

Tampereen ammattikorkeakoulu
Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikka
Pasi Heinonen

Opinnäytetyö

Nosturillisen vaihtolavarakenteen CAD-mallintaminen ja lujuuslaskenta

Työn ohjaaja TkT Markus Aho

Tampere 12/2009

| | |
|-----------------|--|
| Tekijä | Pasi Heinonen |
| Työn nimi | Nosturillisen vaihtolavarakenteen CAD- mallinnus ja lujuuslaskenta |
| Sivumäärä | 64 sivua + 2 liitesivua |
| Valmistumisaika | 31.12.2009 |
| Työn ohjaaja | TkT Markus Aho |

TIIVISTELMÄ

Työssä suoritettiin Mesi-Auto Oy:ssä valmistetun nosturillisen vaihtolavan CAD-mallinnus ja lujuuslaskenta. Työn pääasiallisena tarkoituksena oli tutkia vaihtolavan mekaanista kestävyyttä, kun sitä kuormitetaan kuormaa kuvaavilla betonipainoilla.

CAD-mallinnuksen tekemiseen valittiin Autodesk Inventor -ohjelmisto ja lujuuslaskentaan LUSAS-ohjelmisto. Kumpikin ohjelmisto valittiin, koska ne olivat ennestään tuttuja.

Lujuuslaskenta suoritettiin kahdessa erilaisessa kuormitustilanteessa. Kuorma oli sama kummassakin tapauksessa, mutta tuenta oli erilainen. Rasituk-
sia tutkittiin kahdessa erilaisessa materiaalissa, koska vaihtolavarakenteessa oli teräksen lisäksi myös vaneria.

Lopputuloksena saatiin kumpaakin kuormitustapausta vastaava siirtymätila ja vertailujännitys jakauma kummallekin tutkitulle materiaalille. Rakenteen kestävyyttä pystyttiin arvioimaan vertailemalla saatuja vertailujännityksiä materiaalien myötö- tai murtorajaan nähden. Teräksen vertailujännityksiä verrattiin myötöraajaan nähden ja vanerin vertailujännityksiä murtorajaan nähden.

Tarkastelun perusteella rakenne kesti tutkitut kuormitustapaukset, kun jätetään huomioimatta mallivirheestä johtuva hyvin paikallinen huippujännitys.

| | |
|-------------------|---|
| Writer | Pasi Heinonen |
| Thesis | CAD modeling and Structural analysis of Demountable platform with crane |
| Pages | 64 pages + 2 appendices |
| Graduation time | 31.12.2009 |
| Thesis Supervisor | Dr. Tech Markus Aho |

ABSTRACT

This engineering thesis was concentrated on CAD modeling and structural analysis of demountable platform with crane. The purpose of this thesis was to analyse mechanical strength of demountable platform when it is loaded with a load that describe the concrete weights.

Autodesk Inventor software was used for CAD modeling and LUSAS software for structural analysis. These softwares were already familiar.

Structural analysis was carried out in two different loadcases. The load was the same for both the cases, but support was different. Stresses were analysed for two different materials, because there was plywood and steel in the platform under study.

As the result, the distributions of displacements and equivalent stresses were collected for both analysed materials in both loadcases. The strength of the structure was able to estimate by comparing the equivalent stresses with the yield strength of steel and tensile strength of plywood.

The results in both the analysed loadcases showed that structure is strength enough, when excluding peak stresses in one singulative point.

Keywords

CAD-modeling, demountable platform,
structural analysis

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| 1 Johdanto | 6 |
| 2 Mesi-Auto Oy..... | 7 |
| 3 DAF-kuorma-autot..... | 8 |
| 3.1 DAF-kalusto..... | 8 |
| 4 Suoritettavan työn kuvaaminen..... | 11 |
| 4.1 Suoritettava työ | 11 |
| 4.2 Nosturillinen vaihtolava | 12 |
| 5 Lavarakenteen CAD-mallinnus..... | 13 |
| 5.1 Autodesk Inventor | 13 |
| 5.2 Käytetty CAD-malli | 14 |
| 5.3 Piirustukset..... | 19 |
| 6 Teoria | 21 |
| 6.1 Elementtimenetelmän perusteoria..... | 21 |
| 6.1.1 Elementtiverkko | 22 |
| 6.1.2 Solmusuureet..... | 22 |
| 6.1.3 Ratkaisu elementin alueessa..... | 23 |
| 6.2 Laskennan teoria | 24 |
| 6.3 LUSAS | 25 |
| 7 Lujuuslaskenta..... | 28 |
| 7.1 Elementtiverkon luonti..... | 28 |
| 7.2 Määritteiden luonti | 31 |
| 7.2.1 Symmetriaehto | 31 |
| 7.2.2 Mallin kääntö | 33 |
| 7.2.3 Materiaalit | 34 |
| 7.2.4 Tuenta ja kuormitus | 35 |
| 7.3 Mallin ratkaiseminen..... | 40 |
| 7.3.1 Kuormitustapaus 1 | 40 |
| 7.3.2 Kuormitustapaus 2 | 44 |
| 7.4 Tulokset ja niiden analysointi | 48 |
| 7.4.1 Kuormitustapaus 1 | 50 |
| 7.4.2 Kuormitustapaus 2 | 54 |
| 7.4.3 Tulosten tarkkuus | 55 |
| 8 YHTEENVETO | 61 |
| Lähteet..... | 62 |
| Liitteet | 64 |

Symboliluettelo

| | |
|----------|--------------------------------------|
| p | paine, MPa |
| F | voima, N |
| A | pinta-ala, mm ² |
| σ | normaalijännitys, MPa |
| τ | leikkausjännitys, MPa |
| m | massa, kg |
| g | putoamiskiihtyvyys, m/s ² |
| R_{eL} | alempi myötöraja, Mpa |
| R_m | murtolujuus, MPa |

1 Johdanto

Mesi-Auto Oy:n toiminta keskittyy pääosin eri kuorma-automerkkien kattavaan huoltoon. Yrityksellä on korjaamohallin ulkopuolella runsaasti erinäisiin tarpeisiin sopivia tavaroita. Näistä tavaroista suuri osa painaa todella paljon ja vaativat näin ollen nostovoimaa. Varsinkin kuormaa kuvaavat betonipainot ovat todella raskaita. Niinpä yritys päätti rakentaa vaihtolavarakenteen, johon tulee nosturi päälle.

Vaihtolavarakenteen päätarkoitus on, että kuorma-auto ei ole sidoksissa kyseiseen lavaan, ts. lava voidaan jättää tarvittaessa haluttuun paikkaan. Yrityksen rakentaman vaihtolavarakenteen on myös tarkoitus olla mahdollisimman kätevä niin, että se voidaan vinssata kuorma-auton päälle mahdollisimman helposti. Niinpä tämä lavarakenne on vedettävissä kyytiin kummas-takin päästään.

Vaihtolavarakenteeseen kohdistuu erilaisia rasituksia erilaisissa tilanteissa. Omat haasteensa tuo myös suhteellisen järeä nosturi vaihtolavan toisessa päässä.

Tämän työn tarkoituksena oli muodostaa CAD-malli yrityksen valmistamasta vaihtolavarakenteesta sekä suorittaa lujuuslaskenta kriittisimmissä rasi-tustilanteissa.

2 Mesi-Auto Oy

Mesi-Auto Oy on vuonna 1993 perustettu raskaan kaluston huoltokorjaamo. Yritys toimii DAF-kuorma-autojen ja Goldhofer-lavettien merkkikorjaamona. Tästä huolimatta yritys huoltaa ja korjaa kaikkia kuorma-autoja merkkiin katsomatta. (Mesi-Auto 2008a)

Yrityksen toimenkuvana on raskaan kaluston huollot ja korjaukset aina pienistä huoltotoimenpiteistä isoihin koneremontteihin. Mesi-Auto suorittaa paljon erinäisiä tarkastuksia ja testauksia, kuten piirturin vuositarkastuksia, katsastuksia, nopeusrajoittimien tarkastuksia, savutestejä, Eberspächer-lämmittimien korjauksia, ilmastointilaitteiden huoltoja sekä takalaitanostimien tarkastuksia. (Mesi-Auto 2008b)

Yritys toimii myös tarvikemyyntipisteenä. Valikoimasta löytyy mm. poltto-
moita, pyyhkijän sulkia, Eberspächer-lämmittimien osia, piirturinkiekkoja,
Dhollandia-takalaitanostimien osia sekä öljyjä ja muita nesteitä. (Mesi-Auto
2008b)

Yrityksen henkilökunta koostuu johtajasta, viidestä asentajasta sekä tarvikemyyjästä. Mesi-Auto Oy:n tiloissa toimii myös CT-Finlandin automyynti. Myynnissä on uusia kuorma-autoja sekä vanhoja vaihtokuorma-autoja.

3 DAF-kuorma-autot

DAF-kuorma-autojen historia ulottuu vuoteen 1926. Perustajat olivat hollantilaiset veljekset Hub ja Wilm van Doorne. Varsinainen toiminta alkoi vuonna 1932 ja se keskittyi aluksi perävaunuihin. Ensimmäinen DAF-kuorma-auto valmistettiin 1949. (DAF Trucks 2009a)

DAF on siis alunperin hollantilainen kuorma-automerkki. DAF-Trucks N.V. kuuluu nykyään amerikkalaiseen Paccar inc.-yhtiöön, joka valmistaa DAF-, Kenworth- ja Peterbilt-kuorma-autoja. DAF -Trucks N.V-yhtiön päätehtävät ovat keskiraskaiden ja raskaiden kulkuneuvojen kehittäminen, tuottaminen, markkinoiminen ja myyminen. DAF-kuorma-autot valmistetaan Eindhovenissa Alankomaissa sekä Westerloossa Belgiassa. Kyseisellä automerkillä on Euroopan kuorma-automarkkinoilla merkittävä jalansija. (DAF Trucks 2009b)

3.1 DAF-kalusto

DAF-kuorma-autoja valmistetaan pääsääntöisesti kolmea eri mallia. Pienin malli on LF, keskikokoinen CF ja suurin XF.

DAF LF

Malli, DAF LF, joka esiintyy kuviossa 1, on siis DAF-kuorma-autoista pienin malli. Se soveltuu erinomaisesti kaupunkialueen jakelutehtäviin, koska autolla on pieni kääntösäde sekä kevyt alusta. Myös ohjaamo on matalalla ja siihen on helppo nousta. Mallin polttoainetehokkuus on myös hyvä. (DAF Trucks 2009c)

Moottorina sarjassa toimii PACCARin 4- ja 6-sylinteriset koneet. Näissä moottoreissa iskutilavuus on aikaisempia malleja isompi. Tärkeä seikka kaikissa moottoreissa on enimmäisväännön käyttö laajalla kierrosalueella. (DAF Trucks 2009d)

Koska DAF LF on ketterä ja sillä pääsee pieniinkin paikkoihin, se soveltuu erinomaisesti myös vaihtolavojen kuljettamiseen. Autoon on helppo asentaa vaihtolavakoneisto.



Kuvio 1. DAF LF (DAF Trucks 2009c)

DAF CF

DAF CF on monikäyttöinen kuorma-auto, joka soveltuu monentyyliiseen ajoon. CF-sarja on suosittu liikennöitsijöiden keskuudessa. Mallin parhaimpia ominaisuuksia ovat tilava ohjaamo, kestävä kori ja hyvät ajo-ominaisuudet. (DAF Trucks 2009e)

CF-sarja on erinomainen juuri siksi, että moottoreissa löytyy valinnan varaa. Vaihtoehtoina ovat CF65:n 6,7-litrainen PACCAR GR, CF75:n 9,2-litrainen PACCAR PR ja CF85:n 12,9-litrainen PACCAR MX. Kaikki moottorit ovat erittäin taloudellisia, luotettavia ja kestäviä. Tehovaihtoehdot ovat CF65:n 220 hv:sta aina CF85:n 510:aan asti. (DAF Trucks 2009f)

DAF XF

DAF XF -sarjan kuorma-autot ovat DAF merkkiperheen raskaimpia malleja. XF-sarja on tarkoitettu pitkän matkan ajoihin. Malliin on saatavana kaksi erilaista ohjaamo, Space Cab ja Super Space Cab. Kummassakin on panostettu kuljettajan toimintaan ohjaamossa. (DAF Trucks 2009g)

”DAFin kehittämä ja valmistama täysin uusi PACCAR MX -moottori yhdistää uskomattoman suorituskyvyn taloudelliseen polttoaineen kulutukseen. Saatavana on 410, 460 ja 510 hv:n versiot, joiden vastaavat vääntömomentit ovat 2000, 2300 ja 2500 Nm. Suurin vääntö on käytettävissä nopeudessa 1000 – 1400 r/min.” (DAF Trucks 2009h)

4 Suoritettavan työn kuvaaminen

4.1 Suoritettava työ

Työn aiheena on Mesi Auto Oy:ssä valmistettava nosturillisen vaihtolavarakenteen CAD-mallinnus ja lujuuslaskenta erilaisissa rasitustilanteissa. Työn voi jakaa periaatteessa kolmeen osaan, vaihtolavarakenteen mittojen ottamiseen, CAD-mallinnukseen ja lujuuslaskentaan.

Vaihtolavarakenteesta tulee saada oleelliset mitat, jotta voi muodostaa tarkan CAD-mallin. Mittaamisessa käytettiin rullamittaa sekä työntömittaa.

Mitoituksen jälkeen oli vuorossa CAD-mallin luonti. Malli muodostettiin AUTODESK INVENTOR -ohjelmalla. CAD-mallin tarkoituksena oli havainnollistaa vaihtolavarakennetta. Mallinnuksessa voi tulla myös joitain muutostarpeita, mitä lavarakenne kaipaisi.

CAD-mallin valmistuttua, alettiin luoda lujuuslaskentamallia. Siihen käytettiin LUSAS-lujuuslaskentaohjelmaa. Lujuuslaskenta suoritettiin tilanteessa, jossa lavaa kuormitetaan Mesi-Auto Oy:n betonipainoilla. Lujuuslaskentamallin oli tarkoitus kuvata mahdollisimman tarkasti CAD-mallin esittämä geometria.

4.2 Nosturillinen vaihtolava

Vaihtolavan runkorakenne, joka on esitetty kuviossa 2, koostuu standardin EN 10025-2 mukaisesta 160x74 mm I-palkista ja EN 10219 mukaisesta neliskantisesta 100x50 mm rakenneputkesta. Lavarungossa kehäpalkit ovat standardin EN 10219 mukaisia neliskanttisia 100x50 mm rakenneputkia, joiden seinämänvahvuus on 4 mm. Lavarungon muu materiaali on standardin EN 10219 mukaista 50x50 mm rakenneputkea 4 mm:n seinämällä. Lavarunkoon kiinnitetyt lattiavannerien kiinnitysraudat ovat standardin EN 10025-2 mukaista 40x40 mm kulmarautaa 3 mm:n seinämällä. Nosturi on pultattu paikoilleen 160x74 mm I-palkin päälle. Standardien mukaisten palkkien ja putkien tiedot löytyvät lähteistä (Ruukki 2009a) ja (Ruukki 2009b).



Kuvio 2. Nosturivaihtolava valmiina maalauksen jälkeen.

5 Lavarakenteen CAD-mallinnus

5.1 Autodesk Inventor

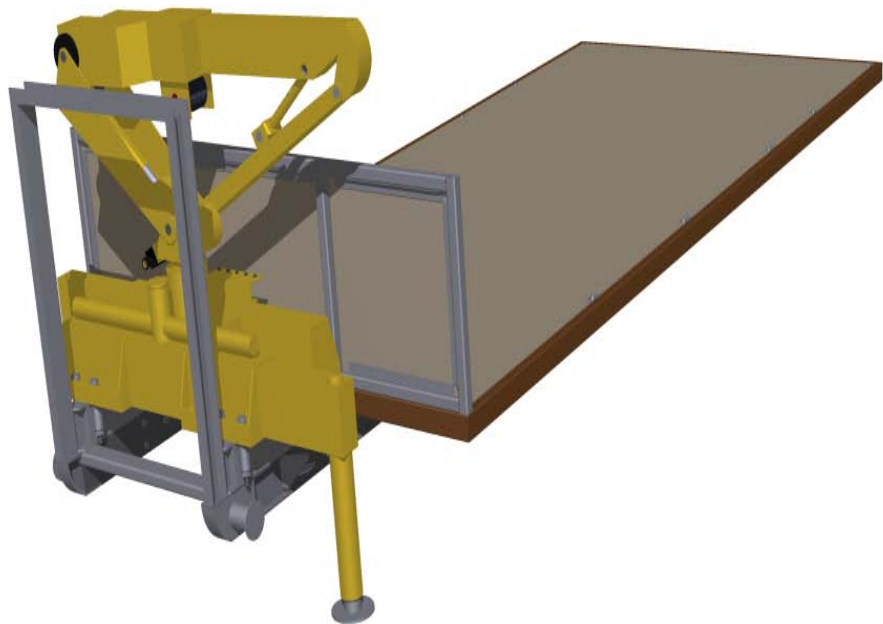
Autodesk Inventor on maailmalla yleisesti käytetty ohjelma. Ohjelma on digitaalisen prototypoinnin perusta. Prototypoinnin tuloksen eli 3d-mallin avulla pystytään varmistamaan valmistettavan tuotteen sopivuus ja toimivuus jo ennen varsinaista valmistusta. (Autodesk 2009a)

Autodesk Inventor on kustannustehokas ja helposti opittava ohjelma. Se tarjoaa joustavat työkalut 3D-mekaniikkasuunnitteluun, tuotteiden simulointiin, suunnitelmia koskevaan tiedonvaihtoon sekä putkistojen ja muottien suunnitteluun. Ohjelman ominaisuudet ovat laajat. Ohjelman ominaisuuksia ovat mm. 3D-mekaniikkasuunnittelu, viestintä ja tiedonhallinta, CAD-tuottavuustyökalut, simulointi, koneistus- ja muottisuunnittelu sekä reititettyjen järjestelmien suunnittelu. (Autodesk 2009b)

Autodesk Inventor-ohjelman peruskäyttö käynnistyy 2D-luonnoksen muodostamisella. Tästä voidaan edelleen luoda 3D-osamalli erilaisilla työkaluilla. 3D-osamalleista pystyy kokoamaan monimutkaisempia rakenteita kokoonpano-osiossa.

