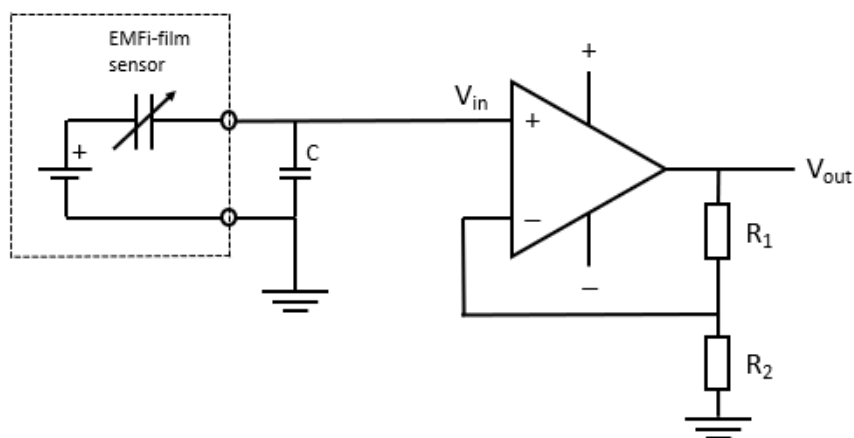
3.4 Mittausvahvistimet

EMFi-kalvon kuten muidenkin pietsosähköisten materiaalien tuottama analoginen signaali on hyvin heikko, minkä vuoksi se on vahvistettava aina ennen kuin sen tuottamaa informaatiota voidaan hyödyntää. Vahvistimina käytetään tavallisesti jännite- ja varausvahvistimia, jotka on mahdollista rakentaa tavallisista elektroniikan operaatiovahvistimista ja passiivikomponenteista.

EMFi-kalvon tuottaman varausmuutoksen vahvistaminen jännitevahvistimella on mahdollista vain, jos anturi ja vahvistin sijaitsevat hyvin lähellä toisiaan. Syynä tähän on anturin ja vahvistimen välisen kaapeloinnin aiheuttama hajakapasitanssi. Kalvon pintojen välinen potentiaaliero U lasketaan kaavalla

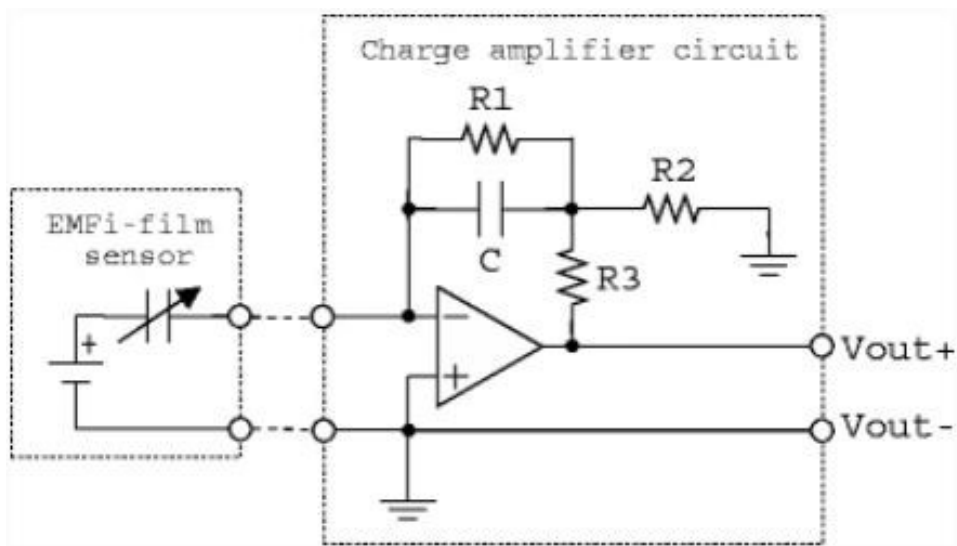
$$U = \frac{Q}{C}, \quad (1)$$

jossa Q on kalvon sähkövaraus ja C on kalvon kapasitanssi. Kaavasta nähdään, että jännitevahvistimelle tuleva signaali vääristyy anturin ja vahvistimen välisen kaapelin kapasitanssista. (Keim 2018.) Häiriötä voidaan vähentää käyttämällä koaksiaalikaapelia tiedonsiirrossa (Lekkala 2010, 441). Kuvassa 6 on esitettyä vahvistinpiirin yksinkertaistettu kaavio. Kaaviossa esitetty kapasitanssi C kuvaa anturin ja jännitevahvistimen välisen kaapelin kapasitanssia. Vastusten R_1 ja R_2 välisellä suhteella säädetään vahvistimen vahvistuskerroin.



KUVA 6. EMFi- anturi ja jännitevahvistin

Signaalin vahvistaminen varausvahvistimella poistaa kaapelin hajakapasitanssin tuomat ongelmat. Varausvahvistin on invertoiva vahvistin, jonka takaisinkytkentäsilman väliin on kytketty kondensaattori integraattoriksi. Kondensaattorin kytkeminen takaisinkytkentäsilmaan muokkaa vahvistinta siten, että lähtevä signaali ei ole verrannollinen kalvolta tulevaan hetkelliseen virtaan, vaan virran kertymiseen ajan myötä. (Keim 2018.) Kondensaattorin rinnalle kytketty vastus tarjoaa kondensaattorille purkautumisreitit, jolloin vältetään vahvistimen ajautuminen saturaatioon. Vahvistimen saturaatiolla tai kyllästymisellä tarkoitetaan tilaa, jossa vahvistimesta lähtevä signaali lakkaa kasvamasta, vaikka tuleva signaali kasvaisi edelleen. Kuvassa 7 on esitettyä vahvistinpiirin yksinkertaistettu kaavio. Sarjavastuksen R_3 ja vastuksen R_2 välisellä suhteella säädetään vahvistimen vahvistuskerroin. (Akhbardeh ym. 2008, 310.)



KUVA 7. EMFi-anturi ja varausvahvistin (Akhbardeh ym. 2008)

4 KUORMITUSTAPAUKSET

4.1 Puulajit ja katkontamitat

Opinnäytetyön tutkimuksellinen osuus aloitettiin määrittämällä laaja otanta erilaisia kuormakoneen runkoa kuormittavia kuormitustapauksia. Puulajeiksi valittiin yleisimmät talousmetsissä kasvavat puulajit, mukaan lukien eukalyptus. Eukalyptus valittiin mukaan siksi, että sillä on maailmanlaajuisesti merkittävä asema metsäteollisuuden raaka-ainemarkkinoilla. Valtavilla eukalyptuspelloilla suoritettavat hakkuut ovat kova rasitus siellä käytettäville koneille, koska eukalyptuksen tuoretiheys on huomattavan korkea ja käytetyt katkontamitat ovat poikkeuksellisen suuria. Näistä syistä suurimmat haasteet koneiden kestävyydelle esiintyvät juuri eukalyptushakkuilla.

Puulajien tuoretiheyksissä on suurta vuodenaikasadonnaista vaihtelua. Esimerkiksi järeän koivupölkyn tuoretiheys on tammikuussa noin 50 kg korkeampi kuin keskipäivällä. Tiheyteen vaikuttaa myös puutavaran järeys. Puun tiheys on suurimmillaan sen uloimmissa osissa, koska puussa virtaavat nesteet ja ravinteet kulkevat näissä osissa. Kuivin ja vanhin puuaines löytyy puun sydänosasta. Tämän vuoksi halkaisijaltaan pienissä puissa on painavan pintapuun osuus suhteellisesti suurempi kuin suurissa puissa, jolloin pienten puiden tuoretiheyskin on korkeampi. Kuusen, männyn ja koivun tuoretiheys laskettiin Luonnonvarakeskuksen järeille eteläsuomalaisille puutavarapölkkyille määrittämien kuukausikohtaisten tuoretiheyksien keskiarvona. (Luonnonvarakeskus 2017, 22.) Eukalyptuksen tuoretiheydeksi valittiin 13-vuotiaan Eukalyptus globuluksen tuoretiheys. Eukalyptus globulus ja Eukalyptus grandis ovat yleisimmät eteläamerikkalaisilla eukalyptuspelloilla kasvatettavat puulajit. (Mccomb, Meddings, Siemon & Davis 2004, 238.)

