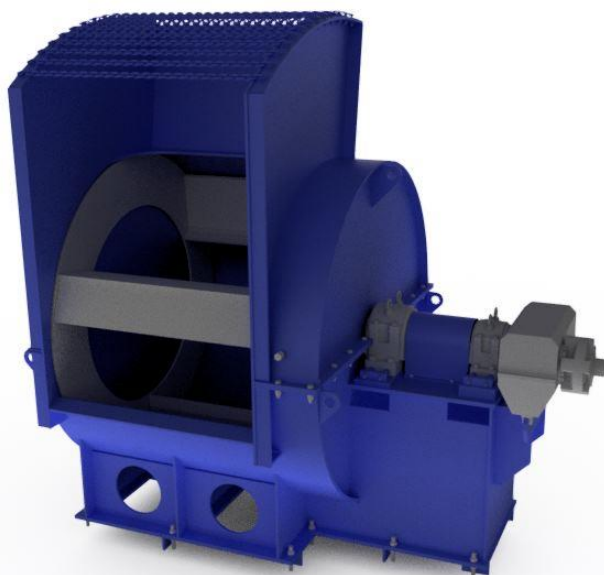


Santeri Paloniemi

Kulmarummun modernisointi



Insinööri (AMK)

Kone- ja

tuotantotekniikka

Kevät 2017



KAJAANIN
AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

TIIVISTELMÄ

Tekijä(t): Paloniemi Santeri

Työn nimi: Kulmarummun modernisointi

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikka

Asiasanat: Väsyminen, kestävyys, FEM, paperitehdas, kuitupuu

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi oululainen Insinööritoimisto Kone-Konstat Oy, joka puolestaan oli saanut työn UPM Kaukaan paperitehtaalta Lappeenrannasta. Opinnäytetyö tehtiin kevään 2017 aikana. Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa paperitehtaan kuitupuukuljettimella sijaitsevan kulmarummun kestävyyttä. Nykyinen kulmarumpu ei ollut kestänyt kuitupuiden aiheuttamia rasituksia ja oli näin ollen rikkoontunut. Tarkoituksena oli parantaa kulmarummun kestävyyttä pienin ja helposti toteutettavin muutoksin asiakkaan toiveen mukaan, jolloin linjastoa ei tarvitsisi seisottaa pitkää aikaa ja tällöin säästyisi pitkästä työseisokista aiheutuvat tuotantotappiot.

Työssä lähdettiin liikkeelle syventymällä käytössä ilmenneisiin ongelmiin ja suunniteltiin, miten nämä ongelmat korjattaisiin. Työssä keskityttiin kulmarummun vastinlevyyn, joka oli ajan saatossa rikkoontunut kuitupuiden iskiessä siihen yhtäjaksoisesti ajon aikana.

Työn toteutus aloitettiin tekemällä suunnitelma parannuksista, joilla käytössä ilmentyneet ongelmat korjattaisiin. Käytännön työ aloitettiin tekemällä vastin- ja vaimennuslevystä muodostuvat 3D-mallit laskenta-analyysijä varten. Seuraavaksi laskettiin kulmarummun vastinlevyyn kohdistuvat kuormitukset. Ensimmäisessä laskenta-analyysissä simuloitiin lähtötilanteessa vastinlevyyn syntyneitä jännityksiä. Toinen laskenta-analyysi tehtiin uudelleen suunnitellulla rakenteella ja tästä saatuja tuloksia verrattiin ensimmäiseen analyysiin. Analyyseistä saatujen tulosten avulla perusteltiin muutosten tuomat hyödyt laitteelle.

Opinnäytetyö eteni suunnitelmien mukaan ilman suurempia ongelmia ja työn tavoitteisiin päästiin. Pieniä ongelmia oli simulointiohjelmisto Autodesk Simulation Mechanicalia käytettäessä. Työssä saatiin tehtyä suunnitelma, jonka mukaan asiakas voi parantaa kulmarummun kestävyyttä ja käyttöikää huomattavasti hinta-/laatusuhteeltaan toimivin ratkaisuin. Työssä tehtyjä parannuksia ei toteutettu työn aikana, joten käytännön toimivuutta ei päästy tarkastelemaan. Työn käytännön toteutus jää asiakkaan vastuulle.

ABSTRACT

Author(s): Paloniemi Santeri

Title of the Publication: Modernization of Angle Drum

Degree Title: Bachelor of Engineering, Mechanical and Production Engineering

Keywords: Fatigue, endurance, FEM, paper mill, pulpwood

The thesis was commissioned by engineering office Kone-Konstat Ltd located in Oulu, Finland. Kone-Konstat Ltd. received the job subject from UPM Kaukas Lappeenranta, Finland. The thesis was made during spring 2017. The objective of the thesis was to improve the endurance of the angle drum, which is part of the papermill pulpwood conveyor. The current angle drum was too weak to take stress from the pulpwood, causing the angle drum getting broken. The idea was to improve the endurance of the angle drum with small and easily accomplished changes according to the client's requirements. This would make it possible for the client to save money from the line, when it is running all the time without any disturbance.

The thesis started by focusing on the most urgent problems and finding out the solution for better stability. The idea was to concentrate on the counterplate of the angle drum, which had got damaged over the years from pulpwood hits.

The first thing to do was the blueprints of the improvements and a better solution for the angle drum causing the problems. The actual work started by drawing up 3D-models and the attenuation plate for the calculation analysis. The plan was to calculate the loads of pulpwood hitting the counterplate of the angle drum. In the first calculation analysis loads forming on the counter plate of the angle drum were simulated at the starting point. When the first calculation was made, it was time to move forward and compare the results from the newly designed structure. Based on the comparison of the results, it was possible to argue that the new solution was better and stronger than the original.

The thesis progressed as planned without major problems and the objectives were achieved. There were a few problems with the simulating software Autodesk Simulation Mechanical. The thesis includes a plan, using which client could improve the endurance and lifetime of the angle drum with good quality-price ratio. The improved solutions designed during the thesis project were executed, so it was not possible study the practical functionality. This remains the responsibility of the customer.

ALKUSANAT

Tein tämän opinnäytetyön Insinööritoimisto Kone-Konstat Oy:lle kevään 2017 aikana. Haluan kiittää Kone-Konstat Oy:n toimitusjohtajaa, Rainer Pihkakoskea mielenkiintoisen opinnäytetyöaiheen antamista. Erityisesti haluan kiittää ohjaajaani Niko Pennasta, jonka neuvojen ja asiantuntemuksen avulla opinnäytetyön tekeminen oli mielenkiintoista ja todella opettavaista. Haluan kiittää myös perhettäni ja ystäviäni, jotka tukivat ja neuvoivat minua projektin loppuun saakka parhaansa mukaan.

Santeri Paloniemi

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
2 TOIMEKSIANTAJAT	2
2.1 Insinööritoimisto Kone-Konstat Oy	2
2.2 UPM-Kymmene Oyj ja UPM Kaukas	2
3 KULMARUMPU	5
4 TYÖVÄLINEET JA TEORIAA.....	9
4.1 Työssä käytetyt ohjelmistot	9
4.2 FEM.....	10
4.3 Väsyminen	11
5 LÄHTÖTILANNE	15
5.1 Ongelmankuvaus	15
5.2 Työn tavoitteet.....	17
6 SUUNNITTELU	18
6.1 Materiaalivalinta	18
6.2 Muotoilu.....	18
6.3 Kiinnitys	20
7 TYÖN TOTEUTUS	21
7.1 Ongelmakohtien kehittäminen	21
7.1.1 Vastinlevy.....	21
7.1.2 Vaimennuslevy	24
7.1.3 Kiinnitys.....	24
7.2 Lähtötilanteen mallinnus ja analysointi	25
7.3 Laskenta-analyysi.....	30
7.4 Tuloksien analysointi ja vertailu.....	34
7.5 Valmistus ja asennus	39
7.6 Kunnossapito ja huollettavuus.....	39
8 YHTEENVETO	40
LÄHTEET	43

LITTEET

TERMILUETTELO

CAD = Computer-aided Design eli tietokoneavusteinen suunnittelu

FEA = Finite Element Analysis eli elementtianalyysi, joka tarkoittaa elementtimenetelmällä tehtävää lujuuslaskentaa

FEM = Finite Element Method eli elementtimenetelmä, jota käytetään lujuuslaskennassa

Kiihdytysrullasto = Kulmarumpua edeltävä kuljetin, jonka tehtävänä erotella peräkkäin tulevat kuitupuut toisistaan

Kuitupuu = Läpimitaltaan pieniä tukkeja, joita käytetään paperi- ja sellutehtaan raaka-aineena

Kulmarumpu = Laite, jonka tehtävä on siirtää ja kasata kuitupuut pitkittäiskuljettimelta poikittaiskuljettimelle

S-N-curve = Stress Amplitude - Number of cycles to failure

Vaimennuslevy = Levy, jonka tehtävä on vaimentaa vastinlevyyn kohdistuvia iskuja

Vastinlevy = Levy, johon kuitupuut törmäävät tullessaan kiihdytysrullastolta

Väsyminen = Vaihtokuormitetun rakenteen pitkällä aikavälillä tapahtuva vaurioituminen

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli UPM Kaukaan paperitehtaalla sijaitsevan kulmarummun modernisointi. Toimeksiantajana toimi Oulun Teknologiakylässä sijaitseva Insinööritoimisto Kone-Konstat Oy. Sain aiheen Kone-Konstat Oy:n toimitusjohtaja Rainer Pihkakoskelta, kun tiedustelin häneltä mahdollista opinnäytetyöaihetta vuoden 2016 lopulla. Työn ohjaajana toimi Kone-Konstat Oy:n työntekijä Niko Pennanen. Työ tehtiin kevään 2017 aikana.

Työn tavoitteena oli parantaa jo olemassa olevan laitteen kestävyyttä kuljettimella kulkevien kuitupuiden aiheuttamia rasituksia kohtaan. Tarkoitus oli saada aikaan hinta-/laatusuhteeltaan hyvä ratkaisu, jonka mukaan asiakas voisi kehittää kulmarumpua kestävämmäksi. Ison paperitehtaan lyhytkin seisottaminen maksaa jo todella paljon, joten työtä lähdettiin tekemään pienin ja helposti toteuttavin, mutta kuitenkin merkittävästi kestävyyttä parantavin ratkaisuin.

2 TOIMEKSIANTAJAT

Tekijä sai toimeksiannon opinnäytetyöhön insinööritoimisto Kone-Konstat Oy:ltä, joka teki työn UPM-Kymmeneille. Toimeksianto saatiin tammikuussa vuonna 2017 ja työtä tehtiin seuraava kevät. Työssä tutkittava kulmarumpu sijaitsee Lappeenrannassa, UPM Kaukaan paperitehtaan hiomossa ja on siellä osana kuitupuukuljetinta. Kone-Konstat Oy on tehnyt töitä jo aiemminkin kyseisen laitteen parissa, jonka vuoksi tämäkin työ tehtiin.

2.1 Insinööritoimisto Kone-Konstat Oy

Kone-Konstat Oy on Oulun Teknologia kylässä Linnanmaalla sijaitseva insinööritoimisto. Yrityksen on perustanut Rainer Pihkakoski vuonna 1989 ja nykyisin se on kasvanut luotettavaksi yhteistyökumppaniksi ympäri Suomen. Kone-Konstat Oy tarjoaa ammattitaitoista osaamista mekaniikkasuunnitteluun, laitossuunnitteluun sekä lujuuslaskentaan ja sen käytössä ovat nykyaikaiset 3D-suunnittelutyökalut sekä ohjelmistot. [1]

2.2 UPM-Kymmene Oyj ja UPM Kaukas

UPM-Kymmene Oyj on kokenut suomalainen bio- ja metsäteollisuusyhtiö, joka syntyi vuonna 1996, kun Repolan tytäryhtiö United Paper Mills eli UPM (perustettu 1920) ja Kymmene (perustettu 1872) yhdistyivät. Tällä hetkellä UPM-Kymmene on yksi bio- ja metsäteollisuusalan edelläkävijöistä. Yrityksen kaikki tuotteet valmistetaan uusiutuvista materiaaleista, ja se myös kierrättää ja käyttää omia jätteitään hyväksi mahdollisimman paljon. Tänä päivänä yritys valmistaa esimerkiksi biopolttoaineita ja -kemikaaleja, paperia, puu- ja sahatavaraa, sellua sekä energiaa. [2]

UPM Kaukas on aivan Saimaan rannalla Lappeenrannassa sijaitseva UPM:n tehdasalue, jossa on sellutehdas, biojalostamo, paperitehdas sekä saha. Tehdasalue

ja sellutehdas näkyvät kuvissa 1 ja 2, ja kuvassa 3 näkyy paperitehtaan kuorimo ja kuitupuukenttä, josta kuitupuut tulevat tässä työssä tutkittavalle kulmarummulle. Sellun tuotanto Kaukaalla on aloitettu vuonna 1897, ja vuosittain tehtaalla valmistetaan 740 000 tonnia havu- ja koivusellua. Havusellusta tehtaalla valmistetaan pehmo- ja aikakauslehtipapereita sekä kartonkia. Koivusellusta tehtaalla valmistetaan tarra- ja erikoispapereita, ja sitä käytetään myös UPM Formi -biokomposiitin valmistuksen raaka-aineena. Tehdasalueen biojalostamolla valmistetaan mäntyöljystä 100 000 tonnia uusiutuvaa BioVerno-dieseliä vuosittain, jota sekoitetaan tavalliseen dieseliin ja myydään kuluttajille St1- ja ABC-aseilla Suomessa. Paperitehtaalla valmistetaan kotimaisesta havukuidusta 314 000 tonnia MWC/LWC-papereita vuosittain, joista tehdään sitten katalogeja, aikakauslehtiä sekä sanomalehtien liitteitä Eurooppaan ja Pohjois-Amerikkaan. Sahalla taas valmistetaan UPM Timber mänty- ja kuusisahatavaraa rakenneteollisuuden käyttöön 510 000 m³ vuosittain Aasiaan, Pohjois-Afrikkaan sekä Suomeen. [3]



Kuva 1. UPM Kaukaan tehdasalue Saimaan rannalla [3]