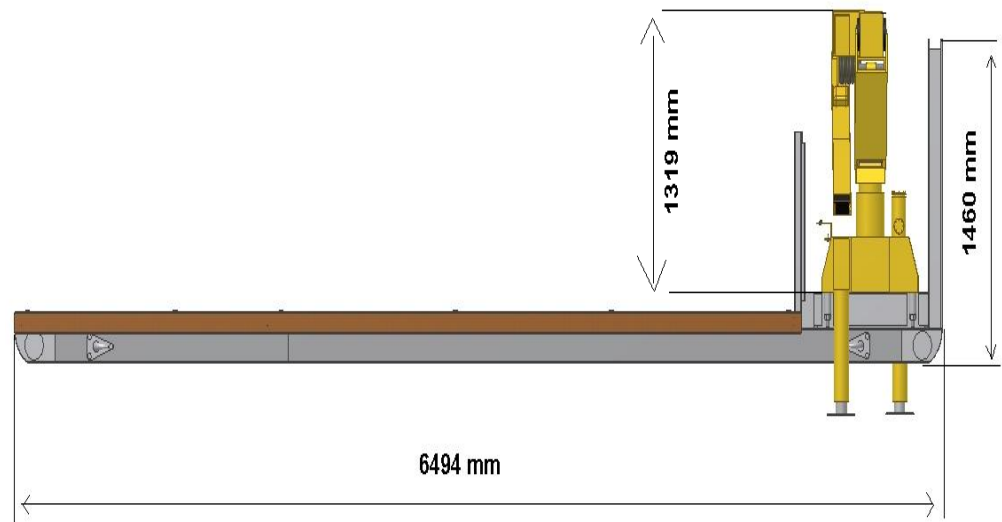
5.2 Käytetty CAD-malli

Tässä työn osiossa esitellään kuvioina Autodesk Inventor -ohjelmalla tehty CAD-mallinnus nosturivaihtolavasta. Kuviot havainnollistavat rakenteen geometriaa eri suunnista. CAD-malli esitellään sivulta, edestä, päältä ja alta. Näistä neljästä suunnasta rakenteen geometria ilmenee tarpeeksi hyvin. Kuviossa 3 on nosturivaihtolava isometrisestä kuvakulmasta.



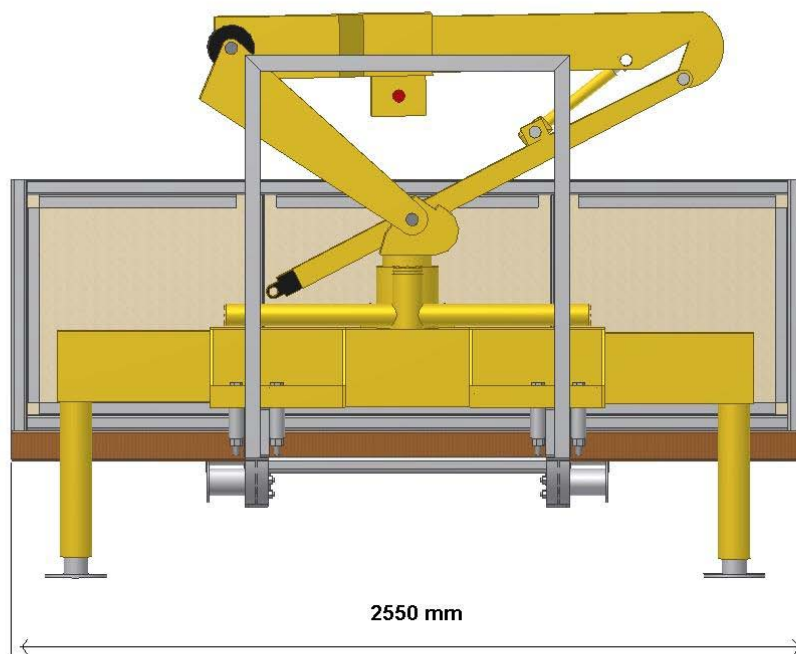
Kuvio 3. CAD-malli isometrisestä kuvakulmasta.

Kuviossa 4 on CAD-malli oikealta katsottuna. Kuviossa näkyy rakenteen kokonaispituus sekä korkeus runkopalkin pohjasta etuseinän yläkärkeen. Myös nosturin korkeus on merkitty kuvaan.



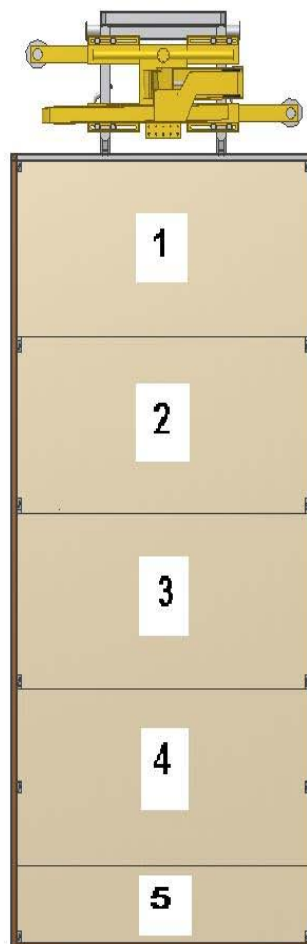
Kuvio 4. CAD-malli oikealta

Kuviossa 5 CAD-malli on kuvattu edestäpäin. Kuviossa näkyy rakenteen leveys.



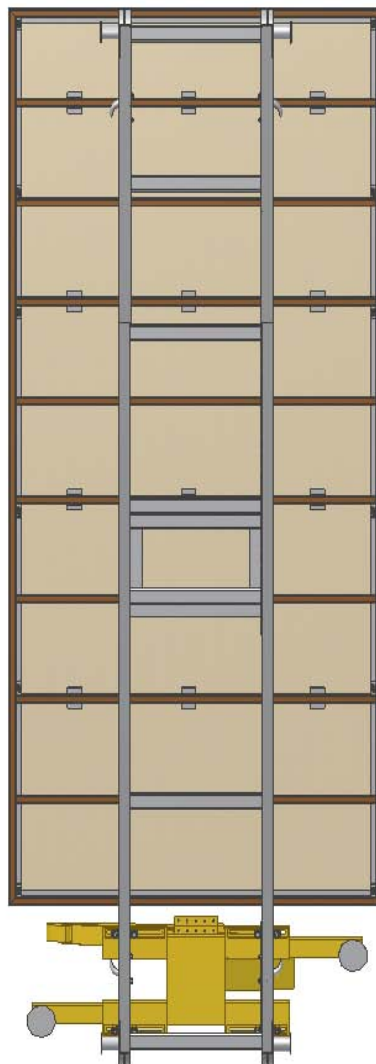
Kuvio 5. CAD-malli edestäpäin.

Seuraavissa kuvioissa 6 ja 7 CAD-malli on kuvattu päältä ja alta. Kuviossa 6 näkyy vanerien numerointi. Numerointia käytetään lujuuslaskentaosiossa. Vanerit ovat numeroitu edestä taaksepäin.



Kuvio 6. CAD-malli päältäpäin.

Kuviossa 7 näkyvät vanerien kiinnityskohdat ja vanerien alapuoliset teräs-
rakenteet. Teräsrakenteet koostuu runko-osasta ja lava-rungosta.

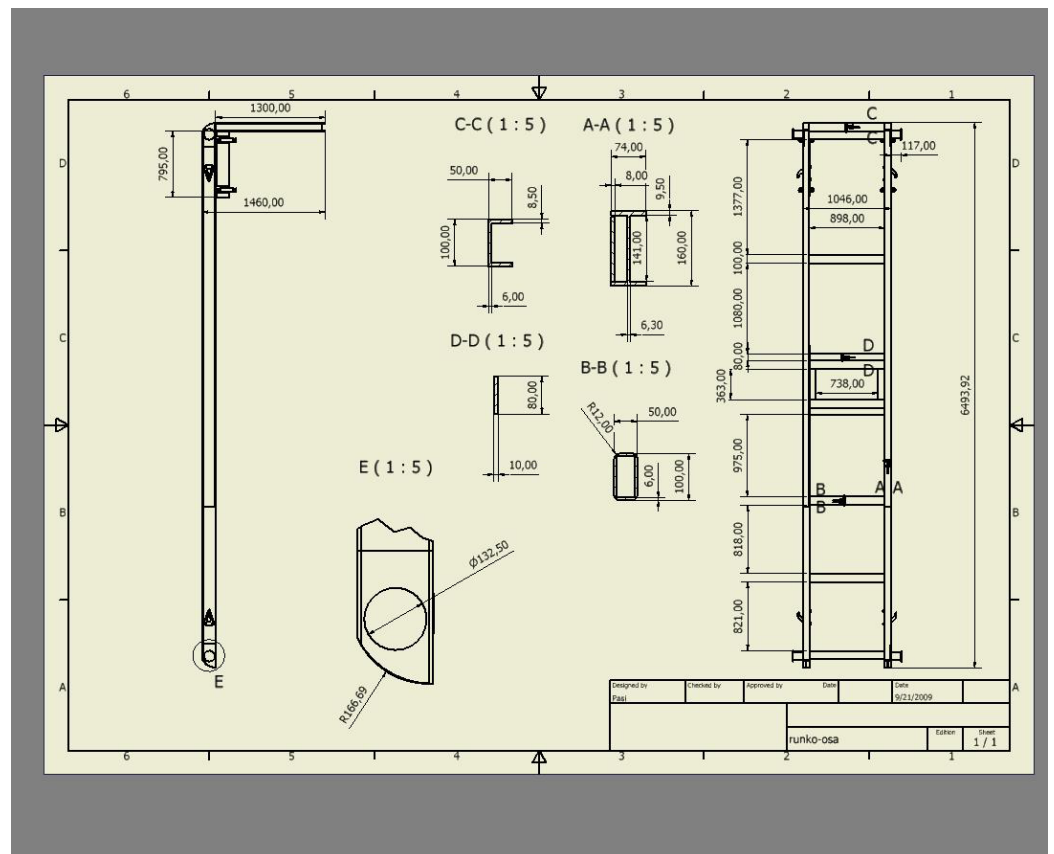


Kuvio 7. CAD-malli alapäin.

5.3 Piirustukset

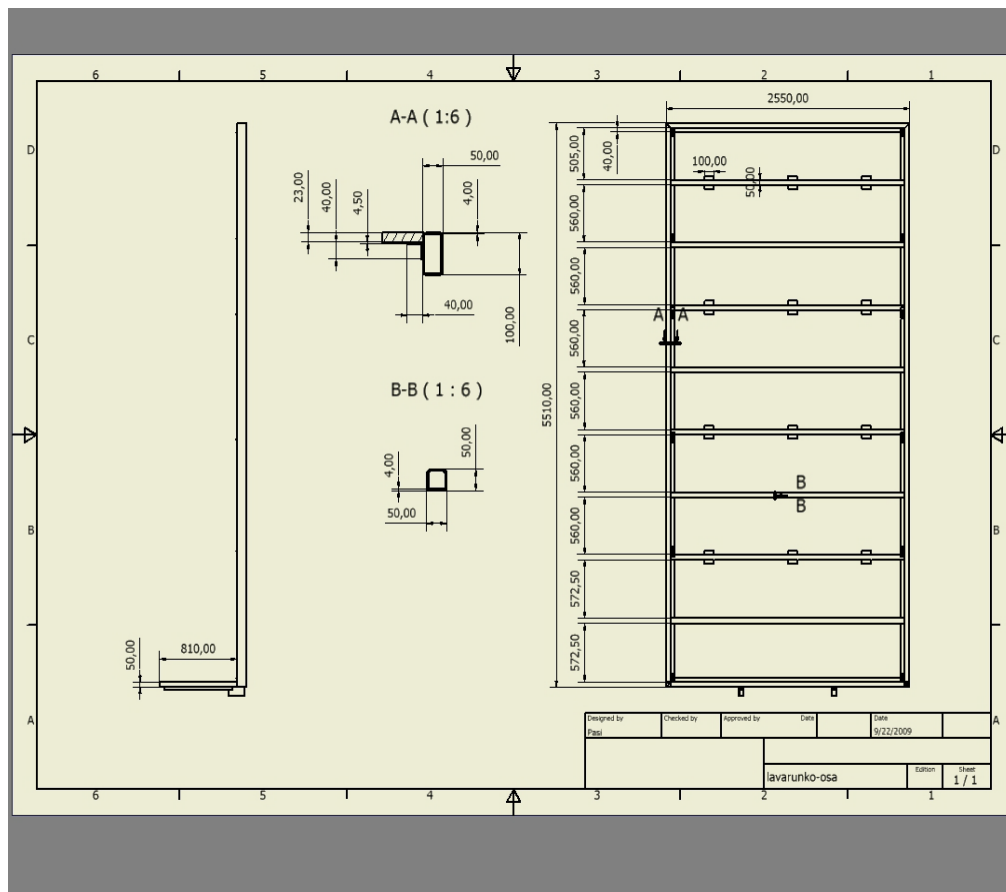
Tässä kappaleessa esitellään CAD-mallista tehdyt mittapiirustukset. Piirustukset sisältävät kaikki olennaiset mitat, jotka otettiin rullamitalla nosturilavan rakennusvaiheessa. Alla olevat mittapiirustukset löytyvät myös liitteinä työn lopussa.

Seuraavassa kuviossa on esitetty nosturilavan runko-osan mitat. Leikkauksista A, B, C, D näkee materiaalin poikkileikkauspinnan eri kohdissa.



Kuvio 8. runko-osan mitat.

Kuviossa 9 on nosturilavan lavarungon mitat. Leikkaukset A ja B näyttävät materiaalin poikkileikkauspinnan eri kohdissa.



Kuvio 9. Lavarungon mitat.

6 Teoria

Seuraavissa luvuissa käydään läpi elementtimenetelmän teoriaa, laskennan teoriaa ja LUSAS-lujuuslaskentaohjelmaa.

6.1 Elementtimenetelmän perusteoria

Lujuuslaskennan tarkoituksena on ratkaista kuormituksista aiheutuvat siirtymätilakenttä, muodonmuutostilakenttä ja jännitystilakenttä, kun rakenteen tuenta tunnetaan. Staattisessa laskentatapauksessa rakenteen tuet ovat jäykkiä ja estävät kappaleen liikkeen. Edellä mainittujen kenttien ratkaisemisessa tarvittavat yhtälöt tunnetaan lujuusopin teoriasta. Käytännössä analyyttinen ratkaisu onnistuu kuitenkin vain, jos rakenne on geometrialtaan yksinkertainen. Monimutkaisemmissa tapauksissa ratkaisua ei löydy matemaattisilla funktioilla vaan joudutaan tyytymään likimääräisiin ratkaisuihin. (Lähteenmäki 2001a, 1).

Numeerisia ratkaisumenetelmiä on aikojen kuluessa kehitetty monia, mutta elementtimenetelmä on osoittautunut parhaaksi. Elementtimenetelmän käyttö alkoi lentokoneteollisuudessa 1950-luvulla. Sieltä se levisi nopeasti rakennus- ja konetekniikan alueille, jossa sitä käytetään rakenteiden statiikan ja dynamiikan käsittelyyn. Elementtimenetelmää kutsutaan monesti FEM-menetelmäksi. Lyhenne FEM tulee englannin kielisistä sanoista Finite Element Method. Myöskin lyhenne FEA tulee esiin monesti puhuttaessa lujuuslaskennasta. Se tulee sanoista Finite Element Analysis ja tarkoittaa elementtimenetelmällä suoritettavaa laskentaa. (Lähteenmäki 2001a, 1)

6.1.1 Elementtiverkko

Elementtimenetelmässä geometrisesti mutkikas kappale jaetaan pienen pieniin osiin, jotka ovat geometrialtaan tarpeeksi yksinkertaisia. Näitä jaettuja osia kutsutaan elementeiksi. Kolmiulotteisen kappaleen elementteinä käytetään neli-, viisi- ja kuusitahokkaita. Niiden reunapinnat voivat olla tasoja tai kaarevia pintoja. Tällaisia elementtejä kutsutaan tetraedri-, kiila- ja tiiliskivielementeiksi. Pintarakenteissa käytetään neli- ja kolmisivuisia tasoelementtejä, joiden reunaviivat voivat olla suorina tai käyriä viivoja. Tasoelementtejä kutsutaan nelikulmio- ja kolmioelementeiksi. Viivarakenteissa käytetään janaelementtejä. Sauva- ja palkkielementti ovat tyypillisiä janaelementtejä. (Lähtenmäki 2001a, 2)

Elementtimenetelmä on joustava yhdistettyjen rakenteiden käsittelyssä, koska samassa kappaleessa voidaan käyttää samanaikaisesti erityyppisiä ja muotoisia sekä erilaiset geometriset ja materiaaliominaisuudet sisältäviä elementtejä. Kappale kuvataan elementtijoukolla. Tätä joukkoa kutsutaan elementtiverkoksi tai vastaavasti laskentamalliksi. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiinsa liitospisteissä, joita kutsutaan solmuiksi. Yksinkertaisesti siis elementtiverkko muodostuu elementtien joukosta, jotka ovat solmuilla liitoksissa toisiinsa. Soveltuvin elementtityyppi valitaan kullekin osalle tapauskohtaisesti. (Lähtenmäki 2001a, 2)

6.1.2 Solmusuureet

Elementtimenetelmässä ensimmäiseksi ratkaistaan solmusuureet, jonka jälkeen lasketaan tuntemattomat suuret elementtien alueilla. Yleisesti joudutaan käyttämään interpolointia, koska tarkka ratkaisu onnistuu vain viivarakenteilla. Tehokkaimmaksi solmusuureiden ratkaisutavaksi on osoittautunut siirtymämenetelmä. Siirtymämenetelmällä voidaan muodostaa elementin solmusiirtymävektorin ja solmuvoimavektorin välille lineaarinen yhteys (yhtälö 1), jossa $[k]^e$ on elementin jäykkymatriisi. Jäykkymatriisi muo-

dostetaan elementin geometrinen ja materiaaliominaisuuksien pohjalta. Yhtälöä (1) kutsutaan elementin perusyhtälöksi. (Lähtenmäki 2001a, 7)

$$[k]^e \{u\}^e = \{f\}^e \quad (1)$$

Siirtymämenetelmässä voidaan myös muodostaa elementtiverkon solmusiirtymävektorin ja kokonaiskuormitusvektorin välille lineaarinen yhtälöryhmä. Siinä $[K]$ on elementtiverkon jäykkyyssmatriisi eli kokonaisjäykkyyssmatriisi. (yhtälö 2).

$$[K]\{U\} = \{R\} \quad (2)$$

Yhtälöä (2) kutsutaan elementtiverkon perusyhtälöksi. Tuntemattomia ovat vapaat solmusiirtymät, jotka yhdessä tunnettujen tukisiirtymien kanssa muodostavat vektorin $\{U\}$ sekä tukireaktiot, jotka yhdessä tunnettujen ulkoisten solmu- ja elementtikuormitusten kanssa muodostavat kokonaiskuormitusvektorin $\{R\}$. Käytännössä elementtiverkon perusyhtälö (2) sisältää niin paljon yhtälöitä, että tietokone on ainoa työkalu, jolla ratkaisu voidaan saada. (Lähtenmäki 2001a, 8)

6.1.3 Ratkaisu elementin alueessa

Kun solmusuuret on ratkaistu, on ratkaisu saatava ulotetuksi myös solmujen ulkopuolelle elementtien alueeseen. Viivaelementtejä käytettäessä tämä onnistuu tarkasti lujuusopin perusteoriaa käyttäen. Pinta- ja solidielementtejä käytettäessä tarkkaa ratkaisua elementin alueessa ei saada solmusuureisiin nojautuen. Ainoa mahdollinen ratkaisu on likimääräinen, joka perustuu siirtymien ennalta valittavaan interpolointiin solmuarvoista lähtien. (Lähtenmäki 2001a, 8 - 9)

6.2 Laskennan teoria

Tarkastelen nosturilavan lujuuslaskentaa kahdessa eri kuormitusilanteessa. Lavaa kuormitetaan betonipainoilla, joita Mesi-Auto käyttää jarrupainoina. Lujuuslaskennan tuloksena saadaan maksimaalisia siirtymiä ja von Mises-vertailujännityksen arvoja kahdessa eri materiaalissa. Laskennan tarkastelu perustuu rajavarmuusluvun tutkimiseen. Teräkselle käytetään myötörajamitoitusta ja vanerille murtorajamitoitusta. Mikäli vertailujännitys ylittää teräksen myötörajan, myötörajamitoituksen mukaan rakenne myötää tai vastaavasti murtorajamitoituksen mukaan rakenne murtuu, jos vertailujännitys ylittää vanerin murtorajan.

