



Jätteenrepijän kuljettimen rungon opti- mointi

Atte Meriläinen

Opinnäytetyö, AMK
Toukokuu 2023
Konetekniikka (AMK)

Meriläinen, Atte

Jätteenrepijän kuljettimen rungon optimointi

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2023, 31 sivua

Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön aiheena oli kehittää toimeksiantajan Tana Oy:n jätteenrepijän kuljettimen runkoa. Tavoitteena oli optimoida runkoa sen kustannusten ja lujuuden perusteella. Kehittämisessä tuli kiinnittää erityistä huomiota valmistettavuuteen ja hyödyntää FEM-analyysia.

Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena. Tietopohjaa varten perehdyttiin elementtimenetelmän teoriaan ja valmistettavuuden DFMA-menetelmään. Lähtökohdan saamiseksi kuljettimen rungon kehittämiseksi analysoitiin alkuperäistä runkoa ensin FEM:llä. Analyysin tulosten perusteella runkoa voitiin kehittää poistamalla materiaalia kohdista, joissa sitä ei tarvittu ja korjaamalla valmistuksen ongelmakohtia. Lopuksi optimoitu runko analysoitiin FEM:llä uudestaan ja analyysin tuloksia verrattiin alkuperäiseen.

Kehittämistyön tuloksena yläkuljettimen rungon paino saatiin kevennettyä ja samalla materiaalikustannuksia pienennettyä 17,4 %. Lisäksi poistettiin valmistuksen ongelmakohtia ja vähennettiin kuljettimen osien määrää, millä on huomattava vaikutus kuljettimen valmistuskustannuksiin. Konkreettisenä tuloksena saatiin optimoidun rungon 3D-mallit ja valmistuspiirustukset.

Avainsanat (asiasanat)

Elementtimenetelmä, FEM, valmistettavuus, DFMA, 3D-mallinnus, kuljettimet

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Meriläinen, Atte

Optimization of waste shredder conveyor frame

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 31 pages

Degree Programme in Mechanical Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The subject of the thesis was to develop the conveyor frame of the waste shredder of Tana Oy. The goal was to optimize the frame based on its cost and strength. In the development, special attention had to be paid to manufacturability and FEM analysis had to be used.

The work was carried out as a development study. The knowledge base was based on the theory of the element method and the DFMA method. To provide a starting point for the development of the conveyor frame, the original frame was first analysed using FEM. Based on the results of the analysis, the frame could be improved by removing material where it was not needed and by correcting manufacturing problems. Finally, the optimised frame was re-analysed using FEM and the results of the analysis were compared with the original.

As a result of the development work, the weight of the upper conveyor frame and material cost was reduced by 17.4%. In addition, manufacturing problems were eliminated and the number of conveyor parts was reduced, which has a significant impact on the cost of manufacturing the conveyor. The concrete result was 3D models and manufacturing drawings of the optimised frame.

Keywords/tags (subjects)

Finite element method, FEM, manufacturability, DFMA, conveyors

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Kehittämistyön tausta ja tavoitteet	3
1.2	Tana Oy.....	4
2	Tietoperusta	4
2.1	Lujuuslaskenta.....	4
2.2	Elementtimenetelmä	5
2.3	DFMA-periaate	7
3	Tutkimusote ja -menetelmät.....	10
4	Nykytilanteen kuvaus	11
5	Alkuperäisen rungon FEM-analyysi	14
5.1	Määrittelyt ja valmistelut.....	14
5.1.1	Dynaaminen rasitustilanne	15
5.1.2	Yläkuljettimen epätasainen nostotilanne.....	16
5.1.3	Taitto-osan epätasainen nostotilanne.....	18
5.2	Alkuperäisen rungon FEM-analyysin tulokset.....	19
6	Rungon suunnittelu	22
7	Tulokset.....	25
7.1	Optimoidun rungon FEM-analyysin tulokset	25
7.2	Kustannussäästö.....	28
8	Pohdinta.....	29
8.1	Luotettavuus ja eettisyys	29
8.2	Johtopäätökset ja kehittämissuositukset.....	30
Lähteet	31	

Kuviot

Kuvio 1.	Tela-alustainen Tana Shark -jätteenrepijä (Tana tuotteet n.d.)	3
Kuvio 2.	Kuljettimen 3D-malli työasennossa	11
Kuvio 3.	Magneettikuljetin.....	12
Kuvio 4.	Yläkuljettimen taitto-osan runko	13
Kuvio 5.	Yläkuljettimen alaosan moninkertainen levyrakenne	13
Kuvio 6.	Dynaamisen tilanteen määrittelyt Ansysissa	16
Kuvio 7.	Epätasaisen nostotilanteen määrittelyt.....	17
Kuvio 8.	Yläkuljettimen taitto- ja alaosan välinen liitos.....	18

Kuvio 9. Taitto-osan analyysin määritykset	19
Kuvio 10. Dynaamisen kuormitustilanteen jännitys (yllä) ja taipuma (alla)	20
Kuvio 11. Epätasaisen noston jännitys ja taipuma	21
Kuvio 12. Taitto-osan epätasaisen noston jännitys ja taipuma	21
Kuvio 13. Ensimmäisiä kehitysversioita Ansysissa	23
Kuvio 14. Taitto-osan rungon lopullinen rakenne	23
Kuvio 15. Alaosan rungon lopullinen rakenne	24
Kuvio 16. Alkuperäinen alakuljetin	25
Kuvio 17. Uusi pohjalevy	25
Kuvio 18. Optimoidun rungon dynaamisen tilanteen tulokset	26
Kuvio 19. Optimoidun rungon epätasaisen nostotilanteen tulokset.....	27
Kuvio 20. Jännityskeskittymiä yläkuljettimen alaosassa.....	27
Kuvio 21. Optimoidun taitto-osan epätasaisen noston tulokset.....	28

Taulukot

Taulukko 1. Yläkuljettimen materiaalikustannuksen arvio.....	29
--	----

1 Johdanto

1.1 Kehittämistyön tausta ja tavoitteet

Ympäristötietoisuuden lisääntyminen on tuonut yhä enenevän halun uusiokäyttää jättemateriaalia. Kierrätettyä jätettä voidaan käyttää uusien tuotteiden valmistuksessa, mikä vähentää energian ja uusien raaka-aineiden tarvetta. Jätteen kierrättäminen myös vähentää siitä aiheutuvia ympäristöhaittoja. Kierrätystä tai kaatopaikalle loppusijoitusta varten täytyy erilaisia jätteitä muuttaa tiiviimpään tai raaka-ainemaisempaan muotoon, mikä tarkoittaa jätteen repimistä pieniksi palasiksi. Tähän tarpeeseen on Tana kehittänyt Shark-repijämalliston. Jätteenrepijoiden tarve tulee tulevaisuudessa kasvamaan entisestään kierrättämisen yleistyessä maailmalla. Näillä globaaleilla markkinoilla pärjätäkseen on Tanan jatkuvasti kehitettävä repijöidensä kilpailukykyä.

Erytynen kehitystarve Tanan jätteenrepijässä oli sen kuljettimessa. Kuljettimen tehtävänä on kuljettaa revitty jättemateriaali pois repijästä haluttuun paikkaan. Kaksiosainen kuljetin koostuu ala- ja yläkuljettimesta. Repijän sisällä oleva alakuljetin ottaa vastaan revityn materiaalin ja siirtää sen yläkuljettimelle (ks. kuvio 1 oikealla), joka kasaa materiaalin kekkoon.



Kuvio 1. Tela-alustainen Tana Shark -jätteenrepijä (Tana tuotteet n.d.)