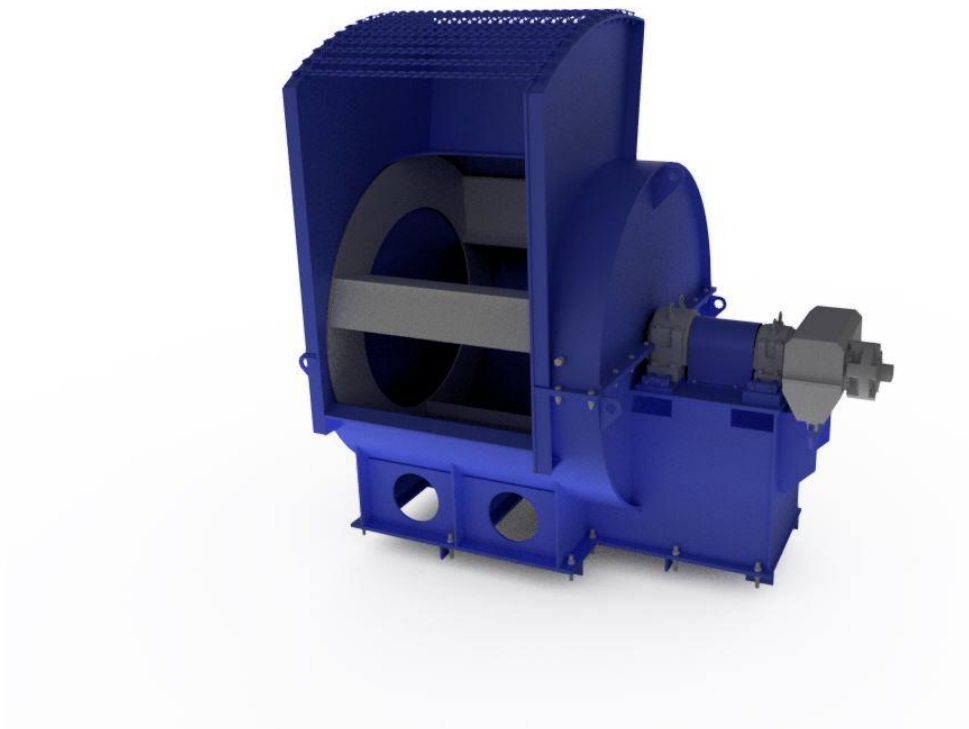
Kuva 2. UPM Kaukaan sellutehdas [3]



Kuva 3. UPM Kaukaan paperitehtaan kuorimo ja kuitupuukenttä [3]

3 KULMARUMPU

Kulmarumpu on paperitehtaan kuitupuukuljettimella sijaitseva kääntölaite. Sen tehtävä on siirtää ja kasata pitkittäiskuljettimelta tulevat kuitupuut poikittaiskuljettimelle. Kuitupuut tulevat kulmarumpuun kuljetinta pitkin joko kuorimosta tai suoraan kuitupuukentältä kauhakuormaajalla syötettynä. Juuri ennen kulmarumpua on kiihdytysrullasto, jonka tehtävänä on erotella kuitupuita toisistaan ja ehkäistä niiden yhtäaikainen tuleminen rumpuun. Kulmarummun jälkeen on hiomakoneiden syöttökuljetin, jolle kulmarumpu kuitupuut lastaa. Kulmarumpu toimii siten, että hydraulikkamoottori pyörittää akseliin kiinnitettyä rumpua, joka nostaa kuitupuita syöttökuljettimelle. Kuvassa 4 näkyy 3D-mallinnettu kulmarumpu.



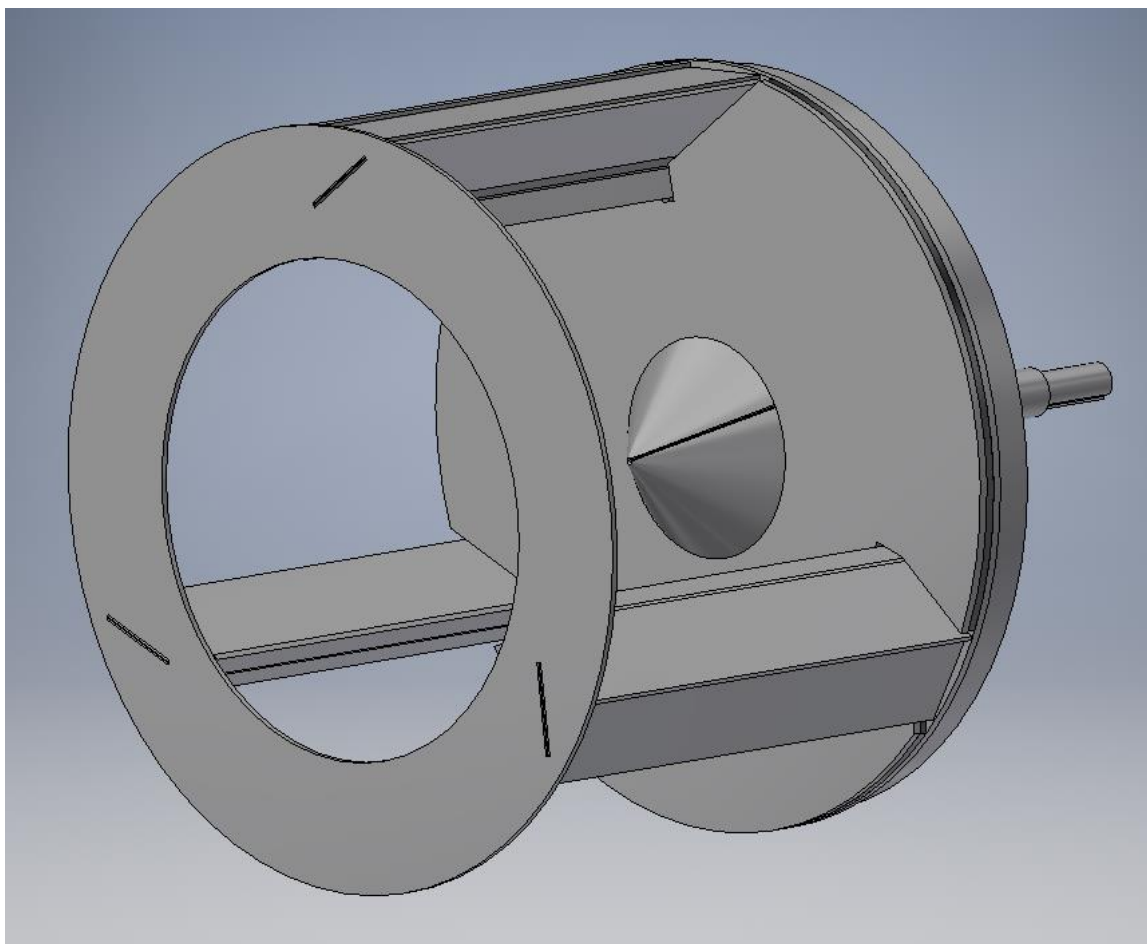
Kuva 4. 3D-mallinuskuva kulmarummusta [1]

Kulmarumpu on järeä laite, ja sen rumpuosan halkaisija onkin 2,5 metriä. Rummun syvyys on 1,62 metriä linjastolla kulkevien kuitupuiden tavoitepituuden ollessa 1,5 metriä. Kuvassa 5 näkyy kulmarumpu käytössä, josta voidaan hahmottaa kulmarummun toimintaperiaate. Sen etuseinään on leikattu reikä, josta kuitupuut tulevat kiihdytysrullastolta sisään rumpuun törmäten vastinlevvyyn. Itse rumpu pyörii kuitupuiden tulosuunnasta päin katsottuna vastapäivään, jolloin se nostaa ja kasaa kuitupuut hiomakoneiden syöttökuljettimelle. Kulmarumpu pyörii linjaston käynnissä olleessa automaattisesti vakionopeudella, mutta tarvittaessa sitä voidaan käyttää myös manuaalisesti ja pyörittää molempiin suuntiin. Manuaalijäjo helpottaa ruuhkatilanteiden hoitoa, mutta aiheuttaa kuitenkin poikkeuksellisia rasituksia kulmarummun eri osiin, jonka vuoksi sen käyttöä tulisi välttää. Kulmarumpu on hyvin voimakas laite, ja mahdollisissa poikkeustilanteissa se voi jopa lennättää kuitupuita, jotka voivat aiheuttaa vaaratilanteita ympäristöön. Sen vuoksi kulmarumpua ympäröivät suoja pellit ja yläpuolella olevat suojaraudat.



Kuva 5. Kulmarumpu käytössä

Kulmarumpu on valmistettu pääosin kokonaan S355J2+N eli normalisoidusta kuumavalssatusta seostamattomasta rakenneteräksestä standardin EN 10025 mukaan. Tässä työssä keskitytään kulmarummun pyörivään osaan (kuva 6), joka joutuu linjaston pyöriessä suurimmalle rasitukselle. Pyörivä osa muodostuu vastin- ja vaimennuslevystä, akselista sekä sisä- ja ulkopään kiinnikelevyistä, joiden väliin nostokolat on hitsattu. Nostokolat on kasattu kolmesta erikokoisesta metallilevystä, jotka on hitsattu kiinni toisiinsa. Vaimennuslevy näkyy kuvassa 6 kiinnikelevyn ja vastinlevyn välissä ja se toimii vastinlevyn iskunvaimentimena. Vastinlevy ja vaimennuslevy on kiinnitetty kiinnikelevyyn kuudella 200 mm pitkällä M39-kuusiopultilla, jotka on suojattu iskulta kuvassa 6 näkyvällä keskellä vastinlevyä olevalla suojakartiolla. Suojakartio on myös valmistettu samasta materiaalista taivuttamalla ja se on hitsattu kiinni vastinlevvyyn.



Kuva 6. Kulmarummun pyörivä osa

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus kehittää kulmarumpua kestävämmäksi, koska se on rikkoontunut ajan saatossa kuitupuiden aiheuttamien rasitusten vuoksi. Ongelmakohta kulmarummussa on sen vastinlevy, johon kuitupuut törmäävät tullessaan kiihdytysrullastolta. Vanha vastinlevy ei ole kestänyt kuitupuiden aiheuttamaa impulssimaista kuormitusta, ja se on lähtenyt ratkeilemaan. Vastinlevy on valmistettu 30 mm paksusta teräslevystä, ja sen materiaalina on myös käytetty samaa S355J2+N-terästä, jota ei ole tarkoitettu kestävämmään kovaa iskumaista kuormitusta. Ongelma on tarkoitus korjata pienin ja helposti toteutettavin muutoksin, joilla saadaan kuitenkin huomattava parannus laitteen kestoikään. Vastinlevylle on tarkoitus etsiä paremmin tarkoitukseen sopiva materiaali, ja sitä on tarkoitus muotoilla paremmin väsymistä kestäväksi.

4 TYÖVÄLINEET JA TEORIAA

Mallinnukseen tässä opinnäytetyössä käytettiin nykyaikaisia CAD- eli tietokoneavusteisia suunnitteluohjelmia. Osat ja kokoonpanot mallinnettiin 3D-suunnitteluohjelmilla, ja simuloinnit tehtiin FEM-laskentaohjelmia hyväksikäyttäen. Työssä tutkittavan aiheen teoria perustuu FEM-laskentaan sekä teräksen väsymiseen vaihtokuormitetuissa rakenteissa.

4.1 Työssä käytetyt ohjelmistot

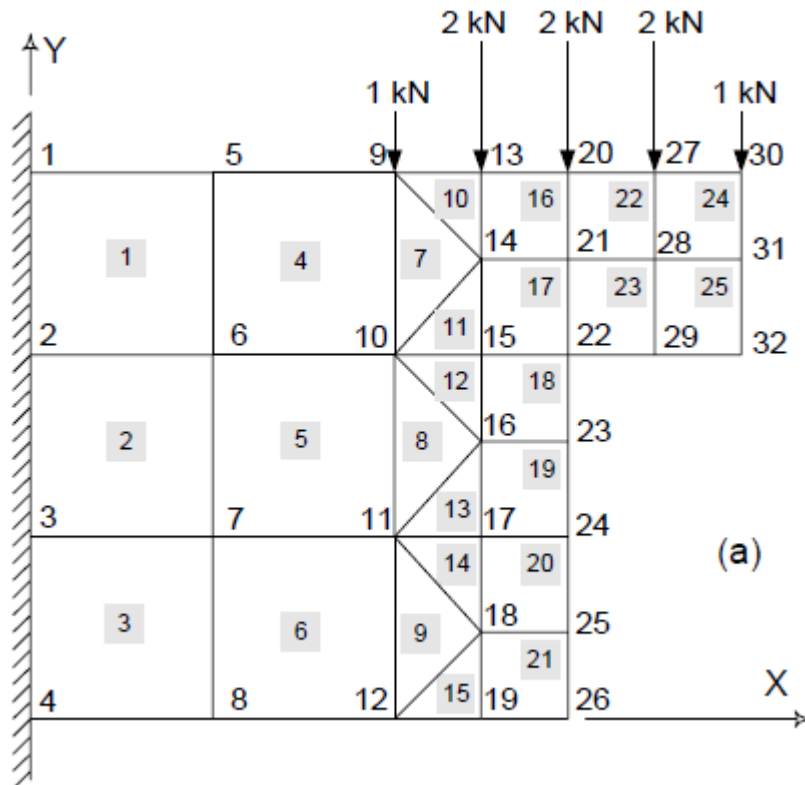
Kulmarummun osien suunnitteluun käytettiin nykyaikaisia 3D-suunnitteluohjelmia, joilla kappaleet mallinnettiin helposti ja nopeasti. Mallintamiseen käytettiin kahden eri valmistajan ohjelmia, hyödyntäen molempien parhaita puolia. Lähtötilanteesta kulmarummusta oli jo aikaisemmin tehty 3D-mallit sekä kokoonpanot Autodesk Inventorilla, joka on yhdysvaltalaisen Autodesk ohjelmistoyrityksen kehittämä 3D-suunnitteluohjelmisto. Työssä 3D-mallinnukseen käytettiin Inventorin uusinta, vuoden 2017 versiota.

Työhön käytettiin myös toisen valmistajan vastaavaa suunnitteluohjelmaa, SolidWorksia, joka on ranskalaisen Dassault Systèmes ohjelmistoyrityksen kehittämä 3D-suunnitteluohjelmisto. Työssä käytettiin SolidWorksin toiseksi uusinta, vuoden 2016 versiota. Molemmista edellä mainituista ohjelmista oli saatavilla ilmaiset opiskelijaversiot, jotka eivät kuitenkaan olleet ohjelmistojen täysversiot. Täysversiot sisältävät yleensä omat simulointityökalut, jotka kuitenkin opiskelijaversioista valitettavasti puuttuivat. Autodeskiltä löytyi tähän ongelmaan kuitenkin ratkaisu nimeltään Autodesk Simulation Mechanical, joka on Autodeskin erillinen simulointiohjelmisto mekaniikkasuunnittelua varten. Tämäkin oli saatavissa ilmaisena opiskelijaversiona, ja siitä löytyi kaikki tarvittavat työkalut kokoonpanojen analysointiin. Työhön käytettiin myös Femap FX Nastran ohjelmaa, joka on sekin FEM-laskentaohjelmisto. Femap on huomattavasti monipuolisempi ja laajempi ohjelmisto kuin Autodeskin Simulation Mechanical, ja sitä käytettiin Simulation Mechanicalilla saatujen tulosten tarkastamiseen.