VVEH-vertailujännitys

Vakiovääristymisenergiahypoteesi eli VVEH on alunperin M.T. Huberin esittämä vuonna 1904. Myöhemmin Richard von Mises ja H. Hencky kehittivät hypoteesia ja tekivät siitä tunnetun. Nykyään se tunnetaan hyvin von Mises-vertailujännityksenä. VVEH:n määritelmä menee seuraavasti:

”Materiaali vaurioituu (myötää tai murtuu) sellaisessa pisteessä, jossa sen vääristymisenergiatiheys saavuttaa tälle materiaalille ja vauriotyypille kriittisen arvon.” (Outinen & Salmi 2004, 349)

Kimmoista materiaalia kuormitettaessa, siihen varastoituu energiaa kimmoenergian muodossa. Osa tästä energiasta voidaan katsoa liittyvän tilavuuden muuttumiseen. Loppu kimmoenergiasta voidaan katsoa kuluvan muodon vääristämiseen. Jälkimmäisen osan tiheys tietyssä materiaalipisteessä on (Outinen & Salmi 2004, 349)

$$U_{ob} = \frac{1}{12G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \quad (3)$$

Toisaalta samanarvoisen aksiaalisen jännitystilän vääristymisenergiatiheys vaurioitumisen kannalta on (Outinen & Salmi 2004, 350)

$$U_{oD} = \frac{1}{12G} (\sigma_{vert}^2 + \sigma_{vert}^2) \quad (4)$$

Kun merkitään yhtälöt (3) ja (4) yhtä suuriksi ja ratkaisemalla edelleen vertailujännitys saadaan (Outinen & Salmi 2004, 350)

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (5)$$

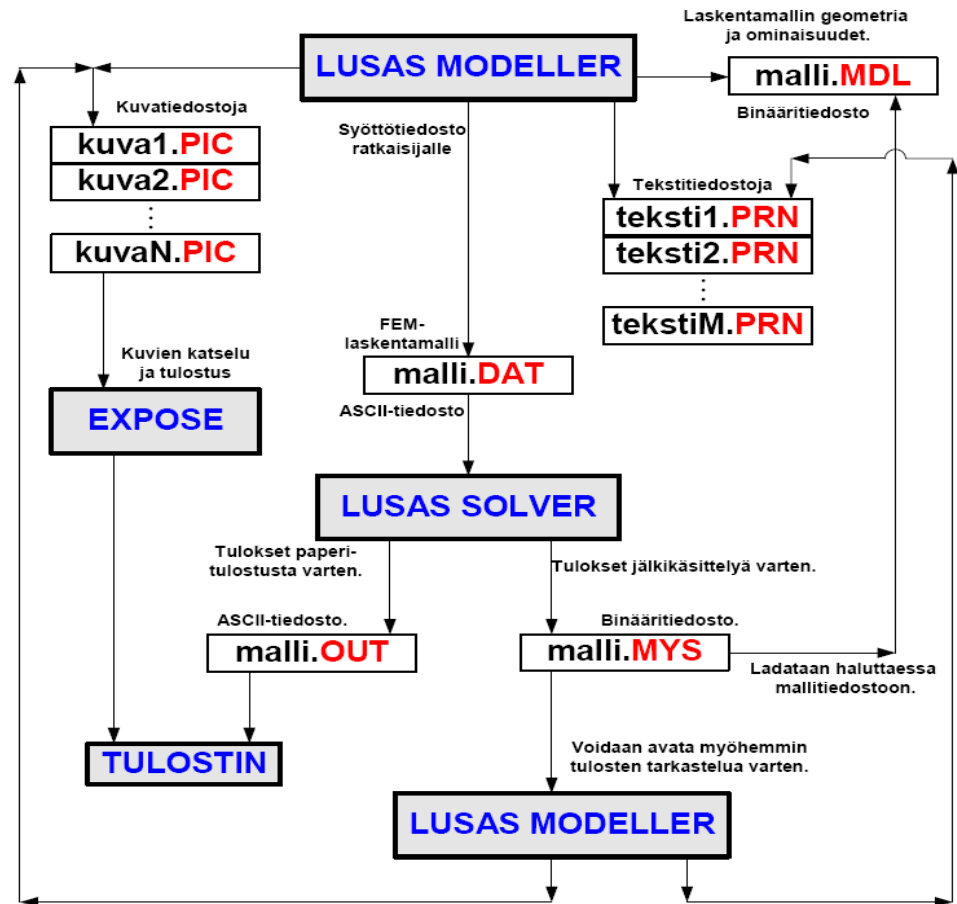
Tämä pätee myös pääkoordinaatistossa, jolloin sama esitys käyttäen pääjännityksiä on (Outinen & Salmi 2004, 350)

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (6)$$

6.3 LUSAS

Tässä luvussa esitellään työssä sovellettua kaupallista FEM-ohjelmistoa nimeltä LUSAS. LUSAS on monipuolinen lujuuslaskentaohjelmisto. Se sisältää viisi erilaista osiota: LUSAS Analyst, LUSAS Bridge, LUSAS Civil & Structural, LUSAS Composite ja LUSAS Academic. Yleisten kappaleiden käsittelyyn sopii hyvin LUSAS Analyst.

LUSASin käytössä esiintyy useita eri tyyppisiä tiedostoja. Osan niistä käyttäjä luo ja nimeää itse ja osa syntyy ohjelmiston tekemänä. Ohjelmassa esiintyvien tiedostotyyppien tunteminen on perusedellytys LUSASin käytölle. Alla olevassa kuviossa (Kuvio 10) on LUSASin tiedostokartta. Siitä näkee tärkeimmät tiedostotyyppit ja niiden syntymisen.



Kuvio 10. LUSASin tiedostokartta (Lähtenmäki 2001b, 2)

Jokaisella LUSASin yhteydessä esiintyvillä tiedostoilla on oletustarkennin, jonka LUSAS ottaa automaattisesti käyttöön, jos käyttäjä ei itse anna tarkenninta. (Lähtenmäki 2001b, 2)

Seuraavaksi esittelen kolme tärkeintä tiedostotyyppiä, mitä LUSASissa esiintyy. LUSAS-ohjelmasta on kerrottu tarkemmin lähteessä (Lähtenmäki 2001b). Siellä on esitelty tarkasti kaikki LUSASissa käytössä olevat tiedostotyyppit. LUSAS-ohjelmasta löytyy tietoa myös sen omilta kotisivuilta www.lusas.com.

Mallitiedosto

Käyttäjä luo itse LUSASin Modeller-osiolla mallitiedostoja. Niiden oletustarkennin on MDL. Mallitiedosto sisältää kaiken informaation laskentamallista. Se sisältää mallin geometrian (pisteet, viivat, pinnat ja tilavuudet) ja

ominaisuudet (materiaalit, poikkipinta- ja paksuustiedot, kuormitukset, tennat sekä elementti- ja solmutiedot). (Lähtenmäki 2001b, 3)

Ratkaisijan syöttötiedosto

Laskentaan valmiista mallitiedostosta luodaan LUSAS Modeller-ohjelmassa syöttötiedosto LUSAS Solver-ratkaisijaohjelmalla, joka suorittaa varsinaisen tehtävän FEM-ratkaisun. Ratkaisijan syöttötiedoston oletustarkennin on DAT. Se on ASCII-tekstitiedosto, jota voidaan käsitellä tekstieditorilla. (Lähtenmäki 2001b, 4)

Ratkaisijan tulostiedostot

LUSAS Solver-ratkaisijaohjelma luo automaattisesti kaksi tiedostoa tulosten jälkikäsitteilyä varten. Toinen näistä tiedostoista on tarkentimella MYS varustettu binääritiedosto. Sitä voidaan tarkastella LUSAS Modeller-ohjelmassa. Ratkaisun päätyttyä MYS-tiedostossa olevat tulokset ladataan vastaavaan MDL-tiedostoon. Näin tuloksia voidaan jälkikäsitellä välittömästi. Toinen ratkaisijaohjelman luoma tiedosto on OUT. Sitä voidaan tarkastella tekstieditorilla. OUT-tiedosto sisältää yhteenvedon elementtiverkon syöttötiedoista ja haluttaessa solmuista ja elementeistä laskettuja tuloksia. (Lähtenmäki 2001b, 5)

7 Lujuuslaskenta

Tässä luvussa käsitellään LUSAS-ohjelmalla suoritettua nosturillisen vaihtolavarakenteen lujuuslaskentaa. Ensin kerrotaan lujuuslaskentamallin luomisesta. Sen jälkeen esitellään tulokset ja niiden analysoinnin.

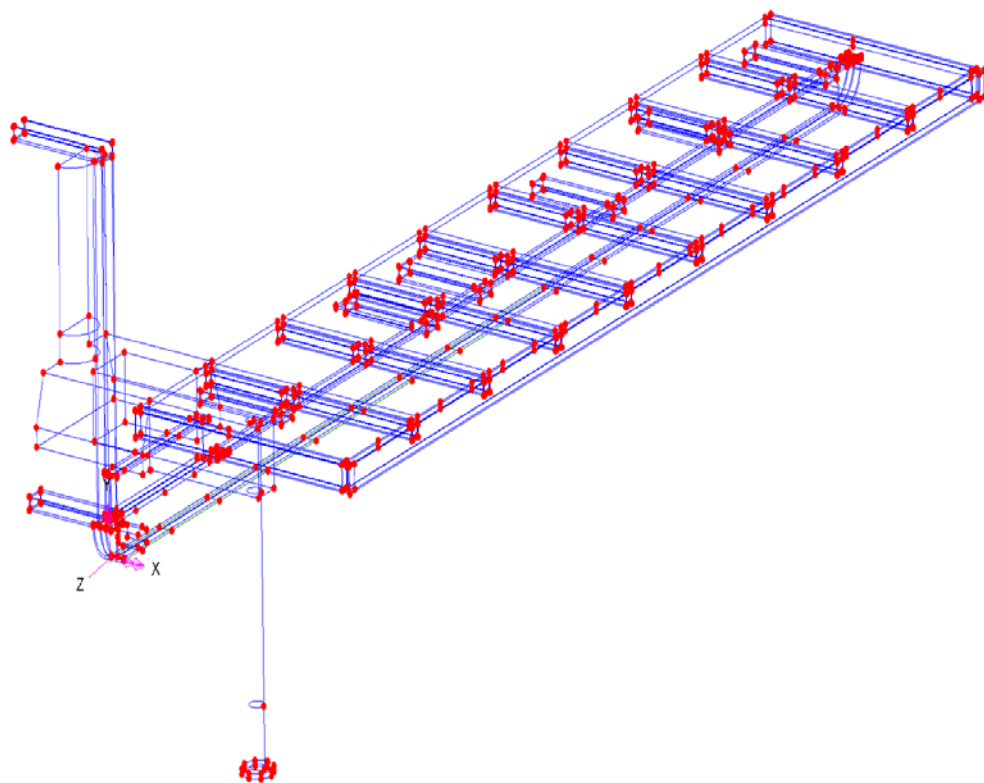
7.1 Elementtiverkon luonti

LUSAS-ohjelman käyttö etenee siten, että ensin valitaan yksiköt. Tässä tapauksessa N, mm, t, s ja °C. Yksiköiden valinnan jälkeen luodaan mallin geometria. Tämän jälkeen mallin päälle asetetaan elementtiverkko. Seuraavaksi malliin asetetaan määritteet (tuet, kuormitukset, materiaalitieto ja tarvittaessa poikkipintojen geometriatieto). Määritteiden asettamisen jälkeen malli on valmis ratkaistavaksi.

Koska nosturillisen vaihtolavarakenteen CAD-malli ei ollut siirrettävissä LUSASiin, jouduttiin geometria luomaan LUSASilla täysin alusta.

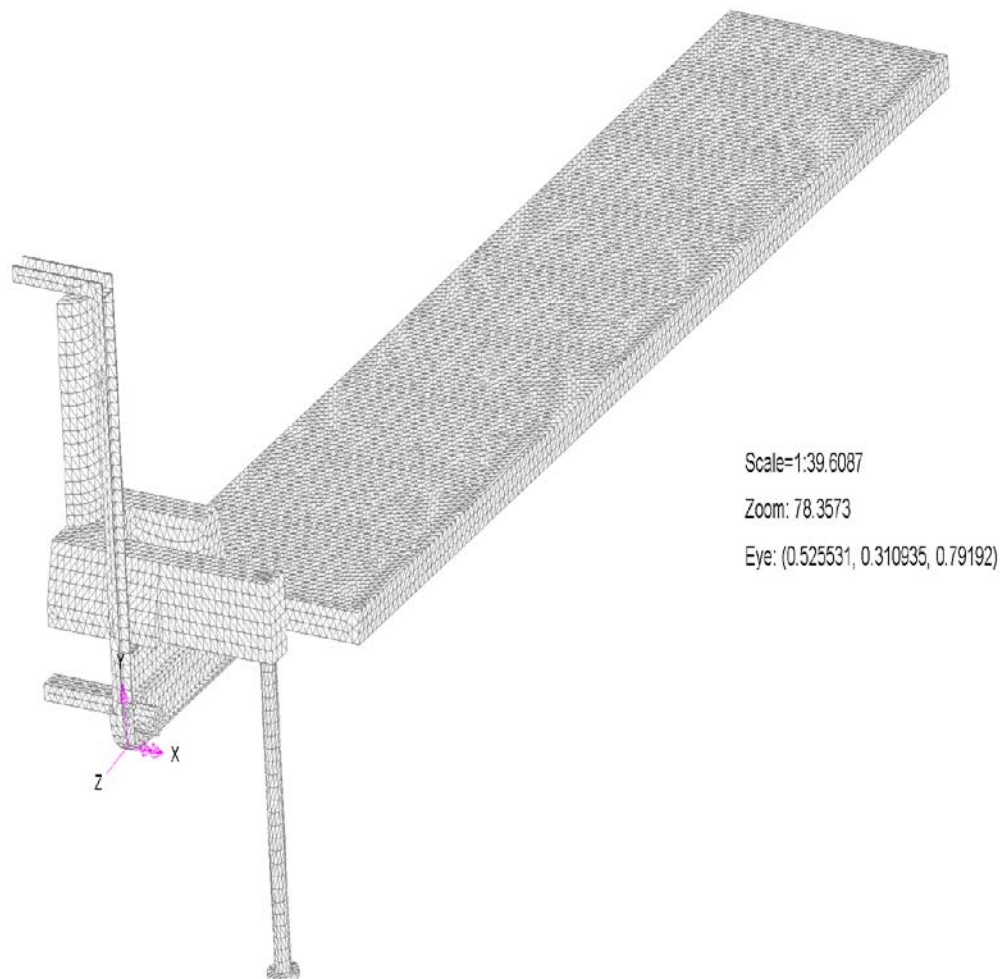
Kuviossa 11 on LUSAS-ohjelmalla luotu lujuuslaskentamallin geometria. Nosturivaihtolavasta mallinnettiin vain puolet, koska ohjelman suorituskyky on rajallinen. Mikäli mallin olisi mallintanut kokonaan, elementtejä olisi tullut kaksinkertainen määrä ja ohjelma olisi kaatunut. Puolikkaan mallin käytöstä kerrotaan tarkemmin kohdassa 7.2.1.

Geometria on luotu siten, että ensin on mallinnettu viivoja. Niistä edelleen on tehty pintoja, jotka edelleen ovat pursotettu kolmiulotteisiksi tilavuuksiksi. Tilavuudet ovat liitetty liitoskohdissaan toisiinsa. Nosturista on mallinnettu vain runko-osa, koska nosturista mittojen ottaminen oli vaikeaa. Ohjelman rajallisen suorituskyvyn vuoksi laskentamallissa nosturin puomiosaa kuvaa vain kuvassa näkyvä ylöspäin nouseva ”pala” ja todellisessa nosturilavassa oleva lavaosan etuseinä puuttuu. Mallinnuksessa on oletettu, että kaikki hitsiliitokset ovat tasalujia materiaalin kanssa.



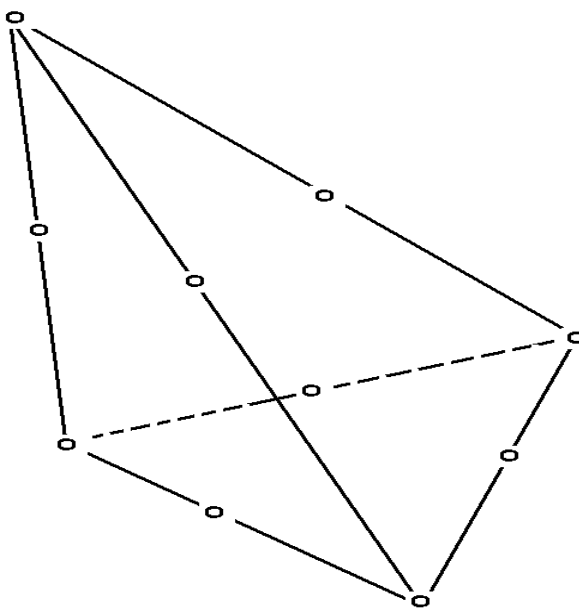
Kuvio 11. LUSASilla mallinnettu geometria

Kuviossa 12 näkyy mallin elementtiverkko. Koska malli on tilavuuksia käyttäen luotu, elementtiverkon elementtien täytyy olla kolmiulotteisia solidielementtejä. Elementtiverkko on epäsäännöllinen, jossa elementin keskimääräinen koko on 40 mm.



Kuvio 12. Elementtiverkko

Elementtiverkko koostuu TH-10 elementeistä. Elementit ovat tetraedrin muotoisia, joiden reunapinnat ovat kvadraattisia, toisen asteen pintoja. Kuviossa 13 on suurennettu yksi elementti, josta elementin muoto käy ilmi. Elementissä on yhteensä 10 solmua.