Runkojen katkontamitoiksi valittiin yleisesti käytössä olevia mittoja. Tukkipuurunkojen katkonta perustuu yleisesti moduulimitaan 30 cm:n jaolla. Yleensä havutukin minimipituudeksi sovitaan asiakaskohtaisesti 37 – 43 dm ja suurimmaksi pituudeksi 58 – 61 dm. Koivutukin katkonnassa on tehdaskohtaisia erikoismittoja. Kuitupuiden katkontamitat asettuvat 3,0 – 5,5 metrin välille. Koivukuitupuun kat-

kontamitta on yleensä 3,0 metriä, mutta männyn ja kuusen katkonnassa käytetään vapaata katkontaa. Vapaa katkonta tarkoittaa sitä, että pölkyn saa katkaista mihin mittaan tahansa, kunhan mitta on vähintään 3,0 metriä ja enintään 5,5 metriä. Tällä saavutetaan ainespuun tarkempi talteenotto. (Halonen 1998, 105.) Eukalyptuksen mittana laskennassa on yleisesti eukalyptushakkuilla käytetty 7,2 metrin katkontamitta (Laakso 2020). Alla olevaan taulukkoon on listattuna kuormitustapausten laskennassa käytetyt puulajit, niiden tuoretiheydet ja katkontamitat (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Laskennassa käytetyt puulajit, niiden tuoretiheydet ja katkontamitat (Halonen 1998, Laakso 2020, Luonnonvarakeskus 2017 & Mccomb ym. 2004)

Puulaji	Tuoretiheys (kg/m ³)	Katkontamitat (m)		
		3,0	4,3	5,8
Kuusi	775	3,0	4,3	5,8
Mänty	836	4,3	5,8	–
Koivu	903	4,1	6,7	–
Eukalyptus	1040	7,2	–	–

4.2 Kuormien tilavuudet, massat ja painot

Laskennassa käytettävien puulajien ja puutavaramittojen määrittämisen jälkeen voitiin laskea eri kuormitustapauksista syntyvät kuormien tilavuudet, massat ja painot. Kuorman paino on se suure, jota tarvitaan kuormakoneen runkoa kuormittavien tukivoimien laskennassa. Laskenta suoritettiin kahdella erikokoisella kuormatilalla. Kuormatilan koko määrittää kuorman poikkileikkauksen pinta-alan. Laskennassa ja taulukoissa sermin pinta-ala tarkoittaa tätä pinta-alaa. Kuormatilat ovat kooltaan 5,5 m² ja 6,5 m², jotka ovat John Deeren 1910G kuormakoneeseen valittavissa olevat kuormatilakoot (John Deere 2020). Kuormitustapauksia laskettiin yhteensä 16 kappaletta. Lisäksi laskettiin vielä yksi kuormitustapaus, jonka paino on sama kuin kuormitustapaus 9:n paino, mutta kuormana on 3,0 metrisen kuusen sijaan vajaa kuorma 7,2 metriä pitkää eukalyptusta. Tällä haluttiin vertailla kahden samanpainoisen mutta erimittaisesta puutavarasta koostuvan kuorman aiheuttamia muodonmuutoseroja koneen rungossa.

Kuorman tilavuus ei tarkoita kuormatilan kokonaistilavuutta, vaan kuormassa olevan puutavaran määrää. Kuormassa olevaan todelliseen puutavaran määrään vaikuttaa puutavaran halkaisija ja kuljettajan huolellisuus kuorman teossa. Kuormatilan kokonaistilavuuden ja kuorman todellisen tilavuuden suhdetta kuvataan kuorman tiiveyskerroimella, joka on yleisesti käytetty 0,65 (Karhunsaaari 2020). Kuorman tilavuus V lasketaan kaavalla

$$V = ALLF, \quad (2)$$

jossa A on sermin pinta-ala, l on puutavaran pituus ja LF (Loading Factor) on kuorman tiiveyskerroin.

Kuorman massa m lasketaan kaavalla

$$m = V\rho, \quad (3)$$

jossa V on kuorman tilavuus ja ρ on puulajin tuoretiheys.

Kuorman paino G lasketaan kaavalla

$$G = mg, \quad (4)$$

jossa m on kuorman massa ja g on putoamiskiihtyvyyys (9,81 m/s²).

Seuraavassa on esimerkki yhden kuormitustapauksen laskennasta. Valitaan sermin pinta-alaksi 6,5 m², puulajiksi kuusi ja puutavaran pituudeksi 3,0 metriä. Tilavuudeksi saadaan kaavalla (2)

$$V = 6,5 \text{ m}^2 \cdot 3,0 \text{ m} \cdot 0,65 = 12,675 \text{ m}^3.$$

Kuorman massan laskennassa käytetään tuoretiheydelle arvoa 775 kg/m³, jolloin massaksi saadaan kaavalla (3)

$$m = 12,675 \text{ m}^3 \cdot 775 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9823,125 \text{ kg}.$$

Kuorman painoksi saadaan kaavalla (4)

$$G = 9823,125 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 96364,85 \text{ N}.$$

Taulukossa 3 on esitetty kuormitustapauksen laskennassa käytetyt arvot sekä laskennasta saadut tulokset. Taulukossa esitetyjä tuloksia on pyöristetty lukemisen helpottamiseksi. Kuorman massan laskeminen on hiukan turha välivaihe tukireaktioiden laskemisen kannalta, mutta se antaa ymmärrettävämmän kuvan kuorman koosta kuin paino.

TAULUKKO 3. Laskentaesimerkin arvot ja tulokset

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	9
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	3,0 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	12,7 m ³
Kuorman massa (m)	9823 kg
Kuorman paino (G)	96365 N

Vertailukuorman laskennassa kuorman massana käytetään taulukon 3 kuorman massaa. Puulajina on eukalyptus, jolloin tuoretiheyden arvona käytetään 1040 kg/m³ ja puutavaran pituutena on 7,2 metriä. Kuorman tilavuus V lasketaan kaavalla

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (5)$$

jossa m on kuorman massa ja ρ on puulajin tuoretiheys.

Kuorman poikkileikkauksen pinta-ala kuvaa taulukossa 3 olevaa sermin pinta-alaa. Näitä pinta-aloja vertailemalla nähdään, kuinka paljon tarvitaan 7,2 metriä

pitkää eukalyptusta, että saadaan saman massainen kuorma kuin taulukossa 3. Kuorman poikkileikkauksen pinta-ala A lasketaan kaavalla

$$A = \frac{V}{LF}, \quad (6)$$

jossa V on kuorman tilavuus, l on puutavaran pituus ja LF on kuorman tiiveyskerroin.

Vertailukuorman massana on 9823 kg. Kuorman tilavuus lasketaan sijoittamalla annetut arvot kaavaan (5)

$$V = \frac{9823 \text{ kg}}{1040 \text{ kg/m}^3} = 9,445 \text{ m}^3.$$

Kuorman poikkileikkauksen pinta-alaksi saadaan kaavalla (6)

$$A = \frac{\frac{9,445 \text{ m}^3}{7,2 \text{ m}}}{0,65} = 2,01 \text{ m}^2.$$

Taulukossa 4 on esitetty vertailukuorman laskennassa käytetyt arvot sekä laskennasta saadut tulokset. Taulukossa esitettyjä tuloksia on pyöristetty lukemisen helpottamiseksi. Taulukoiden 3 ja 4 tuloksista nähdään, miten merkittävästi saman massaisen kuorman koko voi vaihdella eri puulajien ja katkontamittojen vuoksi. Muista kuormitustapauksista laaditut taulukot ovat liitteessä 1.

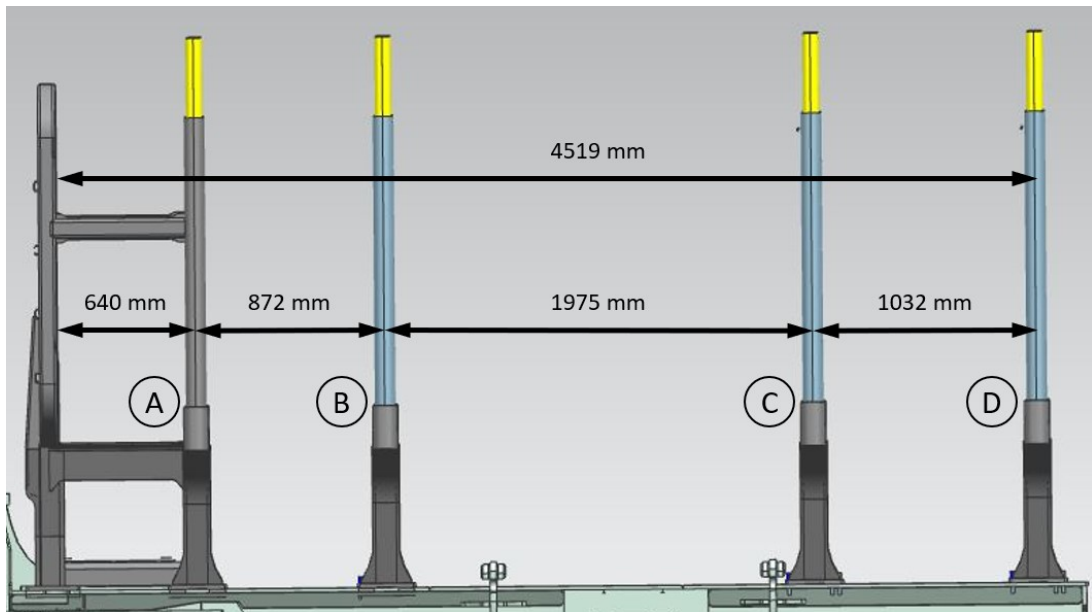
TAULUKKO 4. Vertailukuorman arvot ja tulokset

Kuorman tilavuus ja poikkipinta-ala	
Kuormitustapaus	17
Puulaji	eukalyptus
Kuorman massa (m)	9823 kg
Puutavaran pituus (l)	7,2 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	1040 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	9,4 m ³
Kuorman poikkil. pinta-ala (A)	2,0 m ²

4.3 Kuormien tukivoimat

Kuorman aiheuttamien tukivoimien laskennassa on oleellista tietää kohdat, joista kuorma on kosketuksissa koneen runkoon. Todellisuudessa kuorma tukeutuu koneen runkoon kaikkien pankkojen kautta. Puutavarakuormaa ei voida mallintaa yhtenä kiinteänä elementtinä, vaan kuormassa tapahtuu luistoa puiden pintojen välillä koneen rungon muodonmuutosten mukaan. Kuorman jakautumista kaikille pankoille on mahdotonta ratkaista statiikan tasapainoyhtälöillä, koska päädytään hyperstaattiseen eli ylituettuun tilanteeseen, jossa tuntemattomia tekijöitä on enemmän kuin tasapainoyhtälöitä. Ongelma ratkaistiin yksinkertaistamalla kuormitustilannetta jakamalla kuorman paino kahden tukipisteen kautta koneen runkoon.