4.2 FEM

Finite Element Method eli lyhennettynä FEM tarkoittaa elementtimenetelmää, jota käytetään matemaattisten ongelmien ratkaisuun. Sen ovat kehittäneet Alexander Hrennikoff ja Richard Courant jo 1940-luvulla tarkoituksena tehdä lentokoneiden lujuuslaskentaa. Aluksi laskentaa tehtiin käsin, mutta 1950-luvulla tulleet tietokoneet mahdollistivat laskennan kehittymisen nykyiseen muotoonsa. Nykyisin FEM-laskentaa käytetään hyvin yleisesti kaikenlaisten kone- ja rakennusteknisten rakenteiden lujuuslaskentaan. Nykyään puhutaan myös käsitteestä FEA eli Finite Element Analysis, jolla tarkoitetaan elementtimenetelmällä tehtävää laskentaa. [4]

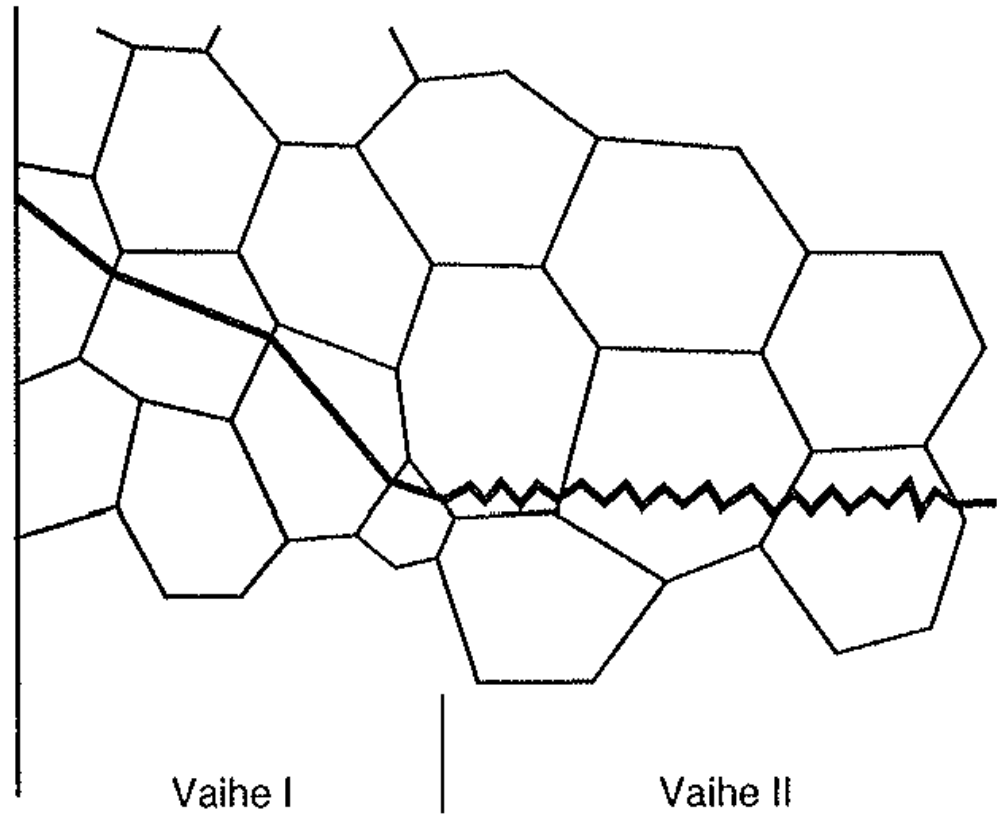
Elementtimenetelmä perustuu matemaattiseen laskentaan, ja sitä käytetään kolmiulotteisten solidirakenteiden rasitusten ja muodonmuutosten tutkimiseen. Elementtimenetelmä eli puhekielisesti ilmaistuna verkotus tarkoittaa rakenteen jakamista halutun kokoihin ja muotoihin, geometrisesti yksinkertaisiin osiin, jotka ovat kiinni toisissaan solmupisteiden avulla. Näin syntyneitä osia kutsutaan elementteiksi. Elementteinä käytetään yleensä tetraedri-, kiila- ja tiilikivielementtejä tutkittavan kappaleen rakenteen mukaan. Elementtien koko vaihtelee hyvin paljon tutkittavan rakenteen koon ja muodon mukaan. Yhdessä rakenteessa voidaan käyttää myös useita erimuotoisia elementtejä, mikä tekee elementtimenetelmästä erittäin monipuolisen. Kuvassa 7 on esimerkki levyrakenteen elementtiverkosta. [4]



Kuva 7. Esimerkki levyrakenteen elementtiverkosta [4]

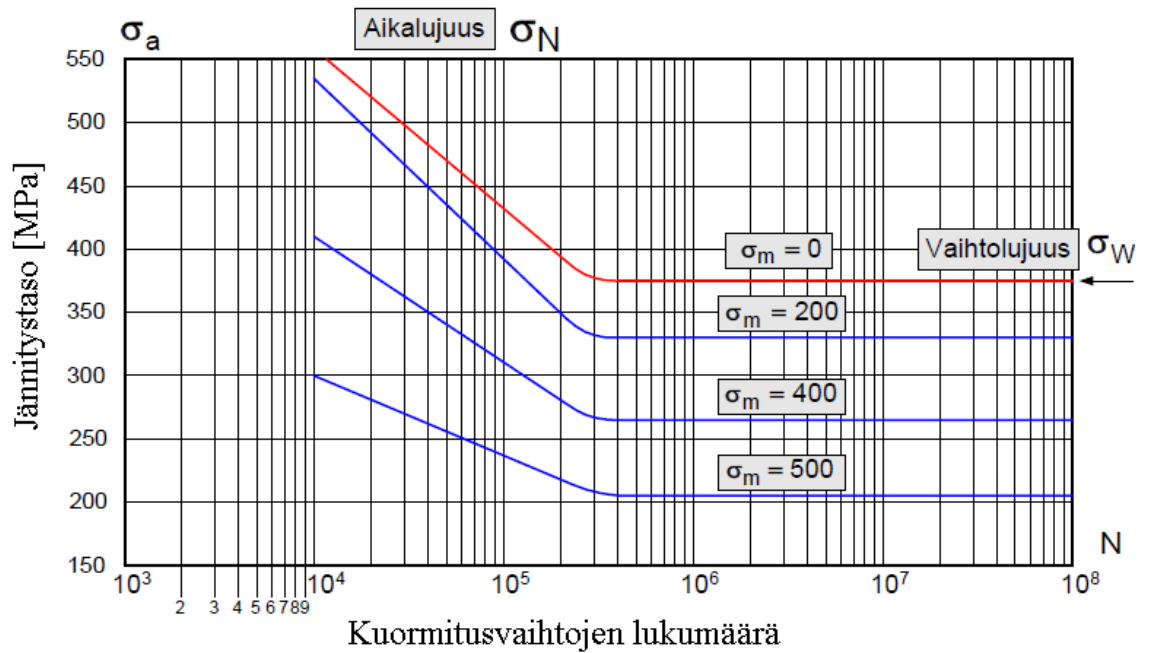
4.3 Väsyminen

Väsyminen on yleisin vaurioitumistapa vaihtokuormitetuissa teräsrakenteissa, ja se tapahtuu yleensä pitkällä aikavälillä. Väsyminen tarkoittaa sitä, että rakenteen muodonmuutokset tapahtuvat huomattavasti materiaalin myötörajan alapuolella. Väsyminen on pitkäkestoinen reaktio, jossa vaurio kehittyy pikkuhiljaa ja etenee kiihtyvästi murtumiseen saakka. Väsymisessä rakenteen pintaan muodostuu särö, josta se lähtee etenemään sille edulliseen suuntaan. Yleensä särö lähtee etenemään noin 45 asteen kulmassa vaikuttavaan jännitykseen ja kappaleen ulkopintaa nähden (vaihe 1). Kun väsymissärö on kasvanut tarpeeksi, se kääntyy kohtisuoraan vaikuttavaa jännitystä vastaan (vaihe 2), jonka jälkeen tapahtuu lopullinen murtuma (vaihe 3). Kuvassa 8 on esitetty väsymissärön etenemisen vaiheet. [5]



Kuva 8. Väsymissärön etenemisvaiheet 1 ja 2 [5]

Väsyminen on monimutkainen reaktio, johon vaikuttavat useat eri tekijät. Näitä tekijöitä ovat materiaalin myötö- ja murtolujuudet sekä mikrorakenne, sitkeys, pinnan laatu, muotoilu sekä liitokset. Ulkopuolisia tekijöitä ovat kuormittavat voimat, käyttölämpötila ja korrosio. Materiaalin sitkeydellä tarkoitetaan sen kykyä vastustaa särön etenemistä rakenteessa. Materiaalien väsymislujutta mitataan koesauvojen avulla, joihin kohdistetaan vaihtosuuntaista kuormitusta eri aallonpituuksilla. Tulokset esitetään kuvan 9 mukaisella Wöhler-käyrällä, jossa kuormitusvaihtojen määrää verrataan jännitystasoon. [6]



Kuva 9. Esimerkki Wöhler-käyrästä [6]

Rakenteen väsymislujutta voidaan parantaa usein eri tavoin. Suurin vaikutus on materiaalivalinnalla, kappaleen muotoilulla ja liitostavoilla. Usein rakenteen väsymiskesto kuitenkin muodostuu edellä mainittujen tekijöiden summasta. Rakenne voi olla esimerkiksi valmistettu hyvin kestävästä materiaalista, mutta on hitsattu huonosti, jolloin rakenteen väsymiskesto on hyvin heikko. Taulukossa 1 on esitelty yleisimpien väsymislujutta parantavien menetelmien vaikutusten tuomat edut ja haitat. [6]

Taulukko 1. Väsymislujuutta parantavat menetelmät [6]

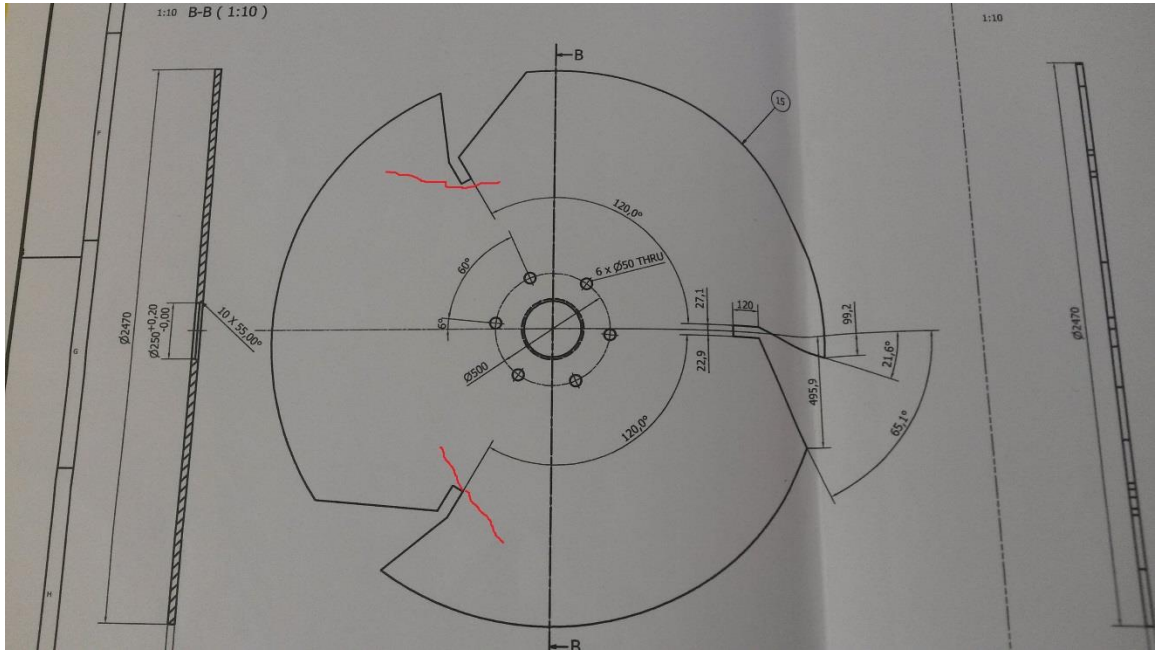
MENETELMÄ	VAIKUTUS	EDUT	HAITAT
Liitosten sijoitus vähemmän rasitettuihin kohtiin	Jännitysvaihtelujen pienentäminen kriittisissä kohdissa.	Väsymiskestävyys paranee.	Usein rakenteen toimivuuden kannalta mahdotonta toteuttaa tai vaatii suuria muutoksia rakenteeseen.
Liitosten muotoilu	K_s kertoimen pienentäminen muuttamalla liitosta juohevammaksi.	Pienet muutokset suunnittelu- vaiheessa. Edullinen toteutus.	Kriittisten kohtien löytäminen joskus vaikeaa, vaatii usein FEM-laskentaa. Voi jälkikäteen olla vaikeaa ja kallista.
Hitsin geometrian muuttaminen	Lovivaikutus hitsin rajaviivalla pienemmäksi, mahdollinen juurivirhe pois.	Suunnittelutyö vähäistä Saattaa riittää joissain tapauksissa.	Toteutus voi olla kallista määrästä riippuen.
Hitsausliitoksen jälkikäsitely	Jäännösjännityksen ja/tai alkusärön poisto.	Väsymislujuus saattaa kasvaa huomattavasti.	Toteutus voi olla kallista määrästä riippuen. Soveltuu parhaiten paikallisten kriittisten kohtien käsittelyyn.

5 LÄHTÖTILANNE

5.1 Ongelmankuvaus

Nykyisessä ratkaisussa kulmarummun ongelmaksi on muodostunut sen kestättömyys siihen kohdistuvia kuitupuiden aiheuttamia rasituksia kohtaan. Kiihdytysrullastolta tulevat kuitupuut lentävät rumpuun törmäten sen vastinlevyyn, joka näin ollen joutuu kovalle iskumaiselle rasitukselle. Tällainen pitkäkestoinen, impulssiainen kuormitus aiheuttaa teräksen väsymistä. Kuitupuita voi tulla rumpuun myös esimerkiksi viistossa tai niitä voi tulla useita kerralla, jotka siten aiheuttavat poikkeuksellisia rasituksia ja jännityksiä rummun eri osiin.

Vanhan kulmarummun vastinlevy on väsynyt ajan saatossa ja sitä on yritetty korjatakin hitsaamalla, mutta huonolla menestyksellä. Kuvassa 10 on havainnollistettu vastinlevyyn syntyneet ratkeamat viivoilla, ja kuten kuvasta huomaa, ratkeamat ovat lähteneet liikkeelle levyyn nostokolille tehdyistä leikkaukskohdista. Leikkaukset on tehty alkuperäiseen vastinlevyyn kulmikkaasti polttoleikkaamalla, jonka vuoksi teräviin kulmiin syntyy suuria jännityksiä kuitupuiden törmätessä vastinlevyyn. Kuvassa 11 näkyy, kuinka näitä ratkeamia on korjattu hitsaamalla, mutta se ei ole pysäyttänyt säröä. Ratkeama olisi pitänyt aukaista kokonaan ja hitsata läpi asti, jonka jälkeen hitsi olisi myös voitu hioa tasaiseksi ja röntgenkuvata, jotta mahdolliset sisäiset vauriot olisi vielä voitu korjata. Hitsin oikeanlaisella jälkikäsitelyllä olisi vielä saatu huomattava parannus sen kestoikään, kun jäännösjännitykset olisi saatu poistettua. UPM:ltä saatujen tietojen mukaan vastinlevy oli myös lähtenyt muuttamaan muotoaan hitsauksien aiheuttamien lämpötilavaihtelujen vuoksi. Vastinlevy oli lähtenyt taipumaan reunoilta koveraksi, jolloin vastinlevyn ja vaimennuslevyn väliin jää ilmarako, jolloin koko vaimennuslevystä oli tullut käytännössä hyödytön.



Kuva 10. Vastinlevyn ratkeamat



Kuva 11. Vastinlevyn korjaushitsit

5.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää kulmarumpua kestävämmän siihen kohdistuvia rasituksia nykytilannetta paremmin. Tarkoitus on keskittyä käytössä havaittuihin ongelma-kohtiin eli kulmarummun vastin- ja vaimennuslevyyn. Tarkoitus on tehdä selvitys parempien materiaalien valinnasta sekä uudelleen muotoilusta, jonka mukaan uudet osat voitaisiin valmistaa ja saada kulmarumpu kestävämmän nykyistä paremmin. Työn painopiste on keskittyä perustelemaan, miksi uusi ratkaisu on parempi kuin entinen.