Kuljettimen toimintaan, ominaisuuksiin tai varusteisiin ei puututtu tässä työssä, vaan opinnäytetyön aihe rajautui kuljettimen runkoon. Kehittämiselle oli tarvetta, koska runko oli lähtötilanteessa

tarpeettoman monimutkainen ja kallis valmistaa. Kehittämistyön tavoitteena oli optimoida runkoa sen kustannusten ja lujuuden kannalta. Konkreettisenä lopputuloksena haluttiin optimoidun rungon 3D-mallit ja työpiirustukset. Tarkastelemalla kuljettimen runkoa FEM-analyysillä, saatiin tietoa, jonka pohjalta rakennetta voitiin yksinkertaistaa siten, että se on kuitenkin edelleen tarpeeksi luja. Koska suurin osa rungon valmistuksen kustannuksista tulee työtunneista, kiinnitettiin optimoinnissa erityistä huomiota valmistettavuuteen. Tutkimuskysymykseksi muotoiltuna opinnäytetyössä haluttiin siis selvittää, miten kuljettimen runkoa pitäisi muuttaa, jotta sen valmistuksen kustannukset pienisivät ja se pysyisi edelleen tarpeeksi lujana.

1.2 Tana Oy

Tana Oy on suomalainen ympäristötekniikan ja jätehuollon aloille keskittyvä yritys, joka tarjoaa laitteita ja ratkaisuja kiinteän jätteen käsittelyyn. Tana perustettiin vuonna 1971, jolloin sen ensimmäinen tuote oli tavallisen traktorin pohjalta rakennettu kaatopaikkajyrä. Nykyään Tana on kasvanut globaaliksi toimijaksi ja se on yksi maailman johtavista kiinteän jätteen käsittelyyn tarkoitettujen koneiden valmistajista. Kaatopaikkajyrien lisäksi Tana valmistaa nykyään myös jätteenrepijöitä, kiekoseuloja ja tuulierottimia, ja niitä myydään yli 50 maahan. (Tana from waste to value n.d.; Tanan tarina n.d.; Tana tuotteet n.d.; Tietoa meistä n.d.)

Yrityksen nimi ja tuotekatalogi on vuosien aikana vaihdellut, mutta toiminta on vielä globaaliksi kasvamisen jälkeenkin keskittynyt Jyväskylään, jossa Tana perustettiin. Pääkonttorin lisäksi Jyväskylässä sijaitsee Tana R&D Center eli tuotekehityskeskus, jossa valmistetaan tuotteiden prototyyppit. Myös tuotteiden varsinainen valmistus oli Jyväskylässä Vaajakoskella Tanan omalla konepajalla, mutta vuonna 2008 Tanan valmistustoiminta päätettiin ulkoistaa, jotta voitiin tehostaa toimintaa ja keskittyä asiakkaiden tarpeisiin. (50 vuotta arvoa jätteestä n.d.; Tietoa meistä n.d.)

2 Tietoperusta

2.1 Lujuuslaskenta

Hietikon (2021a) mukaan lujuuslaskenta kohdistuu aina konkreettiseen tuotteeseen ja se on nykyään lähes jokaisen tuotteen kehityksessä osana. Lujuuslaskenta on luonteeltaan analyyttinen tie-

teenala, jolla tarkoitetaan sitä, että laskennassa analysoitavia muuttujia verrataan ennalta määritettyihin reunaehtoihin. Tätä reunaehtoien määrittystä taas kutsutaan synteeksi. Tuotesuunnittelu on iteratiivinen prosessi, joka jakaantuu toisiaan seuraaviin synteesi- ja analyysivaiheisiin. Lujuuslaskenta on tyypillinen analyysivaiheen tehtävä. Tyypillisiä ominaisuuksia, joita halutaan analysoida ovat esimerkiksi jännitys, muodonmuutos, stabiliteetti ja kuluminen. (Hietikko 2021a, 9, 12–14.)

Lujuuslaskennalla halutaan varmistaa, että tuotteen rakenne on riittävän luja, että se toimii halutussa käyttötarkoituksessa, mutta ei toisaalta ole myöskään tarpeettoman painava ja kallis. Laskentaa tarvitaan myös, koska on ehdottoman tärkeää varmistua tuotteen turvallisesta ja luotettavasta toiminnasta sen käyttöiän aikana. Puutteellisesti tai piittaamattomasti tehdyillä laskelmilla voi olla erittäin vakavia seurauksia, esimerkkinä sillan sortuminen. Jotta tuotteeseen kohdistuvat rasitukset voidaan lujuuslaskennalla ennustaa, on tiedettävä siihen kohdistuvien kuormitusten suuruus, suunta ja taajuus, ja tuotteessa käytettyjen materiaalien mekaaniset ominaisuudet. Rasituksia analysoimalla tuotteelle valitaan sellaiset mitat ja materiaalit, että vauriota ja toimintakyvyn menetystä ei synny. Kolme yleisintä vauriomekanismia, joita pyritään estämään ovat liian suuret kimmoiset muodonmuutokset, pysyvän muodonmuutoksen syntyminen eli myötäminen ja väsymismurtuma. (Hietikko 2021a, 10, 13–14.)

2.2 Elementtimenetelmä

Tietokoneiden yleistyttyä ja edelleen niiden laskentakapasiteetin jatkuvasti kasvaessa on elementtimenetelmän (eng. Finite Element Method, FEM) käyttö lujuuslaskennassa yleistynyt. Menetelmällä voi mallintaa lähes millaisen kappaleen tai kokonaisuuden, millaisilla materiaaleilla ja kuormituksilla tahansa. Elementtimenetelmä on mahdollistanut monimutkaisten rakenteiden analysoinnin, joka oli ennen tietokoneiden aikaa käytännössä mahdotonta. FEM kehitettiin alun perin jännitysten ja taivutusten laskentaan, mutta se soveltuu myös esimerkiksi lämpö-, virtaus- ja värähtelylaskentaan. (Hietikko 2021a, 170.)

Elementtimenetelmä perustuu analysoitavan rakenteen jakamiseen pienempiin osiin eli elementteihin. Elementit yhdistyvät toisiinsa solmupisteissä ja muodostavat elementtiverkon. Solmupisteiden koordinaattien ja rakenteelle määrättyjen materiaaliominaisuuksien avulla muodostetaan jäykkyysmatriisi, joka yhdistetään kuormitukseen, jolloin voidaan laskea solmupisteiden siirtymät

ja edelleen rakenteen jännitykset. Elementtiverkkoa tihentämällä, eli lisäämällä solmupisteiden määrää, saadaan tuloksesta tarkempi. Tämä voi tarkoittaa jopa tuhansien yhtälöiden yhtälöryhmän ratkaisemista, joten laskenta on välttämätöntä suorittaa tietokoneella. (Hietikko 2021a, 170.) Koska elementtimenetelmällä ratkaistu ongelma on aina yksinkertaistettu, on ratkaisu vain likimääräinen (Rao 2005, 3).

Hietikon (2021a, 171–172) mukaan FEM-analyysi kulkee vaiheittain seuraavalla tavalla:

1. Rakenteen idealisointi analyysia varten
2. Elementtiverkon muodostaminen
3. Reunaehtojen muodostaminen
4. Kuormitusten muodostaminen
5. Laskenta
6. Tulosten tulkinta ja tarkastelu

Rakenteen idealisoinnilla tarkoitetaan mallin yksinkertaistamista niin, että analyysin vaatima aika ja laskentakapasiteetin tarve pienenevät. Yksityiskohdat, joilla ei ole analyysin tulosten kannalta merkitystä kannattaa jättää pois. Lisäksi kannattaa hyödyntää symmetriatasoja. Rajaamalla malli symmetriatasoon ja asettamalla siihen symmetriareunaehdot voidaan laskenta-aikaa lyhentää huomattavasti tulosten ollessa samat. (Hietikko 2021a, 172–173.)