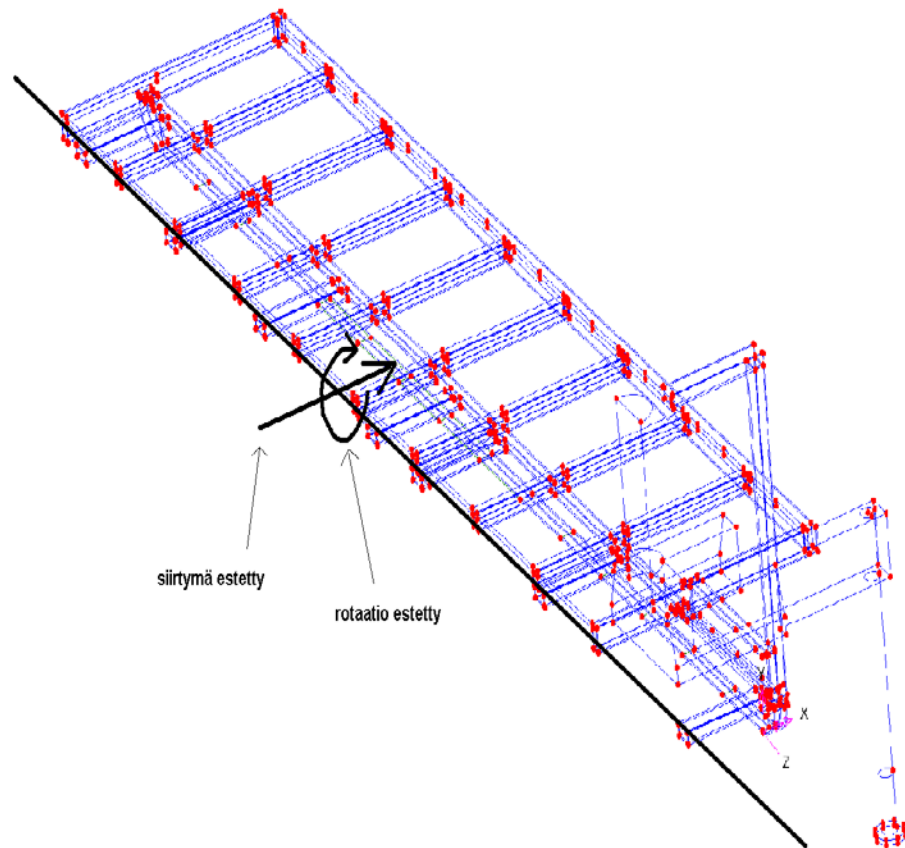
Kuvio 13. Tetraedri-elementti, jossa elementin 10 solmua esitetty ympyröillä.

7.2 Määritteiden luonti

Kun geometria on luotu ja elementtiverkko asetettu, täytyy laskentamalliin liittää tarvittavat määritteet.

7.2.1 Symmetriaehto

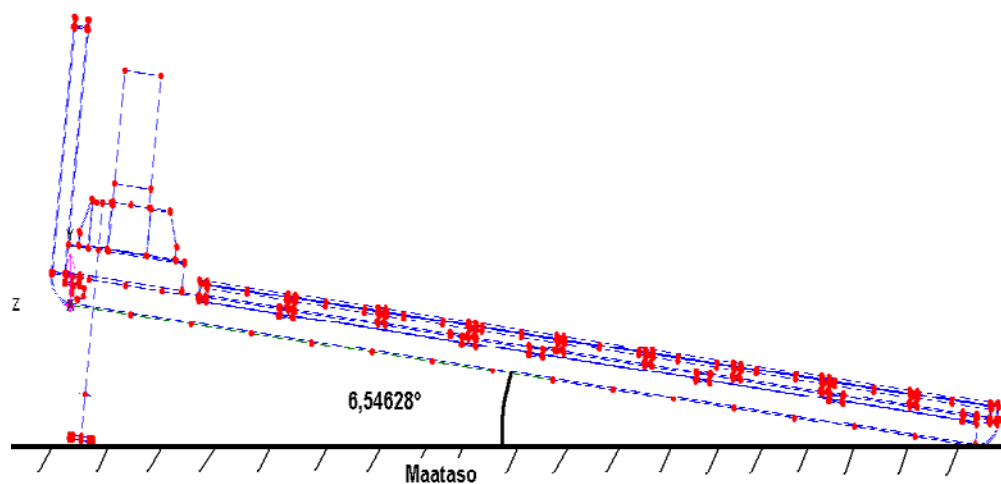
Ensimmäinen määrite, mikä tuli esiin jo alusta alkaen, on symmetriaehto. Symmetriaehdon mukaan mallin puolikas tuetaan siten, että translaatio leveysakselilla, tässä tapauksessa x-akselilla, estetään ja samoin rotaatio pituusakselin ympäri, tässä tapauksessa z-akselin ympäri, estetään. Näin tuettu malli vastaa laskennassa kokonaista mallia. Todellisuudessa nosturilava ei ole aivan symmetrinen, mutta tämä oletus tuli tehdä, koska LUSAS-ohjelman ja tietokoneen suorituskyky eivät riittäisi kokonaisen mallin laskentaan. Kuvio 14 selventää symmetriaehtoa.



Kuvio 14. Symmetriaehto

7.2.2 Mallin kääntö

Seuraava määrite mallille oli sen kääntö. Kummassakin kuormitustapauksessa nosturillinen vaihtolava on $6,55^{\circ}$ vinossa maatasoon nähden. LUSAS-ohjelmassa mallin kääntö onnistuu liittämällä malliin käännetty koordinaatisto. Kuvio 15 havainnollistaa kyseistä tilannetta.



Kuvio 15. Käännetty malli

7.2.3 Materiaalit

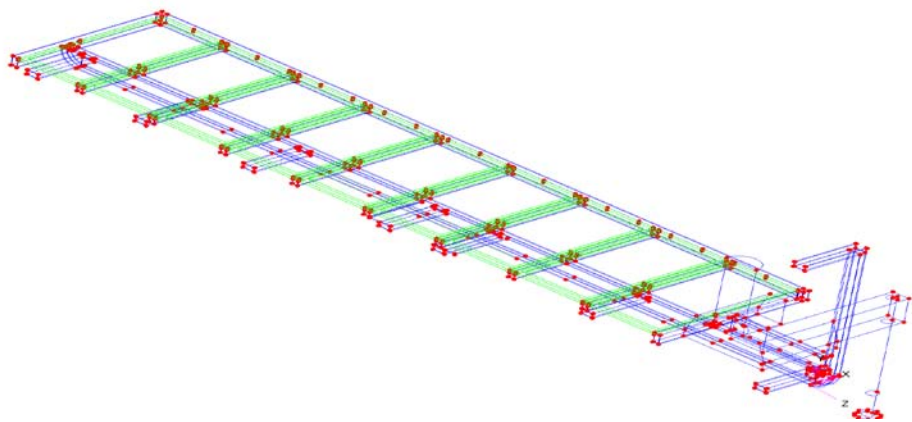
Nosturillinen vaihtolavarakenne koostuu teräksestä S235 ja konttilattiavanerista. LUSAS-ohjelmassa lineaariseen materiaalmalliin täytyy syöttää materiaalista kimmomoduuli E , poissonin vakio ν ja tiheys ρ .

Seuraavassa taulukossa on teräksen S235 ja konttilattiavanerin materiaaliarvot. Vanerin arvot ovat oletuksia, sillä en löytänyt varmasti tarkkoja arvoja juuri kyseiselle vanerityypille. Vanerin murtolujuuden arvona käytetään kuusivanerin murtolujuutta. Vanerin arvot ovat poimittu eri lähteistä: (Paul Hills 2004), (Outinen & Salmi 2004, 430) ja (edge.rit.edu). Teräs on standardin SFS-EN 10025 mukaista rakenneterästä, jonka arvot ovat kirjoista Steel Designer's Manual (2003) ja (Outinen & Salmi 2004, 431).

Taulukko 1. Materiaaliarvot

| | Teräs | Vaneeri |
|-----------------------------|-------|---------|
| Myötöraja (MPa) | 235 | - |
| Murtolujuus (MPa) | - | 80 |
| Kimmomoduuli (Gpa) | 205 | 12,4 |
| Poissonin vakio | 0,3 | 0,22 |
| Tiheys (kg/m ³) | 7850 | 615 |

Kuvio 16 esittää mallin materiaaleja. Sinisellä näkyvät osat ovat terästä ja vihreällä näkyvät vaneria.



Kuvio 16. Materiaalit

7.2.4 Tuenta ja kuormitus

Laskenta suoritettiin kahdessa erilaisessa kuormitustilanteessa. Kuormitustapauksessa 1 rakenne on maata vasten tuettuna sekä etu- että takapäätä. Kuormitustapauksessa 2 rakenne on maata vasten tuettuna takapäätä ja auton vaijerin varaan tuettuna etupäätä.

Kuormitus

Kummassakin kuormitustapauksessa nosturilavaa on kuormitettu kolmella 1600 kg:n betonipainolla, puolikkaassa mallissa siis 800 kg. Yhteensä 4800 kg:n kuorma vastaa tilannetta, jossa kaikki Mesi-Auto Oy:n betoniset painot ovat lavan päällä. Painot ovat edestäpäin laskien toisen, kolmannen ja neljännen vanerin päällä. Vanerien numerointi on esitetty kuviossa 6 sivulla 17. LUSAS-ohjelmaan täytyy syöttää betonipainojen aiheuttama kuormitus painekuormituksena. Niinpä paine täytyy laskea itse kaavalla

$$p = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Kun tiedetään, että puolikkaan mallin betonit painaa 800 kg ja putoamiskiihtyvyys g on $9,81 \text{ m/s}^2$ saadaan voimaksi F kaavalla

$$F = mg \quad (8)$$

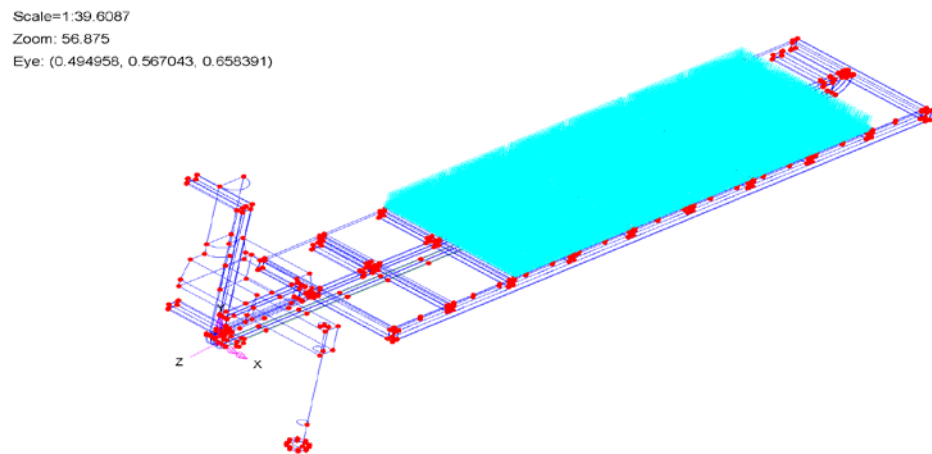
49050 N. Pinta-ala, johon paine kohdistuu pystytään laskemaan LUSAS-mallista. Vanerin 2 sivu on pituussuunnassa 1225 mm ja leveysuunnassa 1182,5 mm. Näin pinta-alaksi saadaan kaavalla

$$A = ab \quad (9)$$

$1448562,5 \text{ mm}^2$. Vanereihin 3 ja 4 paine kohdistuu hieman pienemmälle pinta-alalle, 1433250 mm^2 :n alueelle. Nyt pystytään laskemaan betonipainojen aiheuttama painekuormitus. Paineekuormaksi vanerille 2 saadaan

0,005418 MPa ja vanereille 3 ja 4 0,005476 MPa kummallekin. Kuvio 17 näyttää kuormituksen mallissa.

Betonikuormituksen lisäksi mallia kuormittaa sen oma massa. LUSAS-ohjelmalla voi helposti määrittää painovoiman aiheuttaman kuormituksen. Kun LUSASiin annetaan materiaalista tiheys, se pystyy tilavuuksista ja tiheyksistä laskemaan massan. Tämän jälkeen täytyy valita kuormitukseksi Body Force (oma massa) ja antaa pysty akselin, tässä tapauksessa y-akselin, suuntainen putoamiskiikkyvyys.

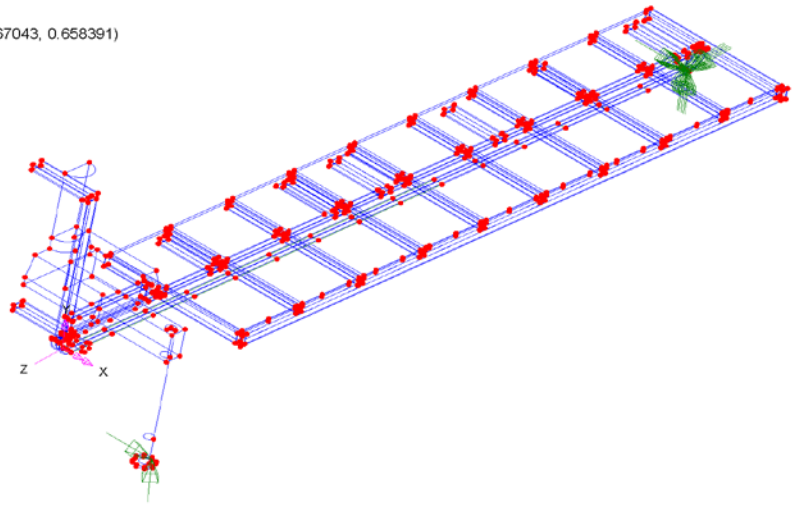


Kuvio 17. Betonipainojen aiheuttama kuormitus

Tuenta

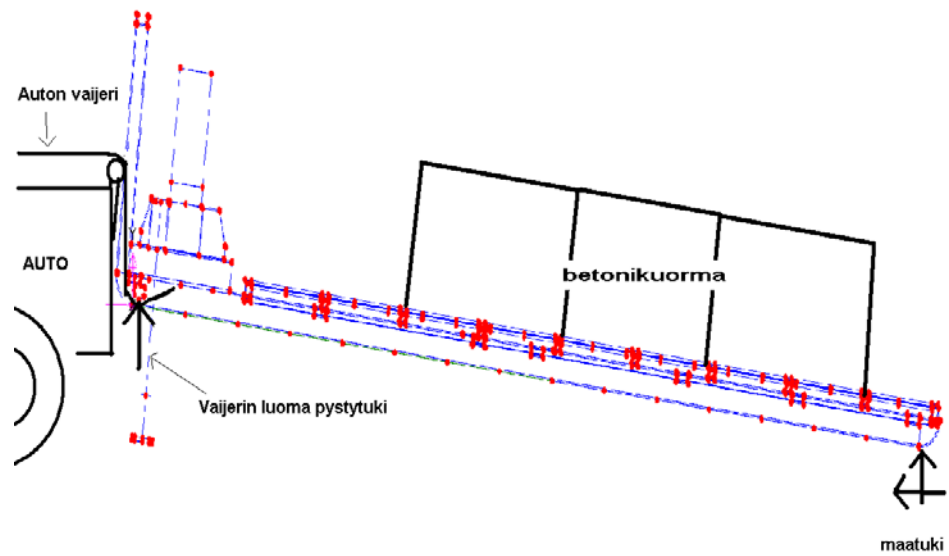
Kuormitustapauksessa 1:ssä lavarakenne on maata vasten ja tukipisteet ovat näin ollen nosturin tassun alapäässä ja nosturilavan peräpäähän runkopalkissa. Nosturin tassun alapää on tuettu siten, että translaatiot x- ja y-akselin suunnassa ovat estetty. Samoin rotaatiot y- ja z-akselien ympäri ovat estetty. Nosturilavan peräpäähän runkopalkin maata vasten oleva kohta on tuettu siten, että translaatiot x-, y- ja z-akselin suunnassa ovat estetty. Rotaatiot y- ja z-akselin ympäri ovat myös estetty. Kuvio 18 näyttää tuennat. Vihreä väri näyttää tukien sijaintia.

Scale=1.39.6087
 Zoom: 56.875
 Eye: (0.494958, 0.567043, 0.658391)



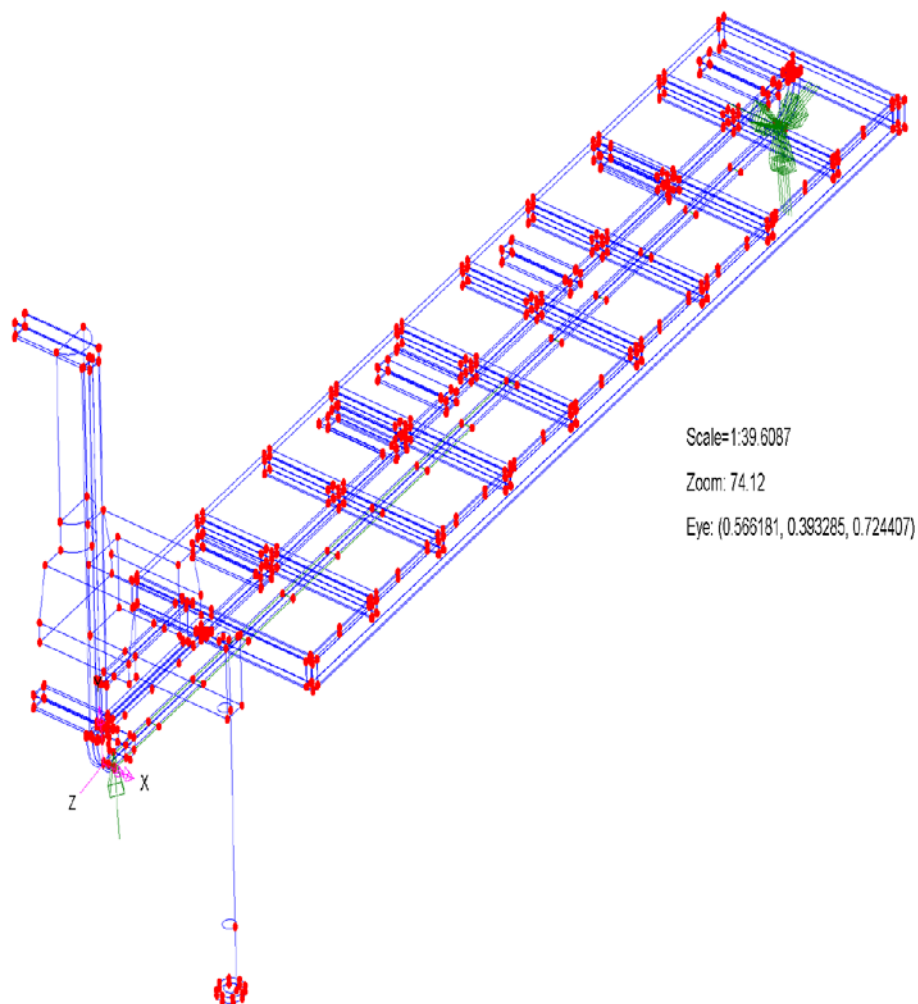
Kuvio 18. Kuormitustapaus 1. Tuenta

Kuormitustapaus 2:ssa kuvataan nostotilanteen alkua. Lavarakenne on samassa asennossa, kuin ensimmäisessä tapauksessa, mutta nosturilavan etupäässä oleva tukipiste muodostuu auton vaijerista. Peräpään runkopalkki on tässäkin tapauksessa maata vasten. Vaijeri antaa tuen pystysuunnassa eli y-akselin suunnassa. Niinpä etupään tukipisteessä translaatio y-suunnassa on estetty. Peräpään runkopalkin maata vasten oleva kohta on tuettu siten, että translaatiot x-, y- ja z-suunnassa on estetty. Myöskin rotaatiot y- ja z-akselin ympäri ovat estetty. Kuvio 19 on tilannetta havainnollistava kuva.



Kuvio 19. Nostotilanne

Kuviossa 20 esitetään tuet kuormitustapauksessa 2.