6 SUUNNITTELU

Projektissa lähdettiin liikkeelle tutkimalla sitä, mikä oli aiheuttanut alkuperäisen laitteen rikkoontumisen. Tarkoituksena oli pyrkiä korjaamaan ongelma mahdollisimman pienin ja helposti toteutettavin ratkaisuin asiakkaan toiveiden mukaan, koska silloin linjastoa ei tarvitsisi seisottaa niin pitkää aikaa kuin esimerkiksi silloin, jos lähdettäisiin miettimään vaikkapa kokonaan uutta ja erilaista laitetta entisen tilalle. Tuollaisen ison tehtaan lyhytkin seisottaminen maksaa jo niin paljon yritykselle, että kokonaan uudentyyppisen ratkaisun suunnittelu olisi käytännössä hukkaan heitettyä työtä, koska sitä ei todennäköisesti kuitenkaan toteutettaisi.

6.1 Materiaalivalinta

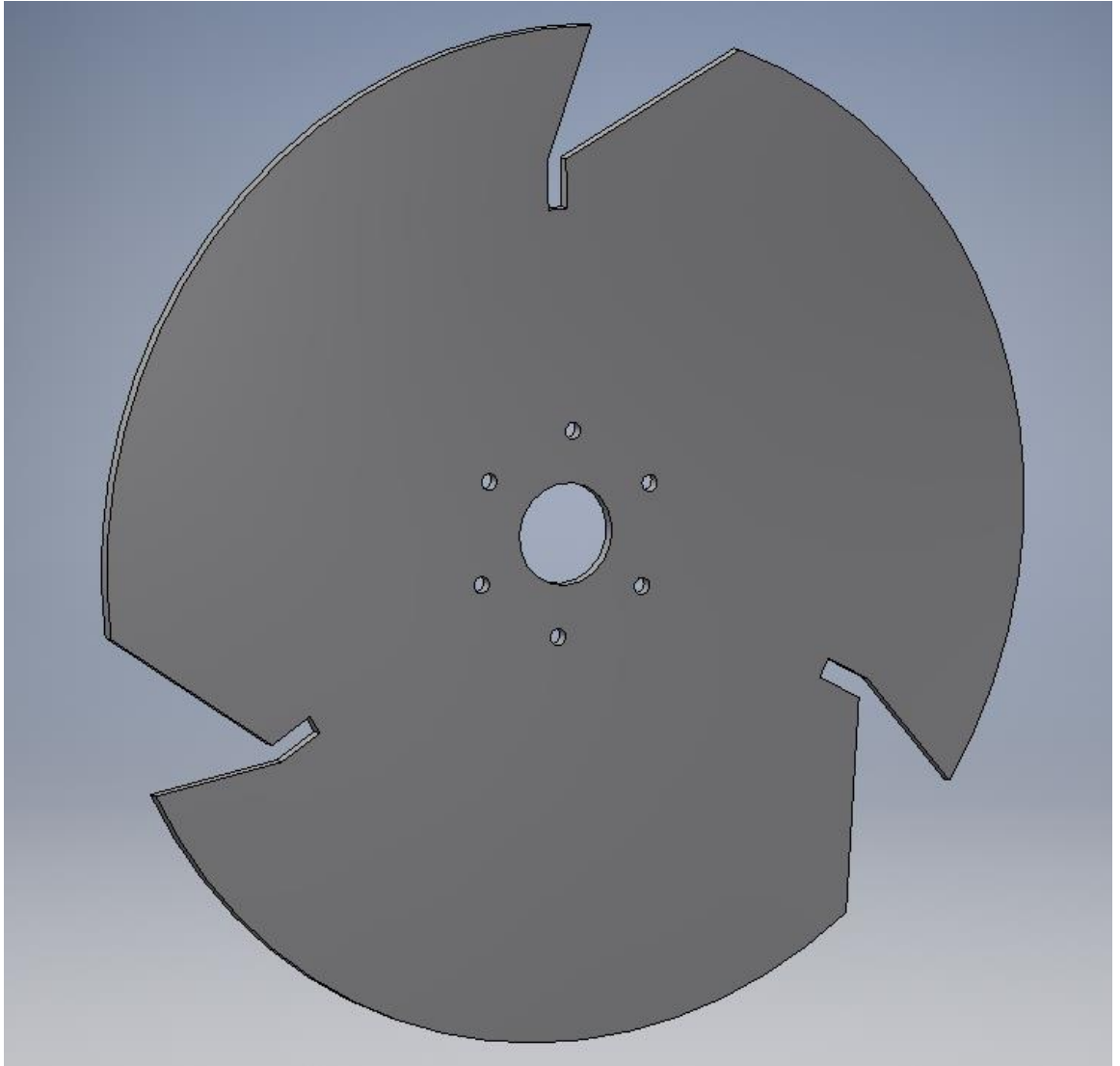
Ensimmäisenä lähdettiin selvittämään, löytyykö kulmarummun vastinlevylle ja vaimennuslevylle paremmin kyseiseen tarkoitukseen sopivia materiaaleja. Alun perin vastinlevy oli valmistettu tavallisesta S355J2+N eli normalisoidusta rakenneteräksestä EN10025-standardin mukaan, jonka ei ole tarkoitettu kestävästi kovaa iskumaista kuormitusta. Vaihtoehtoa tälle lähdettiin etsimään nykyaikaisista kulutuslevyteräksistä, jotka ovat kehittyneet viime vuosina todella paljon kestävämmiksi.

Vaimennuslevy oli alun perin leikattu Armaflex XG -solukumieristelevystä, joka on oikeasti tarkoitettu eristeeksi ilmastointi- ja kylmäasennuksiin. Vaihtoehtoa tälle lähdettiin etsimään erilaisista tarkoitukseen suunnitelluista kumi- ja muovimateriaaleista. [7]

6.2 Muotoilu

Alkuperäisessä kokoonpanossa vastinlevy oli tasainen levy, joka oli polttoleikattu kulmikkaasti muotoonsa kuvan 12 tavalla. Uudelleen muotoilulla, paremmalla leikkaustavalla sekä kulmien pyöristyksillä on tarkoitus pyrkiä pienentämään vastinle-

vyyn kohdistuvia jännityksiä. Myös sellaista ratkaisua pohdittiin, että uudesta vastinlevystä tehtäisiin jo valmiiksi hieman kupera, joka edesauttaisi sitä, että levy ei lähtisi niin helposti taipumaan niin kuin sille oli käynyt. Tätä ei kuitenkaan laskennassa otettu huomioon, vaan simuloinnit tehtiin tasaisilla levyillä, jotta analyysit pysyisivät tarpeeksi yksinkertaisina ja todellisuutta kuvaavina.



Kuva 12. Alkuperäinen vastinlevy

6.3 Kiinnitys

Alkuperäinen vastinlevy oli kiinnitetty kokoonpanoon kuudella 200 mm pitkällä M39-pultilla ja kuudella M39-mutterilla. Pulttien suojana oleva kartio oli hitsattu kiinni vastinlevyyn. Myös kiinnityksillä on oleellinen merkitys vastinlevyn kestävyyteen väsymisen kannalta. Kiinnityspultit oli myös tarkoitus vaihtaa vielä isommiksi ja käyttää varmistusmuttereita kierrelukitteen kera, jotta pultit eivät pääsisi löystymään käytössä. Myös kiinnitysreikien mahdolliset välykset oli tarkoitus minimoida, jotta vastinlevy ei pääsisi turhaa liikkumaan pyörimissuunnassaan.

7 TYÖN TOTEUTUS

7.1 Ongelmakohtien kehittäminen

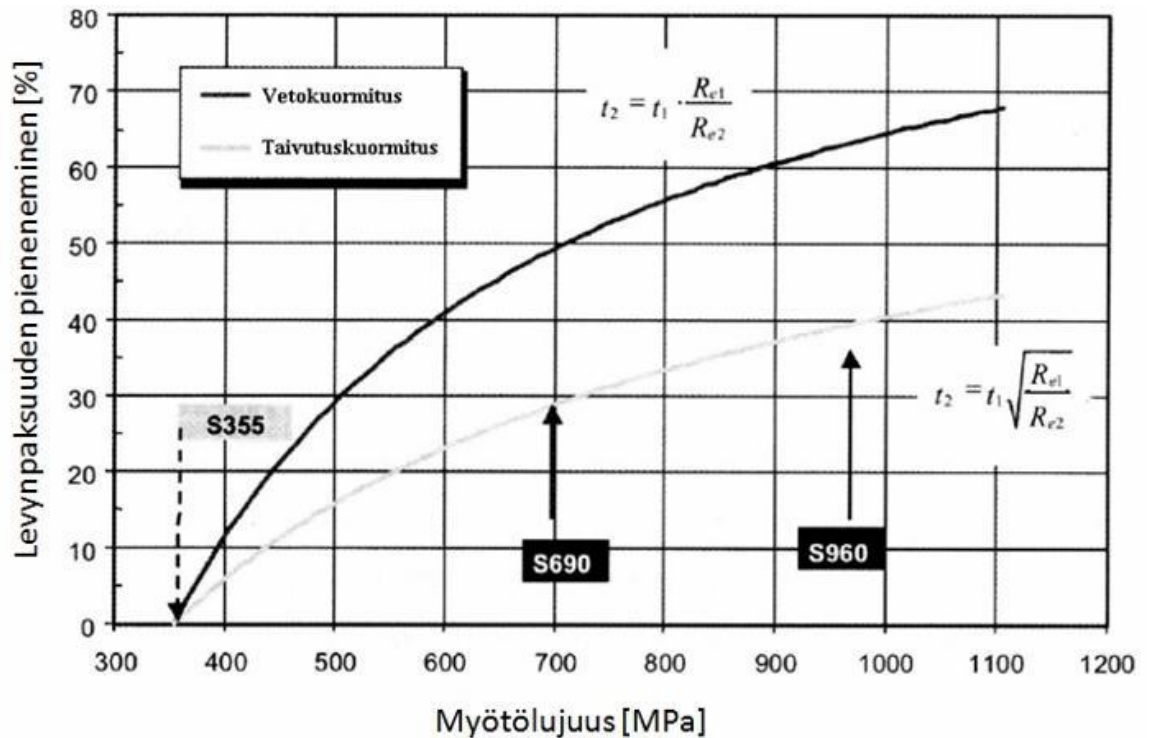
Kun tutkittiin alkuperäisen laitteen rikkoontumisen syitä, tultiin siihen tulokseen, että vastinlevyn materiaali ja muotoilu olivat syypäitä tähän ongelmaan. Myös vaimennuslevyllä on oma vaikutuksensa rikkoontumiseen, jos se ei ole toiminutkaan laitteessa suunnitellulla tavalla. Alkuperäinen vastinlevy oli myös taipunut koveraksi, jolloin sen reunat olivat irti vaimennuslevystä. Tällöin vastinlevy pääsee liikkumaan vapaasti kuitupuiden iskiessä siihen, jolloin rasituksia syntyy myös levyn kiinnityskohtiin ja vaimennuslevyn olemassa olon tarkoitus katoaa.

7.1.1 Vastinlevy

Vastinlevylle uutta materiaalia lähdettiin etsimään nykyaikaisista kulutuslevyteräksistä. Neuvoa tähän tiedusteltiin SSAB:lta, josta materiaali olisi helposti saatavilla. Vastaus kysymykseen saatiin nopeasti ja materiaaliksi suositeltiin SSAB:n Strenx 700 -terästä, joka on erittäin lujaa rakenneterästä. Vaihtoehtoiseksi materiaaliksi Strenxille ehdotettiin Laser 250C Plus -terästä, joka on huomattavasti pehmeämpää materiaalia kuin Strenx, mutta jolla olisi taas suurempi murtovenymä kuin Strenxillä. [8] [9]

Strenx-teräkset on tarkoitettu sellaisiin kohteisiin, joissa teräkseltä vaaditaan äärimmäistä kestävyttä ja se täyttää standardin EN 10025-6 mukaisesti asetetut vaatimukset. Strenx-teräs on vahvempaa ja ohuempaa kuin normaali teräs, joten sen oikealla käytöllä rakenteiden painosta voidaan vähentää useita kymmeniä prosentteja, kuten kuvasta 13 voi todeta. Strenx-teräksen myötöraja on lähes kaksinkertainen verrattuna normaaliin S355-teräkseen, mikä tarkoittaa sitä, että se kestää melkein kaksi kertaa enemmän rasitusta, ennen kuin se muuttuu pysyvästi. Taulukkoon 2 on listattu Strenx 700 -teräslevyn, Laser 250C Plus -teräslevyn ja S355J2+N-teräslevyn tärkeimmät ominaisuudet. Taulukosta 2 voidaan todeta

Strenxin olevan kaksi kertaa normaalia S355-terästä lujempaa materiaalia, murtovenymän kuitenkin ollessa pienempi. Laser Plus -teräs on taas heikompaa materiaalia kuin normaali S355-teräs, mutta sen murtovenymä on suurempi, joka tarkoittaa sitä, että se pystyy muuttamaan muotomaan enemmän, siitä kuitenkaan murtumatta. [8] [9]



Kuva 13. Kulutuslevyterästen myötölujuuden vertaus levypaksuuden suhteen normaaliin S355-teräkseen [6]

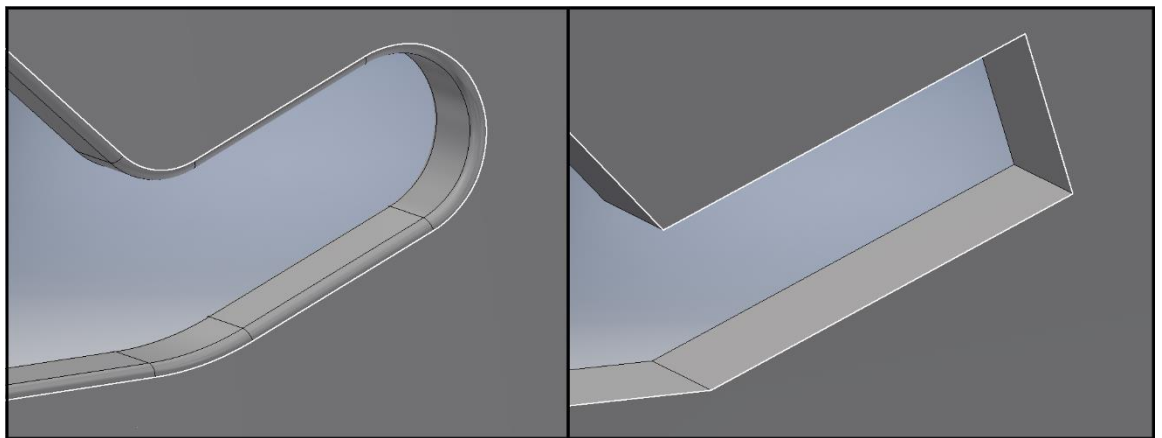
Taulukko 2. Materiaalien ominaisuudet listattuna [8] [9]

Materiaali	Nimellispaksuus [mm]	Myötölujuus [Mpa]	Murtolujuus [Mpa]	Murtovenymä [%]	Iskusitkeys [J] -20°C
S355J2 + N	16 < x ≤ 40	355	470-630	22	27
Strenx 700	4 < x ≤ 53	700	780-930	14	69 (-40°C)
Laser 250C Plus	8 < x < 30	240	360-460	29	40

Materiaaliksi päätettiin käytettäväksi kuitenkin ensiksi suositeltua Strenx 700 -rakenneterästä. Valinta tehtiin sillä perusteella, että Strenx on hyvin lujaa terästä ja sen iskusitkeys on myös hyvä, jopa -40 °C asteen lämpötilassa, millä on suuri merkitys väsymiskestävyyteen. Strenx 700 -teräksen myötölujuus myös on huomattavasti korkeampi verrattuna S355J2+N-teräkseen, jolla myös on suuri merkitys väsymiskestävyyteen, vaikka väsyminen tapahtuukin yleensä huomattavasti

myötörajan alapuolella. Laser Plus -teräs hylättiin sen takia, koska se ei ole niin kestävää kuin Strenx, vaikkakin sen murtovenymä olisi parempi. Vastinlevyn pitää olla luja, iskusitkeä levy, joka kestää kuitupuiden aiheuttamat suuret rasitukset murtumatta. Strenx 700 -teräksestä valmistettaessa nämä vastinlevyltä vaaditut kriteerit täyttyvät.

