

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta/Konetekniikan osasto
Konstruktiotekniikan laitos/Rakenne ja lujuustekniikka

Kandidaatintyö
Teräsrunгон mallinnus
Modelling of a steel frame

Työn tarkastajana on toiminut professori Gary Marquis.

Lappeenrannassa 25.04.2008

Olli Kinnunen
Miilukatu 2 A 2
53850 Lappeenranta
p. 050 327 6540

1	Johdanto	1
2	Tutkimuskohde ja tutkimusmenetelmät	1
2.1	Metsäperävaunu.....	1
3	FE-menetelmä rakenteen tutkimisessa.....	2
3.1	FE-menetelmä	2
3.2	Vaunun mallinnuksessa käytettyjen elementtityyppien kuvaus.....	3
3.3	Epälineaarinen analyysi ja kontaktit.....	4
3.4	Epälineaarisen ongelman ratkaisu	4
3.4.1	Ratkaisualgoritmit	4
3.4.2	Konvergointi.....	7
4	Tavoitteiden asettelu	8
5	FE-mallin luonti ja ratkaisu	8
5.1	Elementtimalli	8
5.2	Kuormat ja reunaehdot	12
5.3	Materiaalit	13
5.4	Ratkaisu	14
6	Tulokset ja niiden arviointi	14
6.1	Kuormitusyhdistelmä 1: traktorin veto ja omapaino.....	14
6.1.1	Jännitykset	14
6.1.2	Siirtymät	17

6.2	Kuormitusyhdistelmä 2: nosturin käytön aiheuttamat kuormitukset	18
6.2.1	Jännitykset	18
6.2.2	Siirtymät	20
6.3	Kuormitusyhdistelmä 3: runko kuormattuna.....	21
6.3.1	Jännitykset	21
6.3.2	Siirtymät	23
6.4	Tuloksien varmennus	23
6.5	Ratkaisualgoritmin vaikutus ratkaisuaikaan.....	25
7	Jatkotutkimusaiheet.....	26
8	Johtopäätökset ja suositukset.....	27
	Lähteet.....	28
	Liitteet	

1 Johdanto

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli tutkia Kesla oy:n valmistaman metsäperävaunun rungon ja aisan siirtymiä ja jännityksiä kuormituksen alaisena. Tutkimiseen käytettiin pääasiassa tietokonepohjaista elementtimenetelmäohjelmistoa ja epälineaarista ratkaisualgoritmia. Rungosta laadittiin kaksi erillistä elementtimallia.

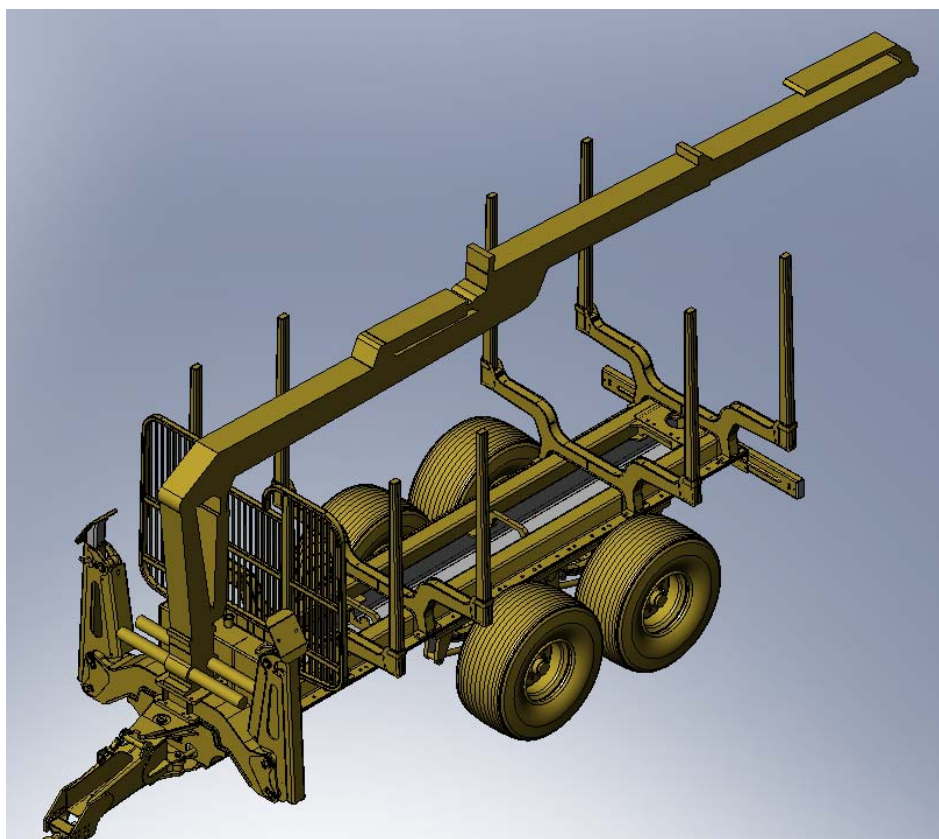
Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin rakenteen mahdolliset väsymisvauriot.

Kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston teknilliseen tiedekuntaan, konetekniikan osastolle.

2 Tutkimuskohde ja tutkimusmenetelmät

2.1 Metsäperävaunu

Kuvassa 1 on metsäperävaunun rakenne. Perävaunu koostuu tutkimuksen alaisesta rungosta, akselistosta, kuorman kannatukseen tarvittavista pankoista ja etusermistä ja kuorman tekoon käytettävästä nostimesta ja tukijaloista. Kuormana metsäperävaunussa on määrämittaan katkaistut puutukit. Pääasiassa vaunulla on tarkoitus siirtää puutavaraa jo olemassa olevaa tiestöä pitkin, mutta vaunulla on mahdollisuus liikkua myös teiden ulkopuolella aisan kääntömahdollisuuden ja vaunun oman vedon ansiosta.



Kuva 1 *Kuva vaunusta*

3 FE-menetelmä rakenteen tutkimisessa

3.1 FE-menetelmä

Elementti- eli FE-menetelmä on numeerinen menetelmä rakenteiden analysointiin. Sillä voidaan tutkia rakenteiden siirtymiä ja jännityksiä, mutta näiden lisäksi myös esimerkiksi nestevirtauksia, magneettikenttiä tai lämmönjohtumista. Menetelmässä yhtenäinen rakenne jaetaan rajallisen kokoisiin osiin, elementteihin ja elementit yhdistetään toisiinsa solmuilla. Elementtityyppinä on yksinkertaisista sauva- tai palkkielementeistä monimutkaisiin useampi solmuisiin tilavuuselementteihin ja epälineaarisiin kontaktielementteihin. Ratkaisualgoritmi muodostaa elementtejä kuvaavat matriisit, yhdistää ne koko rakennetta kuvaavaksi jäykkymatriisiksi ja ratkaisee jäykkyyden- ja kuormitusmatriisin avulla halutut tulokset solmuissa.

FE-menetelmän edut piilevät sen monikäyttöisyydessä ja monimutkaistenkin rakenteiden sujuvassa kuvaamisessa. Haittoina voidaan taas pitää saatua numeerista ratkaisua. Tulokset tarjoavat ainoastaan ratkaisun asetettuun yksittäiseen ongelmatilanteeseen, se ei mahdollista tulosten analyttistä tarkastelua esimerkiksi tutkimalla parametrien vaikutusta lopputulokseen tai parametrien optimaalisten arvojen löytämiseen. Lisäksi menetelmän käytännön soveltaminen vaatii tietokoneen ja siihen soveltuvan ohjelmiston ja hyvän elementtimallin luonti voi vaatia hyvää kokemusta ja insinöörimaista otetta mallin luontiin. Toisin sanoen, tulokset ja niiden hyödyntäminen riippuu ohjelman käyttäjästä.[1]

3.2 Vaunun mallinnuksessa käytettyjen elementtityyppien kuvaus

Kuorielementti on elementtityyppi, mikä kuvaa tasaista laattaa. Kuorielementin solmuilla on 6 vapausastetta, kolme translaatio-suuntaa ja 3 rotaatio-akselia. Elementti vastustaa membraani-, leikkaus- ja taivutusvoimia, tason suuntaiset voimat jätetään huomioimatta.

Tilavuuselementti kuvaa kolmiulotteista tilavuutta ja elementillä kuvataan tilavuuksia. Tilavuuselementtien soluilla on ainoastaan translaatio-suunnan vapausasteet.

Palkkielementit kuvaavat palkkeja, ja ne vastustavat normaali-, leikkaus- ja taivutusvoimia. Palkkielementin solmuilla on kaikki kuusi vapausastetta.

Gap- elementti on kahden solmun välille määriteltävä kontaktielementti, mille voidaan määrittellä erilliset puristus-, veto- ja leikkausominaisuudet.

Massaelementti on yksisolmuinen elementti, mikä kuvaa massaa ja mahdollisesti sen rotaatiohitautta.[4]

3.3 Epälineaarinen analyysi ja kontaktit

Epälineaarilla analyysillä kuvataan tilannetta, missä ratkaisu ei välttämättä käyttäydy lineaarisesti, eli esimerkiksi kuormitukset ja jännitykset eivät korreloi samassa suhteessa.

Epälineaarisuus FE-menetelmässä jakaantuu yleensä materiaalin epälineaarisuuteen, geometrian epälineaarisuuteen ja kontakteihin. Epälineaarisen materiaalin venymän riippuvuus kuormitukseen ei ole lineaarinen. Esimerkiksi perinteisillä rakenneteräksillä on löydettävissä myötöraja, jonka jälkeen rakenteeseen syntyy pysyviä venymiä kuormituksen kasvaessa.