Tukipisteiden paikat määräytyivät puutavaran pituuden mukaan. Kolme metriä pitkä puutavaranippu sijoitettiin symmetrisesti pankkojen B ja C päälle, mutta muut puutavaraniput mitoitettiin alkamaan sermistä. Näissä tapauksissa pankko A toimi etummaisena tukipisteenä ja pankko C tai D takimmaisena tukipisteenä. Takimmaisen tukipisteen määräsi puutavaranipun pituus. Sermin paikka sekä pankkojen väliset etäisyydet mitattiin työn tilaajan toimittamasta CAD-mallista. Kuvassa 8 on esitettyä tutkimuksen kohteena olleen lyhytrunkoisen John Deere 1910G kuormakoneen kuormatilan pituus sekä sermin ja pankkojen väliset etäisyydet. Pankot on kuvassa nimetty aakkosin A – D.



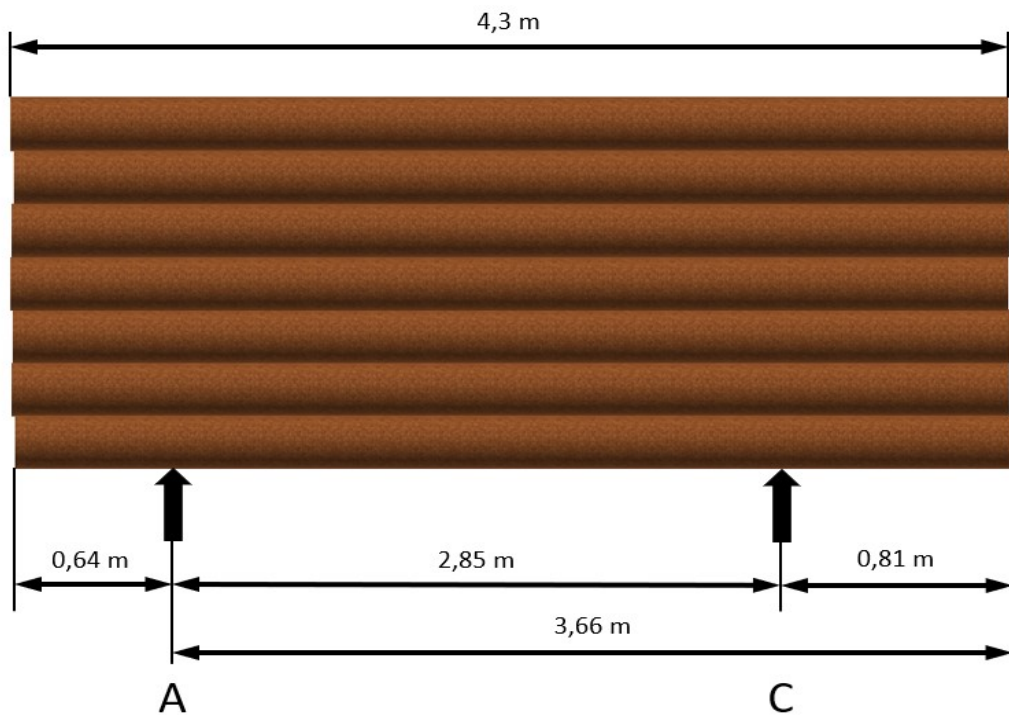
KUVA 8. John Deere 1910G kuormakoneen kuormatilan mittoja

Erimittaisten puutavarakuormien tukipisteiden paikkojen laskeminen on varsin yksinkertaista vähennyslaskua, joten sitä ei aleta tässä esittämään. Taulukossa 5 on esitettyinä ne pankkojen kirjaimet, joiden varassa 4,3 metriä pitkän puutavarakuorman etu- ja takapää lepäävät sekä tukireaktioiden laskennassa tarvittavat mitat ja etäisyydet. Muiden puutavaramittojen vastaavat taulukot ovat liitteessä 2.

TAULUKKO 5. 4,3 metriä pitkän puutavarakuorman sijainti pankoilla

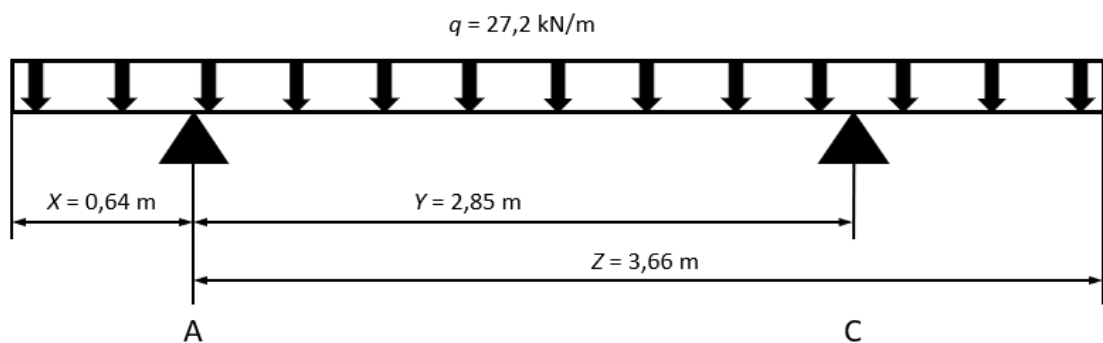
Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	4,3 m
Pankot	A & C
Pankkojen väli	2,85 m
A-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,64 m
A-pankon oik. puolelle jäävä osuus	3,66 m
C-pankon oik. puolelle jäävä osuus	0,81 m

Kuvassa 9 on esitettyinä taulukon 5 mukaisen puutavarakuorman sijainti kuormakoneen kuormatilassa.



KUVA 9. 4,3 metriä pitkän puutavarakuorman sijainti kuormatilassa

Seuraavassa laskentaesimerkissä esitetään kuormitustapauksen numero 2 tukivoimien laskenta. Kuormitustapauksen perustiedot ovat taulukoituna liitteessä 1. Kuormitustapauksen kuormana on 4,3 metriä pitkää kuusta. Kuorman paino on 116,9 kN. Laskennassa käytetyt mitat ja merkintätavat löytyvät kuvasta 10. Kuvassa esiintyvä q tarkoittaa koko kuorman pituudelle tasaisesti jakautunutta kuormaa, joka on saatu jakamalla kuorman paino G (116,9 kN) kuorman pituudella / (4,3 m).



KUVA 10. Tukivoimien laskennassa tarvittavat mitat

Laskennassa selvitetään ensin kuormitustilanteen tasaisen kuorman resultanttien suuruudet ja paikat. Resultantilla tarkoitetaan tasaisen kuormituksen muuttamista pistekuormaksi laskennassa käytettävän momenttipisteen vasemmalle ja

oikealle puolelle. Laskettu resultantti sijoitetaan laskennassa kyseisen kuorman osan puoleenväliin. Laskennassa käytetään momenttipisteenä A-tukea. Tasaisen kuorman resultantti R lasketaan kaavalla

$$R = qX, \quad (7)$$

jossa q tarkoittaa tasaisesti jakautuneen kuorman suuruutta ja X tarkoittaa kuorman pituutta momenttipisteestä mitattuna.

Resultantin paikka X_R lasketaan kaavalla

$$X_R = \frac{X}{2}, \quad (8)$$

jossa X tarkoittaa kuorman pituutta momenttipisteestä mitattuna.

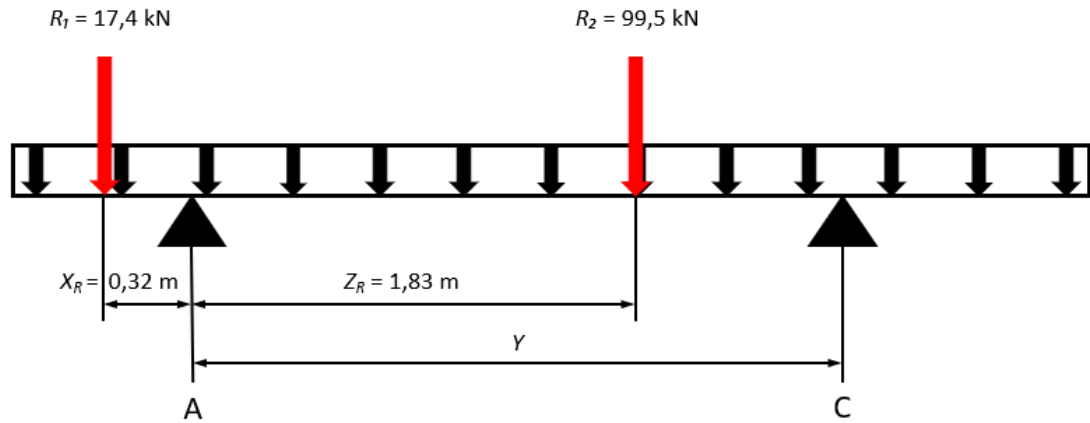
Resultantin R_1 suuruudeksi A-tuen vasemmalla puolella saadaan kaavalla (7)

$$R_1 = 27,2 \text{ kN/m} \cdot 0,64 \text{ m} = 17,4 \text{ kN}.$$

Resultantin R_1 paikaksi A-tuen vasemmalla puolella saadaan kaavalla (8)

$$X_R = \frac{0,64 \text{ m}}{2} = 0,32 \text{ m}.$$

Samalla tavalla lasketaan A-tuen oikean puolen resultantin suuruus R_2 ja sen paikka Z_R . Resultantin R_2 suuruudeksi saadaan 99,5 kN ja sen etäisyydeksi (Z_R) A-tuelta 1,83 m. Kuvassa 11 esitetään laskentaesimerkin resultanttien arvot ja sijainnit.