Materiaalivalinnan jälkeen kiinnitettiin huomiota vastinlevyn leikkauksiin voisiko niitä paremmin muotoilemalla pienentää niihin muodostuvia jännityshuippuja. Alun perin kaikki terävästi tehdyt leikkaukset pyöristettiin ja pyöristyksiä lisättiin myös vastinlevyn tasosuunnassa leikkausreunoihin sekä kiinnitysreikiin. Näillä voitiin todeta olevan parantava vaikutus väsymiskestävyyteen jo ennen kuin simuloiteja edes tehtiin, koska terävät reunat ovat yleensä alttiimpia väsymään kuin pyöreät reunat. Tasosuunnassa kiinnitysreikiin tehdyt pyöristykset jätettiin kuitenkin tekemättä laskentamalleihin, koska niiden todettiin aiheuttavan epäsopivuutta Simulation Mechanicalin Bolt-toimintoa käytettäessä. Kuvassa 14 näkyy, millaiset pyöristykset leikkausreunoihin tehtiin.



Kuva 14. Vasemmalla pyöristetty ja oikealla pyöristämätön leikkausreuna

Viimeiseksi myös leikkaustavalla todettiin olevan vaikutusta väsymislujuuden parantamiseen. Polttoleikkaamalla leikkausreunaan jää epätasainen pinta, joka edesauttaa väsymissärön syntymistä. Esimerkiksi plasma- tai laserleikkaamalla tätä voidaan ehkäistä, koska se jättää sileämmän jäljen ja muodostaa paremman mikrorakenteen leikkausreunaan, leikkausprosessin lämpökäsittävän vaikutuksen johdosta. Näin ollen uusi vastinlevy tulisi leikata joko plasmalla tai laserilla, jos halutaan pidentää vastinlevyn käyttöikää. [5]

7.1.2 Vaimennuslevy

Kulmarummun vaimennuslevy toimii iskunvaimentimena mahdollistaen vastinlevyn joustamisen kuitupuiden törmätessä siihen, mikä taas pienentää vastinlevyyn syntyviä jännityksiä. Alun perin vaimennuslevy oli valmistettu 32 mm paksusta Armaflex XG -solukumieristematoista. Sitä ei kuitenkaan ole tarkoitettu käytettäväksi tällaiseen tarkoitukseen, joten sillekin lähdettiin etsimään vaihtoehtoisia materiaaleja. Vaihtoehtoja etsittiin yleisesti saatavilla olevista erilaisista kumilevyistä. Esimerkiksi sienikumista valmistetut levyt olisivat sen puolesta parempia, että ne palautuvat rakenteensa puolesta aina takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Valitettavasti kuitenkin kaikki löydetyt vaihtoehtoiset kumilevyt olivat huomattavasti jäykempiä materiaaleja kuin alun perin käytetty Armaflex, ja niitä käytettäessä ongelmaksi muodostuisi niiden joustamattomuus. Vastinlevy on niin suuri, että se jakaa iskun kuormituksen laajalle alueelle, jolloin jäykkä materiaali ei joustaisi ollenkaan ja myös silloin koko vaimennuslevyn idea katoaisi kokonaan. Materiaalina päädyttiin siis käyttämään edelleen samaa Armaflex-levyä, koska sen epäsopivuudesta-kaan käyttötarkoitukseen ei asiakkaalta saatu tietoa, jolloin sen oletettiin kuitenkin toimineen halutulla tavalla.

7.1.3 Kiinnitys

Alun perin vastinlevy oli kiinnitetty kuudella 200 mm pitkällä M39-pultilla ja kuudella M39-mutterilla. Vastinlevyssä oli 50 mm halkaisijalla olevat kiinnitysreiät, jolloin vastinlevy pääsi hieman elämään pyörimissuunnassaan. Uuteen vastinlevyyn kiinnitysreikiä pienennettiin 42 millimetriin pienellä positiivisella toleranssilla ja kiinnitykseen suunniteltiin käytettäväksi M42-pultteja. Pultit kiinnitettäisiin 12 kappaaleella M42-muttereita, eli jokaisessa pultissa olisi vielä varmistusmutterit, jotta ne eivät pääsisi löystymään käytössä. Kierteisiin voi vielä ennen muttereiden kiinnittämistä laittaa tarkoitukseen soveltuvaa kierrelukitetta varmuuden vuoksi. Näin ollen vastinlevy pysyisi tiukasti kiinni eikä pääsisi elämään, mikä aiheuttaa turhaa rasitusta kiinnitysreikiin.

7.2 Lähtötilanteen mallinnus ja analysointi

Varsinaisen työn tekeminen aloitettiin siitä, että mallinnettiin vastinlevystä ja vaimennuslevystä muodostuva kokoonpano 3D-suunnitteluohjelmilla ja laskettiin vastinlevyyn kohdistuvat kuormitukset. Vastinlevyyn kohdistuvat jännitykset analysoitiin simulointiohjelmia käyttäen. Tarkoitus oli simuloida lähtötilanteessa vastinlevyyn kohdistuvat jännitykset ja niihin oli sitten tarkoitus verrata uudelleen suunniteltuun kokoonpanoon muodostuvia jännityksiä, joilla sitten voitaisiin perustella muutosten tuomat hyödyt laitteelle. Vertailun päädyttiin olevan tässä tapauksessa paras keino perustella parannukset, koska laitteen tarkka väsymiskeston laskenta olisi todella hankalaa ja työlästä eikä sillä välttämättä päästäisi siltikään oikeisiin tuloksiin. Tarkan väsymiskeston laskemiseksi jouduttaisiin rakentamaan testilaitteisto sekä seuraamaan tutkittavaa laitetta useita kuukausia tai jopa vuosia kaikkien mahdollisten poikkeamien huomioon ottamiseksi. Jo itse seuraamiseen kuluva aika olisi aivan liian pitkä opinnäytetyön tekemisen kannalta. Vertailun todettiin olevan tarpeeksi luotettava menetelmä perustella uudelleen suunnitellun kokoonpanon parempi kestävyys. Vertailussa käytettiin samoja kuormituksia ja reunaehtoja vanhan ja uuden rakenteen välillä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia.

Lähtötilanteen simulointia varten tarvitsimme tietoon sekä vastin- että vaimennuslevyn materiaalien tekniset tiedot ja linjastolla kulkevan puutavaran tiedot ja nopeudet. Materiaalien teknisten tietojen avulla voitiin simulointiohjelmaan syöttää halutut ominaisuudet laskentamallin kappaleille eli vastin- ja vaimennuslevylle. Linjastolla kulkeva puutavara on kuusta, jonka tiheyden ja koon sekä kiihdytysrullaston nopeuden avulla voitiin määrittää vastinlevyyn kohdistuvaa voimaa.

Liikkeelle lähdettiin selvittämällä, mikä on suurin realistinen rasitus, jonka kuitupuut voivat aiheuttaa vastinlevyyn. Tähän vaikuttavat kuitupuiden materiaali, koko, kaatoaika vuodenaikaan nähden sekä kiihdytysrullaston nopeus. Linjastolla kulkevat kuitupuut ovat kuusitukkeja, joiden tavoitepituus on 1500 mm ja keskimääräinen halkaisija 200 mm vaihteluvälin ollessa 50-400 mm. Kuitupuiden kaatoaika vaikuttaa niiden tiheyteen siten, että talvella kaadetut kuitupuut ovat painavampia

kuin kesällä kaadetut, koska talvella kosteuden haihtuminen puusta on vähäisempää kuin kesällä. Myös puutavaran kasvusijainnilla, kuljetuksella ja varastoinnilla on oma vaikutuksensa puiden tiheyteen. Kärkkäisen mukaan kuusen tuoretiheys tehtaalla on talvimaksimin aikaan 890 kg/m^3 , kesäminimin ollessa 740 kg/m^3 . Näin ollen voidaan laskea suurimman mahdollisen kuitupuun massa kertomalla sen tilavuus, talvimaksimin tiheydellä. [10]

Massa lasketaan käyttämällä seuraavaa kaavaa (1):

$$\text{Kuitupuun massa, } m = \pi * R^2 * h * \rho, \text{ jossa} \quad (1)$$

$$\text{säde, } R = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{korkeus, } h = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{tiheys, } \rho = 890 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Kuitupuun massa, } m = \pi * (0,2 \text{ m})^2 * 1,5 \text{ m} * 890 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Kuitupuun massa, } m = 167,76 \text{ kg}$$

Suurimman linjastolla kulkevan kuitupuun massaksi saatiin siis 167,76 kg. Toimeksiantajalta saatujen tietojen mukaan linjastolla voi kulkea kuitupuita myös päällekkäin, kun niitä annostellaan kuljettimelle kauhakuormaajan avulla, jolloin niiden erotteleminen on vaikeaa. Tämän vuoksi simuloiteja varten päätettiin käyttää sellaista tilannetta, jossa kulmarumpuun tulee yksi 400 mm ja yksi 200 mm halkaisijalla oleva kuitupuu yhtä aikaa kiihdytysrullastolta. 200 mm halkaisijalla olevan kuitupuun massaksi saadaan samalla kaavalla laskettuna:

$$\text{Kuitupuun massa, } m = \pi * (0,1 \text{ m})^2 * 1,5 \text{ m} * 890 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

$$\text{Kuitupuun massa, } m = 41,94 \text{ kg}$$

Näin ollen yhtä aikaa kulmarumpuun tulevien kuitupuiden yhteismassaksi tulee:

$$\text{Kuitupuiden yhteismassa } m = 167,76 \text{ kg} + 41,94 \text{ kg}$$

$$\text{Kuitupuiden yhteismassa } m = 209,7 \text{ kg}$$

Seuraavaksi lasketaan kuitupuiden vastinlevyyyn kohdistama voima, massan ja kiihdytysrullaston nopeuden avulla. Kiihdytysrullaston tarkan nopeuden määrittäminen tuotti vaikeuksia sen vuoksi, että kiihdytysrullaston rullat voivat pyöriä niin sanotusti tyhjää kuitupuiden alla, jonka vuoksi kuitupuiden nopeutta ei suoraan voida määrittää rullien pyörimisnopeudesta. Kiihdytysrullasto toimii siten, että siinä on rullia, joissa joka toisessa on piikit ja joka toisessa ei. Seuraava rulla pyörii aina edeltäjänsä nopeammin, jonka tarkoituksena on erotella peräkkäin tai mahdollisesti läjässä tulevat kuitupuut. Kuvassa 15 näkyy kiihdytysrullasto kulmarummulta kuitupuiden tulosuuntaan kohti katsottuna.



Kuva 15. Kiihdytysrullasto kulmarummulta kuitupuiden tulosuuntaan kohti katsottuna

Toimeksiantaja mittasi kuitupuiden tulonopeutta siten, että se mittasi kahden kiin-
topisteen A ja B välisen etäisyyden kiihdytysrullastolta ja otti aikaa, jolloin kuitupuut
ohittavat nämä pisteet. Mittauspisteiden A ja B välinen etäisyys oli 4 metriä ja aikaa
kuitupuilla kului tällä matkalla 1,9 sekunnista 2,04 sekuntiin. Keskiarvo kuitupuiden
tuloajasta lasketaan kaavan $t_{ka} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ (2) avulla seuraavasti:

$$\text{Kuitupuiden tuloajan keskiarvo, } t_{ka} = \frac{1,9 \text{ s} + 2,04 \text{ s}}{2} \quad (2)$$

$$\text{Kuitupuiden tuloajan keskiarvo, } t_{ka} = 1,97 \text{ s}$$

Kun saatiin kuitupuiden tuloajan keskiarvo, lasketaan kuitupuiden keskimääräinen tulo nopeus. Kuitupuiden tulo nopeus lasketaan kaavan $v = \frac{s}{t}$ (3) avulla seuraavasti:

$$\text{Kuitupuiden tulo nopeus } v = \frac{s}{t} \quad (3)$$

$$\text{Kuitupuiden tulo nopeus } v = \frac{4 \text{ m}}{1,97 \text{ s}}$$

$$\text{Kuitupuiden tulo nopeus } v = 2,03 \text{ m/s}$$

Kuitupuiden pysähtymisnopeuden keskiarvo lasketaan kaavan $v_k = \frac{v + v_0}{2}$ (4) avulla seuraavasti:

$$\text{Kuitupuiden pysähtymisnopeuden keskiarvo, } v_k = \frac{2,03 \text{ m/s} + 0 \text{ m/s}}{2} \quad (4)$$

$$\text{Kuitupuiden pysähtymisnopeuden keskiarvo, } v_k = 1,015 \text{ m/s}$$

Kuitupuiden vastinlevyyn kohdistaman voiman laskemiseen tarvittiin tietoon vielä pysähtymisaika eli se aika, jonka aikana kuitupuut pysähtyvät iskeytyessään vastinlevyyn. Sen lisäksi tietoon tarvittiin kiihtyvyys eli tässä tapauksessa hidastuvuus. Kuitupuun pysähtymismatkaksi arvioitiin 8 mm, maksimin ollessa 32 mm, joka on siis vaimennuslevyn paksuus. Pysähtymismatka tarkoittaa siis sitä joustoa, minkä verran Armaflex painuu kasaan kuitupuiden törmätessä vastinlevyyn. Vastinlevy jakaa kuitupuiden siihen kohdistaman rasituksen suurelle pinta-alalle, jolloin voidaan päätellä, ettei vaimennuslevy varmasti puristu kokonaan kasaan kuitupuiden iskukohdalta. Kuitupuiden pysähtymisaika lasketaan myös kaavan $v_k = \frac{s}{t}$ (3) avulla seuraavasti:

$$\text{Pysähtymisaika, } t = \frac{s}{v_k} \quad (3)$$

$$\text{Pysähtymisaika, } t = \frac{0,008 \text{ m}}{1,015 \text{ m/s}}$$

Pysähtymisaika, $t = 0,007882 \text{ s}$

Kuitupuiden kiihtyvyys eli tässä tapauksessa hidastuvuus lasketaan kaavan

$a = \frac{v}{t}$ (5) avulla seuraavasti:

$$\text{Hidastuvuus } a = \frac{v}{t} \quad (5)$$

$$\text{Hidastuvuus } a = \frac{2 \text{ m/s}}{0,007882 \text{ s}}$$

$$\text{Hidastuvuus } a \approx 254 \text{ m/s}^2$$

Lopulta voitiin laskea kuitupuiden vastinlevyyn kohdistama voima kaavan $F = ma$ (6) avulla seuraavasti:

$$\text{Kuitupuiden iskuvoima } F_{\text{Kuitupuut}} = ma \quad (6)$$

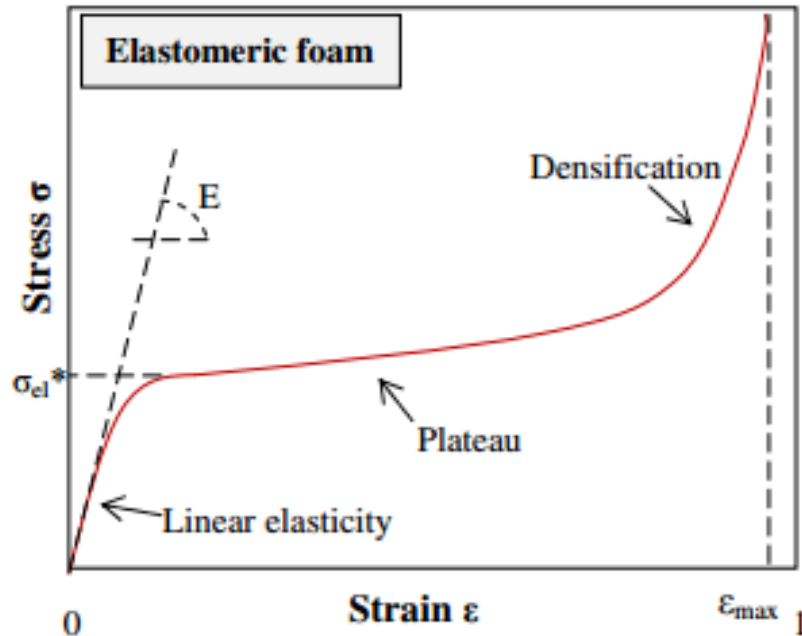
$$\text{Kuitupuiden iskuvoima } F_{\text{Kuitupuut}} = 209,7 \text{ kg} * 254 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Kuitupuiden iskuvoima } F_{\text{Kuitupuut}} = 53263,8 \text{ N}$$

Edellä laskettu kuitupuiden vastinlevyyn kohdistama iskuvoima perustuu kuitenkin täysin arvioon, koska sen tarkka laskeminen on käytännössä mahdotonta. Kaikki linjastolta tulevat kuitupuut ovat erikokoisia keskenään, jolloin laskennassa on pakko turvautua realistiseen arvioon. Tässä laskennassa pyrittiin laskemaan suurin mahdollinen realistinen rasitus, jonka kuitupuut voivat kohdistaa vastinlevyyn.

Armaflexin teknisten tietojen saamiseksi pyydettiin tietoja sen maahantuojalta. Laskentaa varten tarvittiin tietoon materiaalin tiheys sekä kimmokerroin. Maahantuojalta saadun tiedon mukaan 32 mm paksun Armaflex-levyn tiheys on 45-60 kg/m³. Kimmokerrointa materiaalille ei ollut tiedossa, joten sitä lähdettiin etsimään vastaavista materiaaleista. Netistä löydetyn tieteellisen dokumentin mukaan elastomeerisen vaahtomuovin kimmokerroin ei määräydy lineaarisesti voiman ja pinta-alan suhteen, kuten esimerkiksi teräksellä, vaan se käyttäytyy kuvan 16 tavalla. Kuvaajasta voidaan todeta, että pienellä voimalla kimmokerroin on suuri, kun vaahtomuovi ei vielä lähde puristumaan kasaan. Sitten kun voimaa lisätään tarpeeksi, vaahtomuovi antaa periksi todella nopeasti ja tällöin kimmokerroin olisi

pieni. Lopuksi kun vaahtomuovi on puristunut täysin kasaan, kimmokerroin taas kasvaa, koska voimaa voisi lisätä huomattavasti mutta puristumista ei enää pystyisi tapahtumaan. [11]



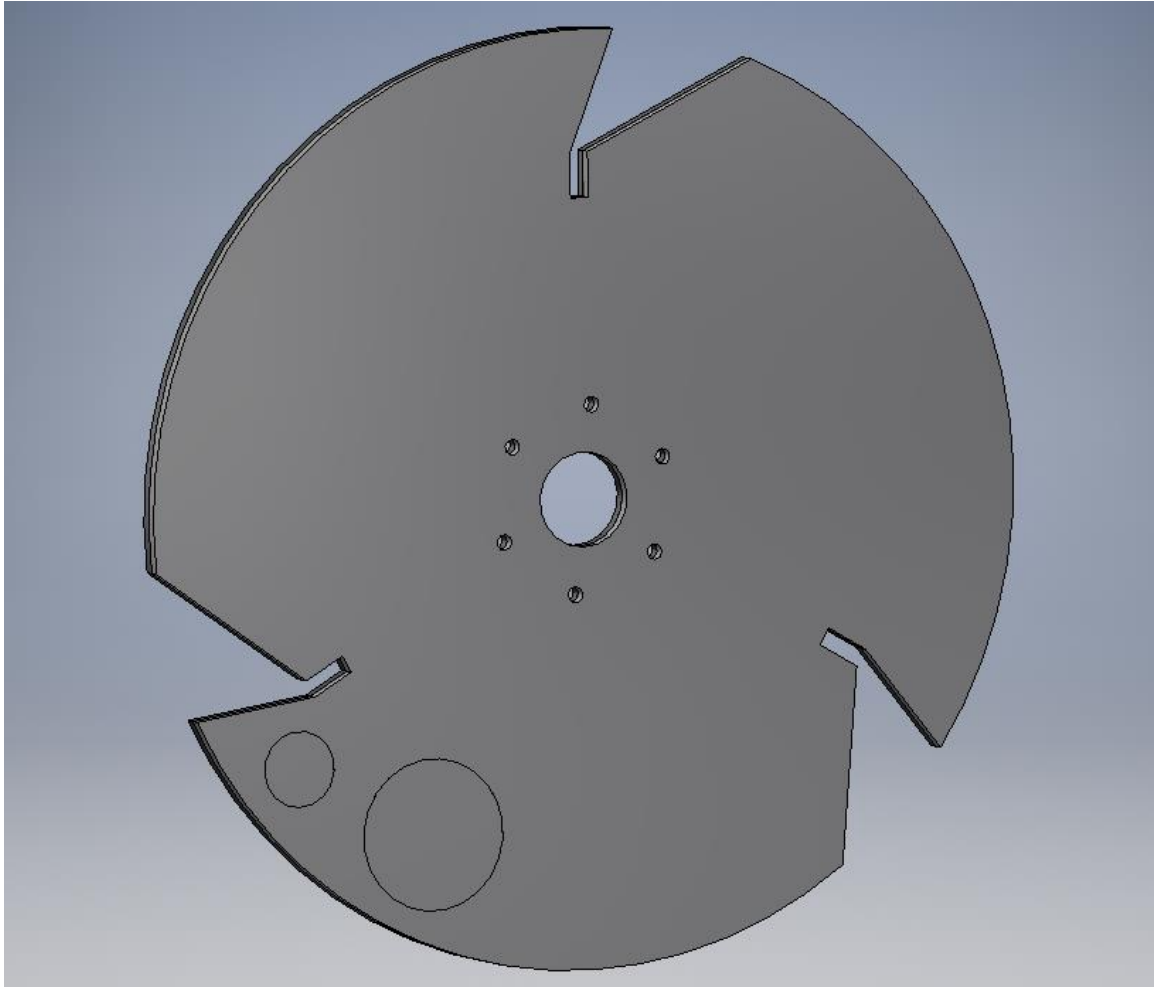
Kuva 16. Elastomeerisen vaahtomuovin käyttäytyminen voiman ja pinta-alan suhteen [11]

Dokumentin mukaan vaahtomuovin kimmokerroin asettuu tyypillisesti keskiarvoisesti välille $0,10-0,50 \text{ N/mm}^2$, kun otetaan huomioon koko otanta pienestä voimasta suureen tietyn kokoisella pinta-alalla [11]. Laskenta-analyysiä varten päätettiin käyttämään Armaflexin kimmokertoimenä $0,50 \text{ N/mm}^2$, jolloin vaimennuslevyn todettiin käyttäytyvän analyysissä halutulla tavalla. Käytetyllä arvolla vaimennuslevy joustaa selvästi, mutta ei kuitenkaan ole liian löysä, jolloin vastinlevy painuisi vaimennuslevyn läpi.

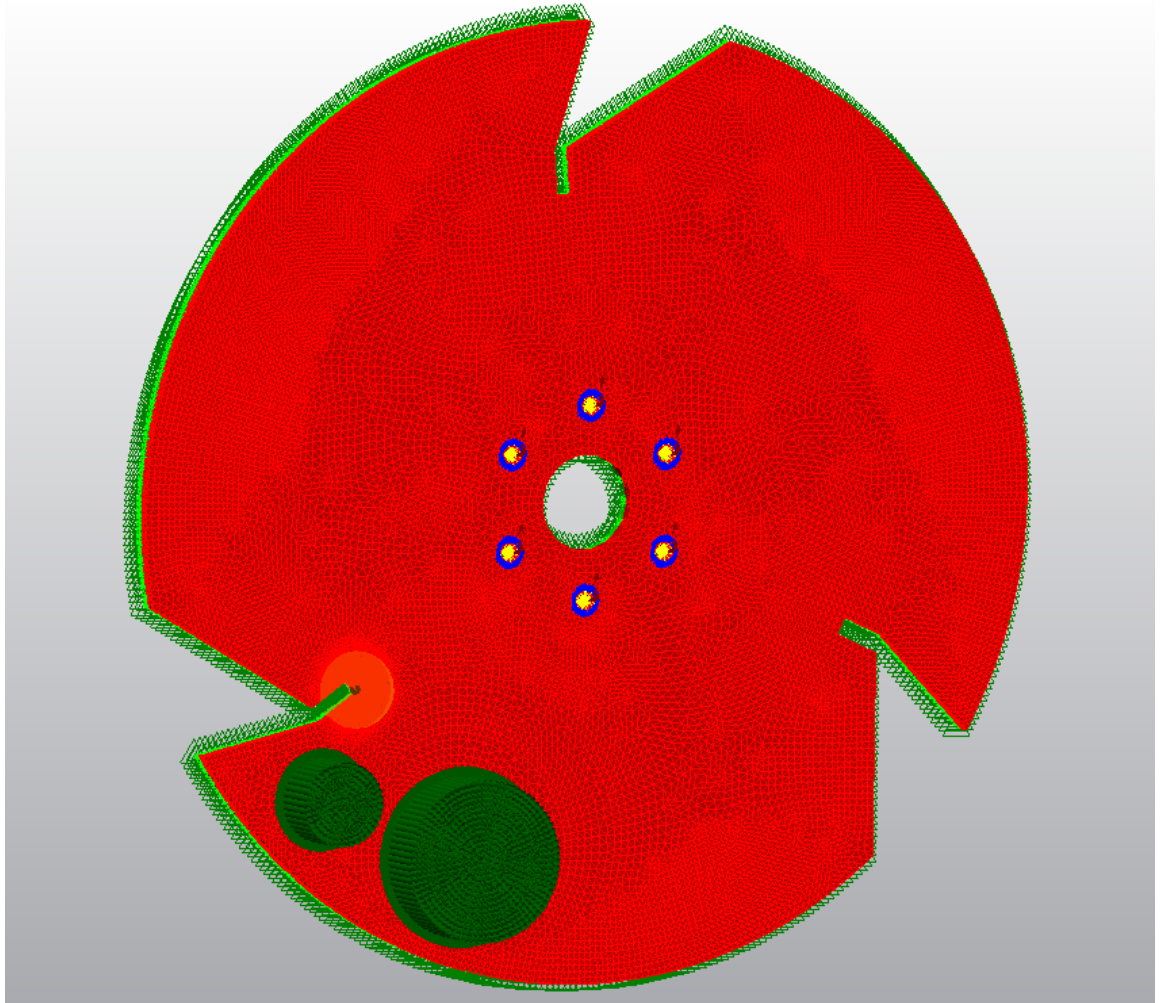
7.3 Laskenta-analyysi

Laskenta-analyysit tehtiin käyttämällä Autodesk Simulation Mechanical -ohjelmaa. Laskentamallia varten mallinnettiin vastinlevystä ja vaimennuslevystä muo-

dostuva kokoonpano käyttäen solidielementtejä (kuva 17). Kuitupuiden aiheuttamaa kuormitusta varten vastinlevyyn lisättiin 200 mm ja 400 mm halkaisijalla olevat alueet, joiden pintaan kuormitus laitettiin. Elementtiverkotus tehtiin käyttäen hyvin pieniä tetraedri-elementtejä ja kuitupuiden iskukohtaan lähellä olevaan leikkausreunaan noita elementtejä pienennettiin vielä entisestään, jotta tulos ei siltä kohdalta vääristyisi. Levyjen väliseen pintakontaktin muodostamiseen käytettiin ohjelman omaa Surface-kontaktia. Reunaehdot kokoonpanolla olivat siten, että vaimennuslevyn takapuoli oli täysin jäykästi tuettu ja vastinlevyn kiinnitysreikiin käytettiin ohjelman omaa Bolt-toimintoa, jolla saatiin laitettua juuri sellaiset pultit, kuin kulmarummussa on oikeasti käytetty eli 200 mm pitkät M39-pultit. Pulttien kiristysvoimaksi laitettiin 50 kN per pultti, joka selvitettiin kokeilemalla sopivia arvoja. Näin puristusvoimasta ei tullut liian suuri suhteessa kuitupuiden aiheuttamaan iskuvoimaan. Analyysissä jännityksiä tulee toki myös kiinnitysreikien ympärille, mutta tässä analyysissä keskityttiin vain leikkausreunoihin syntyviin jännityksiin. Oikeassa tilanteessakin väsymisen kannalta suurempi merkitys on kuitupuiden aiheuttamalla impulssimaisella kuormituksella kuin pulttien aiheuttamalla staattisella kiristysvoimalla. Kuvassa 18 näkyy laskentamalli valmiina analyysiä varten.