Geometrian epälineaarisuudella viitataan usein rakenteen muuttumiseen kuormituksen yhteydessä. Toisin sanoen rakenne voi esimerkiksi löytää uusia tapoja kuorman kantamiseen kuormitusten kasvaessa tietyn rajan yli. Kontaktirakenteissa on välyksiä ja rakoja, mitkä aukeavat tai elävät kuormituksen muuttuessa ja näin välittävät kontaktin kautta kuormituksia.[1]

FE-ohjelmistoissa kontakti luodaan yleensä erillisellä kontaktielementillä, mikä luodaan pinnoille, mitkä oletetaan joutuvan kontaktiin. Käytännössä elementti haistelee mahdollisen kontaktin syntyä, ja tämän jälkeen reagoi siihen. Lisäksi kontaktin luontiin voidaan käyttää edellä mainittua gap -elementtiä.[4]

3.4 Epälineaarisen ongelman ratkaisu

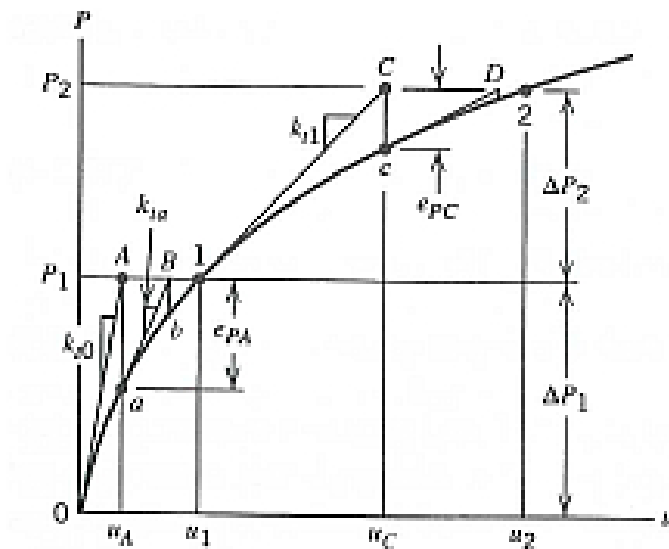
3.4.1 Ratkaisualgoritmit

Epälineaaristen ongelmien ratkaisuun on olemassa erilaisia ratkaisumalleja, mutta monille näistä on yhteistä jakaa epälineaarinen ongelma tarvittavaan määrään lineaarisia askeleita, inkrementtejä.

Seuraavassa esitellään muutama epälineaarinen ratkaisualgoritmi.

Newton-Raphsonin menetelmä

Kuvassa 2 on esitetty Newton-Raphsonin menetelmän eteneminen.



Kuva 2 Newton-Raphsonin ratkaisualgoritmin eteneminen[1]

Newton-Raphsonin menetelmää käytetään epälinearisessa ongelmassa voima-siirtymä(P vs u) kuvaajaan luontiin. Ratkaisun periaate on noudattaa seuraavaa proseduuria. Lähtötilanteessa voima ja siirtymä ovat 0. Rakennetta kuormitetaan ensimmäisellä inkrementillä P_1 . Inkrementti on yleensä osa kokonaiskuormituksesta. Rakenteen jäykkyydelle käytetään alkuarvoa k_{i0} , mitä kutsutaan tangentiaalijäykkyydeksi. Voimaa vastaava siirtymä u_A lasketaan kaavalla:

$$k_{i0} \cdot \Delta u = \Delta P_1, \quad (1)$$

Missä $\Delta u = u_A$ ja $\Delta P_1 = P_1$.

Tällöin päädytään kuvaa 2 vastaavaan pisteeseen A. Otetun askeleen jälkeen rakenteessa esiintyy kuitenkin voimaepätasapaino e_{pa} , koska rakenteen jäykkyys

muuttuu liikuttaessa pisteeseen A. Voimaepätasapaino lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$e_{pA} = P_1 - ku_A \quad (2)$$

Missä $k=k(u)$ arvioidaan käyttäen siirtymää u_A

Seuraavaksi tehdään toinen askel, toisin sanoen iteraatio, lähtien pisteestä u_A käyttäen jäykkyydelle arvoa k_{tA} ja voimalle arvoa e_{pa} . Soveltaen kaavaa 1 päädytään pisteeseen B ja siirtymään u_B . Tämän jälkeen tarkistetaan voimaepätasapainon e suuruus. Iteraatioita jatketaan, kunnes voimaepätasapainon suuruus on riittävän pieni. Tällöin on saavutettu voima-siirtymä –kuvaajaan piste (P_1, u_1) ja inkrementti 1 on valmis. Tämän jälkeen muodostetaan toinen inkrementti ja ensimmäisen inkrementin proseduuri toistetaan. Iteraatioiden jälkeen päädytään kuvan 2 pisteeseen (P_2, u_2) . Tällä tavalla käydään kaikki määrättyt inkrementit läpi ja saadaan muodostettua rakenteen voima-siirtymä kuvaaja. Kuvaajan tarkkuus riippuu luonnollisesti käytettyjen inkrementtien määrästä.[1]

Modifioitu Newton Raphson

Modifioitu Newton-Raphson poikkeaa alkuperäisestä Newton-Raphsonista tangentiaalijäykkyyden k_t käytössä. Alkuperäisessä Newton-Raphson –menetelmässä tangentiaalijäykkyys päivitettiin jokaisen iteraation jälkeen, kun taas modifioidussa N-R menetelmässä käytetään samaa tangentiaalijäykkyyttä koko inkrementin ajan. Näin säästytään raskaalta tangentiaalijäykkyyden päivitykseltä.[2]

Quasi-Newton –menetelmä

Ratkaisualgoritmia voidaan kehittää laskemalla tarkan tangentiaalijäykkyyden sijasta sen approksimaatio. Quasi-Newton –menetelmässä lasketaan jäykkyyden sekanttityppinen approksimaatio perustuen edellisiin iteraatioihin[2].

Arc-length –menetelmä

Edellä kuvatut algoritmit pohjautuvat vakiona pysyvään inkrementtiin. Kuitenkin ongelmissa, missä voima-siirtymä –kuvaaja kaareutuu tietyn ajan kuluttua alaspäin, voi tulla ongelmia iteraatioiden määrän ja/tai konvergoinnin kanssa. Näihin ongelmiin on kehitetty menetelmä, mikä pystyy säätämään inkrementtien suuruutta. Arc-length -menetelmän toiminta perustuu modifioituun Newton-Raphson –algoritmiin, mutta voimaparametria P_n käsitellään muuttujana vakion sijaan. Parametrin muuttumisen käsittely riippuu lähestymistavasta, muuttuminen voi olla lineaarista tai epälineaarista[3].

3.4.2 Konvergointi

Inkrementin läpäisyyn käytetään kriteerinä konvergointia. Toisin sanoen inkrementin iterointi voidaan lopettaa, kun iteraation voimaepätasapaino ja siirtymä ovat tarpeeksi lähellä ratkaisua. Konvergointiehtona käytetään tiettyä osaa kokonaisvoimasta ja siirtymästä. Käytettävän osan suuruutta kontrolloidaan automaattisesti laskentaohjelmalla tai käyttäjä voi itse asettaa haluamansa konvergointitoleranssin.[1]

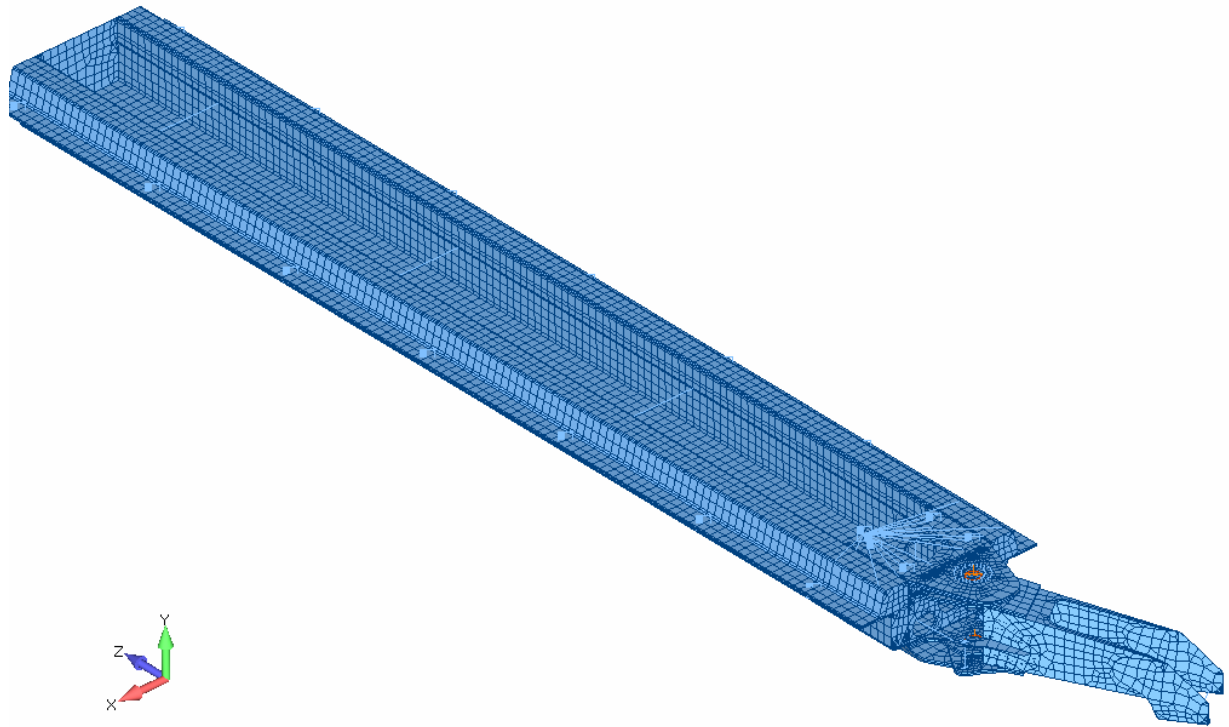
4 Tavoitteiden asettelu

Päätavoitteena oli saada muodostettua toimiva ja luotettava FE-malli metsäperävaunusta. FE-mallin avulla voitiin arvioida kriittisten komponenttien jännitys- ja siirtymätilat. Lisäksi työn tarkoituksena oli tutkia nivelkohdan mallinnukseen käytettävissä olevia keinoja. Tavoitteena voidaan myös pitää tutustuminen epälineaarisen mallin ratkaisuun ja erityisesti kontaktien hyödyntämiseen mm. nivelkohtien tarkastelussa.