KUVA 11. Resultanttien arvot ja sijainnit

Resultanttien määrittämisen jälkeen voidaan laskea kuormituksen aiheuttamat tukivoimat. Tukivoimien laskennassa käytetään kahta statiikan tasapainoyhtälöä. Ensimmäisellä yhtälöllä tutkitaan pisteen A ympäri vaikuttavia momenteja ja sillä voidaan ratkaista tuntematon tekijä C. Yhtälöön on sijoitettu kuvassa 11 käytetyt suuret ja se on muotoa

$$\sum \overset{\curvearrowright}{M}_A = 0 : R_1 X_R - R_2 Z_R + C Y = 0. \quad (9)$$

Toisella yhtälöllä tutkitaan tasapainosysteemin pystysuuntaisia voimia ja sillä voidaan ratkaista tuntematon tekijä A. Yhtälöön on sijoitettu kuvassa 11 käytetyt suuret ja se on muotoa

$$\uparrow \sum F = 0 : -R_1 + A - R_2 + C = 0. \quad (10)$$

Sijoittamalla arvot yhtälöön (9)

$$\sum \overset{\curvearrowright}{M}_A = 0 : 17,4 \text{ kN} \cdot 0,32 \text{ m} - 99,5 \text{ kN} \cdot 1,83 \text{ m} + C \cdot 2,85 \text{ m} = 0$$

ja ratkaisemalla se, saadaan pisteen C tukivoimaksi 62 kN.

Sijoittamalla arvot yhtälöön (10)

$$\uparrow \sum F = 0 : -17,4 \text{ kN} + A - 99,5 \text{ kN} + 62 \text{ kN} = 0$$

ja ratkaisemalla se, saadaan pisteen A tukivoimaksi 54,9 kN. Taulukossa 6 on esitetty tukivoimien laskennassa tarvittavat voimat ja mitat sekä kuormitustilanteesta syntyneet runkoa kuormittavat tukivoimat. Loput kuormitustapauskohtaiset taulukot ovat liitteessä 3.

TAULUKKO 6. Kuorman tukivoimat

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	2
Puutavaran pituus	4,3 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	27,2 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	17,4 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	99,5 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,83 m
Tukivoima A	54,9 kN
Tukivoima C	62,0 kN

4.4 Kuormitustiedot

Kuormitustapausten laskennasta saatiin hyödyllistä tietoa koneen runkoa rasittavista voimista. Laskenta osoitti, kuinka helposti kuormakoneeseen saadaan lastattua ylikuorma kotimaisillakin puulajeilla. Todellisuudessa kuormat lastataan niin täyteen kuin mahdollista, jolloin ylikuorma suurenee entisestään. Eukalyptus osoittautui ylivoimaisesti pahimmaksi ylikuorman aiheuttajaksi. Toisaalta kuormat voivat jäädä hyvinkin pieniksi käytössä olevilla kuormatiloilla. Lyhyttä puutavaraa on mahdollista ajaa pitkärunkoisella kuormakoneella kahtakin nippua, mutta tutkinnan kohteena olevalla lyhytrunkoisella kuormakoneella se olisi todella hankalaa. Taulukkoon 7 on kerätty kaikkien kuormitustapausten mitoitus- ja kuormitustiedot.

TAULUKKO 7. Kuormitustiedot

Kuormitus- tapaus	Puulaji	Sermin pinta-ala (m ²)	Kuorman tiiveyskerroin	Puutavaran pituus (m)	Kuorman tilavuus (m ³)	Kuorman massa (kg)	Ylikuorma (kg)	Tukivoima vas. (kN)	Tukivoima oik. (kN)
1	kuusi	5,5	0,65	3,0	10,7	8312		40,8	40,8
2	kuusi	5,5	0,65	4,3	15,4	11914		54,9	62,0
3	mänty	5,5	0,65	4,3	15,4	12851		59,2	66,9
4	kuusi	5,5	0,65	5,8	20,7	16070		65,8	91,8
5	mänty	5,5	0,65	5,8	20,7	17334		71,0	99,1
6	koivu	5,5	0,65	4,1	14,7	13236		65,5	64,3
7	koivu	5,5	0,65	6,7	24,0	21629	2629	63,9	148,2
8	eukalyptus	5,5	0,65	7,2	25,7	26770	7770	62,2	200,4
9	kuusi	6,5	0,65	3,0	12,7	9823		48,2	48,2
10	kuusi	6,5	0,65	4,3	18,2	14080		64,9	73,3
11	mänty	6,5	0,65	4,3	18,2	15188		70,0	79,0
12	kuusi	6,5	0,65	5,8	24,5	18991		77,8	108,5
13	mänty	6,5	0,65	5,8	24,5	20486	1486	83,9	117,1
14	koivu	6,5	0,65	4,1	17,3	15642		77,5	76,0
15	koivu	6,5	0,65	6,7	28,3	25562	6562	75,6	175,2
16	eukalyptus	6,5	0,65	7,2	30,4	31637	12637	73,5	236,8
17	eukalyptus	2	0,65	7,2	9,4	9823		22,8	73,5

Taulukossa esitetyjä tukivoimia käytettiin rungon länkilevyjen muodonmuutoksien simulointiin ANSYS 2019 R3 -ohjelmistolla. Lisäksi suurinta tukivoimaa käytettiin voimana laskettaessa EMFi-kalvosta valmistetun anturin pinta-alaa, jos sellaiset asennettaisiin pankkojen kiinnityslevyjen alle.

5 MALLINNUSTYÖKALUT

5.1 Siemens NX 12

Siemens NX 12 on erityisesti CAD-suunnitteluohjelmisto, jolla voidaan mallintaa ohutlevykappaleita, pintamalleja sekä solid-malleja. Yksittäisten kappaleiden mallintamisen lisäksi ohjelmistolla on mahdollista tehdä vaativiakin kokoonpanoja sekä simuloida erilaisten mekanismien toimintaa. Kone- ja kokoonpanopiirustusten tekemiseen ohjelmisto tarjoaa käyttäjälleen tehokkaita ja tuottavia ominaisuuksia. (Siemens 2020).

Kappaleiden ja kokoonpanojen muodonmuutoksia ja jännityksiä voidaan simuloida ohjelmistosta löytyvällä lujuuslaskentatyökalulla. Kappaleen rakenteen hienosäätö on toteutettavissa topologian optimoinnilla. Ohjelmistosta löytyy myös omat työkalunsa putkisto- ja sähkösuunnittelulle. NX CAM tarjoaa laajat ohjelmointimahdollisuudet työstöratojen ja -arvojen määrittelyyn CAD-puolella mallinnettuihin kappaleisiin. (Siemens 2020).

5.2 ANSYS 2019 R3

ANSYS on maailman johtava teknisiä simulointiohjelmia suunnitteleva ja markkinoiva yhdysvaltalainen yritys. ANSYS 2019 R3 on ohjelmistokokonaisuus, joka tarjoaa käyttäjälleen laskenta- ja simulaatio-ohjelmia moniin eri tarkoituksiin. Ohjelmistolla on mahdollista simuloida nesteiden ja kaasujen virtausta erilaisissa putkistoissa sekä rakenteiden tuuliherkkyyttä ja muita virtausteknisiä ominaisuuksia. (Ansys 2020.)

Tunnetuin ANSYS 2019 R3:n käyttöalue on varmasti mekaanisten rakenteiden muodonmuutos- ja jännitysanalyysi. Sen toiminta perustuu elementtimenetelmän hyväksikäyttöön, jossa tutkittava alue on jaettu äärellisiin osiin eli elementeiksi. Elementit liittyvät toisiinsa solmujen avulla. Kappaleen rakenneanalyysi perustuu

solmupisteiden siirtymiin ja jännityksiin. (Lähteenmäki 2020.) Ohjelmistoon kuuluva SpaceClaim on 3D-mallinnusohjelma, jolla on mahdollista mallintaa ja viimeistellä simuloitavaksi meneviä kappaleita ja kokoonpanoja. (Ansys 2020.)

6 LÄNKILEVYJEN ANTUROINTIMAHDOLLISUUS

6.1 CAD-mallin valmistelu

Cad-mallin valmistelu muodonmuutossimulointia varten aloitettiin Siemens NX:lla. Mallin kokoonpanosta poistettiin ensin kaikki ylimääräiset komponentit. Näitä olivat taka-akselisto, pulttikiinnitteiset suojalevyt, pultit ja muut kiinnitystarvikkeet sekä pankot ja sermi. Vain pankkojen ja sermin kiinnityslevyt jätettiin paikoilleen. Tämän jälkeen mallista poistettiin kaikki laskennan kannalta tarpeettomat osat ja pyöritykset sekä tukittiin kaikki ylimääräiset reiät. Tämänkaltaisen CAD-mallin valmistelu ennen muodonmuutossimulointia on välttämätöntä tietokoneen laskentakapasiteetin säästämiseksi.

Useat käytössä olleen CAD-mallin osat olivat pintamalleja. Tämän vuoksi kyseisillä osilla ei ollut tilavuutta, eikä niille ollut myöskään voitu määrittellä materiaalia. Nämä osat korjattiin solid-malleiksi. Toimivan simulointimallin edellytys on se, että kaikki kokoonpanon kappaleet ovat kiinnitettyinä toisiinsa samalla tavalla kuin ne on tarkoitus kiinnittää oikeassakin kokoonpanossa. Tästä syystä joidenkin osien pintoja oli tarve hieman venyttää ja lisätä pintoihin tarvittavat liitokset. Käytössä ollut CAD-malli oli ilmeisesti kokoonpanomalli, johon oli jätetty tarvittavat hitsausvarat, eikä sellaisenaan soveltunut simulointikäyttöön.