Kuvio 20. Kuormitustapaus 2. Tuenta

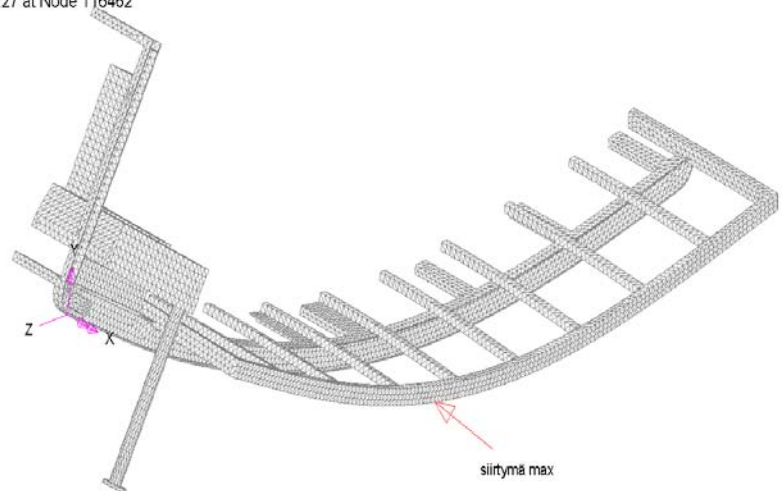
7.3 Mallin ratkaiseminen

Kun geometria on luotu ja määritteet mallille annettu, malli on valmis ratkaistavaksi. Ratkaistusta mallista voidaan tutkia laskennan tuloksia. Seuraavaksi esitellään LUSASin antamat siirtymä- ja vertailujännityskuvat kahdessa tutkitussa kuormitustilanteessa. LUSASin antamia tuloksia käsitellään tarkemmin luvussa 7.4.

7.3.1 Kuormitustapaus 1

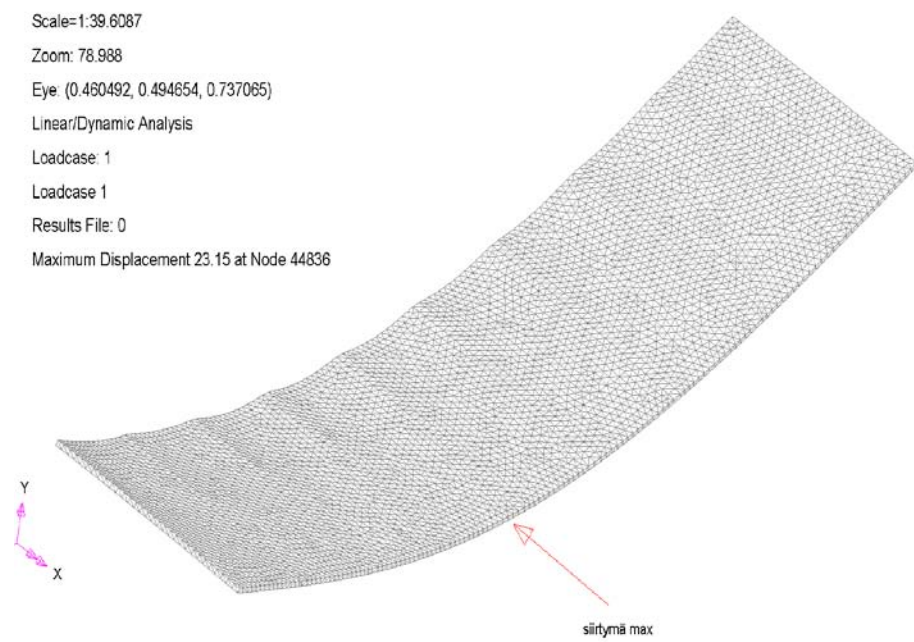
Kuormitustapauksessa 1 nosturilava on maata vasten tuettuna. Kuvio 21 näyttää mallin teräsosien siirtymät kuormitusten vaikutuksesta. Siirtymän näkyvyyttä on parannettu suurennuskertoimella 25. Maksimaaliseksi siirtymäksi saadaan 23,27 mm. Maksimaalisen siirtymän kohta näkyy kuviosta.

Scale=1:39.8087
 Zoom: 56.875
 Eye: (0.569813, 0.306453, 0.762496)
 Linear/Dynamic Analysis
 Loadcase: 1
 Loadcase 1
 Results File: 0
 Maximum Displacement 23.27 at Node 116462



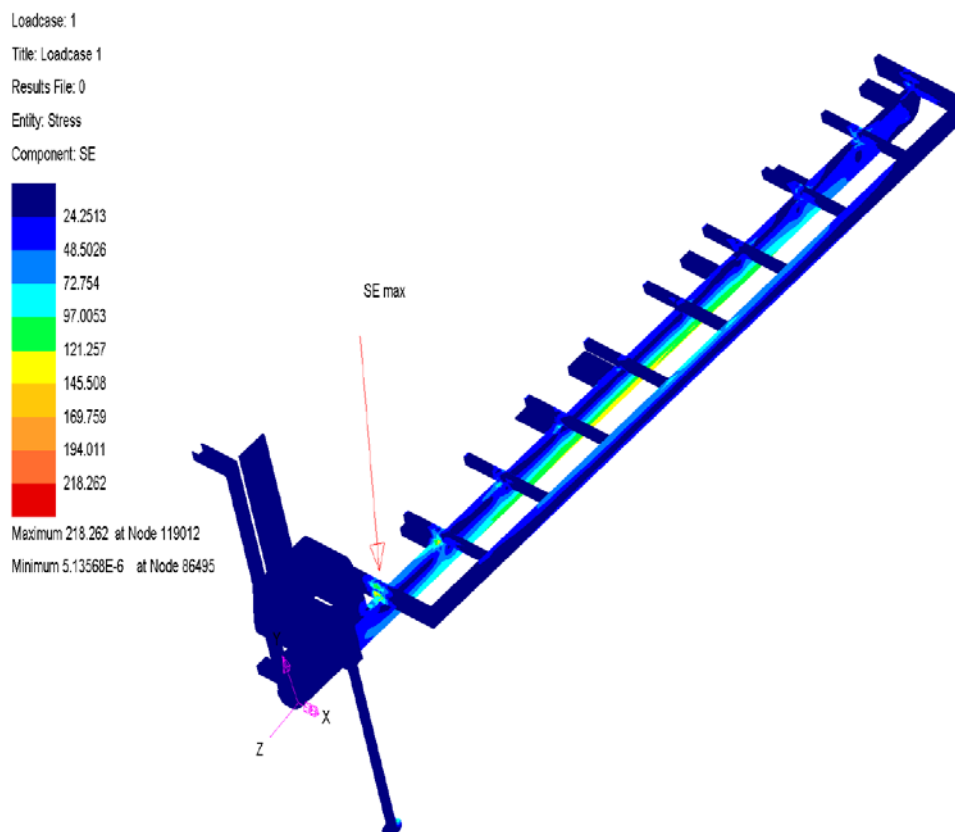
Kuvio 21. Kuormitustapaus 1. Teräksen siirtymät

Kuviosta 22 nähdään vaneriosien siirtymät kuormitustapauksessa 1. Maksimaalinen siirtymä vanereissa on 23,15 mm. Maksimaalisen siirtymän kohta näkyy kuviosta.



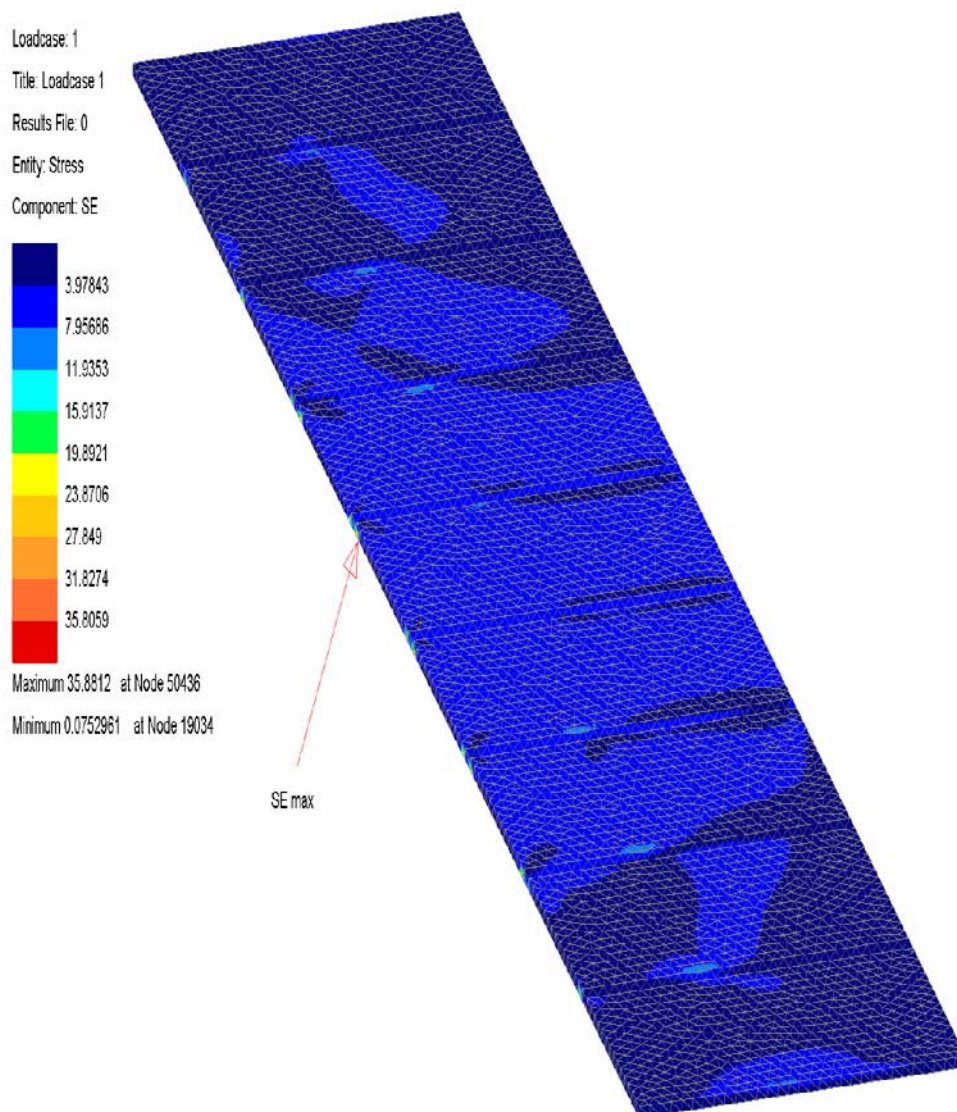
Kuvio 22. Kuormitustapaus 1. Vaneriosien siirtymät

Kuvio 23 näyttää mallin teräsosien vertailujännityksen. Maksimaalisen vertailujännityksen alue näkyy kuviosta nuolen osoittamasta kohdasta. Vertailujännityksen suurin arvo mallissa on 218,262 MPa.



Kuvio 23. Kuormitustapaus 1. Teräksen vertailujännitys

Kuvio 24 näyttää vaneriosien vertailujännityksen. Maksimaalisen vertailujännityksen alue näkyy kuviossa. Vertailujännityksen suurin arvo on 35,8812 MPa.



Kuvio 24. Kuormitustapaus 1. Vaneriosien vertailujännitys.

7.3.2 Kuormitustapaus 2

Kuormitustapauksessa 2 nosturilava on peräpäätänsä maata vasten tuettuna ja etuosasta auton vaijerin varaan tuettuna. Kuvio 25 näyttää mallin teräsosien siirtymät kuormitusten vaikutuksesta. Siirtymän näkyvyyttä on parannettu suurennuskertoimella 25. Maksimaaliseksi siirtymäksi saadaan 24,79 mm. Maksimaalinen siirtymä on solmussa 116125. Solmun kohta on merkitty kuvioon.

Scale=1:39.6087

Zoom: 42.5461

Eye: (0.603, 0.352135, 0.715815)

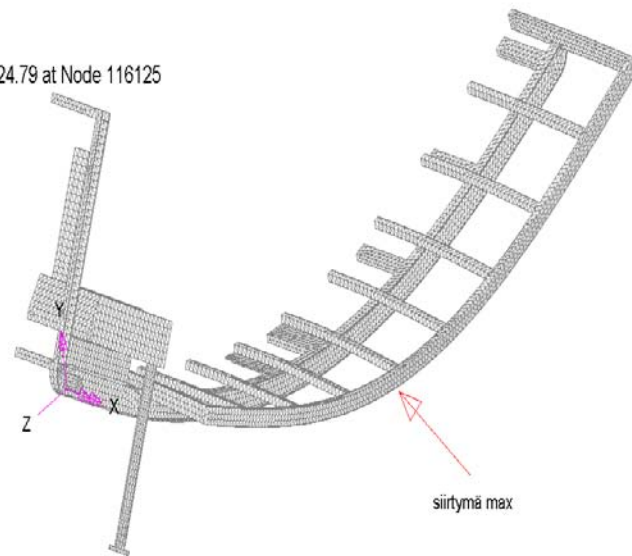
Linear/Dynamic Analysis

Loadcase: 1

Loadcase 1

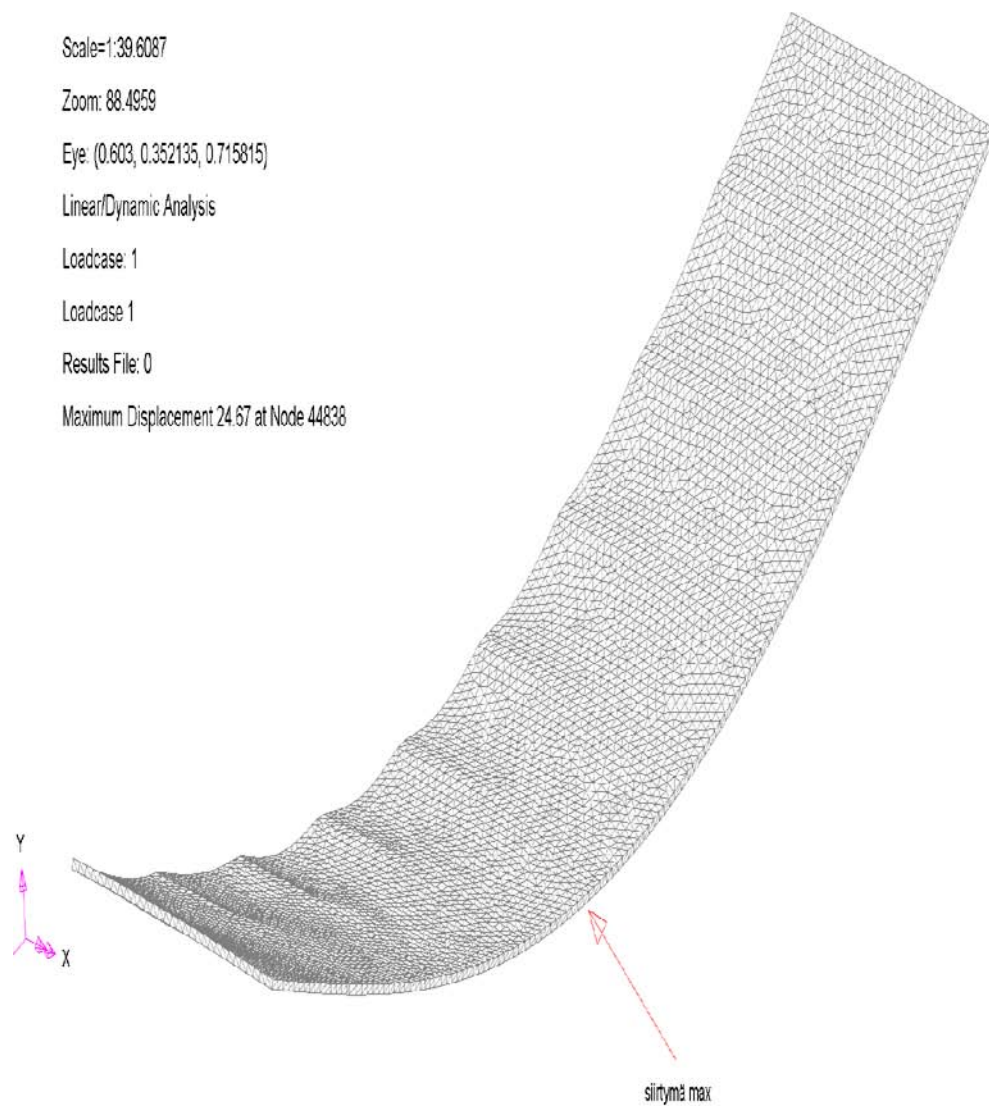
Results File: 0

Maximum Displacement 24.79 at Node 116125



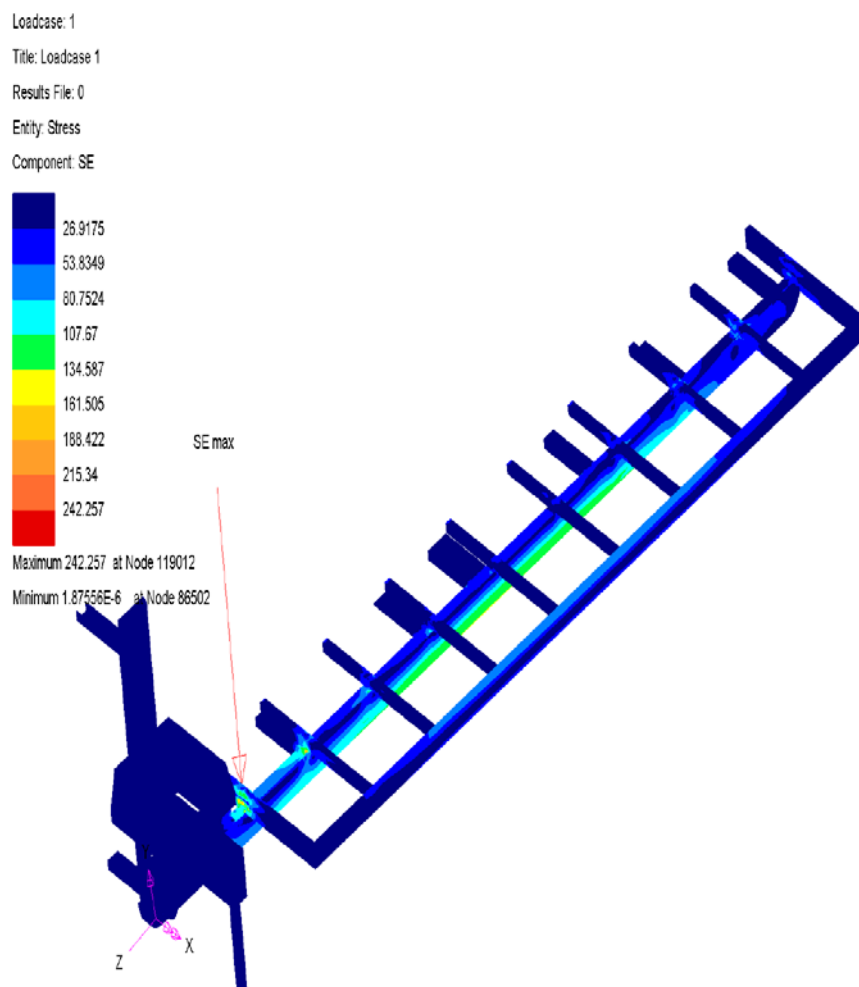
Kuvio 25. Kuormitustapaus 2. Teräsosien siirtymät.