5 FE-mallin luonti ja ratkaisu

5.1 Elementtimalli

Rungon elementtimallin luontiin käytettiin *FEMAP 9.1* ohjelmistoa. Samalla ohjelmistolla suoritettiin myös tulosten jälkikäsitteily. Elementtimalli on kuvassa 3. Malli koostuu rungosta, nivelkohdasta ja aisasta. Rungon ja aisan profiilit mallinnettiin hyväksikäyttäen kuorielementtejä, nivelkohdassa käytettiin tilavuuselementtejä rungon ja aisan nivel-levyissä ja nivelen tapeissa. Liittyviä osia, kuten nivelkohdan käyttösylintereitä kuvattiin palkkielementeillä. Samoin nosturin epäkeskistä kiinnityskohtaa kuvattiin palkkielementeistä kootulla ristikolla. Suurimmat kuormitukset aiheuttavan nosturityypin(Z-malli) kiinnitys tapahtuu rungon oikealle puolelle, jolloin runkoon muodostuu suurin vääntömomentti aisan ollessa käännettynä vasemmalle.

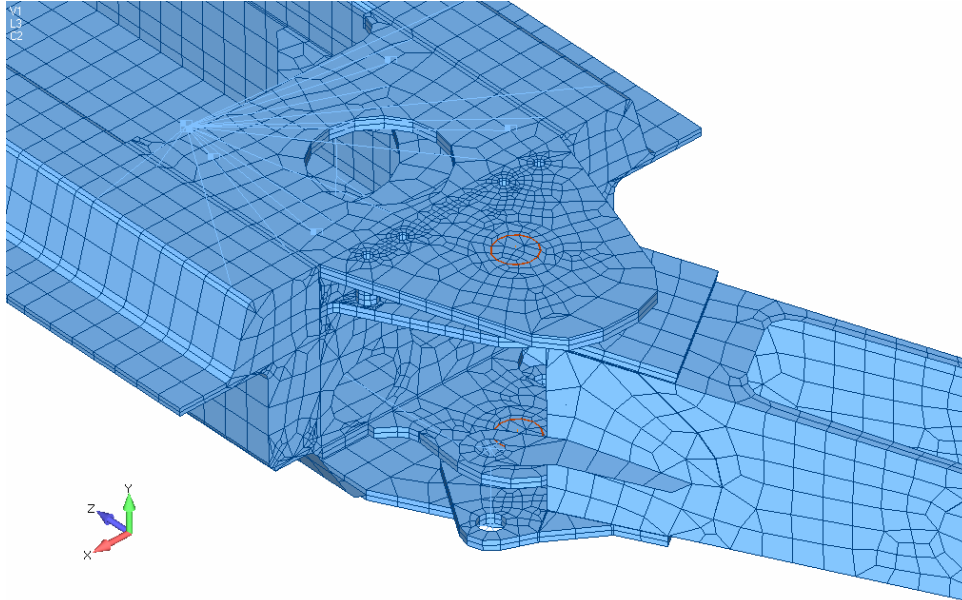


Kuva 3 Rakenteen elementtimalli

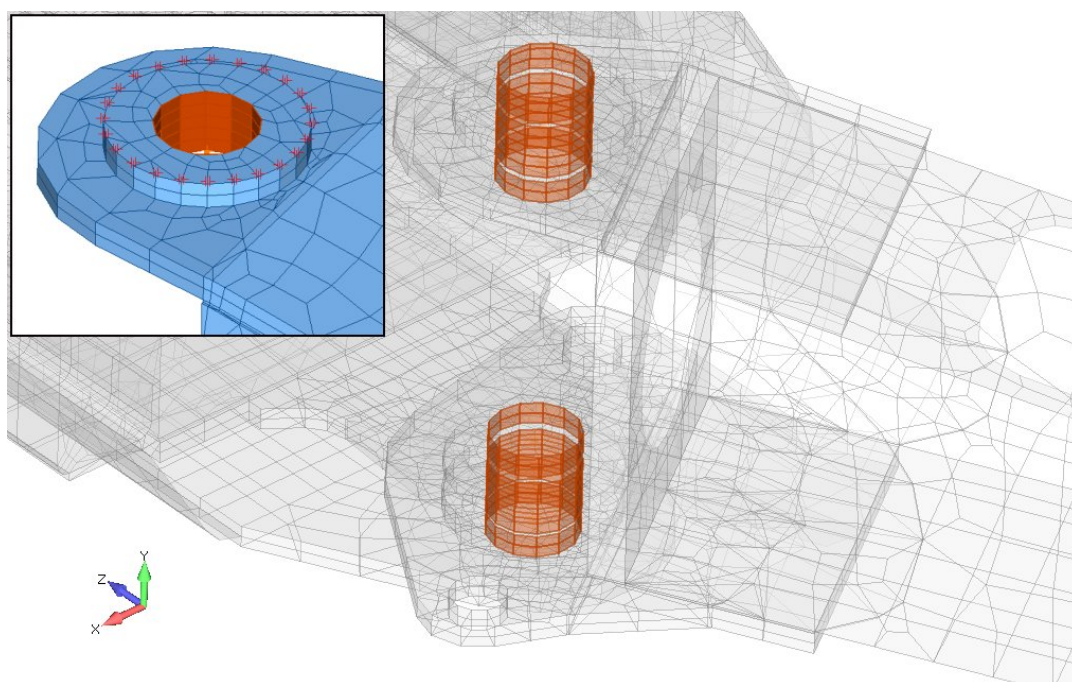
Kuorielementtien liittämiseen tilavuuselementtiin pitää kiinnittää huomiota. Tilavuuselementti ei välitä kuorielementille taivutusmomenttia, joten liitoskohta pitää jäykistää nivelen muodostumisen estämiseksi. Jäykistys suoritettiin asettamalla tilavuuselementtien pinnalle kuorielementit, mitkä välittävät liittyvälle kuorielementille taivutusmomentit.

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty nivelkohtien mallinnus. Nivelkohtaan muodostettiin tilavuuselementeillä korvakkeet ja tapit. Tapin ja korvakkeen välille muodostettiin erillinen kontaktielementti valitsemalla tapin ja korvakkeen tilavuuselementtien kontaktiin tulevat pinnat. Kontaktielementin kitkakertoimeksi määritettiin 0, eli kontakti ei siirrä voimaa tapin akselin suunnassa. Tapin akselin suuntainen liike estettiin aisan ja rungon korvakkeiden otsapintojen välisellä gap-elementeillä. Tässä tapauksessa gap-elementille määriteltiin ainoastaan puristusjäykkyys,

elementti pyrkii puristumaan ja otsapintojen ei oleteta siirtävän voimia kitkalla liitospinnan rasvauksen takia.



Kuva 4 Nivelkohdan elementtimalli. Liitoskohdan levyt mallinnettu tilavuuselementeillä, runkoprofiili, hitsit ja aisa on mallinnettu kuorielementeillä.



Kuva 5 Nivelkohdan kontaktit. Kuvassa oranssilla näkyvät kontaktipinnat ja pienemmässä kuvassa punaisella näkyvät aisan ja rungon väliin asetetut gap-elementit, millä kuvataan otsapinnan kontaktia.

Elementtiverkon tiheys on kohtalaisen karkea. Nivelkohdassa käytettiin tiheämpää elementtiverkkoa (elementin globaalikoko 20 mm), ja muualla rakenteessa verkko oli karkeampi (elementin globaalikoko 50 mm). Syynä verkon suhteelliseen karkeuteen oli ratkaisun laskenta-ajan pito lyhyempänä. Epälineaarinen ratkaisu koostuu useasta inkrementistä, missä ratkaistaan päivitetty yhtälöryhmä toistuvasti, joten elementtien määrällä on korostuva vaikutus ratkaisuaikaan. Ja toisaalta tässä vaiheessa tarkastelua keskityttiin yleisempiin jännitystasoihin ja erilaisten mallinnusmenetelmien tutkimiseen, ei niinkään tarkkoihin, yksityiskohtaisiin tuloksiin.

5.2 Kuormat ja reunaehdot

Runkoon kohdistuvat kuormitukset, kuten kuorman ja nosturin paino mallinnettiin massaelementeillä. Massaelementit kiinnitettiin rungon elementtien solmuihin. Nosturin tuottama nostomomentti asetettiin nosturin kiinnityssolmuun taivutusmomenttina.

Lisäksi malliin asetettiin vetotraktorin aiheuttama kärryn vetovoima. Traktorin painoksi arvioidaan 8 800 kg ja oletetaan että traktori voi vetää vaunua 80% painostaan, toisin sanoen traktorin vetokyky on tällöin noin 69 kN.

Rakenteen omapaino ja massaelementtien aiheuttama kuormitus huomioitiin asettamalla malliin putoamiskiihtyvyyttä, $9,81\text{m/s}^2$, vaikuttamaan alaspäin.