Länkilevyjen kontaktipintojen välisten alueiden muodonmuutosten määrittäminen edellytti länkilevyjen kontaktipintoihin kiinnitettyjen referenssiiviisareiden mallintamista. Viisareiden kärjet mitoitettiin noin millimetrin päähän niistä länkilevyjen kohdista, joista haluttiin tutkia kuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia. Viisareiden kärkien siirtymiä käytettiin referenssipisteinä laskettaessa länkilevyjen muodonmuutoksia. Kuvassa 12 on nähtävillä koneen takarungon oikeanpuoleinen länkilevy referenssiiviisareineen. Kuvassa näkyvä verkotus on muodonmuutossimuloinnin vaatima verkko.

Poistettu salassa pidettävänä.

KUVA 12. Länkilevy referenssiivisareineen

6.2 Simuloinnin valmistelut

Muodonmuutosten simulointi suoritettiin ANSYS Mechanical -ohjelmalla. Lähtötietoihin kirjattiin kimmokertoimeksi (E) 210 GPa, joka on yleisesti käytetty teräksen kimmokerroin (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2016, 151). Kuormakoneen rungossa käytetään kolmea erilaatuista rakenneterästä. Ohuimmissa levyosissa, vahvuudeltaan 6 – 10 mm, on käytetty (salattua tietoa). Paksuimpien levyosien, vahvuudeltaan 40 – 60 mm, teräslaatu on (salattua tietoa). Tätä teräslaatu on käytetty länkilevyjenkin materiaalina. Muissa levyosissa on materiaalina (salattua tietoa). Kaikki teräslaadut ovat hitsattavissa ilman erikoismenetelmiä. (Karhunsaaari 2020.) Teräslaadun nimessä mainittu numerosarja ilmoittaa teräksen myötörajan. Myötöraja on se jännitys (MPa), jonka ylittäminen aiheuttaa rakenteessa pysyvän muodonmuutoksen. Myötörajan suuruudella ei ole merkitystä muodonmuutoksen simuloinnissa, koska kuormitus on lineaarista eikä myötörajaa ylitetä. Myötörajan arvoa käytetään rakenteen varmuusluvun laskennassa. Muodonmuutosten suuruuteen vaikuttaa kimmokertoimen arvo.

Elementtimenetelmän kannalta oleellinen verkotus tehtiin 45 millimetrin verkolla. Verkon koko vaikuttaa laskentaelementtien ja solmujen lukumäärään. Liian tiheä verkko kuormittaa tietokoneen laskentakapasiteettia ja siten pidentää simulaation ratkaisemiseen kuluvaa aikaa. CAD-malliin luotiin tukipisteet, jotka vastasivat todellista tilannetta. Rungon etupää tuettiin runkonivelen korvakkeista ja takapää länkilevyjen keskilinjalta. Tukipisteille sallittiin tarvittavat liikesuunnat ja kiertymät. Länkilevyjen kuormituksenaikaisten kiertymien vuoksi oli välttämätöntä käyttää

referenssipisteitä länkilevyjen muodonmuutosten selvittämiseen. Sekä referenssiivareiden että länkilevyjen mittapisteiden siirtymistä voitiin laskea halutun kohdan muodonmuutos. Länkilevyjen kontaktipintojen ja referenssiivareiden muodonmuutokset estettiin.

Runkomallille tehdyllä Modal-analyysillä tarkastettiin vielä kaikkien kokoonpanossa olevien osien kiinnitys. Modal-analyysi on rakenteen ominaistajuusanalyysi, jossa osan matala ominaistajuus paljastaa sen puutteellisen kiinnityksen. Rakenneanalyysi saattaa keskeytyä kappaleessa olevien puutteellisten liitosten vuoksi ja viallista liitosta voi olla hankala paikallistaa muuten kuin Modal-analyysillä.

6.3 Länkilevyjen muodonmuutokset

Kuormakoneen runkorakenteita kuormittavat todellisessa tilanteessa puutavara-kuorman lisäksi muutkin voimat. Näitä ovat esimerkiksi päällirakenteen paino, kuten nosturista, sermistä ja pankoista aiheutuva paino sekä maan vetovoima. Lisäksi dynaamisia voimia runkoon tuottavat koneen kääntely, ajo epätasaisessa maastossa, telien keinuntaa rajoittavat telistopparit ja koneen etu- ja takarungon välisen kiertymän kuormauksen ajaksi estävä runkolukko.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin runkoa kuormittavien staattisten voimien aiheuttamia muodonmuutoksia. Voimina käytettiin erilaisten kuormien painoja sekä nosturin ja voimalinjan tuottamia momenteja. Toimivaan laskentamalliin lisättiin pohjakuormitukseksi sekä sermin että pankkojen paino ja maan vetovoima. Nämä voimat aiheuttivat sekä referenssiivareiden että länkilevyjen mittauspisteissä siirtymiä. Näitä siirtymiä käytettiin siirtymien 0-pisteinä. Mitatut siirtymät on esitetty taulukossa 8. Siirtymien yksikkö vaihdettiin millimetristä mikrometriksi, koska se helpottaa muodonmuutosten suuruuden suhteuttamista EMFi-kalvon paksuuteen, joka on joko 37 μm tai 70 μm . Mittauspisteet on nimetty siten, että ne kuvaavat niiden sijaintia oikean ja vasemman länkilevyn eri osissa.

TAULUKKO 8. Siirtymien 0-pisteet

Poistettu salassa pidettävänä.

Siirtymien 0-pisteistä voitiin laskea länkilevyjen muodonmuutosten 0-pisteet. Näissä pisteissä on otettu huomioon ne muodonmuutokset, jotka sermin ja pankkojen paino sekä maan vetovoima länkilevyihin aiheuttavat. Muodonmuutosten suuruus laskettiin vähentämällä mittauspisteen siirtymästä kyseisen referenssipisteen siirtymä. Muodonmuutosten 0-pisteet on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Muodonmuutosten 0-pisteet

Poistettu salassa pidettävänä.

Kuormitustapausten aiheuttamat siirtymät simuloitiin neljällä erilaisella voiman ja momentin yhdistelmällä. Aluksi voimana oli vain kuorman paino. Tämän jälkeen systeemiin lisättiin vetomomentti, nosturimomentti ja näiden yhdistelmä. Vetomomentin suuruus oli (salattua tietoa), joka on vetomoottorin tuottama maksimimomentti (Laitinen 2020). Nosturin aiheuttamana momenttina käytettiin nosturin maksiminostomomenttia, joka on (salattua tietoa) (Karhunsaaari 2020). Molemmat momentit vaikuttivat rungossa samaan suuntaan. Kuvassa 13 on nähtävillä viidennen kuormitustapauksen kuormitustilanne simulointia varten.

Poistettu salassa pidettävänä.

KUVA 13. Kuormitustilanne simulointia varten

Kaikkien kuormitustapausten mittaustulokset taulukoitiin muodonmuutosten laskemista varten. Taulukkoon 10 on kerätty ensimmäisen kuormitustapauksen aiheuttamat siirtymät kuormakoneen länkilevyissä ja referenssipisteissä. Muiden kuormitustapausten mittaustulokset ovat liitteessä 4.

TAULUKKO 10. Mitattuja siirtymiä

Poistettu salassa pidettävänä.

Länkilevyjen kuormitustapauskohdaiset muodonmuutokset voitiin laskea referenssi- ja mittauspisteiden siirtymien avulla. Muodonmuutosten suuruus laskettiin vähentämällä mittauspisteen siirtymästä kyseisen referenssipisteen siirtymä. Saadusta tuloksesta vähennettiin vielä kyseisen mittauspisteen muodonmuutoksen 0-pisteen arvo. Taulukossa 11 on esitettyä ensimmäisen kuormitustapauksen aiheuttamat muodonmuutokset länkilevyissä. Muiden kuormitustapausten muodonmuutokset ovat liitteessä 5.

TAULUKKO 11. Muodonmuutoksia

Poistettu salassa pidettävänä.

6.4 Paikkakohtaiset muodonmuutokset

Mittaustuloksia kannattaa havainnollistaa kaavioilla, varsinkin kun mittausdataa on suuri määrä. Erilaisten mittaustulosten havainnollistamiseen on käytettävissä monenlaisia kaavioita, joista yleisimpiä ovat viiva-, pylväs- ja ympyräkaavio. Paikkakohtaisten muodonmuutoskaavioiden laatimiseksi kuormitustapauskohdaiset

muodonmuutokset kerättiin paikkakohtaisiksi muodonmuutostaulukoiksi. Taulukossa 12 on koottuna oikean länkilevyn yläosan muodonmuutokset kaikilla kuormitustapauksilla. Loput paikkakohtaiset muodonmuutostaulukot ovat liitteessä 6.

TAULUKKO 12. Paikkakohtainen muodonmuutos

Poistettu salassa pidettävänä.

Kuormitustapauksista 1 – 16 laadittiin paikkakohtaiset muodonmuutoskaaviot. Kaavioissa on nähtävillä länkilevyjen mittauspisteiden muodonmuutokset kaikilla voiman ja momenttien yhdistelmillä. Länkilevyjen etuosien muodonmuutosten negatiiviset arvot muutettiin positiivisiksi, että kaikkien kaavioiden rakenne pysyisi samanlaisena ja niitä olisi siten helpompi vertailla. Kaavioihin lisättyjen trendiviivojen hajonnasta voidaan tehdä päätelmiä kyseisen länkilevyn kohdan soveltuvuudesta kuormanvalvonta-anturoinnin sijoituspaikaksi. Kuviossa 1 on nähtävillä erilaisten kuormitustilanteiden vaikutus oikean länkilevyn yläosaan. Länkilevyjen muiden mittauspisteiden muodonmuutoskaaviot ovat liitteessä 7.