Kuviosta 26 näkyy vaneriosien siirtymät kuormitustapauksessa 2. Siirtymän näkyvyyttä on parannettu suurennuskertoimella 25. Maksimaalinen siirtymä mallissa on solmussa 44838. Se on 24,67 mm. Solmun kohta näkyy kuvios-
ta.



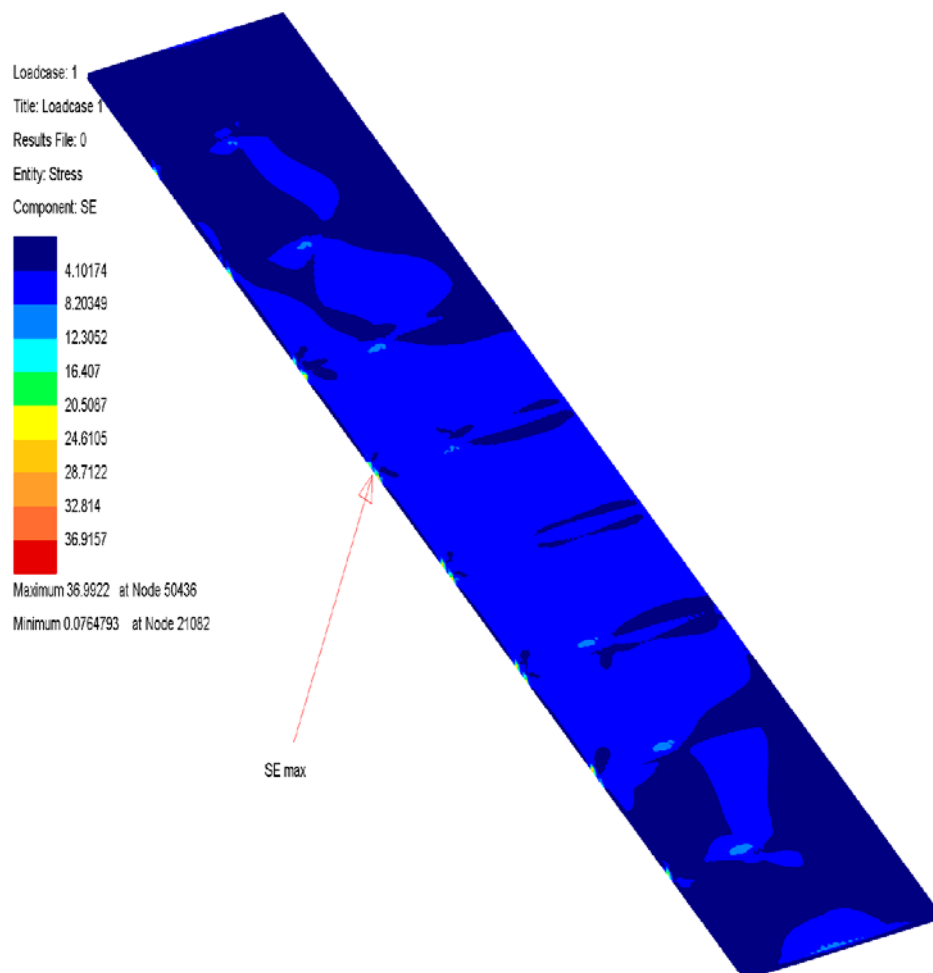
Kuvio 26. Kuormitustapaus 2. Vaneriosien siirtymät.

Kuviossa 27 on esitetty mallin vertailujännitys kuormitustapauksessa 2. Maksimaalisen vertailujännityksen kohta on nuolen osoittamassa kohdassa. Vertailujännityksen maksimiarvo on 242,257 MPa. Suurin arvo sijaitsee solmussa 119012.



Kuvio 27. Kuormitustapaus 2. Teräksen vertailujännitys

Kuvio 28 näyttää vaneriosien vertailujännityksen kuormitustapauksessa 2. Suurin vertailujännityksen arvo löytyy nuolen osoittamasta alueesta. Suurin vertailujännityksen arvo mallissa on 36,9922 MPa ja se sijaitsee solmussa 50436.



Kuvio 28. Kuormitustapaus 2. Vaneriosien vertailujännitys.

7.4 Tulokset ja niiden analysointi

Tässä luvussa käydään läpi LUSAS-ohjelman antamia tuloksia mallin laskennasta kahdessa lasketussa kuormitustilanteessa.

Myötö- ja murtorajamitoitus

Tulosten tarkastelu perustuu myötö- tai murtorajamitoitukseen. Rajavarmuusluku myötön suhteen tavallisessa staattisessa kuormituksessa lasketaan kaavan

$$n = \frac{R_{eL}}{\sigma_{sall}} \quad (10)$$

mukaan, jossa R_{eL} on materiaalin alempi myötöraja ja σ_{sall} on rakenteessa esiintyvä sallittu jännitys. Murtorajamitoituksessa kaavassa (10) myötörajan R_{eL} sijaan käytetään murtolujuutta R_m . Myötörajamitoituksessa jännitys ei saa missään kohdassa rakennetta ylittää myötörajaa ja siihen liittyviä suuria venymiä ei sallita. Murtorajamitoituksessa vastaavasti, murtörajaa ei saa ylittää. (Outinen & Salmi 2004, 57)

Tulosten tarkastelu perustuu siis tässä tapauksessa rajavarmuusluvun tutkimiseen rakenteen rasittuneimmissa kohdissa. Teräksessä tutkitaan rajavarmuutta myötöön nähden ja vanerissa rajavarmuutta murtoon nähden. Tavallisessa staattisessa kuormituksessa rajavarmuuslukua 1,5 myötöön nähden pidetään riittävänä.

Nosturillisessa vaihtolavassa käytetty teräs on terästä S235, jonka myötöraja on lähteen (Outinen & Salmi 2004, 431) mukaan standardin SFS-EN 10025 mukainen, 235 MPa. Vanerin murtörajan oletetaan olevan lähteen (Outinen & Salmi 2004, 430) mukaan 80 MPa.

Saint Venant'n periaate

Kun kappaletta kuormitetaan, jännityskenttä on rakenteen tuenta- ja kuormituskohdissa hyvin epämääräinen. Jännityskenttä kuitenkin tasaantuu nopeasti siirryttäessä häiriökohdasta etäämmälle. Tämä tasaantumislmiö tunnetaan lujuusopissa Saint Venant'n periaatteena. Saint Venant'n periaate menee seuraavasti (Outinen & Salmi 2004, 133):

”Jos kimmoisen kappaleen tiettyyn alueeseen kohdistuva kuormitus korvataan sen kanssa staattisesti samanarvoisella kuormitussysteemillä, muuttuvat kappaleen siirtymät, muodonmuutokset ja jännitykset sitä vähemmän, mitä kauempana ollaan kummankin kuormituksen vaikutusalueesta. Useimmiten näiden vaikutusten ero on sovellusten kannalta mitätön jo kuormitusalueen muutaman tyypillisen mitan päässä siitä.”

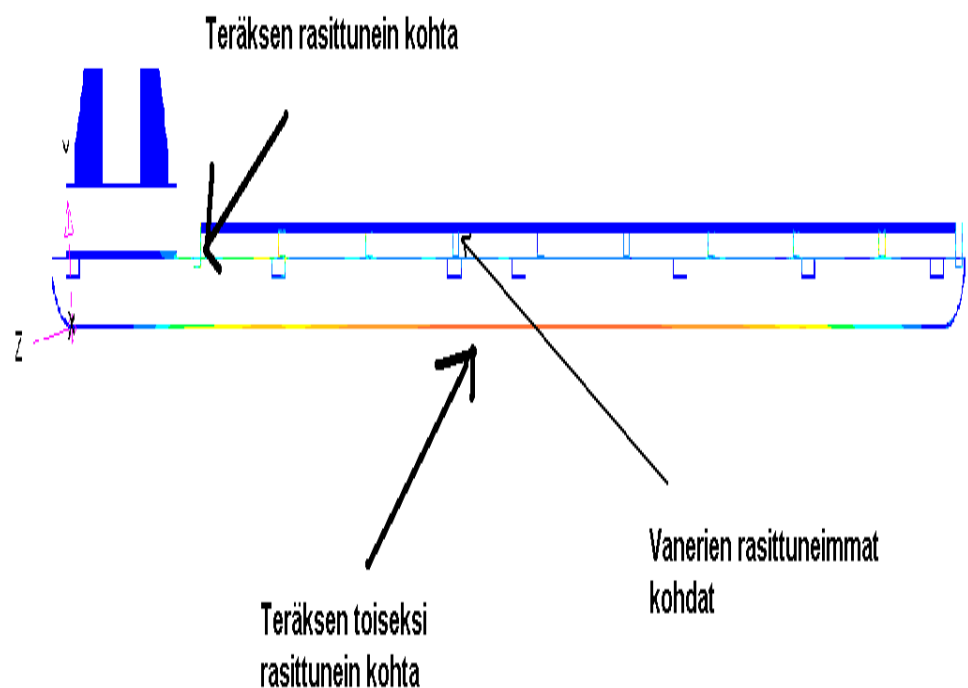
Tässä tapauksessa yksinkertaisesti siis elementtimenetelmää sovellettaessa jännitysarvoja ei lueta solmuilta, joihin tuodaan tuenta tai kuormitus. Sen sijaan, tuloksia luetaan etäällä näistä niin sanotuista singulaaripisteistä.

Lusasin laskemat suureet

LUSASin laskiessa mallia, syntyy OUT-tiedosto. Tässä tiedostossa on tekstimuotoista informaatiota koskien laskentamallia. Muun muassa rakenteen massa löytyy kyseisestä tiedostosta. LUSASin laskema massa puolikkaalle lavarakenteelle on 1320,37 kg. Siitä teräksen osuus on 1226,63 kg. Vanerit painavat yhteensä 93,74 kg. Teräsosien yhteenlaskettu tilavuus puolikkaassa mallissa on 156258000 mm^3 ja vaneriosien 152427 mm^3 .

7.4.1 Kuormitustapaus 1

Kummassakin tutkitussa kuormitustapauksessa nosturillinen vaihtolavarakenne rasittui samoista kohdista. Kuvio 29 esittää tasoleikkauskuvan, jossa näkyvät vertailujännityksen alueet. Kuvasta näkyy, mistä teräs ja vaneri rasittuvat eniten.



Kuvio 29. Kuormituksissa rasittuneet kohdat.

Kuormitustapauksessa 1 nosturilava oli siis maata vasten tuettuna. Taulukossa 2 on esitetty laskennan tuloksena saatu materiaalien vertailujännityksen arvo rakenteen kuormitetuimmassa solmussa sekä sen muutamassa lähisolmussa kuormitustapauksessa 1. Taulukossa näkyvät myös kuormituksen aiheuttamat maksimaaliset solmuniirtymät.

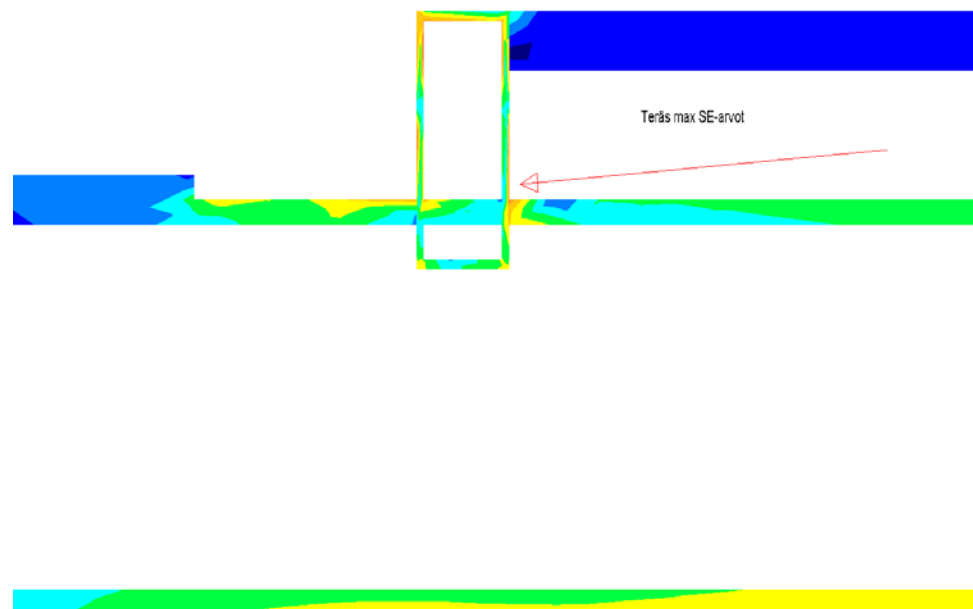
Taulukko 2. Kuormitustapaus 1. Tulokset

| Teräs S235 | | | | | |
|------------|---------------------------|------|------|------------------------------------|--|
| | jännityskomponentit (MPa) | | | VVEH- vertailujännitys (MPa) | Rajavarmuus- luku myötöön nähdän |
| solmu | S1 | S2 | S3 | SE | |
| 119010 | 137 | 37.6 | 7.51 | 117 | 2.01 |
| 119011 | 111 | 27,6 | 5.67 | 96.2 | 2.44 |
| 119012 | 255 | 71.9 | 13.1 | 218 | 1.08 |
| 119013 | 131 | 37.4 | 11.7 | 109 | 2.16 |
| 119014 | 143 | 45.9 | 6.81 | 121 | 1.94 |
| solmu | siirtymä (mm) | | | | |
| 116461 | 23.267 | | | | |
| 116462 | 23.269 | | | | |
| 116462 | 23.255 | | | | |

| Vaneri | | | | | |
|--------|---------------------------|--------|--------|------------------------------------|--|
| | jännityskomponentit (MPa) | | | VVEH- vertailujännitys (MPa) | Rajavarmuus- luku murtoon nähdän |
| solmu | S1 | S2 | S3 | SE | |
| 50433 | 4.85 | -0.204 | -0.343 | 5.12 | 15.63 |
| 50434 | 4.74 | 0.404 | -0.566 | 4.89 | 16.36 |
| 50435 | 4.28 | -0.735 | -9.95 | 12.5 | 6.40 |
| 50436 | -2.15 | -5.15 | -39.4 | 35.9 | 2.23 |
| 50437 | 1.09 | -1.58 | -10.4 | 10.4 | 7.69 |
| 50438 | 0.526 | -1.14 | -3.82 | 3.8 | 21.05 |
| solmu | siirtymä (mm) | | | | |
| 44835 | 23,144 | | | | |
| 44836 | 23,145 | | | | |
| 44837 | 23,143 | | | | |

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että kuormitustapauksessa 1 nosturilavan teräsrakenteen jännitysten arvot pysyvät tarpeeksi alhaisina ja varmuutta myötöön nähden on riittävästi. Näin ollen, teräsrakenne kestää kyseisen 4800 kg:n kuormituksen. Solmussa 119012 esiintyy suuri jännitys, jonka vuoksi rajavarmuusluku myötöön nähden on vain 1,08. Tämä ns. jännityshuippu johtuu osittain laskentamallivirheestä. Laskentamallissa reunat ovat teräviä ja suoraa, kun taas todellisessa nosturilavassa materiaalin reunoissa ja liitoskohdissa on aina luonnollisesti pieni pyöristys. Jännitykset pienenevät kuitenkin hyvin nopeasti siirryttäessä etäämmälle tästä huippukohdasta. Toisaalta vaikka tämä jännityshuippu olisi todellista, se on niin paikallista, että yhden solmun ympäristö ts. pahimmassa tapauksessa yksi terävä nurkka plastisoituisi. Tästä lisää kappaleessa 7.4.3. Teräs rasittui eni-

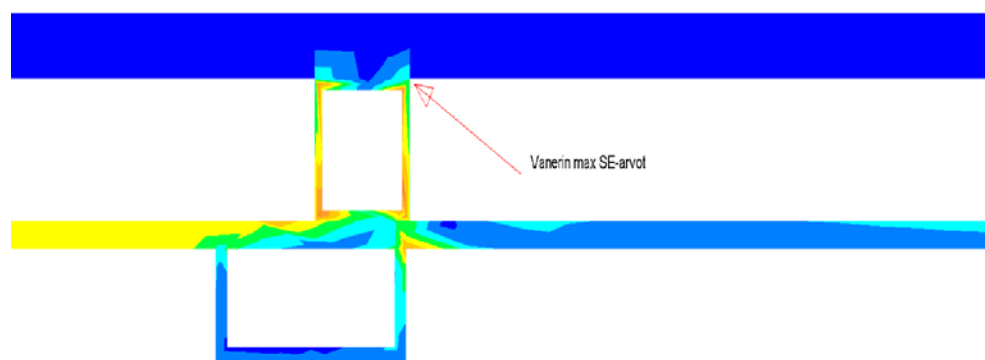
ten lavan etupäässä olevasta kohdasta, missä lavarungon etupalkki yhdistyy koko nosturilavan runkopalkkiin (Kuvio 30). Teräs rasittui kohtuullisesti myös runkopalkin alareunasta, kuten kuvio 29 osoittaa. Täällä vertailujännityksen arvot olivat korkeimmillaan 100 MPa:n luokkaa. Siirtymät teräksessä olivat suhteellisen pieniä.



Kuvio 30. Teräksen rasittunein alue

Vaneriosien voidaan todeta kestävän kuormituksen, koska jännitysten arvot vanereissa pysyvät suhteellisen alhaisina ja varmuutta murtoon nähden on riittävästi. Myös vaneriosiin syntyy kuormituksen ansiosta jännityksien keskittymiä. Tässä tapauksessa on myöskin kyse osittain laskentamallivirheestä. Mallissa reunat ovat todellista tilannetta terävämpiä ja näin jännityspiikki pääsee syntymään. Lisäksi vanerien kiinnitys ei mallissa vastaa täysin todellista tilannetta LUSASin rajallisen suorituskyvyn vuoksi. Tämä huippujännitys kuitenkin tasaantuu nopeasti siirryttäessä etäämmälle huippukohdasta.

Nurkkasolmussa 50436 on juuri edellä mainitun mukainen jännityspiikki, mutta jännitykset kuitenkin tasaantuvat nopeasti ko. solmun ympäristössä. Vaneriosat rasittuvat eniten kohdasta, jossa vanerin alta loppuu teräksinen tuki. Kuvio 31 näyttää kohdan tarkemmin. Siirtymät vaneriosissa ovat suhteellisen pieniä.



Kuvio 31. Vanerien rasittuneimmat alueet

7.4.2 Kuormitustapaus 2

Kuormitustapauksessa 2 nosturilava oli siis edestä tuettu auton vajjerilla ja peräpäästään maata vasten. Taulukko 3 esittää laskennan tulokset materiaalien kuormittuneimmissa kohdissa kuormitustapauksessa 2.