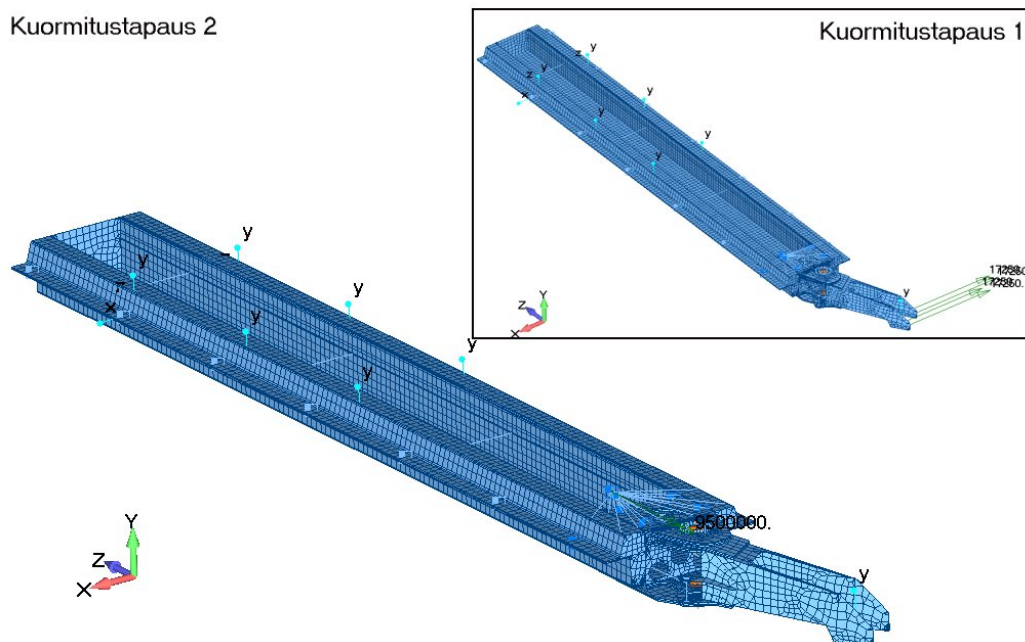
Kuormien pohjalta muodostettiin kolme kuormitusyhdistelmää:

- 1) Kuorman ja nosturin paino, omapaino ja traktorin vetovoima 90 asteen kulmassa runkoon nähden sivulle. Vetovoima asetettiin aisan päähän edellä kuvattuun asentoon.
- 2) Kuorman ja nosturin paino, omapaino ja nosturin nostomomentti asetettuna nosturin kiinnityskohtaan. Nosturi muodostaa rungon kannalta kriittisimmän kuormituksen nostessaan kuormaa vaunun oikealta puolelta.
- 3) Omapaino, kuorman ja nosturin paino.

Kuormitustilanteista 2 ensimmäistä on lähinnä ääritilanteita ja kolmas tapaus esittää normaalin käytön aiheuttamia kuormia.

Reunaehdot asetettiin aisassa olevan vetosilmukan kohdalle ja akseliston kiinnityspisteisiin. Kiinnityssilmukka tukee rakenteen vain pystysuunnassa silmukan ja koukun välisen välyksen takia. Akseliston kiinnityspisteisiin asetettiin pystysuuntainen reunaehto ja rakenteesta estettiin jäykän kappaleen liike asettamalla kiertymät estävä reunaehtopari.

Kuvassa 6 on kuvattu kuormitustapaukset 1-2.



Kuva 6 Elementtimallin kuormitustapaukset. Kirjaimet kuvaavat estettyjen siirtymien globaaleja suuntia kyseisen solmun kohdalla, numerot ovat kuormituksen suuruuksia.

5.3 Materiaalit

Rungon valmistusmateriaali on *Rautaruukki RAEX 640 HSF(S650MC)*. Aisan materiaalina on *S355JSG3*. Materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Materiaaliominaisuudet. Lujuusarvot EN-standardin mukaisia minimiarvoja.

Materiaali	Kimmokerroin	Myötöraja	Murtolujuus
EN 10149 S650MC	210 GPa	650 MPa	700...850 MPa
EN 10025 S355JSG3	210 GPa	355 MPa	510...680 MPa

Rungon materiaalin oletettiin käyttäytyvän lineaarisesti, joten materiaalista luotiin elementtiohjelmaan lineaarinen malli. Oletukselle luo pohjaa perusajatus rungon

käyttäytymisestä; rungon jännitysten pitää kestää materiaalin myötörajan alapuolella. Teräksen käyttäytymistä myötörajan alapuolella voidaan pitää lineaarisena.

5.4 Ratkaisu

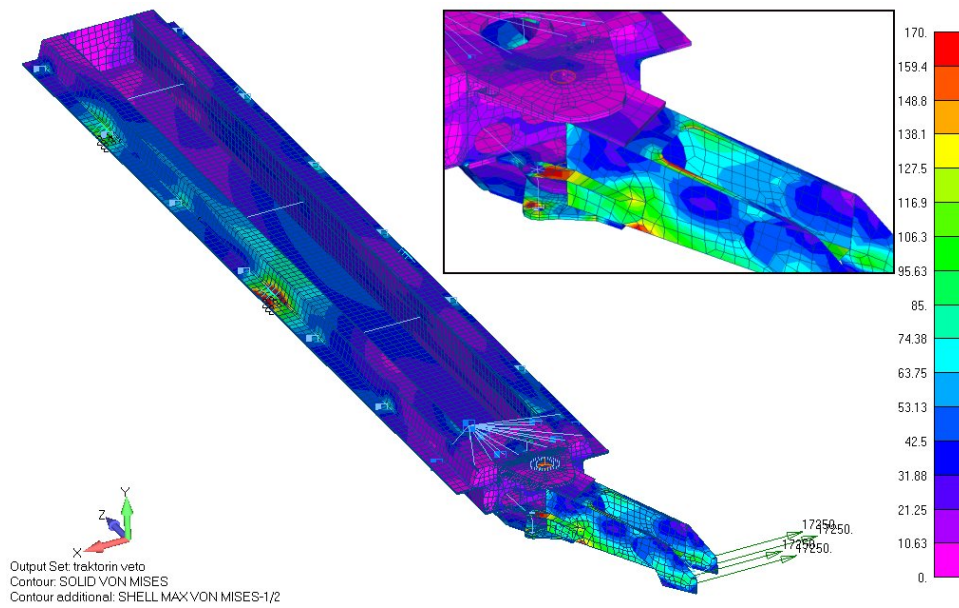
Epälineaarisen, kontakteja sisältävän elementtimallin ratkaisuun käytettiin *NEi Nastran 9.1* -ohjelmistoa. Nivelkohdan kontaktielementtien takia elementtimallin ratkaisu tehtiin epälineaarisenä. Kuormitusilanteiden ratkaisu tehtiin käyttäen luvussa 3.4 esiteltyä modifioitua Newton- Raphson –menetelmää. Ratkaisussa käytettiin viittä inkrementtiä. Inkrementtien määrää vertailtiin ja vertailussa huomattiin, että tulokset eivät muutu enää huomattavasti viiden inkrementin jälkeen.

6 Tulokset ja niiden arviointi

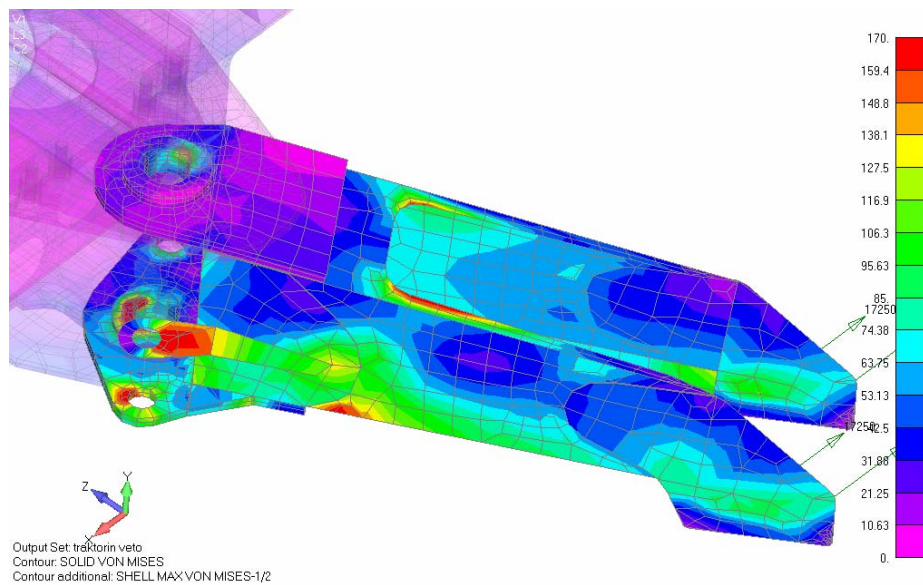
6.1 Kuormitusyhdistelmä 1: traktorin veto ja omapaino

6.1.1 Jännitykset

Kuvissa 7 ja 8 on rakenteen von Misesin mukaiset resultanttijännitykset kuormattuna ja traktorin vetäessä vaunua sivulle päin.



Kuva 7 Rakenteen jännitykset kuormattuna ja traktorin vetäessä vaunua sivulle päin. Jännitykset rajattu arvoon 170 MPa.



Kuva 8 Aisan jännitykset kuormattuna ja traktorin vetäessä vaunua sivulle päin. Jännitykset rajattu arvoon 170 MPa.

Kuvista 7 ja 8 nähdään, että jännitykset ovat suurimmillaan rungossa telin kiinnityspisteissä ja aisan ja rungon nivelkohdassa. Rakenteen kannalta kriittisimmät jännitykset esiintyvät rakenneteräksestä valmistetussa aisassa. Aisan pystylevyissä esiintyy 100-120 MPa:n resultanttijännityksiä, samoin alemman kiinnityskorvakkeen käyttösylinterin tuntumassa. aisan yläosaan tehdyn aukon reunassa esiintyy lähes 200 MPa:n maksimijännitys. Nivelkohdassa tapin ja korvakkeen kontakti aiheuttaa alempaan liitokseen suurimmillaan lähes 500 MPa:n pistemäisen jännityksen. Ylemmässä kontaktissa jännitystaso jää suurimmillaan noin 140 MPa:iin.