Elementtiverkko muodostetaan usein automaattisesti suoraan CAD-ohjelmassa tai esikäsittelijään siirrettynä. Elementtiverkolle voidaan asettaa haluttu jako ja tiheys, jolloin ohjelma tekee verkotuksen automaattisesti. Koska tiheämmällä verkolla saa tarkemman tuloksen pidemmän laskenta-ajan kustannuksella, kannattaa verkkoa tihentää kriittisissä kohdissa rakennetta, joihin odotetaan suurta jännitystä tai muuta tarkasteltavaa suuretta. Verkotukseen liittyy olennaisesti myös elementtityypin valinta. (Hietikko 2021a, 172.) Kolmiulotteisen geometrian voi monissa tapauksissa yksinkertaistaa kaksi- tai yksiulotteiseksi. Esimerkiksi palkilla on todellisuudessa kolme ulottuvuutta, mutta mekaniikan teoriassa palkki on yksiulotteinen viiva. Sama pätee myös tangoille. Levymäiset rakenteet taas voidaan yksinkertaistaa litteiksi kaksiulotteisiksi kuori- tai levyelementeiksi. (Liu & Quek 2014, 5–6.)

Reunaehdoilla kuvataan rakenteen tuentoja ja kiinnityksiä. Kappale on aina tuettava jollain tavalla, jotta se ei liiku vapaasti, kun siihen kohdistetaan kuormituksia. Tuennat kuvataan kiinnittämällä

mallin solmupisteiden siirtymiä haluttuun suuntaan. Esimerkiksi niveltuki ei salli solmupisteen siirtymistä mihinkään suuntaan, mutta sallii kiertymän pisteen ympäri. Virheelliset reunaehdot ovat useimmiten syynä FEM-laskennan virheellisiin tuloksiin, joten ne tulee asettaa erityisen huolellisesti ja niin todenmukaisesti kuin mahdollista. (Hietikko 2021a, 172–173.)

Samoin kuormitusten asettaminen on toinen suuri ongelmakohta mallintamisessa. Kuormitukset ovat usein todellisuudessa varsin epämääräisiä ja monimutkaisia, joten niiden määrittämisessä joutuu käyttämään suurimittaisia yksinkertaistuksia ja ammattitaitoon perustuvaa tietoa. Kuormitukset voidaan tyypillisesti syöttää suoraan malliin pistekuormina viivoille, tai pinnoille. Lisäksi voidaan ottaa huomioon tilavuuskuormia, kuten oma paino tai kiihtyvyydestä johtuva kuorma. (Hietikko 2021a, 173.)

Kun kaikki nämä määritykset on tehty ja lisäksi asetettu materiaaliominaisuudet kuten kimmokerroin ja Poissonin vakio, sekä elementtityypin mukaan mahdollisesti esimerkiksi poikkipintasuureet ja levyn paksuudet, voidaan suorittaa laskenta. Laskenta kestää mallin monimutkaisuudesta ja tietokoneen tehosta riippuen sekunneista tunteihin. Analyysi on tyypillisesti staattinen ja lineaarinen, tarkoittaen sitä, että kuormat ovat staattisia ja että jännitykset eivät ylitä materiaalin suhteellisuusrajaa. Nykyisin on kuitenkin yhä useammin mahdollista suorittaa myös epälineaarisia tai dynaamisia analyyssejä. Lisäksi voidaan analysoida esimerkiksi rakenteen stabiilisuutta. (Hietikko 2021a, 173–174.)

Laskennan valmistuttua päästään tarkastelemaan tuloksia. Tyypillisesti ollaan kiinnostuneita muodonmuutoksista ja jännityksistä. Muodonmuutokset esitetään yleensä solmupisteiden siirtymien avulla ja ne voidaan erotella eri akselien suuntaisiksi. Jännitykset lasketaan solmupisteisiin, joista ne tasoitetaan koko rakenteen alueelle ja esitetään visuaalisesti tyypillisesti väripintoina. FEM-laskenta on yhä helppokäyttöisempää ja monien ulottuvilla, mutta virheiden tekeminen on hyvin helppoa. Siksi analyysin tuloksia on tarkasteltava kriittisesti ja pyrittävä varmistamaan toisella menetelmällä. (Hietikko 2021a, 174.)

2.3 DFMA-periaate

Kutzin (2014, 56–57) mukaan design for manufacturing and assembly (DFM&A), eli suomeksi valmistettavuus ja kokoonpantavuus on tekniikka, jolla pyritään pienentämään tuotteen kustannuksia

heti suunnittelun alusta alkaen, ymmärtämällä tuotteen valmistuksen ja kokoonpanon vaiheet ja ottamalla ne huomioon. Samaan tekniikkaan viitataan myös lyhenteellä DFMA (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, 1). DFMA-prosessi koostuu kahdesta osasta: design for assembly (DFA) ja design for manufacturing (DFM). DFA keskittyy tuotteen kokoonpanon aiheuttaman työkustannuksen pienentämiseen ja DFM tarkastelee yksittäisten osien valmistusprosessia ja niiden valmistuskustannusta ja läpimenoaikaa. (Kutz 2014, 57.)

DFMA:n peruseriaate tiivistettynä on tuotteen osien lukumäärän vähentäminen, ja loppujen osien suunnittelu siten, että niiden valmistus on mahdollisimman helppoa ja niitä on vaivatonta käsitellä ja asentaa kokoonpanovaiheessa. Tuotteen osia ja prosesseja integroimalla voidaan vähentää kokoonpanotyötä ja kustannusta. (Kutz 2014, 56–57.) DFMA-periaatetta tulisi noudattaa heti projektin konseptisuunnittelusta alkaen, koska yli 70 % tuotteen lopullisista kustannuksista määrittyy tuotteen suunnitteluvaiheessa. Mitä myöhemmin tuotteeseen tehdään muutoksia sen kehityksen aikana, sitä enemmän siitä aiheutuu kustannuksia. Siksi valmistus ja kokoonpano on otettava huomioon alusta alkaen. Vaikka DFMA:n käyttö suunnittelussa lisää suunnitteluprosessin kestoa hieman, tuotteen elinkaaren kokonaiskustannuksessa saatu säästö on sen arvoista. (Boothroyd ym. 2011, 7–8; Kutz 2014, 57.)

DFA

Hietikon (2021b) mukaan kokoonpantavuuden tärkein periaate on osien määrän minimointi, koska jokainen osa lisää tuotteen kustannuksia eksponentiaalisesti. Pois jätettyä osaa ei koskaan tarvitse suunnitella, valmistaa, testata, varastoida, jne. (Hietikko 2021b, 170.) Osien poisjättäminen todennäköisesti monimutkaistaa jäljelle jääviä osia, mutta Boothroydin ja muiden (2011, 5–6) mukaan yhdellä monimutkaisella osalla saadaan useimmiten suuremmat säästöt kuin usealla yksinkertaisella osalla. Jäljelle tulisi siis jäädä ainoastaan välttämättömät osat. Boothroyd (2011) esittää teoreettisen ideaalitalanteen, jossa kaikki osat yhdistetään, paitsi jos osa täyttää jonkin kriteerin seuraavasta kolmen kohdan listasta:

1. Osan täytyy liikkua suhteessa kokoonpanon muihin osiin.
2. Osan täytyy olla eri materiaalia kuin muut osat, tai eristetty muista osista (esim. sähköeristys tai värinän vaimennus).
3. Osan on oltava erillinen välttämättömän kokoonpano- tai purkutoimenpiteen takia. (Boothroyd ym. 2011, 10–11, 82.)