Poistettu salassa pidettävänä.

KUVIO 1. Oikean länkilevyn yläosan muodonmuutoshajonta

Kuormitustapauksilla 9 ja 17 tutkittiin samanpainoisten, mutta erimittaisesta puutavarasta koostuvien kuormien aiheuttamia muodonmuutoseroja länkilevyjen eri osissa. Tällä pyrittiin selvittämään kuormanvalvonta-anturoinnin tarpeellisuutta kuormakoneen molemmilla akseleilla. Kuviossa 2 on nähtävillä muodonmuutoserot oikean länkilevyn yläosassa vertailukuormilla. Länkilevyjen muiden mittauspisteiden muodonmuutoskaaviot ovat liitteessä 8.

Poistettu salassa pidettävänä.

KUVIO 2. Muodonmuutoserot vertailukuormilla

6.5 Tarvittavat muutostyöt

Koneiden kehitystyö aiheuttaa useasti muutostarpeita vanhoihin rakenteisiin. Muutostarpeiden suuruus ratkaisee sen, onko uusi ominaisuus tai lisävaruste taloudellisesti kannattavaa jälkiasentaa vanhaan koneeseen, vai jääkö se vain uusien koneiden ominaisuudeksi. EMFi-kalvoanturoinnin toteuttaminen länkilevyjen muodonmuutosten mittaamiseen vaatisi taka-akseliin valumuutoksen, sillä anturi vaatii suoran asennuspinnan. Pinta olisi myös koneistettava, samoin vastinpin-tana toimiva länkilevyn yläosa. Kuvassa 14 on taka-akselin CAD-malli, johon on lisätty tarvittava valumuutos.

Poistettu salassa pidettävänä.

KUVA 14. Taka-akselin valumuutos

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale, jossa käsiteltiin taka-akseliin tehtäviä valumuutoksia ja länkilevyn asennettavan EMFi-kalvoanturin rakennetta.

7 PANKKOJEN ANTUROINTIMAHDOLLISUUS

7.1 EMFi-kalvon pinta-alatarve

Kuormakoneen kuormakoon valvonta pankkojen alle sijoitetuilla voima-antureilla antaisi lähes häiriötöntä tietoa kuorman suuruudesta. Koneeseen kohdistuvat iskut ja väännöt eivät merkittävästi sekoittaisi mittaustulosta. Ongelmana on anturien asennus, joka edellyttää painavan ja kalliin apurungon käyttöä. EMFi-kalvosta valmistettujen tasoantureiden käyttö poistaisi apurungon käyttötarpeen, sillä anturi olisi mahdollista asentaa suoraan pankkojen alle. Anturin rakennetta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon pankkoihin kohdistuvat rungonsuuntaiset iskut ja jännitykset, jotka kuormittavat pankkojen kiinnityslevyjä. Pankkojen kiinnityskohdissa esiintyvät hitsausvääntyiilystä johtuvat muoto-poikkeamat tulisi myös huomioida anturin kiinnityksessä, sillä anturiin ei saisi jäädä vääntöjännityksiä.

EMFi-kalvoanturin pinta-alatarpeen laskennassa käytettiin maksimivoimana kuormitustapausten suurinta tukivoimaa, joka oli 236800 N. Pintapaineen arvona käytettiin Emfit Oy:n valmistaman L-sarjan EMFi-kalvon maksimipintapainetta, joka on 3 MPa (N/mm²) (Emfit 2019). Tarvittava kalvon pinta-ala A lasketaan kaavalla

$$A = \frac{F}{P}, \quad (11)$$

jossa F on voima ja P on pintapaine (Peltola 2018). Pinta-alaksi saadaan kaavalla (11)

$$A = \frac{236800 \text{ N}}{3 \text{ N/mm}^2} = 78933 \text{ mm}^2.$$

Laskettu pinta-ala jaetaan kahdella, koska kuorman paino jakautuu koneen rungolle kahden pisteen kautta. Kuormakonetta kuormittavien dynaamisten voimien

vuoksi anturin varmuudeksi haluttiin kuitenkin 2, jolloin EMFi-kalvon pinta-alar-
peeksi tulee 78933 mm².

7.2 EMFi-kalvoanturin mitoitus

Tämä luku on poistettu salassa pidettävänä. Tässä luvussa mitoitettiin pankkojen
alle asennettavat EMFi-kalvoanturit sekä pohdittiin anturin rakenteessa ja asen-
nuksessa huomioitavia asioita.

8 RENKAIDEN ANTUROINTIMAHDOLLISUUS

8.1 EMFi-kalvo paperikoneen telassa

Valmet Technologies on hyödyntänyt EMFi-kalvon hyviä anturiominaisuuksia ja monipuolisia asennusmahdollisuuksia paperikoneidensa teloissa. Telan pinnoitteen alle asennettavalla anturikalvolla on mahdollista valvoa telan paineprofiilia koko telan leveydeltä. Paineprofiilin muutokset kertovat telan kulumisesta tai telaan tarttuneesta jäämästä. Telan paineprofiilia valvomalla voidaan parantaa lopputuotteen laatua, lisäksi saadaan tärkeää tietoa telan huollon tarpeesta. (Peltonen 2015, 24 – 25.)

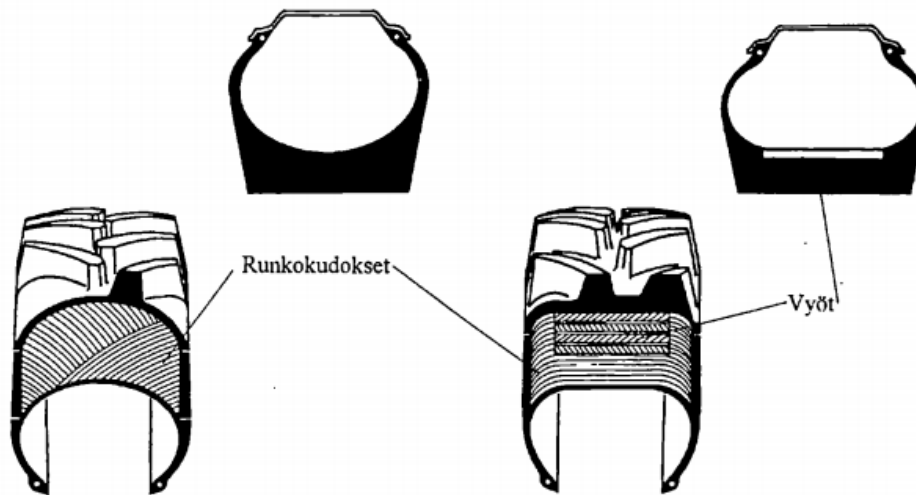
Rajotteena EMFi-kalvon käytölle paperikoneiden telojen valvonnassa on kalvon lämmön kesto. Paperin valmistusprosessissa käytettävät lämpötilat eivät ole kalvolle liian korkeita, mutta telan pinnoitteen asennuksessa käytettävät lämpötilat voivat tuhota kalvon. Tämän vuoksi EMFi-kalvoa on käytetty vain teloissa, joiden pinnoitemateriaalin asentaminen ei vaadi liian korkeita lämpötiloja. (Peltonen 2015, 24 – 25.)

Kapea EMFi-kalvonauha asennetaan telarungon päälle spiraalin muotoon, niin että se kattaa koko telan pinta-alan. Kalvon spiraalimaisen asennuksen ansiosta telassa ilmenneet ongelmat voidaan paikoittaa tarkasti. Telan jäykän runkorakenteen vuoksi kalvon ei tarvitse venyä kuormitustilanteessa. (Peltonen 2015, 24 – 25.)

8.2 EMFi-kalvon asentaminen renkaan valmistusvaiheessa

Metsäkonekäyttöön suunnitellut renkaat ovat rakenteeltaan ristikudosrenkaita. Ristikudosrenkaan hyviä puolia ovat kantavuus, vakaat ajo-ominaisuudet ja kestävyys raskaissa ajo-olosuhteissa. Renkaan vahva rakenne kestää hyvin sen runkoon kohdistuvia pistoja. (Alakukku, Elonen & Koskinen 1995.) Ristikudosrenkaan runko koostuu useista ristikkäisistä teräskudoskerroksista. Kudokset muodostavat renkaan keskilinjan kanssa kulman, joka on yleensä 30° – 40°. Renkaan

suuri kudokset määrä lisää vierintävastusta ja aiheuttaa renkaan lämpiämistä lyhentäen sen käyttöikä, siksi ristikudosrenkaan käyttöalue rajoittuu hitaaseen työkonekäyttöön. Pienen vierintävastuksen vuoksi vyörengas sopii nopeaan ajoon ristikudosrengasta paremmin. (Craelius 1994, 27 – 32.) Kuva 15 havainnollistaa ristikudos- ja vyörengaan rakenteiden eroja.



KUVA 15. Ristikudos- ja vyörengaan rakenne (Alakukku ym. 1995)

Ajoneuvon paino välittyy ajoalustaansa renkaiden kautta, joten renkasiin asennettu kuormantunteva anturointi antaisi tarkan tiedon ajoneuvon kuormituksesta. EMFi-kalvon asentaminen metsäkonerenkaan kulutuspinnaan alle renkaan valmistusvaiheessa tai uuden kulutuspinnan pinnoituksen yhteydessä olisi edullinen ja helposti jälkiasennettava tapa toteuttaa kuormakoneen kuorman valvonta.