Rakenteen jännitystaso aisassa on suhteellisen korkea. Suurimmillaan jännitys on yli 500 MPa, tosin jännitys esiintyy hyvin pistemäisesti. Lisäksi kyseisen jännityspiikin muodostuminen todellisessa rakenteessa estyy nivelkohdassa olevan pallomaisen liukulaakerin ansiosta. Rakenteen kannalta merkittävimmät jännitykset esiintyvät aukon reunassa ja alaosan korvakkeessa käyttösylinterin tuntumassa. Aisan varmuus myötöön on tällöin noin $n=355/200=1,8$.

Osa rakenteessa esiintyvistä yli 170 MPa:n jännityksistä johtuu mallinnustavasta. Palkki- ja sauvaelementit liittyvät kuori- ja tilavuuselementtien yksittäisiin solmuihin, jolloin kyseisiin kohtiin muodostuu pistemäisiä voimia ja jännityksiä. Todellisessa rakenteessa näitä pistemäisiä jännityksiä ei esiinny, vaan voimat jakaantuvat isommille alueille.

Runko-osassa esiintyvät jännitykset jäävät alhaisiksi huomioiden materiaalin korkea myötölujuus. Pääasiassa rungon alueella jännitykset kestävät alle 100 MPa:n, akseliston kiinnittymiskohdassa jännitykset nousevat noin 200 MPa:n tuntumaan. Varmuus myötöön on tällöin noin $n=640/200=3,2$.

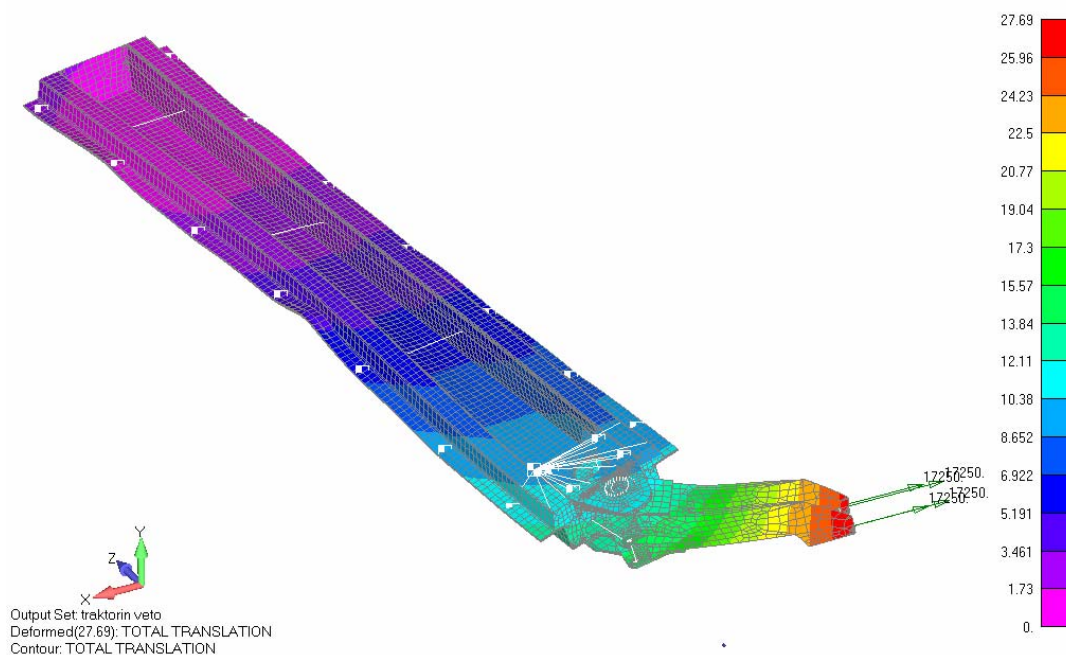
Tulosten perusteella koko runkorakenteen pienin varmuus myötämiseen on 1,8.

Kyseinen kuormitustapaus voi syntyä käytännössä ääritilanteissa. Kuormitustapaus vaatii akseliston jumiutumisen ja samaan aikaan vetokoneen voimakkaan vedon.

Rakenteen käytön aikana kyseinen kuormitustapaus on erittäin harvinainen ja sen ei odoteta aiheuttavan väsyttävää kuormitusta rakenteeseen.

6.1.2 Siirtymät

Kuvassa 9 on rakenteen kokonaissiirtymät ko. kuormitustapauksessa.



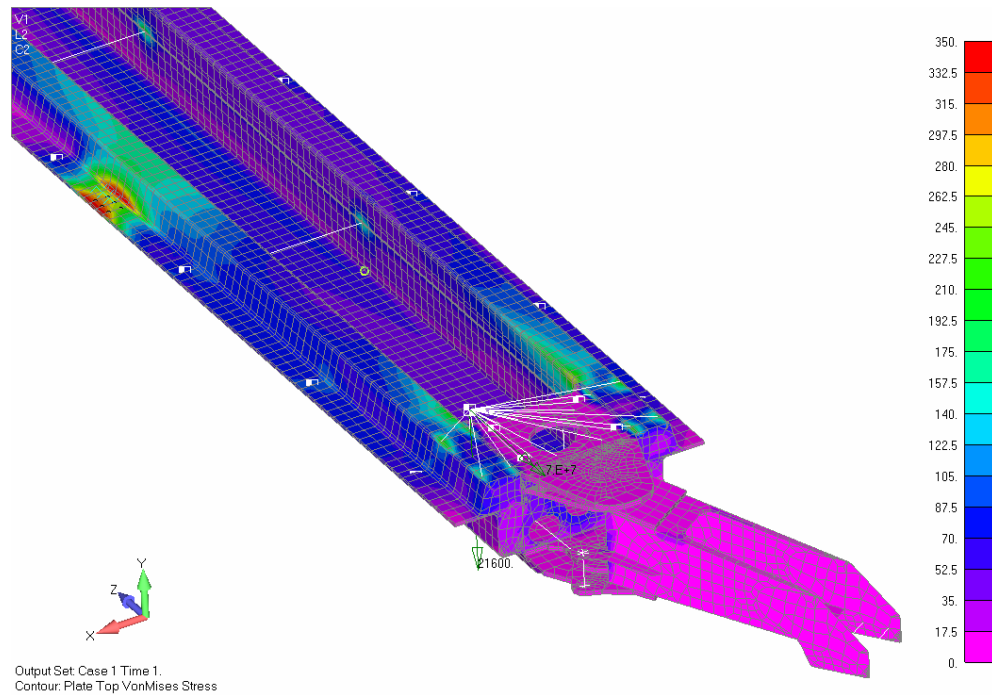
Kuva 9 Rakenteen kokonaissiirtymät. Suurin siirtymä on noin 28 mm, deformaatio on esitetty 50-kertaisena.

Kuvan 9 perusteella suurin kokonaissiirtymä on noin 28 mm. Kokonaissiirtymä koostuu pääasiassa vetokoneen kuormituksen suuntaisesta(x-suunt.) komponentista.

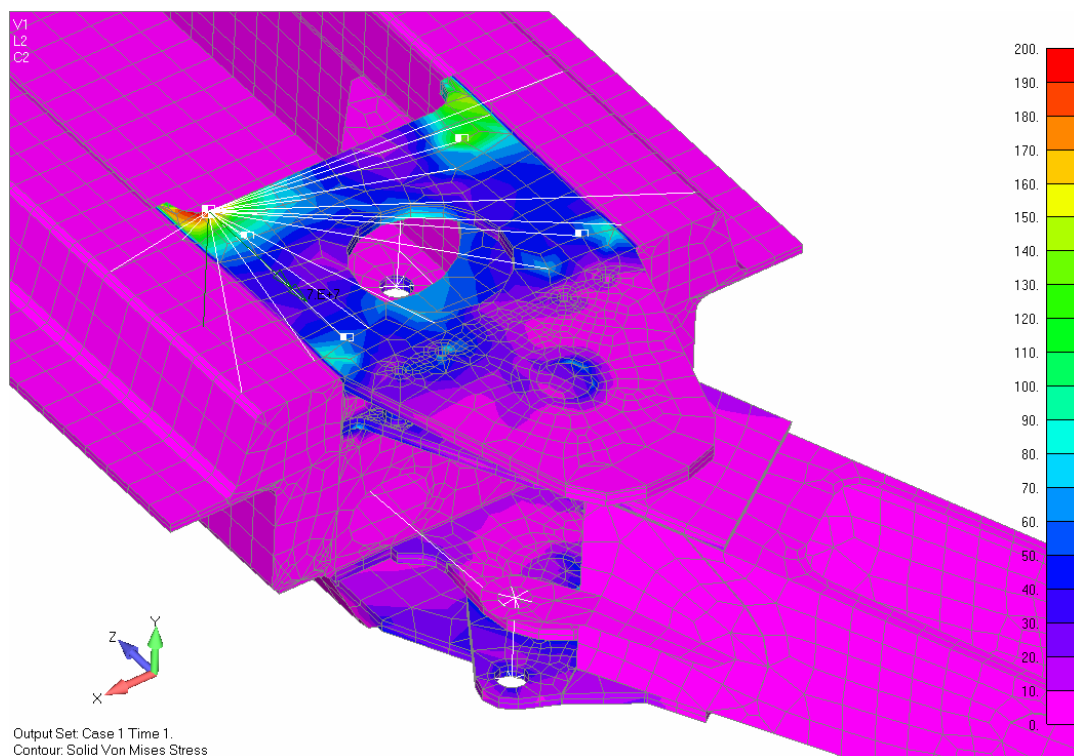
6.2 Kuormitusyhdistelmä 2: nosturin käytön aiheuttamat kuormitukset

6.2.1 Jännitykset

Kuvissa 10 ja 11 on rakenteen von Misesin mukaiset resultanttijännitykset nosturin nostaessa rungon oikealta puolelta aisan ollessa käännettynä vasemmalle. Nostomomentti rajoittuu arvoon, millä vaunu kestää pystyssä.