Kuva 17. Laskentamallia varten tehty kokoonpano vastin- ja vaimennuslevystä

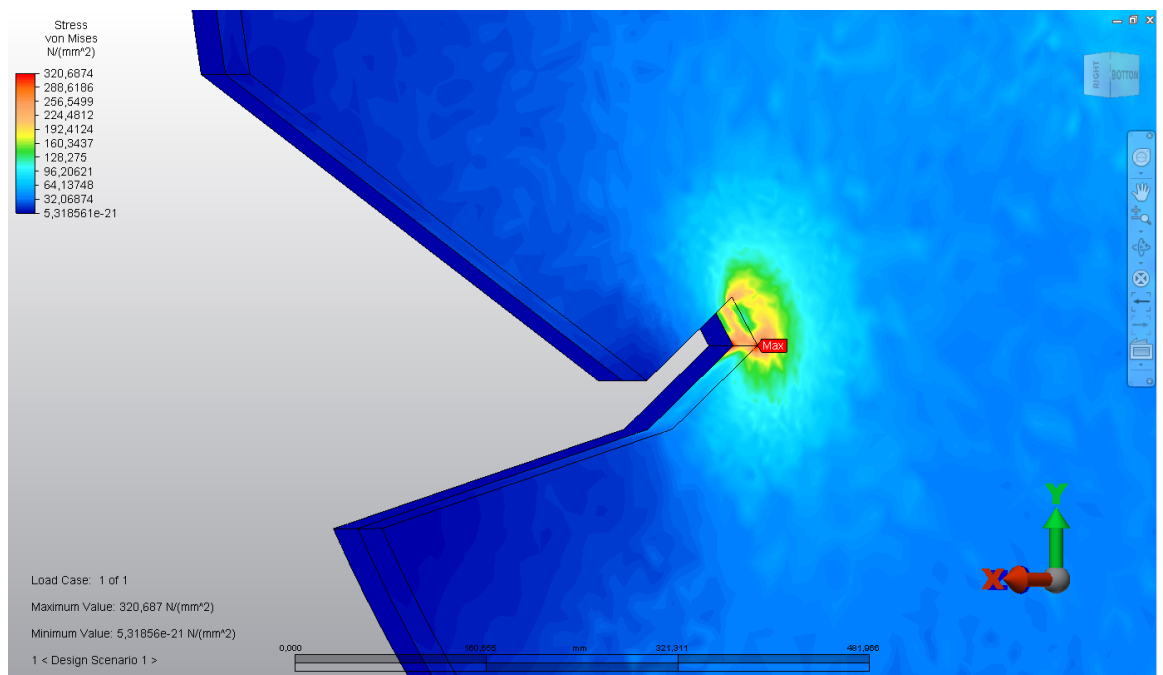


Kuva 18. Laskentamalli valmiina analyysiä varten

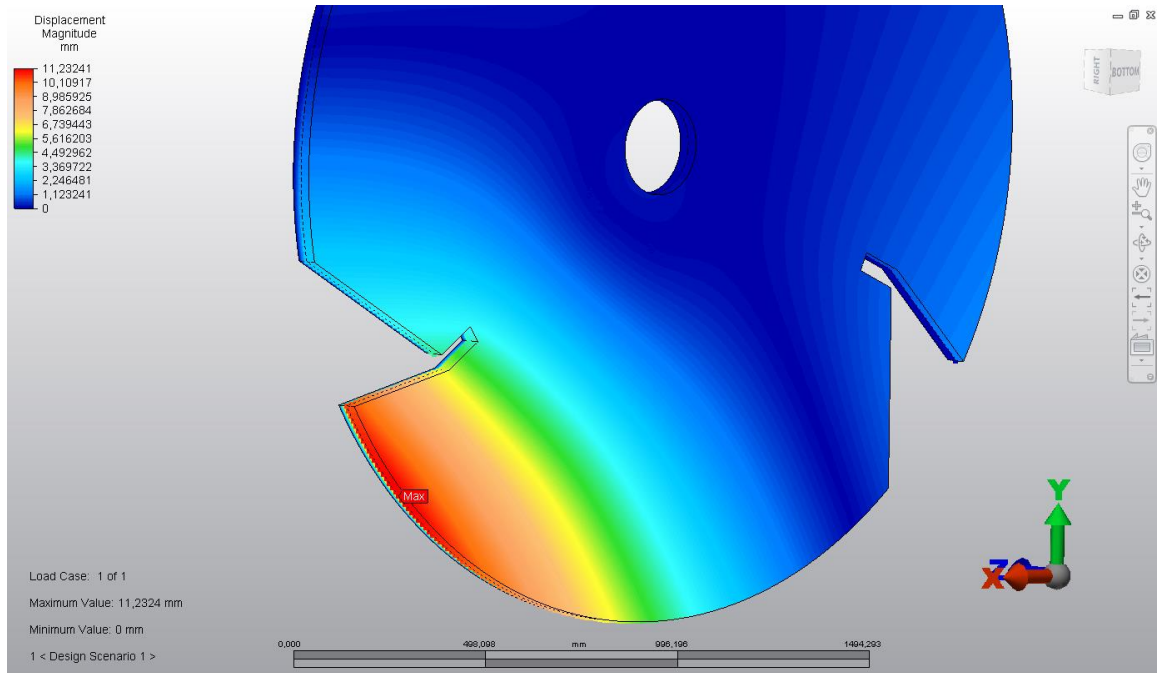
Materiaaliksi laskentamallin vastinlevylle määritettiin S355J2G3, joka löytyi suoraan ohjelmiston omasta materiaalikirjastosta. Vaimennuslevylle vaaditut arvot määritettiin itse edellä mainittujen tietojen perusteella ja pulttien materiaaliksi määritettiin normaali teräs. Kuormituksena laskentamallissa käytettiin edellä laskettua kuitupuiden vastinlevyyn kohdistamaa 53263,8 N suuruista voimaa, joka jaettiin vastinlevyyn tehdyille 200 mm ja 400 mm halkaisijalla oleville alueille. Näiden kuitupuiden iskukohtia kuvaavien pinta-alojen suuruudella, jotka myös perustuvat arvioon, ei kuitenkaan ole niin suurta merkitystä laskennan kannalta kuin sillä, mihin kohtaan vastinlevyä kuormitus laitetaan. Realistista tilannetta demonstroiden kuormitus täytyi laittaa lähelle vastinlevyn ulkokehää, jotta levyn leikkauskohtiin syntyvät jännitykset tulisivat parhaiten esille. Voima laitettiin myös lähelle leikkausreunaa, eikä keskelle levyä, koska sen todettiin suurentavan leikkauskohtaan syntyviä jännityksiä.

7.4 Tuloksien analysointi ja vertailu

Laskenta-analyysistä saatujen tulosten mukaan suurimmat jännitykset syntyvät juuri vastinlevyn leikkausreunaan, kuten oli odotettavissakin. Syntynyt huippujännitys oli $320,69 \text{ N/mm}^2$ ja se oli kuvan 19 mukaisesti juuri leikkausreunan terävässä kulmassa. Suurin siirtymä vastinlevyllä oli kuvan 20 mukaisesti $11,23 \text{ mm}$, jonka voidaan todeta vastaavan realistista tilannetta.

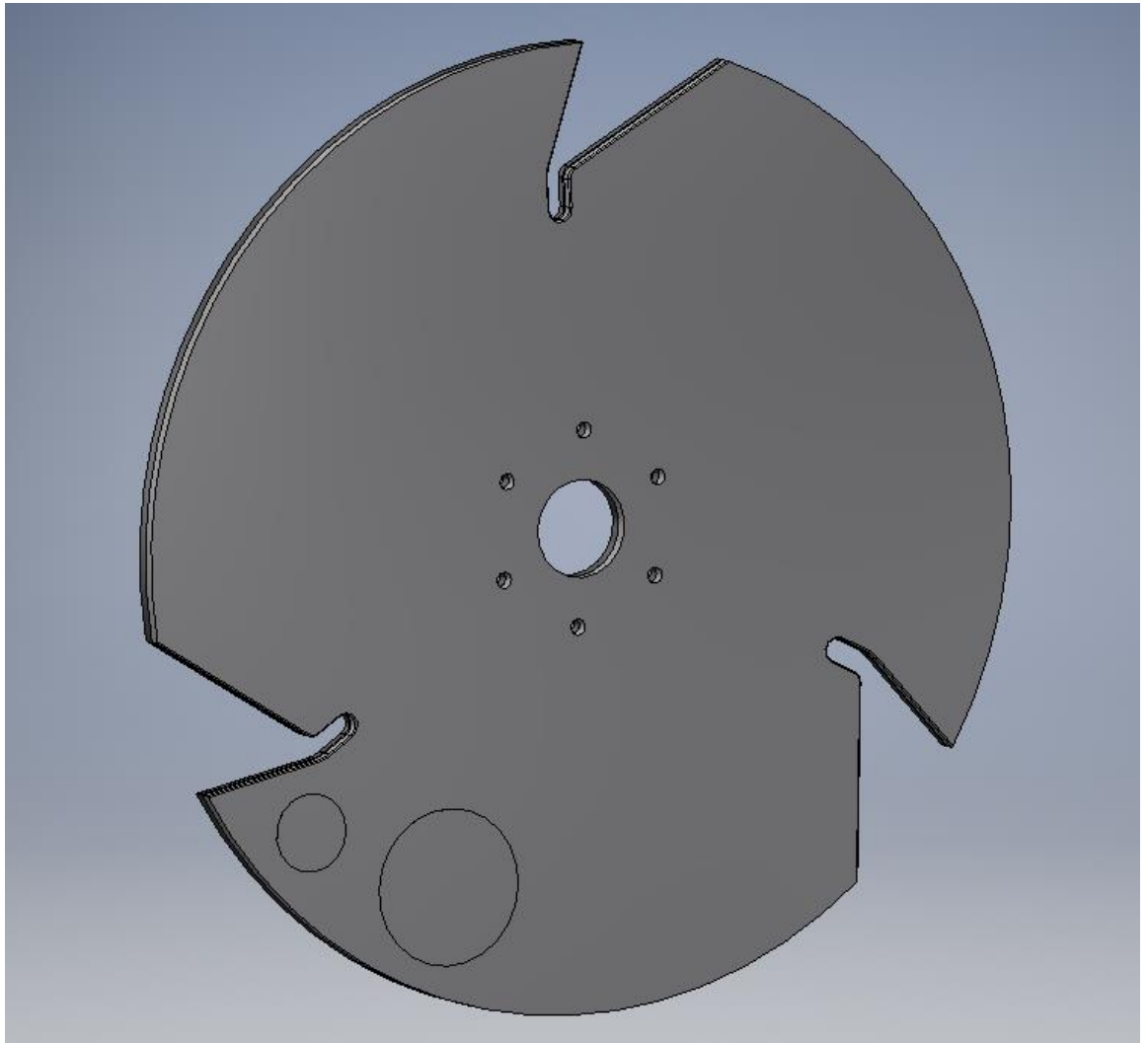


Kuva 19. Alkuperäisen vastinlevyn jännitykset



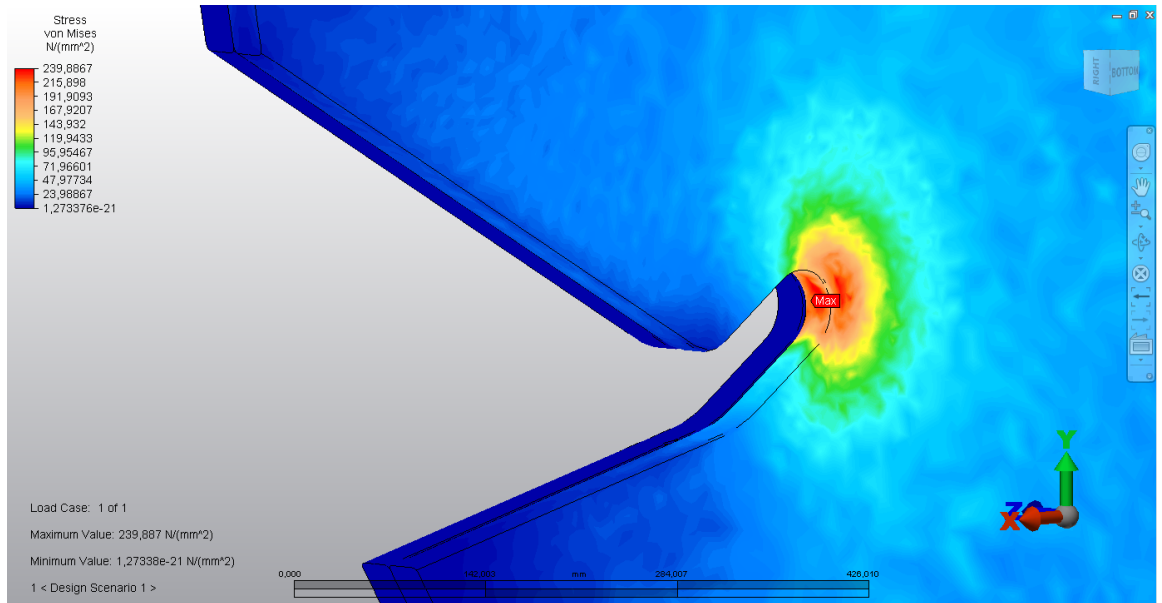
Kuva 20. Alkuperäisen vastinlevyn siirtymät

Jotta suunnitelluilla parannuksilla voitaisiin todistaa olevan parantava vaikutus kulmarummun kestävyuden kannalta, tehtiin myös toinen kokoonpano uutta laskenta-analyysiä varten. Näin voidaan perustella muutosten tuomat hyödyt laitteelle. Kokoonpano oli käytännössä samanlainen kuin edellinenkin, mutta siinä leikkausreunat oli pyöristetty. Kokoonpanon osille määritettiin samat materiaalit kuin ensimmäisessä analyysissä, jotta pyöristysten tuoma hyöty tulisi parhaiten näkyviin. Reunaehdot olivat samat kuten ensimmäisessä ja kuormituksena käytettiin samaa voimaa samassa kohdassa kuin ensimmäisessä laskentamallissa. Tällöin voidaan todeta se, että ensimmäistä analyysiä varten tehtyjen laskelmien todenmukaisuudella ei ole niin suurta merkitystä kuin sillä, että ne ovat molemmissa analyysissä samat. Kuvassa 21 on esitetty toista analyysiä varten tehty kokoonpano.

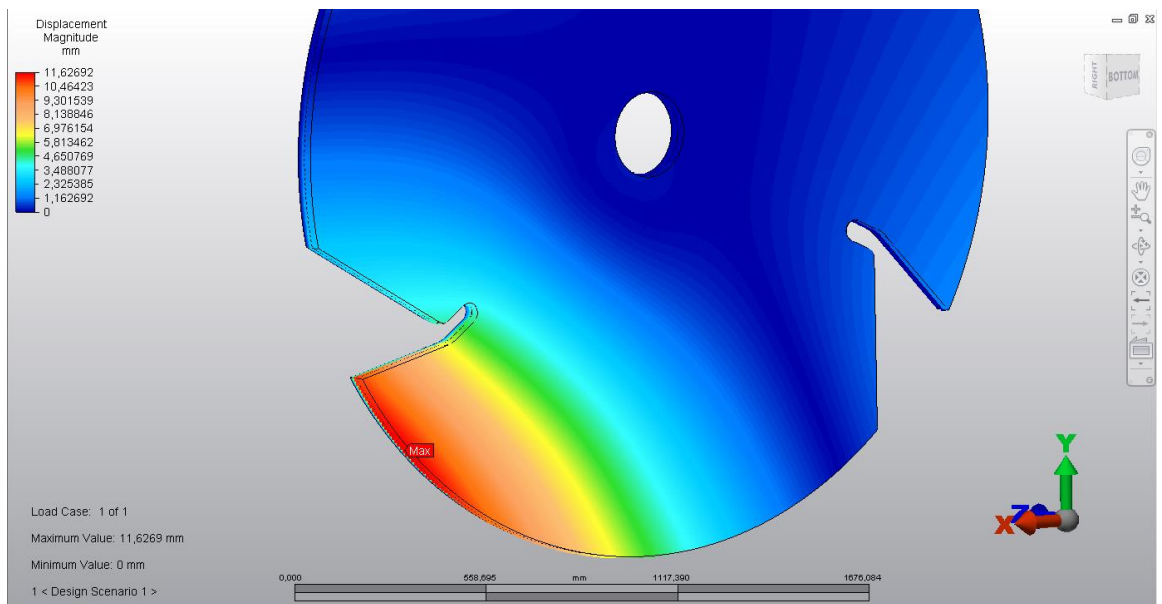


Kuva 21. Toista analyysiä varten tehty kokoonpano

Kuten voitiin olettaa, uudelleen muotoillun vastinlevyn leikkausreunaan syntyneet jännitykset olivat huomattavasti pienempiä kuin alkuperäiseen vastinlevyyn syntyneet jännitykset. Leikkausreunojen pyöristysten ansiosta huippujännitys oli nyt $239,89 \text{ N/mm}^2$ kuvan 22 mukaisesti. Suurin siirtymä oli kuvan 23 mukaisesti $11,63 \text{ mm}$, eli lähestulkoon sama kuin ensimmäisessä analyysissä.