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale, jossa käsiteltiin metsäkonerenkaan valmistusprosessia ja EMFi-kalvon asennusmahdollisuutta renkaan kulutuspinnaan alle renkaan valmistusvaiheessa.

8.3 EMFi-kalvon asentaminen renkaan pinnoitusvaiheessa

Ajoneuvorenkaan pinnoittaminen on renkaan käyttöiän lisäämiseen tähtäävää toimintaa. Erityisesti raskaankaluston renkaiden pinnoittaminen on hyvin yleistä. Pinnoitettujen raskaankaluston renkaiden kilometritulokset ovat jopa parempia kuin alkuperäisillä pinnoilla (Räty 1993, 1). Pinnoituksessa käytetään kahta eri

menetelmää. EV-pinnoituksella tarkoitetaan ahiopuristamalla valmistettujen esivulkanoitujen kulutuspintojen käyttöä renkaan pinnoituksessa. Tämä on yleinen menetelmä kuorma-auton renkaiden pinnoituksessa. Työkoneiden renkaiden pinnoitusmenetelmänä käytetään muottipinnoitusta. Menetelmässä uuden kulutuspinnan raaka-aine suulakepuristetaan renkaan rungon päälle ja paisto suoritetaan metalli- tai kumimatriisissa. (Räty 1993, 54 – 66.)

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale, jossa käsiteltiin EMFi-kalvon asennusmahdollisuutta renkaan kulutuspinnan alle renkaan pinnoituksen yhteydessä.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta käyttää EMFi-kalvoa kuormakoneen kuormakoon valvonnassa. EMFi-kalvopohjaiselle anturille etsittiin sijoituspaikkaa, jossa mittaustietoa häiritsevää virhedataa syntyisi mahdollisimman vähän. Tässä työssä tutkittiin kolmea erilaista tapaa toteuttaa kuormakoneen kuorman valvonta EMFi-kalvolla. Anturoinnin asennusta tutkittiin myös jälkiasennusmahdollisuuden näkökulmasta, sillä helposti vanhaankin koneeseen jälkiasennettava kuormanvalvontajärjestelmä nostaisi opinnäytetyön tilaajan valmistamien kuormakoneiden teknistä tasoa ja niiden markkina-arvoa.

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale. Siinä käsiteltiin tuloksia, jotka saatiin tutkittaessa mahdollisuutta asentaa EMFi-kalvo renkaan kulutuspinnaan alle.

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale. Siinä käsiteltiin tuloksia, jotka saatiin tutkittaessa mahdollisuutta asentaa EMFi-kalvo kuormakoneen pankkojen alle.

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale. Siinä käsiteltiin tuloksia, jotka saatiin tutkittaessa mahdollisuutta asentaa EMFi-kalvo kuormakoneen rungon länki-levyihin.

Tästä on poistettu salassa pidettävä kappale, jossa käsiteltiin opinnäytetyön perusteella esiin tulleita jatkotutkimuskohteita.

Aihe oli erittäin mielenkiintoinen, mutta myös vaativa ja laaja. Opinnäytetyön tekeminen vaati monen eri osa-alueen osaamista ja tutkimista sekä erilaisten tietojen yhdistämistä. Työssä tarvittavaa EMFi-kalvoa koskevaa tietoa oli saatavilla vain vaikeaselkoisten artikkeleiden muodossa. Alaa tuntevat yritykset eivät luonnollisesti halunneet jakaa omia tutkimustuloksiaan muiden osapuolien tarpeisiin. Monissa muissa opinnäyte- ja diplomitoissa teettäjänä on ollut EMFi-kalvoa tutkiva ja kehittävä yritys, jolloin heidän tietonsa ja aineistonsa on ollut opiskelijan käytössä. Opinnäytetyön tekeminen antoi selvän käsityksen kuormakoneen kuorman valvonnan tarpeellisuudesta ja tutkimusongelman ratkaisun vaikeudesta.

Opinnäytetyöprosessissa eniten aikaa kului CAD-mallin simulointivalmisteluihin ja -asetusten tekemiseen, koska ANSYS oli ennalta tuntematon ohjelmisto. Länkilevyjen muodonmuutosten mittaaminen tuotti vaikeuksia, koska länkilevyjen mittauspisteissä tapahtui siirtymää sekä muodonmuutosten että rungon taipumisen takia. Tästä seurasi paljon laskentaa, että rungon taipumisen aiheuttamat siirtymät saatiin erotettua pois länkilevyjen muodonmuutoksista.

Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet saavutettiin tuottamalla kuormanvalvontatutkimukselle hyvää pohjatietoa, jonka perusteella aihetta voidaan kehittää ja tutkia tulevaisuudessa lisää. John Deere Forestry pystyy jatkamaan tutkimusta tämän opinnäytetyön perusteella ja kehittämään kuormakoneidensa teknistä tasoa sekä helpottamaan koneenkuljettajien työtä.

LÄHTEET

Akhbardeh, A., Junnila, S. & Värrä, A. 2008. An Electromechanical Film Sensor Based Wireless Ballistocardiographic Chair: Implementation and Performance. *Journal of Signal Processing Systems* 57, 305 – 320.

Alakukku, L., Elonen, E. & Koskinen, P. 1995. Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen. *Vakolan tiedote* 69/95.

Ansys. 2020. Products. Luettu 6.4.2020. <https://www.ansys.com/>

AZoM. 2001. Elastic Electret Film. Luettu 1.4.2020.

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=398>

Craelius, K. 1994. Kuorma-auton renkaat. Espoo: Erkki Ahlavuo Oy.

Drushka, K. & Konttinen, H. 1997. *Tracks in the Forest*. Keuruu: Otava.

Emfit. 2019. Solutions. Luettu 2.4.2020.

<https://www.emfit.com/sleep-sensing-solutions-with-hrv?lang=fi>

Halonen, M. 1998. Puutavaralajit ja niiden laatuvaatimukset. Teoksessa Hakala, J., Häyrynen, M., Riikilä, M. & Puonti, E. (toim.) *Metsälehdän metsäkoulu*. Kajaani: Kainuun Sanomain Kirjapaino, 103 – 110.

Heiska, K. 2004. VTT kehitti kuumuutta kestävästä sähkömekaanisesta kalvosta. Luettu 3.4.2020. <http://www.tiedetoimittaja.com/sivut/durasmart.html>

John Deere. 2020. Metsäkoneet. Luettu 4.4.2020.

<https://www.deere.fi/fi/mets%C3%A4koneet/>

Karhunsaaari, M. John Deere Forestry Oy, chief design engineer. 2020. Haastattelu 21.2.2020. Haastattelija Välimaa, E. Tampere.

Keim, R. 2018. Understanding and Implementing Charge Amplifiers for Piezoelectric Sensor Systems. Luettu 4.4.2020.

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-and-implementing-charge-amplifiers-for-piezoelectric-sensor-s/>

Kirjavainen, K., Leikkala, J. & Paajanen, M. 2000. ElectroMechanical Film (EMFi) — a new multipurpose electret material. *Sensors & Actuators* 84 (1 – 2), 95–102.

Koskinen, A-L. 2018. John Deere siirtää tuotekehitystä Pohjois-Amerikasta Suomeen. Luettu 1.4.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-10457164>

Laakso, M. John Deere Forestry Oy, sales & support manager. 2020. Haastattelu 24.2.2020. Haastattelija Välimaa, E. Tampere.

Laitinen, T. John Deere Forestry Oy, suunnittelupäällikkö. 2020. Haastattelu 21.2.2020. Haastattelija Välimaa, E. Tampere.

Lekkala, J., Paajanen, M. & Välimäki, H. 2000. Modelling the electromechanical film (EMFi). *Journal of Electrostatics* 48 (3 – 4), 193 – 204.

Lekkala, J. & Rajala, S. 2010. Film-Type Sensor Materials PVDF and EMFi in Measurement of Cardiorespiratory Signals. *IEEE Sensors Journal* 12 (3), 439 – 446.

Luonnonvarakeskus. 2017. Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista. Luettu 5.4.2020.

https://www.luke.fi/wp-content/uploads/2018/03/Luonnonvarakeskuksen_maarays_puutavaran_mittaukseen_liittyvista_muuntoluvuista_FI_22122017.pdf

Lähteenmäki, M. 2020. Elementtimenetelmän perusteet. Luettu 8.4.2020.

https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

Markkinointi&Mainonta. 2005. Timberjack vaihtui John Deereksi. Luettu 1.4.2020. <https://www.marmai.fi/uutiset/timberjack-vaihtui-john-deereksi/>

Mccomb, J. A., Meddings, R., Siemon, G. & Davis, S. 2004. Wood density and shrinkage of five-year-old *Eucalyptus camaldulensis* × *E. globulus* hybrids: preliminary assessment. *Australian Forestry* 1/2004, 236-239.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2016. Tekniikan kaavasto. 16. painos. Tampere: AMK-Kustannus Oy. Tammertekniikka.

PanPhonics. 2016. Directional Audio. Luettu 31.3.2020.

<https://panphonics.com/directional-audio/>

Peltola, M. 2018. Lujuusoppi 1 -Perusteet. Lujuusoppi-opintojakson oppimateriaali. PDF-tiedosto. Tabula. TAMK.

Peltonen, K. 2015. Muovikalvo kertoo paineprofiilin. *Metallitekniikka* 11/2015, 24-25.

Räty, I. 1993. Ajoneuvojen renkaiden pinnoittaminen. Espoo: Erkki Ahlavuo Oy.