Kuva 10 Rakenteen jännitykset kuormattuna ja nosturin nostaessa kuormaa. Jännitykset rajattu arvoon 350 MPa.



Kuva 11 Nivelkohdan resultanttijännitykset kuormattuna ja nosturin nostessa kuormaa. Jännitykset rajattu arvoon 200 MPa.

Kuvista 10 ja 11 nähdään, että jännitykset ovat suurimmillaan rungossa telin etummaisesta kiinnityspisteestä. Kiinnityspisteessä esiintyy pistemäisiä yli 350 MPa:n jännityksiä, mutta pääasiassa jännitykset jäävät noin 250 MPa:n tuntumaan. Muulla rungossa jännitykset ovat 80-120 MPa, nivelkohdassa jännitystaso jää suurimmillaan noin 150 MPa:n tuntumaan. Rungossa jää jännitykset edelleen suhteellisen alhaisiksi. Varmuus myötöön rungossa on noin $n=640/250=2,6$.

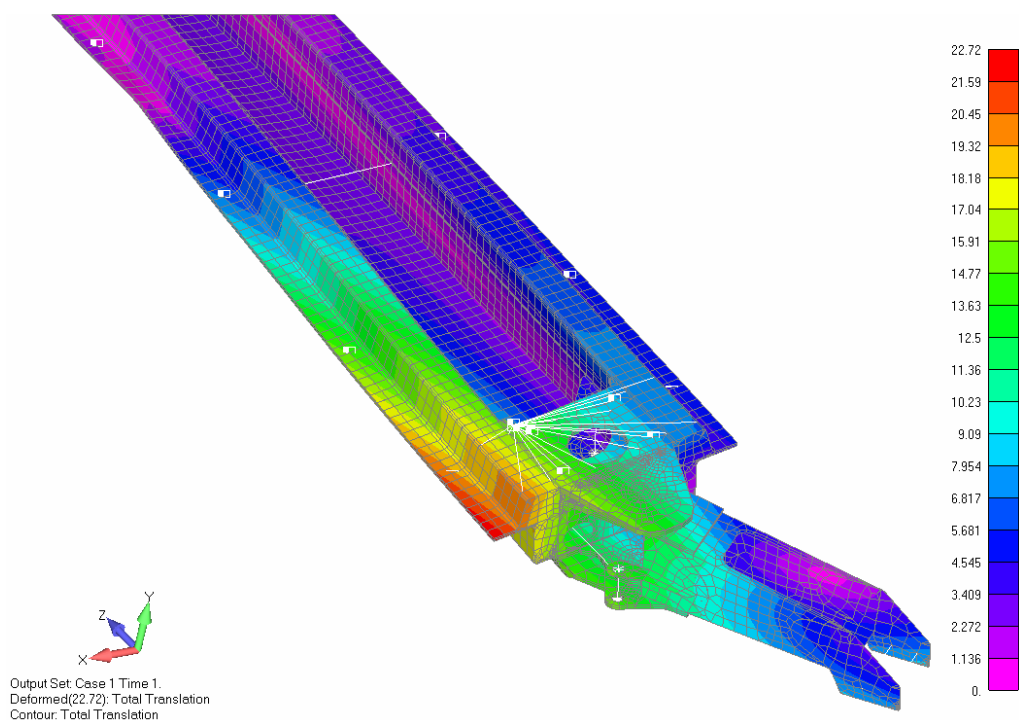
Aisan jännitystaso jää alhaiseksi. Rakenteen kannalta merkittävin jännitys sijaitsee aisan päälle tehdyn aukon reunamissa ja sen suuruus on noin 50 MPa. Varmuus myötöön on noin $n=355/50=7,1$

Tulosten perusteella rakenteen pienin varmuus myötämiseen on 2,6

Kyseinen kuormitustapaus voi syntyä käytännössä ääritilanteissa. Normaalisti nosturi tuetaan maahan erillisillä tukijaloilla, kys. kaltainen kuormitustapaus syntyy tilanteessa, jossa jalka on jäänyt tukematta alustaan tai alusta ei ole tarpeeksi jäykkä pitääkseen jalan paikallaan.

6.2.2 Siirtymät

Kuvassa 12 on rakenteen kokonaissiirtymät ko. kuormitustapauksessa.



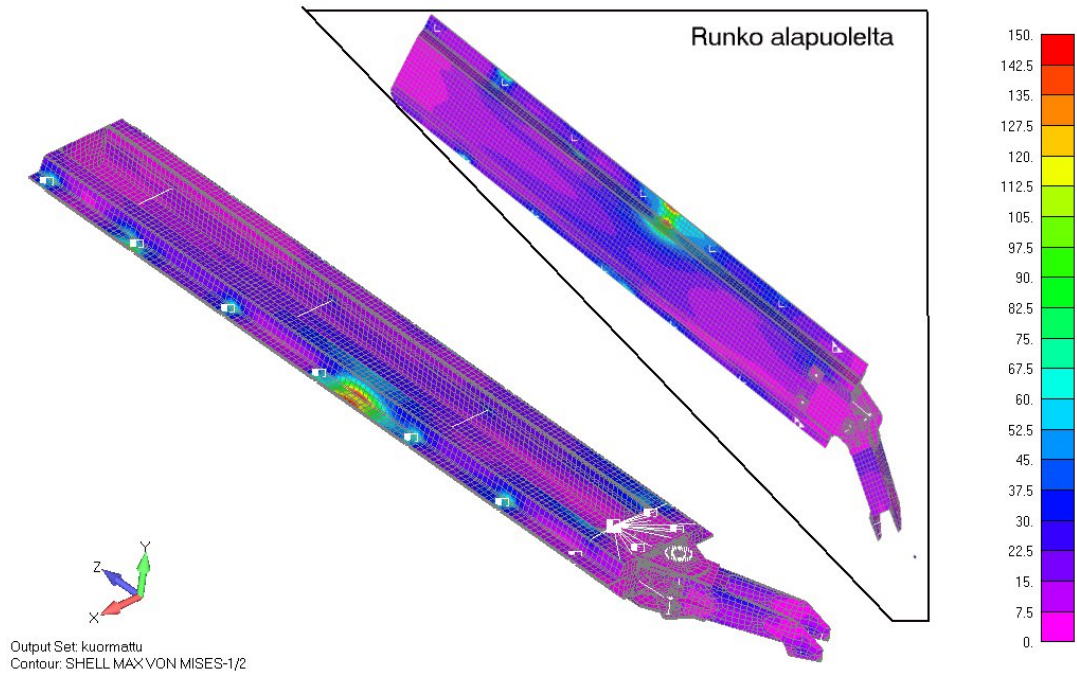
Kuva 12 Rakenteen kokonaissiirtymät. Suurin siirtymä on noin 22 mm, deformaatio on esitetty 50-kertaisena.

Kuvan 12 perusteella suurin kokonaissiirtymä on noin 22 mm. Suurin kokonaissiirtymä koostuu pääasiassa pystysuuntaisesta siirtymän komponentista.

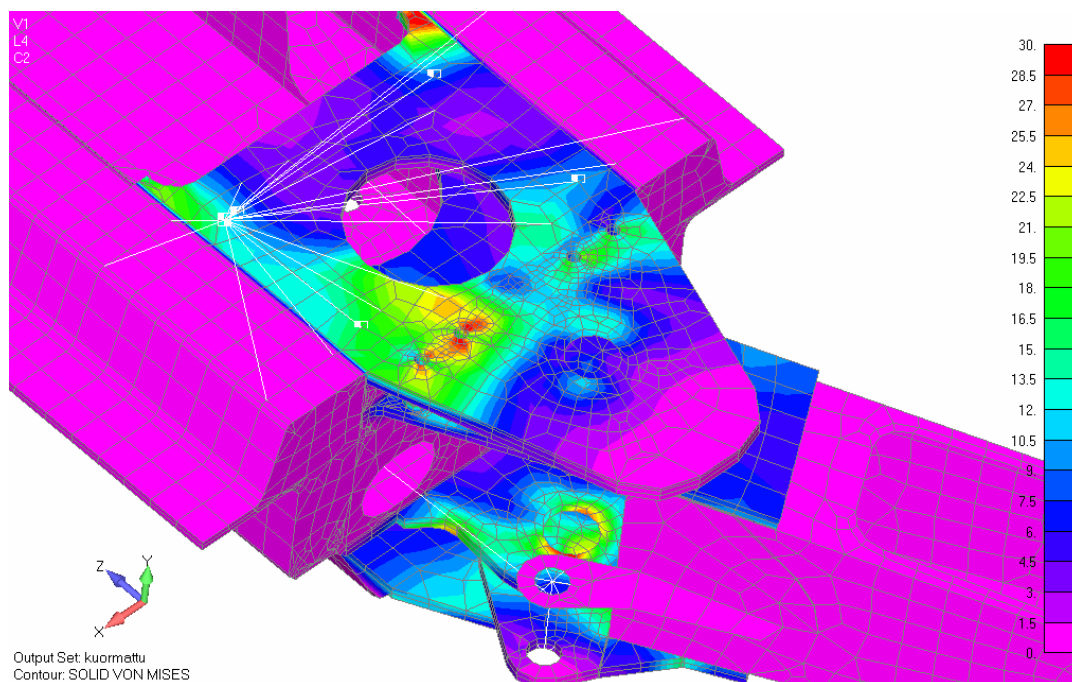
6.3 Kuormitusyhdistelmä 3: runko kuormattuna

6.3.1 Jännitykset

Kuvissa 13 ja 14 on rakenteen von Misesin mukaiset resultanttijännitykset vaunun ollessa kuormattuna ja aisan ollessa käännettynä vasemmalle.