Boothroyd ja muut (2011, 82) toteavat kuitenkin, että näissä kriteereissä ei ole otettu huomioon yleisiä suunnittelun tai huollettavuuden vaatimuksia. Lempiäinen ja Savolainen (2004, 70) tähdentävätkin, että hyväksyttävä syy erilliselle osalle voi olla esimerkiksi valmistustekninen syy. Hietikko (2021b, 171) nostaa esille myös osan irrotettavuuden huollon takia. Lempiäinen ja Savolainen (2004, 70) korostavat vielä kriteerien teoreettisuutta toteamalla, että kaupallisiin tuotteisiin suunnitellaan aina tarkoituksella turhia osia muun muassa ulkonäköseikkojen takia.

Muun muassa Boothroyd (2011) on tutkinut kokoonpantavuuden teoriaa paljon ja kehittänyt yksityiskohtaisia ohjeita eri kokoonpanomenetelmiä varten suunnitteluun. Tarkkoja sääntöjä ei ole tässä syytä käydä läpi, mutta Hietikko (2021b) tiivistää osien vähentämisen lisäksi tärkeimmät yleiset periaatteet seuraavasti:

- Osat tulee suunnitella siten, että ne voi asentaa vain yhdellä tavalla, jotta kokoonpanossa ei voi tulla virhettä.
- Osien tulisi asemoitua itsestään
- Osien tulisi olla mahdollisimman symmetrisiä.
- Tulisi välttää takertuvia tai liukkaita osia ja liian pieniä tai suuria osia.
- Tuotteella tulisi olla selkeä runko-osa, joka pysyy kokoonpanossa paikallaan itsestään. (Hietikko 2021b, 170.)

Kaikella pyritään siis siihen, että kokoonpano on mahdollisimman helppoa, eli nopeaa, ja virheitä ei pääse syntymään.

DFM

Polin (2001) mukaan DFM on periaate, jolla pyritään tekemään osien ja tuotteiden valmistuksesta helpompaa ja edullisempaa. Tähän voidaan lukea mikä tahansa osa suunnitteluprosessia, jossa tuotteen valmistuksesta nousevat ongelmat vaikuttavat suoraan suunnitteluun. DFM:n pitäisi olla osa koko suunnitteluprosessia heti alusta alkaen. (Poli 2001, 2.) Myös Lempiäinen ja Savolainen (2004) määrittävät käsitteen samalla tavalla ja korostavat vielä käsitteen laajuutta. DFM:n apuvälineinä käytetään peruseriaatteita, tarkistuslistoja, suosituksia ja peukalosääntöjä. DFM vaatii ehdottomasti tuotekehitys- ja valmistustiimien yhteistyötä. (Lempiäinen & Savolainen 2004, 13.) Luonnollisesti DFM-periaatteessa on olennaista suunnittelijoiden valmistusmenetelmien tuntemus (Hietikko 2021b, 172).

Samoin kuin DFA:ssa, Lempiäisen ja Savolaisen mainitsemat DFM:n suositukset ja tarkistuslistat ovat valmistusmenetelmäkohtaisia ja niitä on valtava määrä. Koneistukseen, hitsaamiseen, valamiiseen, levytöihin jne. on kaikkiin olemassa pitkiä listoja omia yksityiskohtaisia ohjeitaan, joita ei ole tässä tarpeellista esittää. Alle on kuitenkin listattu joitain Hietikon (2021b) tiivistämiä yleisiä periaatteita, joita voi soveltaa suureen osaan valmistusmenetelmiä.

- Suunnittele osat siten, että ne voidaan valmistaa jo käytössä olevilla ja standardoituilla koneilla ja työkaluilla.
- Käytä suunnittelupiirteille kuten reikäkoille, kierretyypeille ja taivutussäteille standardimittoja ja kokoja, jotta valmistuksessa tarvitaan mahdollisimman vähän erilaisia työstövaiheita ja työkaluja.
- Valitse toleranssit oikein. Tarpeettoman tiukkojen toleranssien valmistamiseen saataan tarvita erikoistyyppivaiheita ja työkaluja.
- Ota huomioon kokonaisuus, koska aina halvin mahdollinen osa ei ole edullisin koko tuotteen kustannusten kannalta.
(Hietikko 2021b, 172–173.)

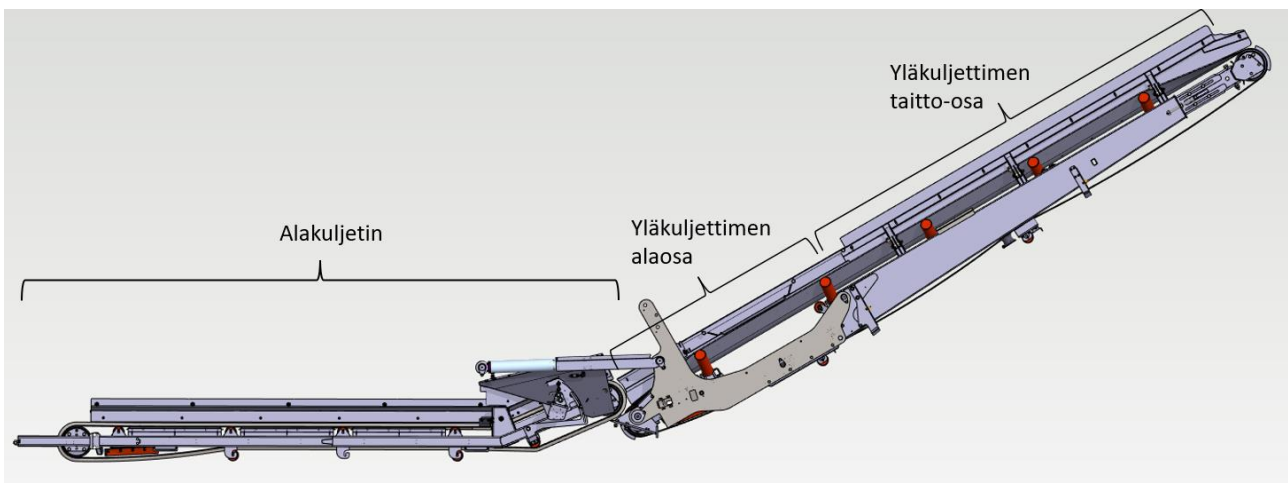
3 Tutkimusote ja -menetelmät

Kanasen (2015) mukaan tutkimusote on kokoelma aineistonkeruun ja analysoinnin menetelmiä, joilla tuotetaan ratkaisu tutkimusongelmaan. Tutkimusote täytyy valita perustellusti tutkimusongelman mukaan, jotta saadaan oikeanlaista aineistoa. Tutkimusotteet jaotellaan yleisesti laadulliseen eli kvalitatiiviseen ja määrälliseen eli kvantitatiiviseen tutkimukseen. Lisäksi on tutkimusstrategioita kuten case-, kehittämis- ja toimintatutkimus, jotka hyödyntävät sekä laadullisen että määrällisen tutkimuksen menetelmiä. (Kananen 2015, 63–64, 67.)

Tämä opinnäytetyö on tyypiltään tutkimuksellinen kehittämistyö ja tutkimusote on kehittämistutkimus. Kehittämistutkimus sopii parhaiten, koska opinnäytetyön tavoitteena on saada aikaan muutos. On ongelma, johon halutaan konkreettinen ratkaisu. Kanasen (2012) mukaan kehittämistutkimuksen tarkoitus on muutos, kun taas perinteisen laadullisen tai määrällisen tutkimuksen tarkoitus on ymmärtää, yleistää ja ennustaa (Kananen 2012, 27). Kehittämistutkimus tukeutuu aina teoriaan ja siinä on oltava tutkimuksellinen ote, jotta se olisi tutkimusta, eikä vain kehittämistyötä (Kananen 2012, 43).