Screeotec. 2020. Palvelut. Luettu 1.4.2020.

<https://www.screotec.com/fi/palvelut/>

Siemens. 2020. Products. Luettu 6.4.2020.

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>

Vainionpää, T. Nokian heavy tyres Ltd, product manager. 2020. Tietoa renkaanvalmistuksesta. Sähköpostiviesti. Luettu 2.4.2020.

LIITTEET

Liite 1. Kuormitustapaukset

1 (3)

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	1
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	3,0 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	10,7 m ³
Kuorman massa (m)	8312 kg
Kuorman paino (G)	81539 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	4
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	5,8 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	20,7 m ³
Kuorman massa (m)	16070 kg
Kuorman paino (G)	157643 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	2
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	4,3 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	15,4 m ³
Kuorman massa (m)	11914 kg
Kuorman paino (G)	116873 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	5
Puulaji	mänty
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	5,8 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	836 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	20,7 m ³
Kuorman massa (m)	17334 kg
Kuorman paino (G)	170051 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	3
Puulaji	mänty
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	4,3 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	836 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	15,4 m ³
Kuorman massa (m)	12851 kg
Kuorman paino (G)	126072 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	6
Puulaji	koivu
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	4,1 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	903 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	14,7 m ³
Kuorman massa (m)	13236 kg
Kuorman paino (G)	129842 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	7
Puulaji	koivu
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	6,7 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	903 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	24,0 m ³
Kuorman massa (m)	21629 kg
Kuorman paino (G)	212182 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	10
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	4,3 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	18,2 m ³
Kuorman massa (m)	14080 kg
Kuorman paino (G)	138123 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	8
Puulaji	eukalyptus
Sermin pinta-ala (A)	5,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	7,2 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	1040 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	25,7 m ³
Kuorman massa (m)	26770 kg
Kuorman paino (G)	262610 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	11
Puulaji	mänty
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	4,3 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	836 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	18,2 m ³
Kuorman massa (m)	15188 kg
Kuorman paino (G)	148995 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	9
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	3,0 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	12,7 m ³
Kuorman massa (m)	9823 kg
Kuorman paino (G)	96365 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	12
Puulaji	kuusi
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	5,8 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	775 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	24,5 m ³
Kuorman massa (m)	18991 kg
Kuorman paino (G)	186305 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	13
Puulaji	mänty
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	5,8 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	836 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	24,5 m ³
Kuorman massa (m)	20486 kg
Kuorman paino (G)	200969 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	16
Puulaji	eukalyptus
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	7,2 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	1040 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	30,4 m ³
Kuorman massa (m)	31637 kg
Kuorman paino (G)	310357 N

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	14
Puulaji	koivu
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	4,1 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	903 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	17,3 m ³
Kuorman massa (m)	15642 kg
Kuorman paino (G)	153450 N

Kuorman tilavuus ja poikkipinta-ala	
Kuormitustapaus	17
Puulaji	eukalyptus
Kuorman massa (m)	9823 kg
Puutavaran pituus (l)	7,2 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	1040 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	9,4 m ³
Kuorman poikkil. pinta-ala (A)	2,0 m ²

Kuorman tilavuus, massa ja paino	
Kuormitustapaus	15
Puulaji	koivu
Sermin pinta-ala (A)	6,5 m ²
Puutavaran pituus (l)	6,7 m
Kuorman tiiveyskerroin (LF)	0,65
Puulajin tiheys (ρ)	903 kg/m ³
Kuorman tilavuus (V)	28,3 m ³
Kuorman massa (m)	25562 kg
Kuorman paino (G)	250760 N

Liite 2. Kuormien sijainti pankoilla

1 (2)

Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	3,0 m
Pankot	B & C
Pankkojen väli	1,98 m
B-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,51 m
B-pankon oik. puolelle jäävä osuus	2,49 m
C-pankon oik. puolelle jäävä osuus	0,51 m

Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	4,1 m
Pankot	A & C
Pankkojen väli	2,85 m
A-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,64 m
A-pankon oik. puolelle jäävä osuus	3,46 m
C-pankon oik. puolelle jäävä osuus	0,61 m

Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	4,3 m
Pankot	A & C
Pankkojen väli	2,85 m
A-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,64 m
A-pankon oik. puolelle jäävä osuus	3,66 m
C-pankon oik. puolelle jäävä osuus	0,81 m

Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	5,8 m
Pankot	A & D
Pankkojen väli	3,88 m
A-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,64 m
A-pankon oik. puolelle jäävä osuus	5,16 m
D-pankon oik. puolelle jäävä osuus	1,28 m

Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	6,7 m
Pankot	A & D
Pankkojen väli	3,88 m
A-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,64 m
A-pankon oik. puolelle jäävä osuus	6,06 m
D-pankon oik. puolelle jäävä osuus	2,18 m

Kuorman sijainti pankoilla	
Puutavaran pituus	7,2 m
Pankot	A & D
Pankkojen väli	3,88 m
A-pankon vas. puolelle jäävä osuus	0,64 m
A-pankon oik. puolelle jäävä osuus	6,56 m
D-pankon oik. puolelle jäävä osuus	2,68 m

Liite 3. Kuormien aiheuttamat tukivoimat

1 (3)

Kuorman aiheuttamat tukivoimat		Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	1	Kuormitustapaus	5
Puutavaran pituus	3,0 m	Puutavaran pituus	5,8 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	27,2 kN/m	Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	29,3 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	13,9 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	18,8 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	67,6 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	151,3 kN
R_1 :n paikka B-pankolta mitattuna (vas.)	0,26 m	R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka B-pankolta mitattuna (oik.)	1,24 m	R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	2,58 m
Tukivoima B	40,8 kN	Tukivoima A	71,0 kN
Tukivoima C	40,8 kN	Tukivoima D	99,1 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat		Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	2	Kuormitustapaus	6
Puutavaran pituus	4,3 m	Puutavaran pituus	4,1 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	27,2 kN/m	Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	31,7 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	17,4 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	20,3 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	99,5 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	109,6 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m	R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,83 m	R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,73 m
Tukivoima A	54,9 kN	Tukivoima A	65,5 kN
Tukivoima C	62,0 kN	Tukivoima C	64,3 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat		Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	3	Kuormitustapaus	7
Puutavaran pituus	4,3 m	Puutavaran pituus	6,7 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	29,3 kN/m	Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	31,7 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	18,8 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	20,3 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	107,3 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	191,9 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m	R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,83 m	R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	3,03 m
Tukivoima A	59,2 kN	Tukivoima A	63,9 kN
Tukivoima C	66,9 kN	Tukivoima D	148,2 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat		Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	4	Kuormitustapaus	8
Puutavaran pituus	5,8 m	Puutavaran pituus	7,2 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	27,2 kN/m	Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	36,5 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	17,4 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	23,3 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	140,2 kN	Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	239,3 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m	R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	2,58 m	R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	3,28 m
Tukivoima A	65,8 kN	Tukivoima A	62,2 kN
Tukivoima D	91,8 kN	Tukivoima D	200,4 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	9
Puutavaran pituus	3,0 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	32,1 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	16,5 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	79,9 kN
R_1 :n paikka B-pankolta mitattuna (vas.)	0,26 m
R_2 :n paikka B-pankolta mitattuna (oik.)	1,24 m
Tukivoima B	48,2 kN
Tukivoima C	48,2 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	13
Puutavaran pituus	5,8 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	34,6 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	22,2 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	178,8 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	2,58 m
Tukivoima A	83,9 kN
Tukivoima D	117,1 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	10
Puutavaran pituus	4,3 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	32,1 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	20,6 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	117,6 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,83 m
Tukivoima A	64,9 kN
Tukivoima C	73,3 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	14
Puutavaran pituus	4,1 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	37,4 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	24,0 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	129,5 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,73 m
Tukivoima A	77,5 kN
Tukivoima C	76,0 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	11
Puutavaran pituus	4,3 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	34,6 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	22,2 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	126,8 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	1,83 m
Tukivoima A	70,0 kN
Tukivoima C	79,0 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	15
Puutavaran pituus	6,7 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	37,4 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	24,0 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	226,8 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	3,03 m
Tukivoima A	75,6 kN
Tukivoima D	175,2 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	12
Puutavaran pituus	5,8 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	32,1 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	20,6 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	165,7 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	2,58 m
Tukivoima A	77,8 kN
Tukivoima D	108,5 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	16
Puutavaran pituus	7,2 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	43,1 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	27,6 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	282,8 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	3,28 m
Tukivoima A	73,5 kN
Tukivoima D	236,8 kN

Kuorman aiheuttamat tukivoimat	
Kuormitustapaus	17
Puutavaran pituus	7,2 m
Tasaisesti jakautunut kuorma (q)	13,4 kN/m
Tasaisen kuorman resultantti (R_1)	8,6 kN
Tasaisen kuorman resultantti (R_2)	87,8 kN
R_1 :n paikka A-pankolta mitattuna (vas.)	0,32 m
R_2 :n paikka A-pankolta mitattuna (oik.)	3,28 m
Tukivoima A	22,8 kN
Tukivoima D	73,5 kN

Liite 4. Referenssi- ja mittauspisteiden siirtymät

Poistettu salassa pidettävänä.

Liite 5. Länkilevyjen muodonmuutokset

Poistettu salassa pidettävänä.

Liite 6. Paikkakohtaiset muodonmuutokset

Poistettu salassa pidettävänä.

Liite 7. Muodonmuutoskaaviot

Poistettu salassa pidettävänä.

Liite 8. Vertailukuormien kaaviot

Poistettu salassa pidettävänä.