Kuva 13 Rakenteen jännitykset kuormattuna. Jännitykset rajattu arvoon 150 MPa.



Kuva 14 Nivelkohdan resultanttijännitykset. Jännitykset rajattu arvoon 30 MPa.

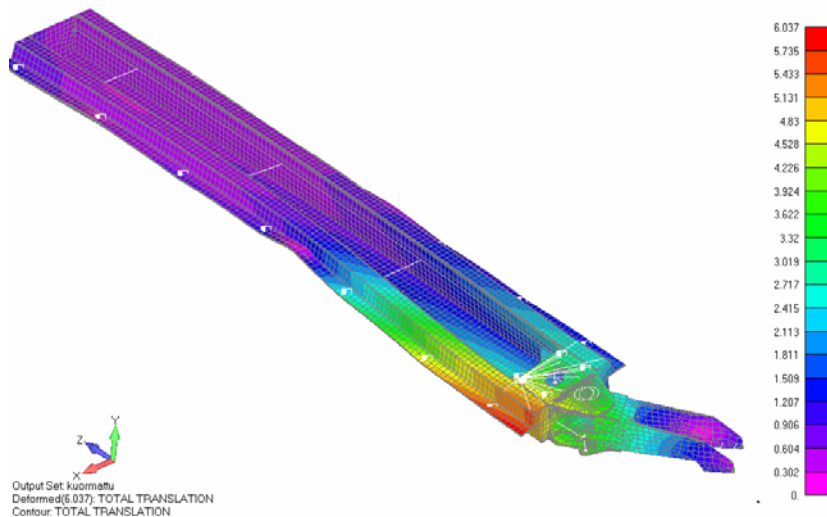
Kuvista 13 ja 14 nähdään, että jännitykset ovat suurimmillaan rungossa telin etummaisesta kiinnityspisteestä. Kiinnityspisteessä esiintyy pistemäisiä yli 150 MPa:n jännityksiä, mutta pääasiassa jännitykset jäävät noin 90 MPa:n tuntumaan. Muulla rungossa jännitykset ovat 10-50 MPa, nivelkohdassa jännitystaso jää suurimmillaan noin 20 MPa:n tuntumaan. Varmuus myötöön rungossa on noin $n=640/150=4,3$.

Aisan jännitystaso jää alhaiseksi. Rakenteen kannalta merkittävin jännitys sijaitsee aisan päälle tehdyn aukon reunamissa ja sen suuruus on noin 35 MPa. Varmuus myötöön on noin $n=355/35=10$

Tulosten perusteella rakenteen pienin varmuus myötämiseen on 4,3

6.3.2 Siirtymät

Kuvassa 15 on rakenteen kokonaissiirtymät ko. kuormitustapauksessa.

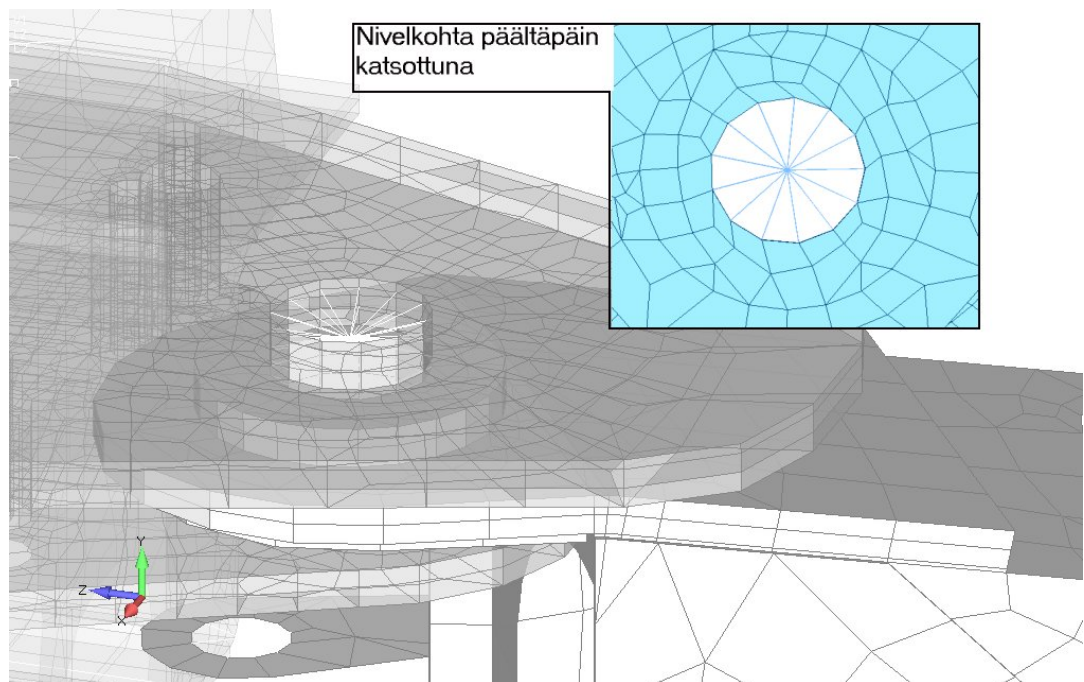


Kuva 15 Rakenteen kokonaissiirtymät. Suurin siirtymä on noin 6 mm, deformaatio on esitetty 50-kertaisena.

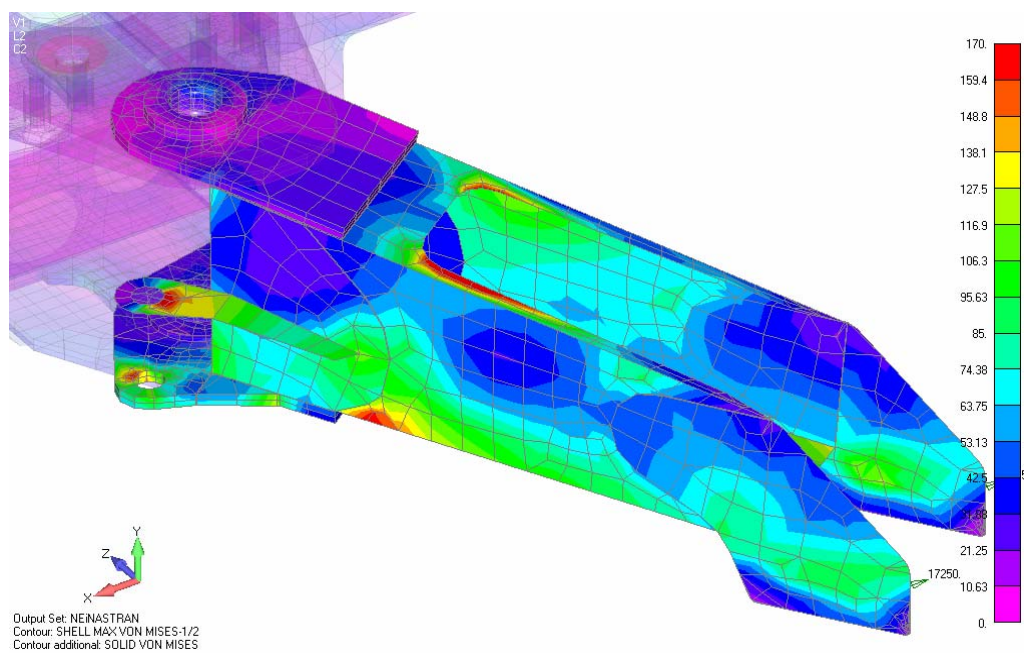
Kuvan 15 perusteella suurin kokonaissiirtymä on noin 6 mm. Suurin kokonaissiirtymä koostuu pääasiassa pystysuuntaisesta siirtymän komponentista.

6.4 Tuloksien varmennus

Tulosten varmentamiseksi ja nivelkohdan toimimisen varmistamiseksi laadittiin vaihtoehtoinen malli. Mallissa korvattiin osien välinen kontakti tekemällä palkkielementeistä kuvan 16 mukainen rakenne. Lineaarinen, vaihtoehtoinen malli ratkaistiin *NEi Nastran 9.1* ohjelmiston lineaarisella ratkaisijalla. Lineaarista ratkaisua varten mallin pitää ainoastaan on yhtenäinen ja reunaehdot ja kuormitukset asetettu niin, että malli ei ole jäykän kappaleen liikkeessä.



Kuva 16 Vaihtoehtoinen nivelen mallinnus palkkielementeillä. Palkeilla mallinnettu nivelkohta johtaa lineaariseen ratkaisuun



Kuva 17 Palkkielementeillä mallinnetun nivelkohdan aisan jännitykset kuormattuna ja traktorin vetäessä vaunua sivulle päin. Jännitykset rajattu arvoon 170 MPa.

Kuvassa 17 on vaihtoehdoisen mallin aisan von Misesin mukaiset resultanttijännitykset kuormitustapaus 1:n mukaisilla kuormituksilla.

Vaihtoehdoisen mallin aisan jännitykset täsmäävät kuvan 17 perusteella hyvin kontaktielementeillä mallinnetun rakenteen jännityksiin. Ainoastaan nivelkohdan jännitystaso jää huomattavasti kontaktimallin jännitysten alapuolelle. Syynä tähän on jäykällä palkkielementeillä mallinnetun kontaktin aiheuttama nivelkohdan jäykistys.