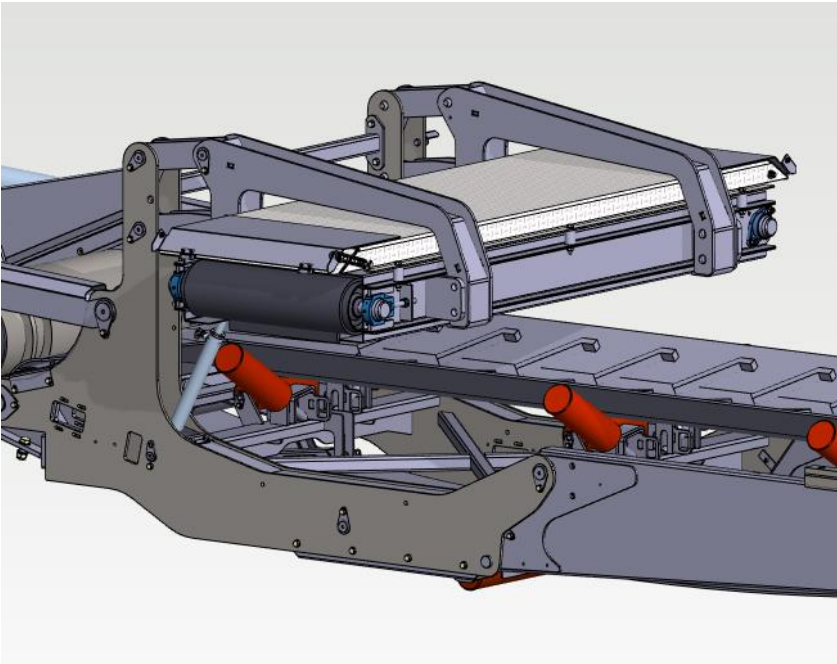
4 Nykytilanteen kuvaus

Kuljettimen rakenne on esitetty kuviossa 2. Kuljetin jakautuu ylä- ja alakuljettimeen. Repijän sisällä oleva alakuljetin siirtää revityn materiaalin yläkuljettimelle, jonka kulma on säädettävissä. Työskentelyasennossa, eli kun revintä on käynnissä, yläkuljetin on noin 30 asteen kulmassa. Lisäksi kuljettimen voi kääntää vaaka-asentoon ja kuljetusasentoon. Kuljetusasentoa varten yläkuljetin jakautuu vielä nivelpisteestä taitto- ja alaosaan, jolloin taitto-osa lepää repijän päällä, eikä rasitu, kun repijää siirretään.



Kuvio 2. Kuljettimen 3D-malli työasennossa

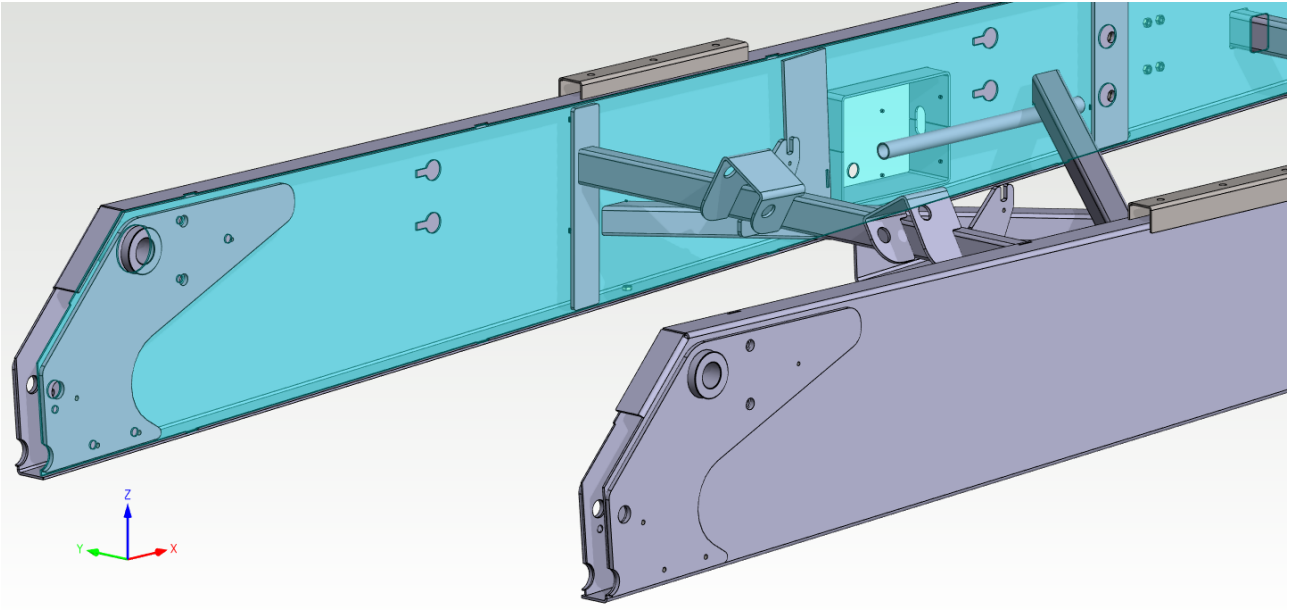
Yläkuljettimen alaosaan kiinnittyy lisäksi poikittaisessa suunnassa kulkeva erillinen magneettikuljetin, joka on esitetty kuvioissa 3. Magneettikuljettimen tehtävä on poimia revitystä materiaalista metalli ja siirtää se sivulle pois kuljetinhihnalta. Magneettikuljetin kuitenkin rajautui opinnäytetyön ulkopuolelle.



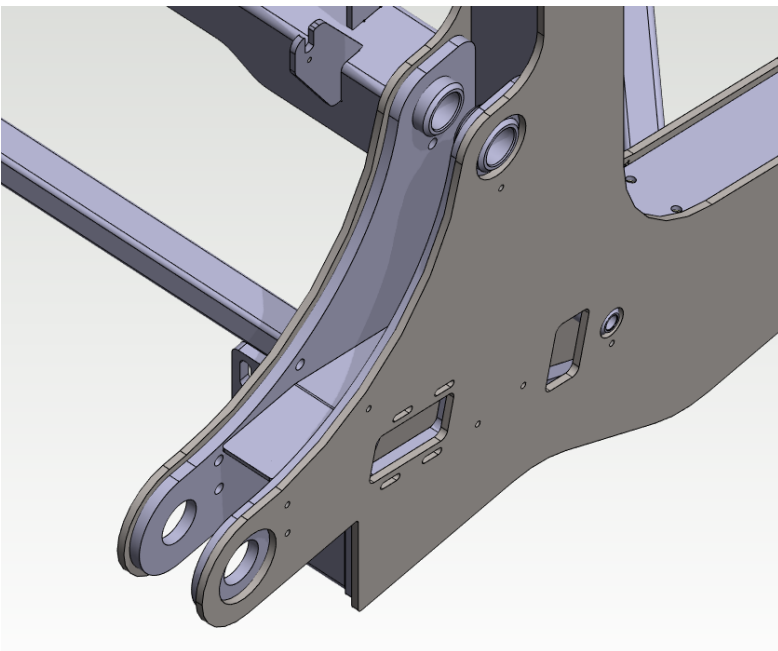
Kuvio 3. Magneetikuljetin

Kuljettimen runko on valmistettu S355-rakenneteräksestä, koska sillä on hyvä 355 MPa:n myötölujuus ja sitä on hyvin saatavilla kohtuulliseen hintaan. Kun kuljetin on aikanaan suunniteltu, sen rungon lujuutta ei ole tarkasteltu FEM-analyysillä, jonka vuoksi epäilyksenä oli, että rungosta on tehty tarpeettoman massiivinen, ja siitä olisi mahdollista poistaa materiaalia ja osia ilman että toiminta kärsisi. Tarkastelemalla runkoa FEM-analyysillä, rakennetta voisi optimoida poistamalla materiaalia kohdista, joihin ei kohdistu suurta jännitystä.