Kuva 22. Uudelleen muotoillun vastinlevyn jännitykset



Kuva 23. Uudelleen muotoillun vastinlevyn siirtymät

Kun tutkitaan analyseistä saatuja tuloksia, voidaan pyöristettyyn vastinlevyyn syntyvien jännitysten todeta olevan merkittävästi pienempiä kuin alkuperäiseen vastinlevyyn syntyneet jännitykset. Ero voidaan muuttaa prosentteiksi käyttämällä seuraavaa kaavaa $p = \frac{a}{b} * 100$ (7).

Muutos prosentteina, $p = \frac{a}{b} * 100$, jossa (7)

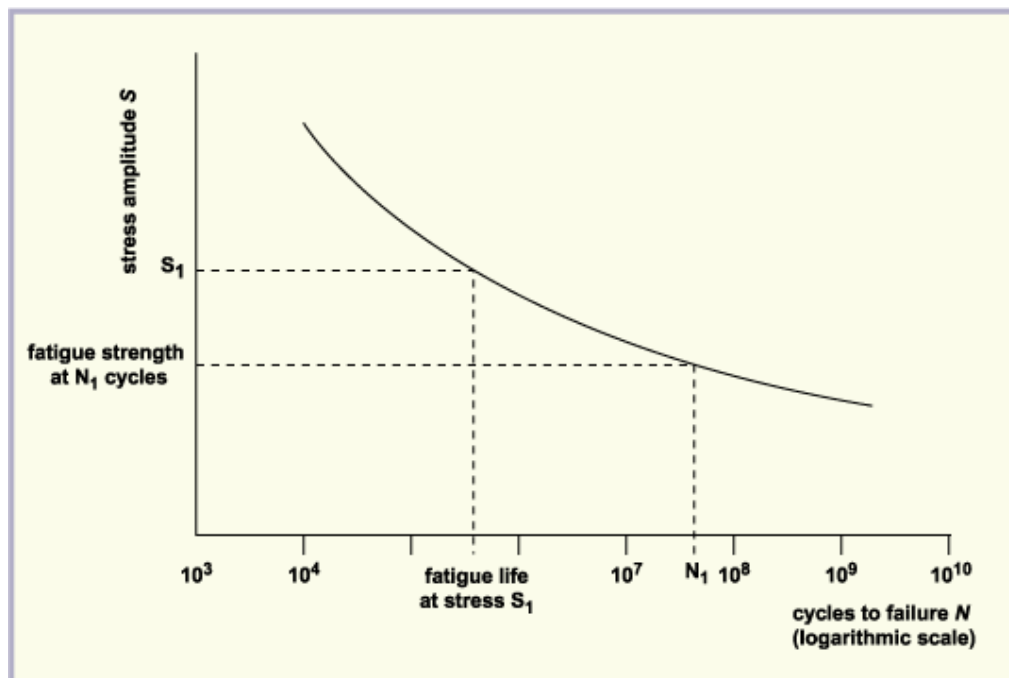
vertoarvo, $a = 239,88 \text{ N/mm}^2$

perusarvo, $b = 320,69 \text{ N/mm}^2$

Muutos prosentteina, $p = \frac{239,88 \text{ N/mm}^2}{320,69 \text{ N/mm}^2} * 100$

Muutos prosentteina, $p = 74,80 \%$

Pyöristetyn vastinlevyn huippujännitys on siis 74,80 % alkuperäisen vastinlevyn huippujännityksestä. Kuvan 24 mukaan väsymisenkesto on verrannollinen kuormitukseen suhteessa kuormituskertojen määrään. Tätä suhdetta kuvataan S-N-käyrällä. Kuvaajasta voidaan todeta huippujännitysten laskun nostavan kuormituskertojen määrää, joten pyöristetyn vastinlevyn voidaan todeta olevan pitkäikäisempi ja näin ollen kestävämpi kuin alkuperäinen vastinlevy. Kun otetaan huomioon myös materiaalinvaihto Strenx 700 -teräkseen sekä leikkaustavan vaihtaminen plasma- tai laserleikkaukseen, voidaan uudelleen suunnitellun vastinlevyn todeta kestävän huomattavasti pidempään kuin alkuperäinen vastinlevy on kestänyt. [12]



Kuva 24. S-N-käyrä, eli väsymisenkesto kuormituksen suhteesta kuormituskertojen määrään [12]

7.5 Valmistus ja asennus

Kulmarummun uuden vastinlevyn materiaaliksi valittiin siis SSAB:n Strenx 700, 30 mm paksu teräslevy standardin EN 10025-6 mukaan. SSAB on Pohjoismaiden suurin teräksen valmistaja, joten teräslevy olisi sieltä helposti saatavissa. Uudesta vastinlevystä on olemassa laskenta-analyysejä varten tehty 3D-malli sekä piirustus, jonka mukaan levy voitaisiin valmistaa. Vastinlevy tulisi leikata laserilla muotoonsa, koska siten leikkausreunoista saataisiin mahdollisimman hyvin rasitusta kestävä. Tarvittavat hitsaukset levyyn tulisi tehdä oikeaoppisesti jouhevasti ja kiinnittää huomiota myös hitsauksesta aiheutuviin jännitysjäännöksiin. Syntyneitä jännitysjäännöksiä voitaisiin ehkäistä hitsien jälkikäsitteilyllä. Uuden vastin- ja vaimennuslevykokoonpanon vaihtamisen pitäisi olla suhteellisen lyhytkestoinen työ, jolloin linjasto ei joutuisi seisomaan pitkiä aikoja, eikä rahaa näin ollen menisi hukkaan.

7.6 Kunnossapito ja huollettavuus

Uuden vastinlevyn kunnossapito toimisi samalla tavalla kuin vanhan vastinlevyn kunnossapito on toiminut. Jos kävisi niin, ettei uusikaan vastinlevy kestäisi siihen kohdistuvia rasituksia vaan murtuisi, niin sitä pystyisi hitsaamaan samalla tavalla kuin vanhaa vastinlevyä. Hitsaukset vain täytyisi tehdä oikein, jos niillä haluttaisiin korjata syntyneet murtumat kunnolla. Ehkäisevää kunnossapitoa vastinlevylle tietysti pystyisi tekemään laskemalla kiihdytysrullaston nopeutta, jolloin vastinlevyyn ei kohdistuisi niin suuria voimia kuitupuiden iskeytyessä siihen. Se kuitenkin tiettenkin hidastaisi kuitupuiden läpimenoaikaa ja näin ollen tuotantoa, joten se ei todennäköisesti olisi vaihtoehto.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä tehdyillä parannuksilla on huomattava merkitys vastinlevyn kestoikään. Jo pelkällä uudelleen muotoilulla vastinlevyyn muodostuvat jännitykset saatiin putoamaan yhdellä neljäsosalla. Kun vielä lisätään vastinlevyn valmistusmateriaalin vaihto kestävämpään teräkseen, pitäisi uuden vastinlevyn olla paljon kestävämpi kuin vanha on ollut. Lisäksi kun vastinlevy leikataan joko plasmalla tai laserilla ja kasataan tiukaksi paketiksi isommilla pulteilla varmistusmuttereiden ja kierrelukitteen kera, ehkäistään vielä lisää väsymissäröjen syntymisen mahdollisuutta.

Jos kävisi niin, ettei uusikaan vastinlevy kestäisi siihen kohdistuvia rasituksia vaan väsyisi käytössä, niin ongelma täytyisi korjata tehden suurempia muutoksia. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon se tosiasia, että mikään ratkaisu ei ole ikuinen, mutta tämän ratkaisun hinta-/laatusuhteen pitäisi kuitenkin olla kohdallaan. Vaihtotyöhön ei kuluisi suuria resursseja ja vanhalla kokoonpanolla voitaisiin ajaa niin kauan, kun uusi kokoonpano olisi saapunut ja olisi valmis asennettavaksi. Uuden vastin- ja vaimennuslevyn vaihto-operaation pitäisi olla suhteellisen nopea työ, jolloin linjasto ei joutuisi seisomaan pitkiä aikoja ja tällöin säästyisi pitkäkestoisesta työseisokista aiheutuvat tuotantotappiot.

Yksi vastinlevyn kestävyuden parannuskeino voisi vielä olla vastinlevyn taivuttaminen hyvin lievästi koveraksi ennen sen asentamista paikoilleen. Tällä voitaisiin ehkäistä levyn taipumista kuperaksi niin kuin vanhalle vastinlevylle oli käynyt. Tällöin vastinlevy voisi myös kestää siihen kohdistuvia rasituksia vielä paremmin. Tätä ei kuitenkaan otettu laskennassa huomioon, vaan tämä on pelkkä idea. Asiaa on kuitenkin tiedusteltu säiliön päätyjä valmistavalta yritykseltä, ja tällainen lievä taivutus pitäisi tarvittaessa olla mahdollista.

Toisena mahdollisuutena olisi lisätä vastinlevyn materiaalipaksuutta käyttämällä esimerkiksi 35 mm paksuista levyä. Tämä voi kuitenkin aiheuttaa muita ongelmia, koska paksumpi levy on ohuempaa levyä alttiimpi väsymiselle ja paksuuden lisääminen lisää myös vastinlevyn massaa, joka aiheuttaa suurempia rasituksia levyn kiinnityskohtiin. Alun perin vastinlevy on valmistettu piirustusten mukaan 30 mm

paksusta teräslevystä ja rakenne on mitoitettu sille, joten samaa levypaksuutta suositellaan käytettäväksi edelleen.

Kun uusi paranneltu vastinlevy asennettaisiin, kannattaisi sen toimintaan kiinnittää huomiota. Kiinnityspultteja kannattaa tarkkailla, jotta ne eivät pääse löystymään käytössä, jolloin kokoonpanoon tulee turhia välyksiä, jotka taas lisäävät rasituksia. Jos näyttää siltä, että uusikin vastinlevy lähtee jostain syystä taipumaan, Armaflexia voi ja kannattaakin lisätä vastinlevyn taakse, koska sillä saadaan poistettua turha liikkumavara. Jatkotutkimuskohteena työssä voisi olla Armaflexin toiminta, onko se kuitenkin paras mahdollinen materiaali tähän käyttötarkoitukseen. Myös vanhan vastinlevyn taipumisen syitä voisi tutkia tarkemmin, onko se johtunut korjaushitsausten lämpövaikutuksesta vai jostain muusta syystä.

Arvioitaessa tehtyä työtä tämä opinnäytetyö oli hyvin opettavainen. Aihe liittyi koneenrakennukseen ja lujuuslaskentaan, jossa tekijä kehittyi huomattavasti. Työssä joutui perehtymään perinpohjaisesti FEM-laskennan perusteisiin, mistä on varmasti hyötyä tulevaisuudessa. Ongelmia työssä tuotti Autodesk Simulation Mechanicalin oikuttelu sekä kaatuilu, mutta ajan kanssa näitä ongelmia opittiin välttämään. Ohjelma oli kuitenkin opiskelijalle ilmainen ja suhteellisen helppokäyttöinen verrattuna esimerkiksi Femap NX Nastran ohjelmistoon, ja ohjelman käyttöön löytyi valmistajan sivuilta hyvät ohjeet. Ohjelma oli myös hyvin yhteensopiva sekä Autodesk Inventorin sekä SolidWorksin kanssa.

Opinnäytetyössä saatiin kehitettyä asiakkaan kannalta toimiva ratkaisu käytössä ilmentyneisiin ongelmiin. Työn raportin sekä tehtyjen piirustusten pohjalta asiakas pystyy valmistamaan uuden vastinlevyn sekä tekemään muut suunnitellut parannukset. Kriittisesti ajateltuna työssä ei tehty suuria muutoksia juuri asiakkaan toiveen mukaisesti, mutta tehtyihin muutoksiin perehdyttiin syvällisesti ja ne perusteltiin huolellisesti. Väsyminen on kuitenkin monesta tekijästä aiheutuva reaktio, jonka kaikkiin tekijöihin ei pelkillä rakenteiden muutoksilla voida vaikuttaa. Esimerkiksi korrosio on yksi tekijä, joka aiheutuu ympäröivän ilman lämpötilasta sekä kosteudesta. Tätä voidaan kuitenkin hieman ehkäistä vastinlevyn pintakäsittelyllä, mutta maali ei kuitenkaan tule vastinlevyssä pysymään kovinkaan kauaa, koska

kuitupuut kuluttavat sitä jatkuvasti. Todennäköisesti korroosion vaikutus vastinle-
vyn kestävyteen on tässä tapauksessa kuitenkin hyvin pieni, koska se on hyvin
hidas reaktio, joka tapahtuu pitkällä aikavälillä.

LÄHTEET

- (1) Insinööritoimisto Kone-Konstat Oy. <http://www.kone-konstat.fi/>. Viitattu 26.1.2017.
- (2) UPM. 2017. <https://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=UPM&oldid=16373202>. Viitattu 27.1.2017.
- (3) UPM Kaukas. 2017. <http://www.upmpulp.fi/upm-kaukas/Pages/Default.aspx>. Viitattu 27.1.2017.
- (4) JOHDANTO. ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSTEET SESSIO 01: Johdanto. Elementtiverkko. Solmusuureet.
- (5) Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa (väsyminen).
- (6) CASR-Steelpolis –verkostohanke (EAKR) Tekijät: Janne Lämsä, Henri Kiuru Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy Oulun yliopisto. Ultralujat rakenne- ja kulu- tusteräkset - tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle.
- (7) Armacell. <http://www.armacell.com/WWW/armacell/INETArmacell.nsf/standard/CCB3347794B9ECCEC12578110049198F>. Viitattu 14.2.2017.
- (8) STRENX-, TERÄKSEN, EDUT. STRENX- TERÄKSEN EDUT.
- (9) SSAB LASER 250C PLUS. SSAB LASER 250C PLUS.
- (10) Kärkkäinen M. Puutieteen perusteet. Helsinki: Metsälehti; 2003.
- (11) Salazar G. CHARACTERIZATION OF. Communications in Algebra 2005 Feb 23,;33(2):519.
- (12) Tarr M. Stress and its effect on materials. 2007.

LIITTEET

Liitteenä uudelleen suunnitellun vastinlevyn piirustus.