Varmennuksessa suoritettiin samalla karkea vertailu erilaisten mallinnustapojen välillä. Tuloksista nähdään, että hankalampi, kontaktielementeillä tehty malli ei välttämättä ole tarpeellinen kyseisen kaltaiselle rakenteelle. Erityisesti tämä korostuu tapauksissa, missä ei runkoa optimoida, vaan tarkastetaan karkeasti rakenteen jännitys- ja siirtymätiloja.

Sekä 2. että 3. kuormitustapauksien tuloksia varmennettiin käyttäen samaa vaihtoehtoista mallia kuin 1. kuormitustapaukselle. Tulokset vastasivat kontaktielementeillä luodun mallin tuloksia samalla tarkkuudella kuin 1. tapauksessa.

Analyttisillä kaavoilla tulosten tarkistus ja varmentaminen on suhteellisen hankalaa. Vaihtoehdoksi muodostui laskea aisan profiilin taivutuksen aiheuttamat jännitykset. Laskenta on suoritettu liitteessä 1. Tulosten perusteella elementtimallin antamat jännitykset aisassa vastaavat hyvin analyttisesti laskettuihin arvoihin.

6.5 Ratkaisualgoritmin vaikutus ratkaisuaikaan

Ratkaisuajan pituutta tutkittiin erilaisilla ratkaisualgoritmeilla. Algoritmeina käytettiin Newton-Raphson-, modifioitu Newton-Raphson-, Quasi-Newton- ja arc-length –algoritmeja. Kuormitustilanteena käytettiin tilannetta 1) ja inkrementtien

määränä kymmentä inkrementtiä. Tulokset ovat taulukossa 2. Ratkaisuaikat on normeerattu Newton-Raphson –menetelmään.

Taulukko 2. Ratkaisuaikat suhteutettuna Newton-Raphson -menetelmään

Ratkaisualgoritmi	Ratkaisuaika
N-R	1
Modifioitu N-R	0,78
Quasi Newton	0,84
Arc-length	0,8

Tuloksista nähdään, että modifioitu N-R –menetelmä oli ratkaisuaikaltaan lyhyin.

7 Jatkotutkimusaiheet

Rakenteen kuormitusten arviointi ilman käytännön mittauksia ja tietokonepohjaisia simulointimalleja on hankalaa. Arvioidut kuormitukset perustuivat käytännössä staattisiin kuormitustapauksiin ja nosturin suorituskykyyn. Kuitenkin vaunua käytetään vaihtelevissa ajo-olosuhteissa ja runkoon kohdistuu täten muuttuva-amplitudinen vaihtokuormitus. Näitä kuormituksia varten vaunulle pitäisi suorittaa mittauksia tai vaunusta ja sen liikkeistä pitäisi tehdä tietokonepohjainen simulointimalli. Yksinkertaisten dynaamisten kuormitusten laskeminen olemassa olevilla tiedoilla on käytännössä mahdotonta; syynä tähän on akseliston valmistajan puutteelliset tiedot jousituksen ja renkaiden jäykkyydestä. Jousien jäykkyyden ollessa selvillä voitaisiin mahdollisia pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä esimerkiksi maantieajossa arvioida.

Mittausten tai simulointimallin pohjalta voitaisiin suorittaa rungolle ja aisalle lujustekninen optimointi. Käytännössä mielenkiinnon kohteina olisivat rakenteen hitsit. Mittaustuloksista voitaisiin arvioida rakenteelle kohdistuva vaihtuva amplitudinen kuormitus. Fe-mallin ja esimerkiksi hitsien väsymiskestoisän määrittämiseen käytettävän hot spot –menetelmän avulla voitaisiin optimoida rungon

ja aisan levyvahvuudet ja muodot väsymiseen nähden. Nykyisillä kuormitustietojen pohjalta ei haluttu lähteä rungon osien väsymistarkasteluun. Nykyisessä rakenteessa jää osittain hyödyntämättä rungon lujan teräksen antamat mahdollisuudet.

8 Johtopäätökset ja suositukset

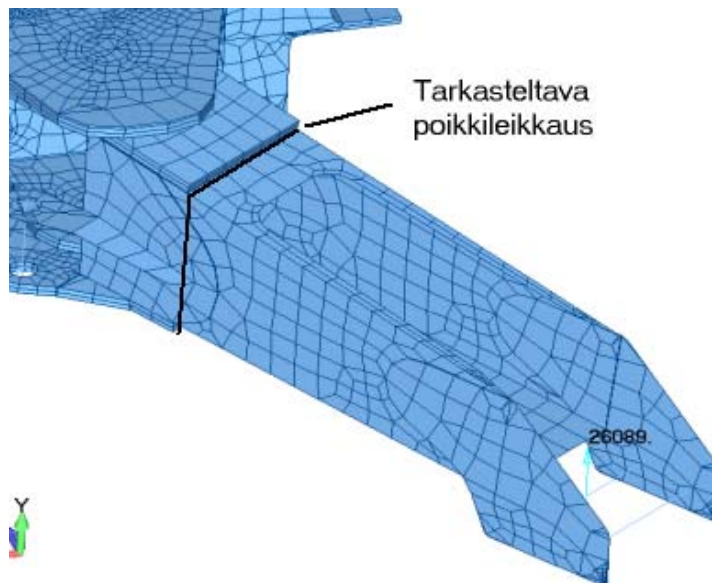
Rakenteen jännitystaso jää suhteellisen alhaiseksi. Ainoastaan kuormitusyhdistelmä 1:n aiheuttamat jännitykset laskevat varmuuskertoimen myötöön nähden alle 2:een. Kuormitustapaus 1 on ääritilanne, joita voidaan olettaa syntyvän harvoin vaunun käytössä.

Tulosten varmennuksella varmistuttiin että kontaktielementeillä tehty malli käyttäytyy halutusti. Tuloksista voitiin päätellä, että kontaktimallinnus ei ole tarpeen, jos nivelkohdan jännitykset eivät ole erityisen tarkastelun alaisina. Rungon ja aisan yleisempien jännitysten selvittämiseksi soveltuu myös yksinkertaisempi, palkkielementeillä toteutettu nivelen mallinnus.

Lähteet

1. Cook, Robert D et al. Concepts and applications of finite element analysis. USA: Hamilton Printing Company 2002. 719 s. ISBN 0-471-3560
2. Komzsik, Louis. What every engineer should know about computational techniques of finite element analysis. USA: CRC Press, Taylor and Francis group 2002. 265 s. ISBN 0-8493-3563-9
3. Kolar, Ramesh. Efficient solution methods for nonlinear finite element analysis. Doctoral dissertation, the University of Arizona 1984. 138 s.
4. Femap 9.3 User's Guide. 2007 UGS Corp.

Liite 1: Tulosten varmennus



Elementtimallista saatava kuormitus aisan päässä (Kuormitustapaus 3):

$$F := 26100\text{N}$$

Etäisyys aisan päästä tarkasteltavaan poikkileikkaukseen.

$$L := 750\text{mm}$$

Tarkasteltavan poikkileikkauksen korkeus:

$$h := 300\text{mm}$$

Tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys:

$$b := 280\text{mm}$$

Ainevahvuus uumassa ja laipassa

$$t := 10\text{mm}$$

Tarkasteltavan poikkileikkauksen taivutusvastus

$$W := \frac{b \cdot h^2}{6} - \left[\frac{(b - 2t) \cdot (h - 2t)^2}{6} \right]$$

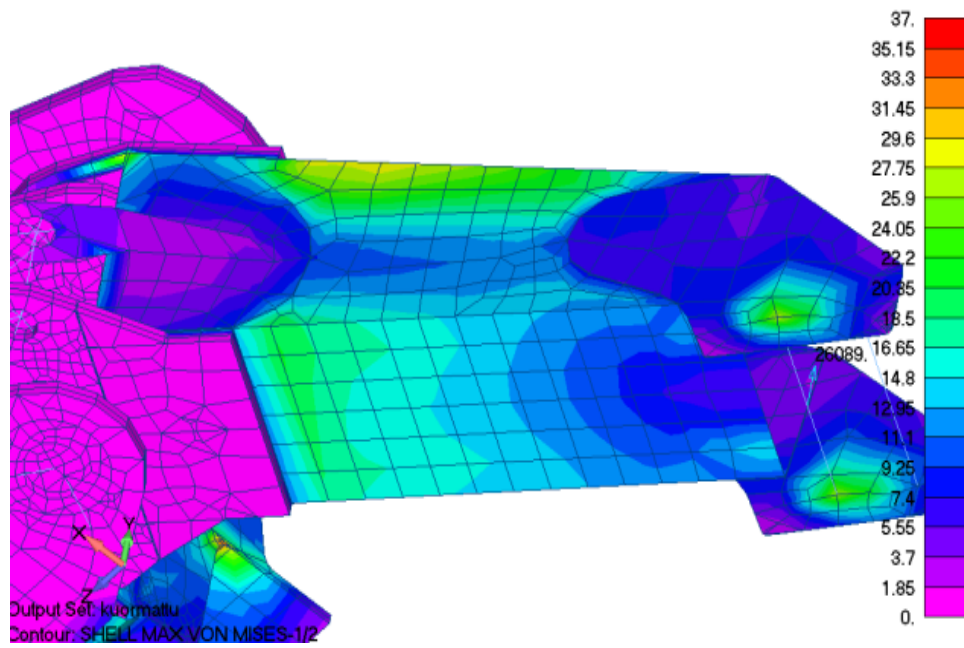
$$W = 8.027 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Taivutusmomentti poikkileikkauksessa:

$$M := F \cdot L$$

taivutuksen aiheuttama jännitys aisan alapinnalla:

$$\sigma := \frac{M}{W} \quad \sigma = 24.387\text{MPa}$$



Vertaamalla kuvan jännityksiä analyyttisesti laskettuihin jännityksiin nähdään, että jännitykset vastaavat toisiaan hyvin.