Lisäksi oli tiedossa joitakin valmistuksen ongelmakohtia, joihin toivottiin ratkaisua. Yläkuljettimen taitto-osan rungon varsissa on kotelomainen rakenne, joka on tehty hitsaamalla U:n muotoon taivutetun levyn sisälle toinen levy (korostettu sinisellä kuviossa 4). Levyn kampeaminen taivutetun levyn sisälle on hankalaa ja pitkät hitsausseamat aiheuttavat rakenteen vetelyä. Sama vetelyongelma suuren hitsimäärän takia tulee myös nivelpisteiden kohdalla olevista vahvistuslevyistä. Kotelorakenteen molemmin puolin on hitsattu paksut levyt vahvistamaan nivelkohtaa. Samankaltainen moninkertainen levyrakenne on myös yläkuljettimen alaosassa (kuvio 5).



Kuvio 4. Yläkuljettimen taitto-osan runko



Kuvio 5. Yläkuljettimen alaosan moninkertainen levyrakente

5 Alkuperäisen rungon FEM-analyysi

Kuljettimen rungon optimoimiseen tarvittiin ensin tietoa alkuperäisen rungon käyttäytymisestä erilaisissa kuormitustilanteissa. FEM-analyysillä saatiin tietoa rungon eri osiin kohdistuvista jännityksistä ja rungon taipumasta. Tätä tietoa voitiin hyödyntää runkoa kehitettäessä poistamalla materiaalia sieltä, missä sitä ei tarvita. Myöhemmin alkuperäisen FEM-analyysin tuloksia voitiin suoraan verrata optimoituun runkoon, jolle tehtiin analyysi samoilla asetuksilla. FEM-analyysi tehtiin Ansys -simulaatio-ohjelmiston avulla. Analyysi kohdistettiin vain yläkuljettimeen, koska alakuljettimeen ei kohdistu merkittäviä voimia.

5.1 Määrytykset ja valmistelut

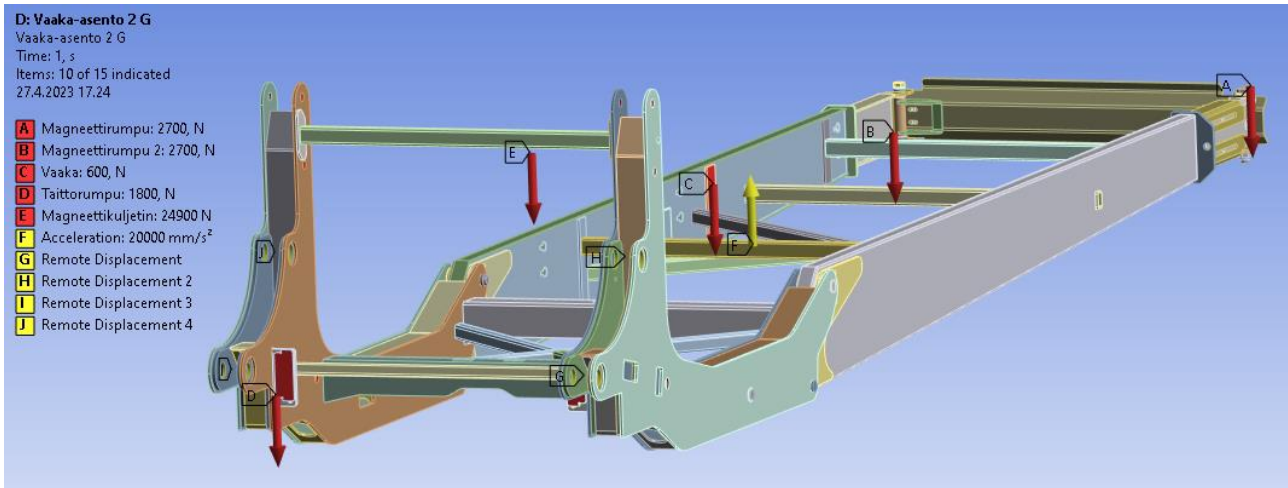
Jotta runkoa voitiin analysoida Ansysilla, täytyi sen 3D-malli tuoda Vertexistä, joka on Tanalla käytössä oleva CAD-ohjelma. 3D-mallin siirtoon käytettiin yleiskäyttöistä SAT-tiedostomuotoa, jota molemmat ohjelmat tukevat. Rungon olisi voinut myös mallintaa erikseen analyysia varten Ansysilla, mutta rungon monimutkaisen rakenteen takia siihen olisi mennyt niin paljon aikaa, ettei se ollut kannattavaa. Ansyihin siirrettyä mallia valmisteltiin analyysia varten poistamalla reikiä ja muita pieniä yksityiskohtia. Näiden poistaminen ei olennaisesti vaikuta lopputulokseen, mutta nopeuttaa laskentaa, parantaa verkottumista, ja helpottaa tulosten tulkintaa. Laskennan nopeuttamiseksi mallista poistettiin myös analyysin kannalta turhia osia, kuten varusteiden kannattimia. Mallille asetettiin niin tiheä verkko, kuin käytössä olleella lisenssillä ja tietokoneen laskentateholla oli järkevästi mahdollista. Ansysissa materiaaliksi määritettiin rakenneteräs, jonka lujuuslaskennan kannalta tärkeät ominaisuudet ovat kimmomoduuli 200 000 MPa, liukumoduuli 77 000 MPa ja Poissonin vakio 0,3. Arvot ovat likimain samat kuin S355-rakenneteräksellä, josta runko on valmistettu.

Luotettavien tulosten saamiseksi oli mietittävä tarkkaan, millaisia kuormitustapauksia simuloidaan. Peruskäyttötilanteessa kun revintä on käynnissä, yläkuljettimeen ei kohdistu merkittävää rasiusta. Revitty materiaali kuten kumi, muovi tai puu jakaantuu kuljettimen hihnalla ohuena kerroksena koko kuljettimen matkalle ja on melko kevyttä. Kuljetin siis kannattelee vain oman painonsa ja vähäisen revityn materiaalin painon, joten peruskäyttötilannetta ei päätetty simuloida.

5.1.1 Dynaaminen rasiutilanne

Mahdollinen kriittinen rasiutilanne saattaa tulla, kun repijää siirretään kuljettimen ollessa työ- tai vaaka-asennossa. Repijällä ajaminen on kielletty, jos kuljetin ei ole käännetty kuljetusasentoon, mutta ei tietenkään haluta, että kuljetin hajoaa, vaikka käyttäjä toimisikin ohjeiden vastaisesti. Tela-alustaisen repijän huippunopeus on vain 3 km/h, mutta epätasaisella alustalla ajaminen aiheuttaa vähäiselläkin nopeudella kuljettimeen kuormitusta. Dynaamisen tilanteen simuloimiseksi painovoima asetettiin kaksinkertaiseksi, mikä simuloi tilannetta, jossa kuljettimeen kohdistuu 2 g:n kiihtyvyyttä. Tämän ajateltiin olevan varmasti todellisuutta suurempi, joten tuloksissa on ylimääräistä varmuutta. Tilannetta simuloitiin kuljettimen ollessa vaaka-asennossa, koska silloin kuljettimeen kohdistuu painovoiman ansiosta suurempi rasitus kuin työasennossa.