Taulukko 3. Kuormitustapaus 2. Tulokset

| Teräs S235 | | | | | |
|-------------------|---------------------------|------|------|------------------------------------|--|
| | jännityskomponentit (MPa) | | | VVEH- vertailujännitys (MPa) | Rajavarmuus- luku myötöön nähdän |
| solmu | S1 | S2 | S3 | SE | |
| 119010 | 152 | 41.7 | 8.23 | 130 | 1.81 |
| 119011 | 123 | 30.6 | 6.22 | 107 | 2.20 |
| 119012 | 283 | 79.8 | 14.5 | 242 | 0.97 |
| 119013 | 145 | 41.5 | 12.9 | 121 | 1.94 |
| 119014 | 159 | 50.9 | 7.46 | 135 | 1.74 |
| solmu | siirtymä (mm) | | | | |
| 116124 | 24.78 | | | | |
| 116125 | 24.79 | | | | |
| 116126 | 24.78 | | | | |

| Vaneri | | | | | |
|---------------|---------------------------|--------|--------|------------------------------------|--|
| | jännityskomponentit (MPa) | | | VVEH- vertailujännitys (MPa) | Rajavarmuus- luku murtoon nähdän |
| solmu | S1 | S2 | S3 | SE | |
| 50433 | 4.94 | -0.207 | -0.344 | 5.22 | 15.33 |
| 50434 | 4.83 | 0.41 | -0.573 | 4.98 | 16.06 |
| 50435 | 4.34 | -0.747 | -10.1 | 12.7 | 6.30 |
| 50436 | -2.23 | -5.32 | -40.7 | 37 | 2.16 |
| 50437 | 1.13 | -1.64 | -10.7 | 10.7 | 7.48 |
| 50438 | 0.542 | -1.19 | -3.96 | 3.93 | 20.36 |
| solmu | siirtymä (mm) | | | | |
| 44837 | 24.667 | | | | |
| 44838 | 24.669 | | | | |
| 44839 | 24.665 | | | | |

Tulosten perusteella voidaan olettaa teräsrakenteen kestävän 4800 kg:n kuormitus kuormitustapauksessa 2, koska jännitykset pysyvät tarpeeksi alhaisina ja varmuutta myötöön nähden on riittävästi. Solmussa 119012 esiintyvän 242 MPa:n jännityspiikin aiheuttaa samoin osittain laskentamallivirhe, kuten kuormitustapauksessa 1 kohdassa 7.4.1. Tässäkin tapauksessa

voidaan todeta, että vaikka jännityspiikki olisi todellinen, se on niin paikallinen, että plastisoitumista tapahtuisi pienellä alueella, yhden solmun ympäristössä. Siirtymät teräksessä ovat kohtalaisen pieniä.

Myös vaneriosien voidaan olettaa kestävä kuormituksen, koska jännitykset pysyvät tarpeeksi alhaisina ja varmuutta murtoon on tarpeeksi. Jännityspiikin solmussa 50436 aiheuttaa osittain laskentamallivirhe, josta tarkemmin kohdassa 7.4.1. Yleisesti ottaen vaneriosien jännitykset eri kohdissa rakennetta pysyivät kohtuullisen alhaisina.

7.4.3 Tulosten tarkkuus

Nosturillisen vaihtolavarakenteen lujuuslaskenta on suoritettu kahdessa erilaisessa kuormitustapauksessa. Kyseisissä kuormitustapauksissa lavarakenne on vaakatasoon nähden vinossa ja tukipisteet ovat suhteellisen pienellä alueella, joten rakenteeseen pääsee syntymään alueita, jossa rasitus on melko iso. Todellisuudessa nosturilavaa kuormitetaan yleensä ulkopuolisella kuormalla vain, kun se on auton päällä. Silloin nosturilavan kuormansietokyky paranee, koska tuennan muodostaa auto lähes koko runkopalkin matkalle. Tällöin jännitykset ja siirtymät pienenevät huomattavasti, koska rakenne ei pääse merkittävästi taipumaan.

Virhettä tuloksiin syntyi siitä, että laskentamallia ei saatu täysin realistiseksi johtuen LUSASin rajallisista mallinnustyökaluista. LUSAS on muutenkin isoilla laskentamalleilla aika kankea työkalu ja lujuuslaskenta olikin tässä työssä selvästi työläin osuus. Varsinkin lujuuslaskentamallin luonti vei todella paljon aikaa.

Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että nosturilava kestää hyvin Mesi-Auto Oy:n käyttämien betonipainojen aiheuttaman kuormituksen. Laskenta suoritettiin kahteen eri mitoitusehtoon perustuen. Teräkselle käytettiin myötörajamitointia ja vanerille murtorajamitointia. Rajavarmuutta tutkittiin myötöön ja murtoon nähden materiaalien kriittisimmässä kohdassa. Ta-

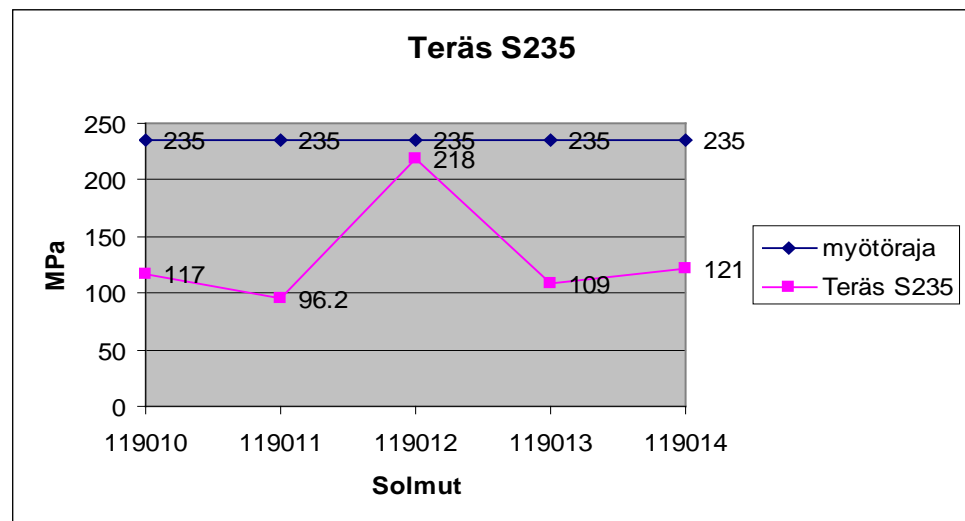
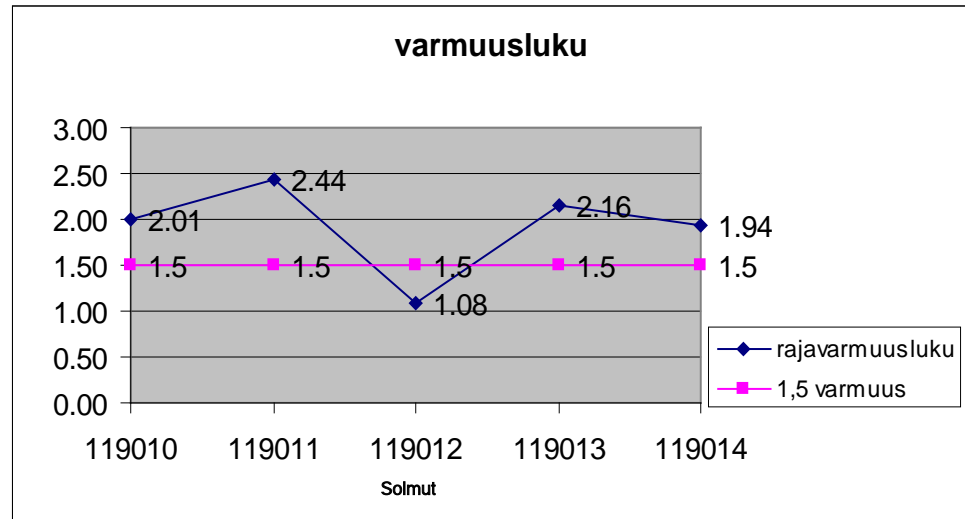
vallisesti staattisessa kuormituksessa rajavarmuusluku myötöön nähden saa olla pienimmillään 1,5. Lukuunottamatta kohtia, joissa oli laskentamallin virheestä johtuva huippujännitys, rajavarmuusluku olikin selvästi yli 1,5 kaikkialla rakenteessa. Kuormittuneimpien kohtien tulokset esitellään seuraavassa selvyyden vuoksi vielä kuvaajina.

Jännityshuiput

Staattisten kuormitusten alaisten kappaleiden käsittelyssä ei ole välttämätöntä kiinnittää erityistä huomiota paikallisiin jännityshuippuihin, joita syntyy esimerkiksi kappaleen muodon äkillisiin muutoskohtiin ja rakenteen osien liitoskohtiin. Näin voidaan olettaa, koska sitkeillä materiaaleilla hyvin pienelle alueelle keskittyvä paikallinen myötäminen ei useimmiten aiheuta toiminnallisia haittoja. (Outinen & Salmi 2004, 382)

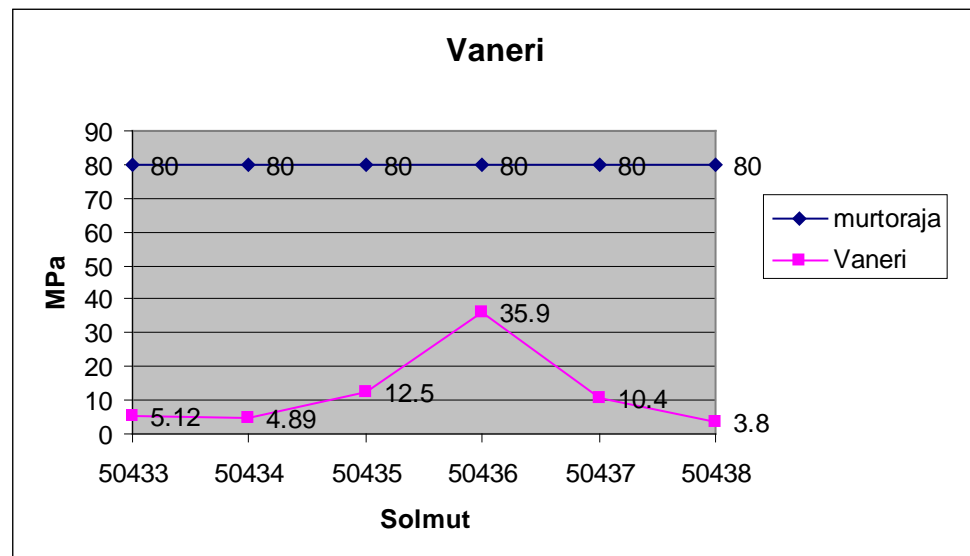
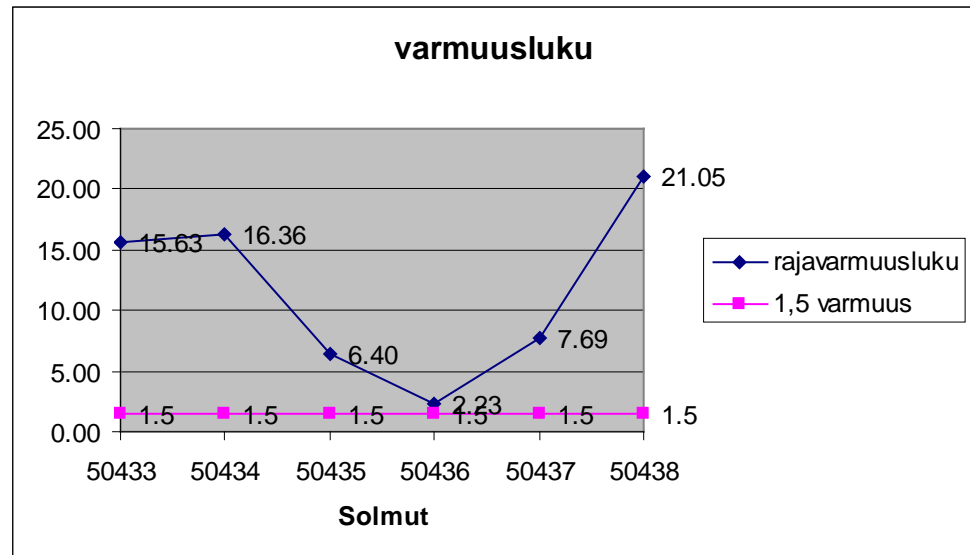
Tässä tapauksessa voidaan siis todeta, että vaikka tuloksissa esiin tulleet jännityshuiput olisivat todellisia, ne eivät ole kriittisiä. Jännityshuiput ovat niin paikallisia, että pahimmillaankin plastisoituminen tapahtuisi vain yhden solmun alueella. Naapurisolmuissa jännitykset tasaantuvat hyvin nopeasti. Tämä voidaan nähdä kuvioista 32, 33, 34 ja 35.

Kuviosta 32 nähdään, että teräksen vertailujännitys kuormitetuimman alueen ympäristössä pysyy myötörajan alapuolella solmua 119012 lukuunottamatta. Myös varmuutta myötöön löytyy tarpeeksi. Kyseessä on kuormitustapaus 1.



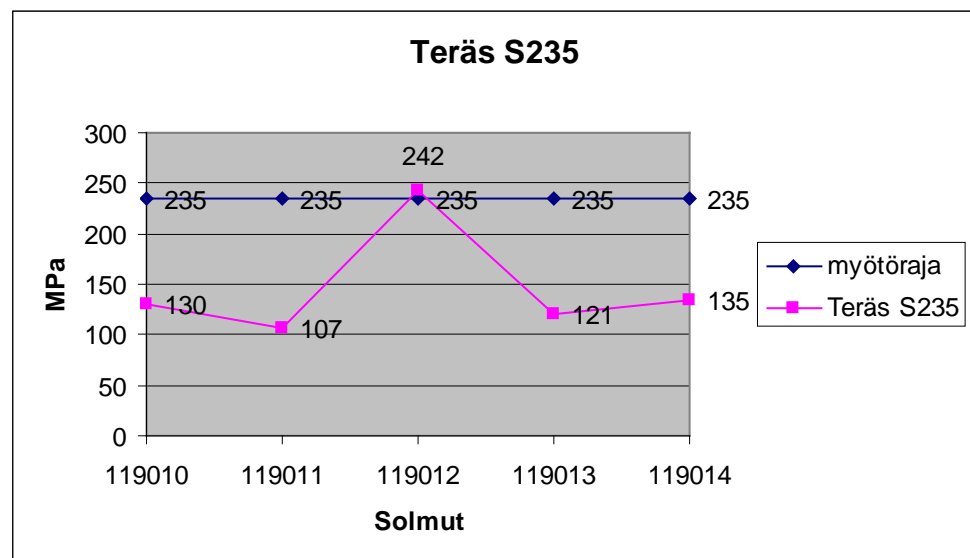
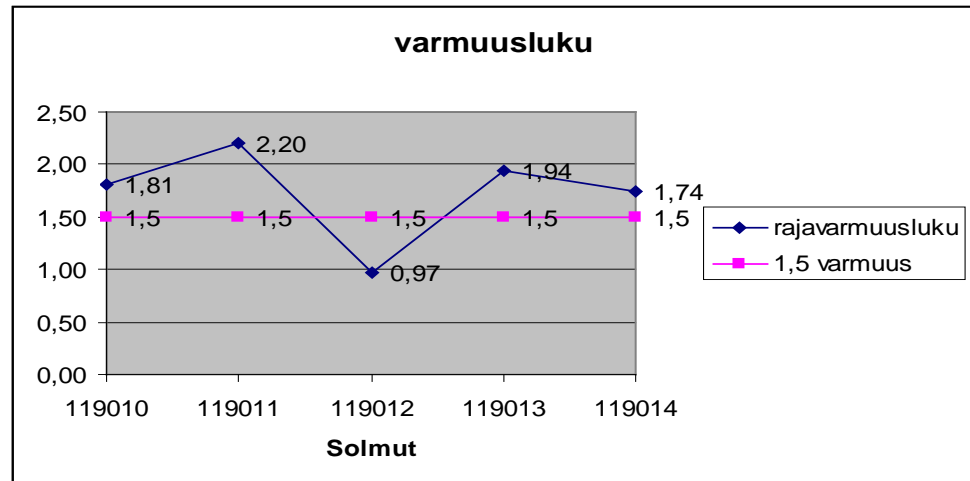
Kuvio 32. Kuormitustapaus 1. Teräksen VVEH-vertailujännitys kuormitetuimman alueen ympäristössä.

Kuviosta 33 näkyy, että vanerin vertailujännitys kuormitetuimman alueen ympäristössä pysyy selvästi murtorajan alapuolella kuormitustapauksessa 1. Varmuutta murtoon nähden on siten riittävästi.



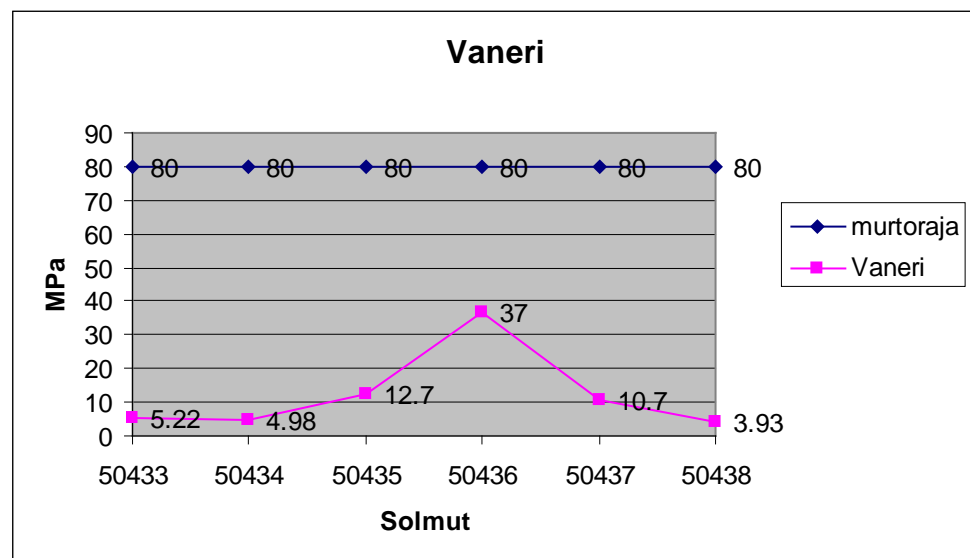
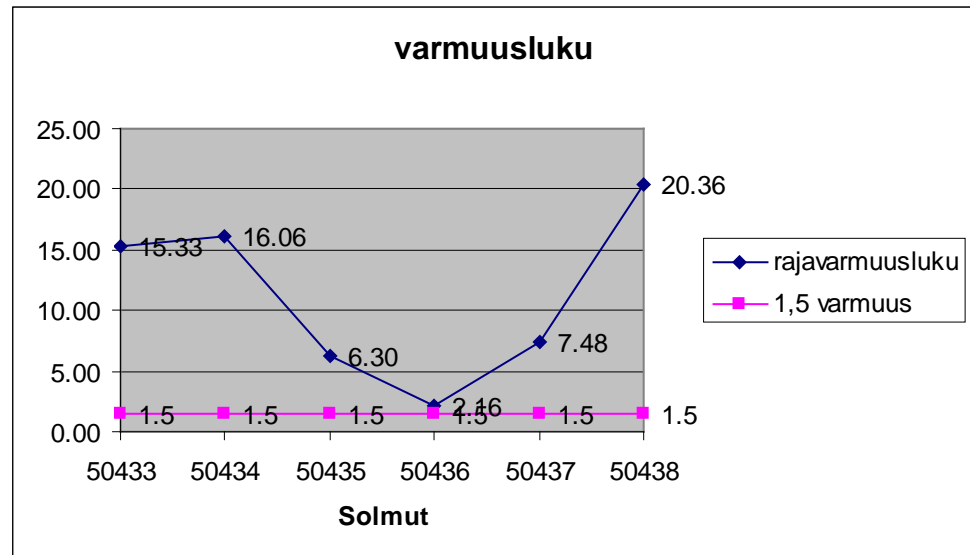
Kuvio 33. Kuormitustapaus 1. Vanerin VVEH-vertailujännitys kuormitetuimman alueen ympäristössä.