Kuviossa 6 on esitetty dynaamisen tilanteen määritykset. Joitain painavia osia, jotka vaikuttavat tulokseen, mutta joista ei itsessään olla kiinnostuneita, korvattiin ulkoisilla voimilla, jotka myös asetettiin kaksinkertaiseksi painovoiman tapaan. Kuljettimen nivelpisteessä repijän rungon kanssa ja hydraulisynterien päissä on pallomaiset säteisnivellaakerit, jotka sallivat pyörimisen kaikkien akselien ympäri. Ansysissa nämä kohdat (kuviossa 6 kohdat G, H, I ja J) asetettiin pistemäisiksi tukiksi. Tuki sijaitsee laakerin keskipisteessä ja kohdistuu holkkien reikien pinnoille. Pistemäinen tuki sallii kiertymisen kaikkien akselien ympäri, mutta ei siirtymää mihinkään suuntaan. Hydraulisynterien kiinnityksessä (kohdat H ja J) kuitenkin sallittiin siirtymä laakerin akselin suuntaan, koska sylinterin molemmissa päissä on nivellaakerit, jolloin se ei voi vastustaa liikettä tähän suuntaan. Kaikki osat on määritetty täysin toisiinsa kiinnitetyiksi, eli kuin hitsatuiksi, mikä lyhentää laskenta-aikaa. Rungossa ei ole kriittisiä ruuviliitoksia, joita tarvitsisi analysoida tarkasti ja taitto-osan nivelkohta ei pääse tässä tilanteessa muutenkaan pyörimään, joten se kannattaa pitää kiinnitettyinä.



Kuvio 6. Dynaamisen tilanteen määitykset Ansysissa

5.1.2 Yläkuljettimen epätasainen nostotilanne

Toinen simuloitava ongelmatilanne on, kun kuljetin lähtee nostettaessa tai laskettaessa kiertymään vinoon. Ongelma on joskus esiintynyt aiemmin ja sen on arveltu johtuvan jumittuvista laakereista. Jotta varmistutaan, että kuljetin ei voi missään tilanteessa hajota, simuloidaan tilannetta siten, että toinen hydraulisylinteri vetää kuljetinta ylös vaaka-asennosta lähes täydellä voimalla, ja toinen sylinteri pysyy paikallaan. Näin pahan tilanteen ei kuitenkaan pitäisi olla käytännössä mahdollinen, koska sylinterit on kytketty rinnakkain samaan piiriin.

Hydraulisylinterin tuottama voima laskettiin yhtälöllä 1.

$$F = p \times A \quad (1)$$

missä F = sylinterin tuottama voima

p = paine

A = pinta-ala

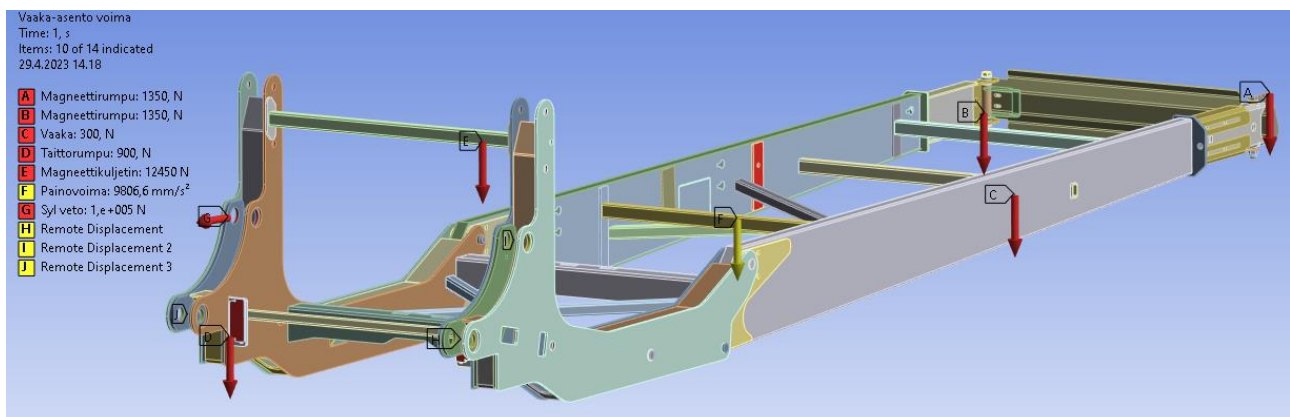
Koska kuljetinta nostettaessa hydraulisylinteri on miinusliikkeessä eli tekee työtä männänvarren puolella, lasketaan tarvittava pinta-ala yhtälöllä 2.

$$A = \pi * \frac{d_1^2}{4} - \pi * \frac{d_2^2}{4} \quad (2)$$

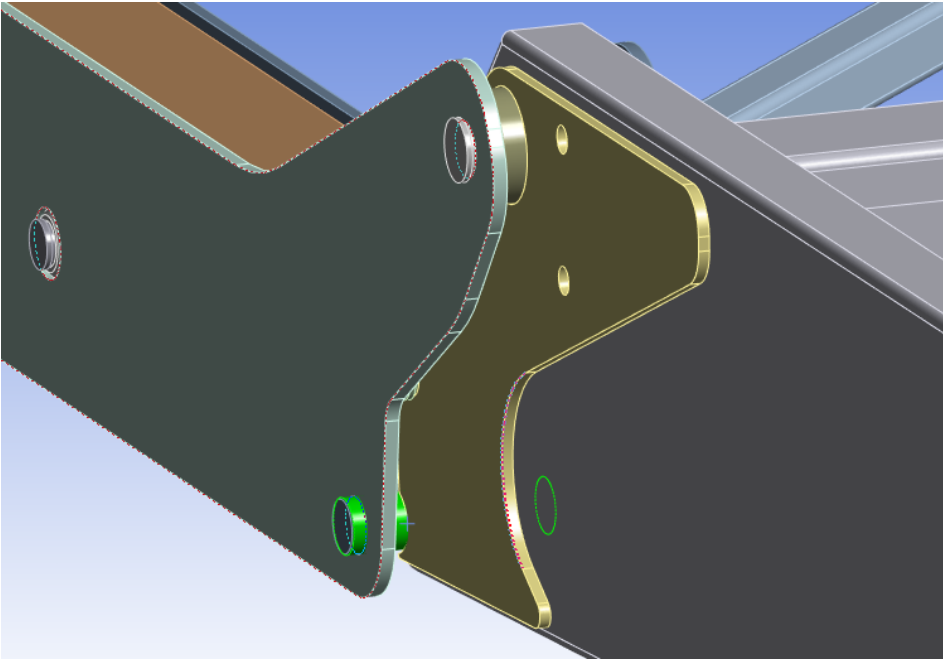
missä d_1 = männän halkaisija
 d_2 = männänvarren halkaisija

Sijoittamalla yhtälöihin sylinterin arvot $d_1 = 100$ mm ja $d_2 = 50$ mm, sekä paineen $p = 200$ bar = $200 * 10^5$ Pa, saadaan sylinterin miinusliikkeen tuottamaksi maksimivoimaksi 117 810 N. Analyysissä käytettiin pyöristettyä arvoa 100 000 N.

Epätasaisen nostotilanteen analyysissä käytettiin samoja määrittämiä kuin dynaamisessa tilanteessa muutamilla muutoksilla. Määrittämiä on esitetty kuviossa 7. Painovoima ja ulkoiset voimat ovat kaksinkertaisen sijaan normaalin suuruiset. Lisäksi toisen hydraulisynterän kiinnityksen pistemäinen tuki korvattiin 100 000 N voimalla sylinterin suuntaan. Osien kontakteja toisiinsa muutettiin siten, että taitto-osan rungon ja sen liikkeen pysäyttävän tapin välille (korostettu vihreällä kuviossa 8) määrittettiin kitkaton kontakti. Tämä antaa rungon liukua tappia pitkin, kuten todellisuudessa saattaa tapahtua, kun kuljetin nousee vinoon. Kaikista todenmukaisimman tuloksen saamiseksi myös itse nivelpisteeseen olisi tullut laittaa liukumisen salliva kontakti, mutta siinä vaiheessa analyysi oli niin monimutkainen, että Ansys ei ainakaan käytössä olleella lisenssillä sitä pystynyt ratkaisemaan. Nivelpisteen kiinnityksen ei kuitenkaan arvioitu suuresti vaikuttavan tulokseen.