Kuviossa 34 on teräksen vertailujännitys kuormitettuihin alueen ympäristössä kuormitustapauksessa 2. Kuvioista nähdään, että jännitykset pysyvät myötörajan alapuolella, lukuunottamatta jännityshuippua solmussa 119012. Varmuutta myötöön nähden löytyy myös riittävästi.



Kuvio 34. Kuormitustapaus 2. Teräksen VVEH-vertailujännitys kuormitettuihin alueen ympäristössä.

Kuviosta 35 nähdään, että vanerin vertailujännitys kuormitetuimman alueen ympäristössä kuormitustapauksessa 2 pysyy selvästi murtorajan alapuolella. Myös varmuutta murtoon nähden löytyy riittävästi.



Kuvio 35. Kuormitustapaus 2. Vanerin VVEH-vertailujännitys kuormitetuimman alueen ympäristössä

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli nosturillisen vaihtolavarakenteen CAD-mallinnus ja sen lujuuslaskenta.

Työhön tuli melko paljon sivuja. Tosin työssä esiintyy paljon kuvioita, jotka vievät sivutilaa. Työ oli kohtuullisen työläs tehdä. Työn alku ja vielä lavarakenteen CAD-mallinnus sujui ongelmitta, mutta lujuuslaskentaosiossa ja tarkemmin ottaen lujuuslaskentamallin tekemisessä LUSAS-ohjelmalla ongelmia tuli jonkin verran ohjelman rajallisten ominaisuuksien vuoksi.

Tavoitteet täyttyivät kohtuullisen hyvin. Tutkitusta nosturillisesta vaihtolavasta saatiin tehtyä CAD-malli ja lujuuslaskentamalli. Lujuuslaskentamallista saaduista tuloksista pystyttiin tarkastelemaan lavarakenteen rasituksia, kun sitä kuormitettiin Mesi-Auto Oy:n betonipainoilla.

Tulosten tarkastelun perusteella rakenne kestää tutkitut kuormitustapaukset hyvin. Jännitykset pysyvät alle myötörajan teräksessä ja selvästi alle murto-
rajan vaneerissa. Ainoastaan jännityksien huippukohdissa arvot nousevat yli sallittujen arvojen. Jännityshuiput johtuvat osittain laskentamallivirheestä. Jännityshuiput ovat tässä tapauksessa kuitenkin niin paikallisia, että ne eivät olisi todellisuudessa kriittisiä.

Huonoa työssä on se, että lujuuslaskentamallista ei saatu identtistä CAD-mallin CAD-mallia ei saatu siirrettyä LUSASiin. Lujuuslaskentamallin geometria jouduttiin luomaan alusta asti LUSASilla. LUSAS-ohjelmisto on tarkoitettu opetuskäyttöön ja suurten laskentamallien käsittely sillä on koh-
talaisen vaikeaa.

Lähteet

- Autodesk 2009a. [www-sivut] [viitattu 1.9.2009]
www.autodesk.fi/adsk/servlet/index?siteID=448412&id=12510918
- Autodesk 2009b. [www-sivut] [viitattu 1.9.2009]
www.autodesk.fi/adsk/servlet/index?siteID=448412&id=12511254
- DAF Trucks 2009a. [www-sivut] [viitattu 2.7.2009]
www.daf.com/EN/About-DAF/Heritage/Pages/Heritage.aspx
- DAF Trucks 2009b. [www-sivut] [viitattu 7.7.2009]
www.daf.com/EN/About-DAF/Pages/The-Company.aspx
- DAF Trucks 2009c. [www-sivut] [viitattu 8.7.2009]
www.daftrucks.fi/lf_sarja.html
- DAF Trucks 2009d. [www-sivut] [viitattu 8.7.2009]
www.daftrucks.fi/tekniikka.html
- DAF Trucks 2009e. [www-sivut] [viitattu 8.7.2009]
www.daftrucks.fi/esittely.html
- DAF Trucks 2009f. [www-sivut] [viitattu 8.7.2009]
www.daftrucks.fi/cf_sarja-tekniikka.html
- DAF Trucks 2009g. [www-sivut] [viitattu 8.7.2009]
www.daftrucks.fi/xf_sarja-esittely.html
- DAF Trucks 2009h. [www-sivut] [viitattu 8.7.2009]
www.daftrucks.fi/xf_sarja-tekniikka.html
- Davison, Buick & Owens, Graham W 2003. Steel Designer's Manual – 6th Edition. UK: Blackwell Publishing
- [www-sivut] [viitattu 8.10.2009]
edge.rit.edu/content/P08003/public/materials.xls
- Lähteenmäki, Matti. 2001a. Elementtimenetelmän perusteet, Luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Lähteenmäki, Matti. 2001b. Lusas tiedosto-opas, Luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Mesi-Auto Oy. 2008a. [www-sivut] [viitattu 24.6.2009].
www.mesiauto.fi
- Mesi-Auto Oy. 2008b. [www-sivut] [viitattu 24.6.2009].
www.mesiauto.fi/huoltokorjaamo/index.html

Outinen, Hannu & Salmi, Tapio 2004. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus Oy.

Paul Hills. 2004. [www-sivut] [viitattu 8.10.2009]
<http://homepages.which.net/~paul.hills/Materials/MaterialsBody.html>

Ruukki. 2009a. [www-sivut] [viitattu 25.6.2009].
[www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/0A4C85B453CBFF8FC22575F4002C03E3/\\$File/Ter%C3%A4spalkit_07.2009.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/0A4C85B453CBFF8FC22575F4002C03E3/$File/Ter%C3%A4spalkit_07.2009.pdf?openElement)

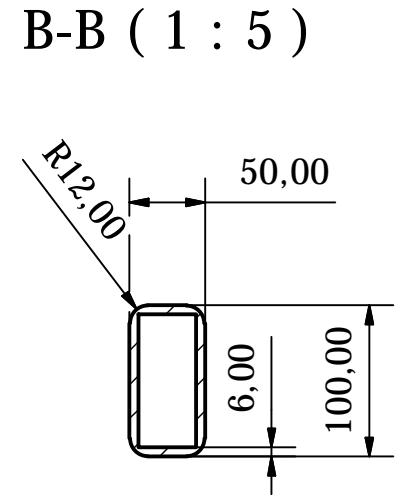
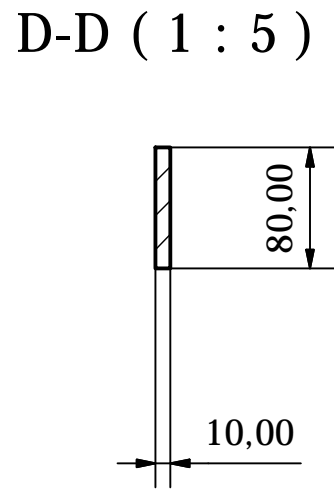
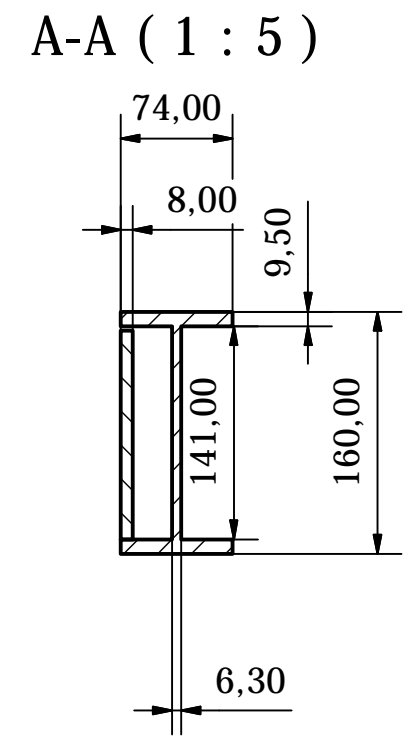
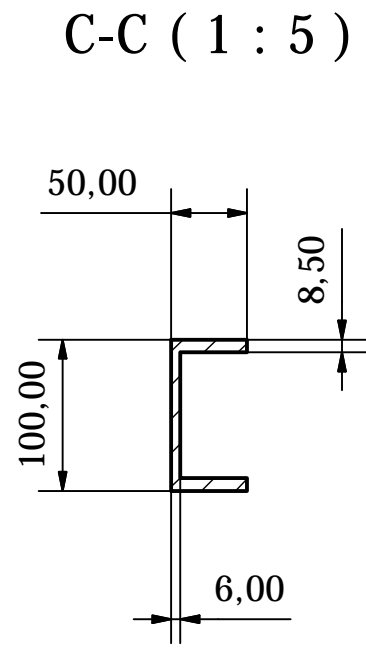
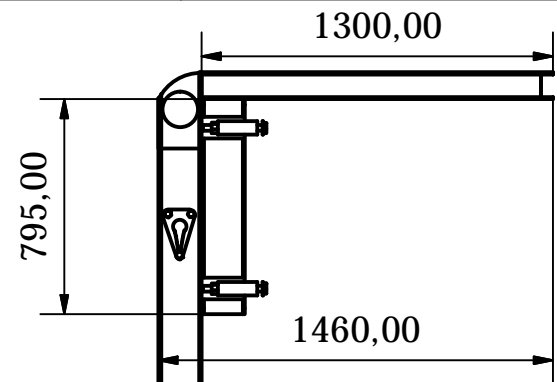
Ruukki 2009b. [www-sivut] [viitattu 25.6.2009].
[www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/6BE39CC78A0A548CC22574E20040E3C6/\\$File/RakenneputketEN10219_TP_10.2008_FI.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/6BE39CC78A0A548CC22574E20040E3C6/$File/RakenneputketEN10219_TP_10.2008_FI.pdf?openElement)

Liitteet

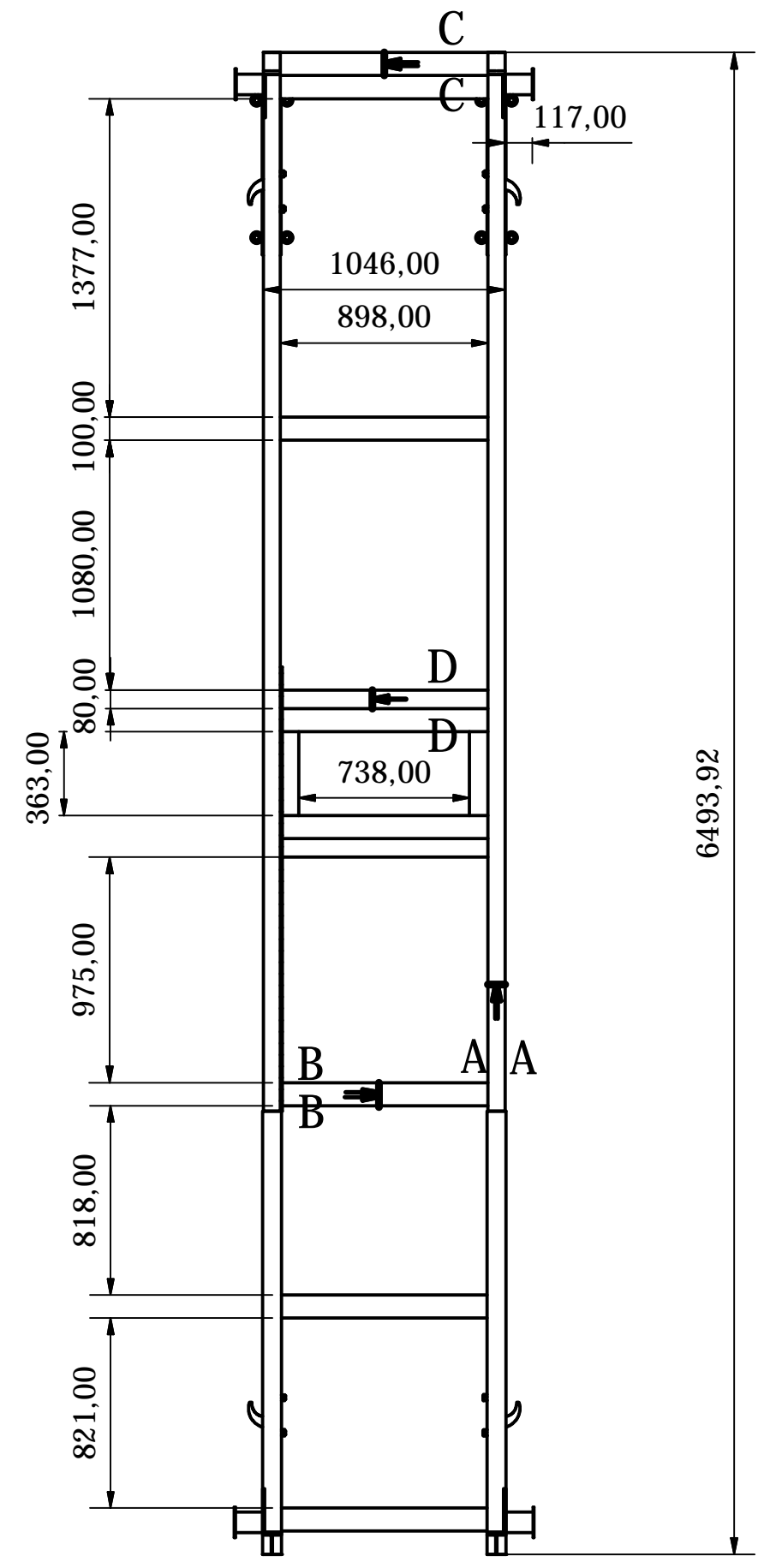
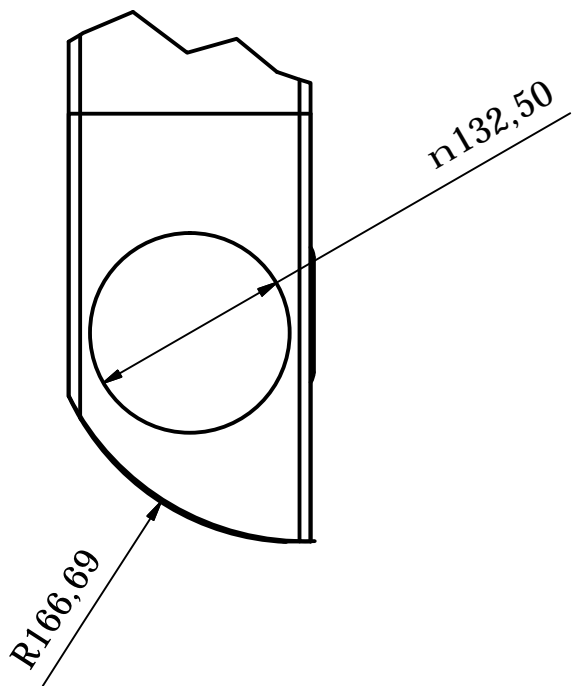
Liite 1: Runko-osan mittapiirustus

Liite 2: Lavarungon mittapiirustus

Lite 1

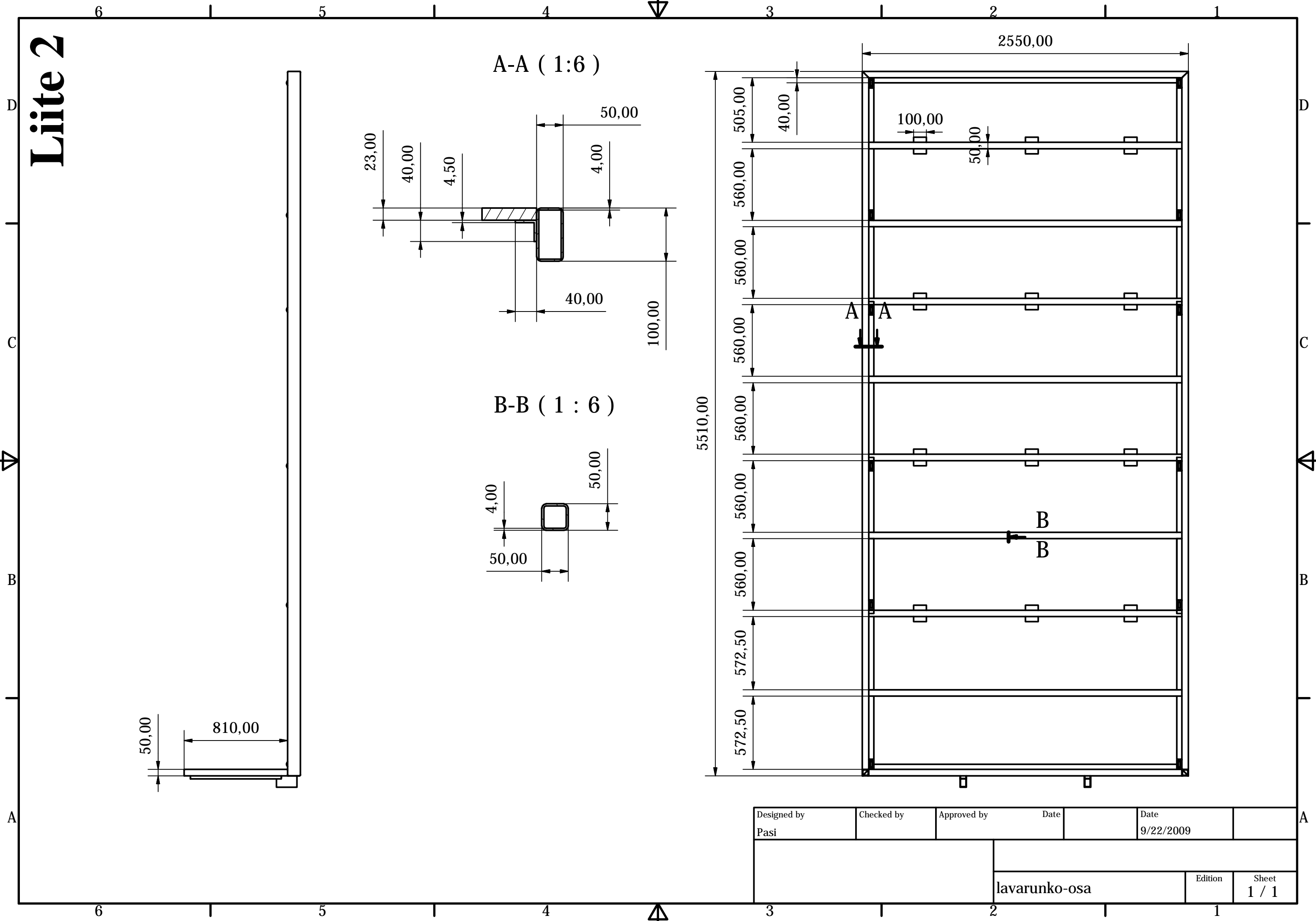


E (1 : 5)



| | | | | |
|---------------------|------------|-------------|---------|-------------------|
| Designed by Pasi | Checked by | Approved by | Date | Date 9/21/2009 |
| runko-osa | | | Edition | Sheet 1 / 1 |

Lite 2



| | | | | |
|---------------------|------------|-------------|----------------|-------------------|
| Designed by Pasi | Checked by | Approved by | Date | Date 9/22/2009 |
| | | | lavarunko-osa | Edition |
| | | | Sheet 1 / 1 | |