Kuvio 7. Epätasaisen nostotilanteen määrittämiä

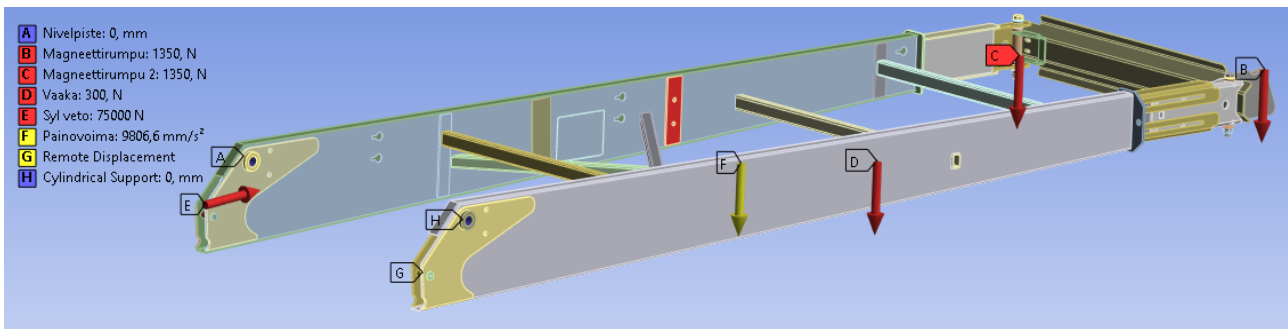


Kuvio 8. Yläkuljettimen taitto- ja alaosan välinen liitos

5.1.3 Taitto-osan epätasainen nostotilanne

Epätasaista nostotilannetta tarkasteltiin vielä erikseen pelkän taitto-osan osalta. Taitto-osaa nostettaessa, sen hydraulisyliinterit ovat plusliikkeessä, eli tekevät työtä koko männän pinta-alalla. Sijoittamalla yhtälöihin 1 ja 2 arvot $d_1 = 70$ mm ja $d_2 = 0$, sekä paineen $p = 200$ bar = $200 \cdot 10^5$ Pa, saadaan sylinterin maksimivoimaksi 76 696 N. Analyysissä käytettiin arvoa 75 000 N.

Analyysin määrittämisessä käytettiin samoja periaatteita kuin edellä kuvatuissa tilanteissa. Toisen hydraulisyliinterin paikalle on asetettu voima ja toisen kiinnityksessä on nivellaakerin takia piste-mäinen tuki. Yläkuljettimen taitto- ja alaosan nivelen kohdalla (kuvio 9 kohdat A ja H) taas on yksinkertainen liukulaakerointi, johon määritettiin sylinterimäinen tuki, joka sallii pyörimisen akselinsa ympäri ja siirtymän akselin suunnassa.



Kuvio 9. Taitto-osan analyysin määritykset

5.2 Alkuperäisen rungon FEM-analyysin tulokset

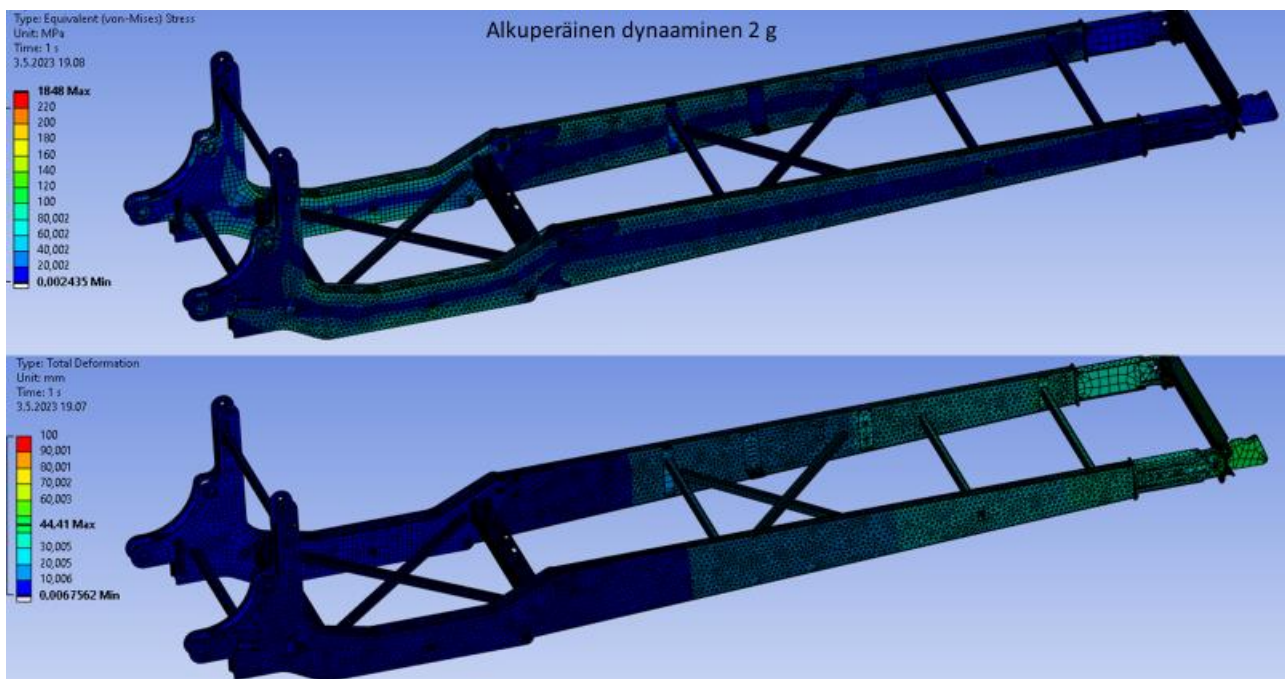
Tuloksissa tarkastellaan Von Misesin vertailujännitystä ja kokonaistaipumaa. Rakenteelle sallittua jännitystä määrittäessä halutaan etenkin varmistaa, että jännitys ei ylitä materiaalin myötölujuutta, jonka jälkeen materiaalissa tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia, eikä se enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa.

Dynaamisen tilanteen analyysissa sallittua jännitystä tulisi ehkä verrata materiaalin väsymislujuuteen. Väsymislujuus on raja, jonka alle jäävää dynaamista kuormitusta materiaali kestää loputtomasti. Väsymislujuus on aina huomattavasti alhaisempi kuin myötölujuus. Kuormituksen ei kuitenkaan odoteta vaihtelevan miljoonia kertoja, koska kuljettimen kuormittaminen tapauksen tavalla on kielletty.

Kaikkiin kolmeen kuormitustapaukseen päätettiin asettaa sama sallittu jännitys. Varmuuskertoimeksi asetettiin 1,5, joka huomioi kuormitusten epävarmuuden ja dynaamisen kuormituksen. Jakamalla S355:n myötölujuus 355 MPa varmuuskertoimella 1,5 saadaan sallituksi jännitykseksi 237 MPa. Sallitun taipuman määrittäminen kuormitustapauksille on sen sijaan hankalaa arvioida. Taipumaa voidaan kuitenkin käyttää ainakin tulosten vertailuun ja jäykkyyden arviointiin.

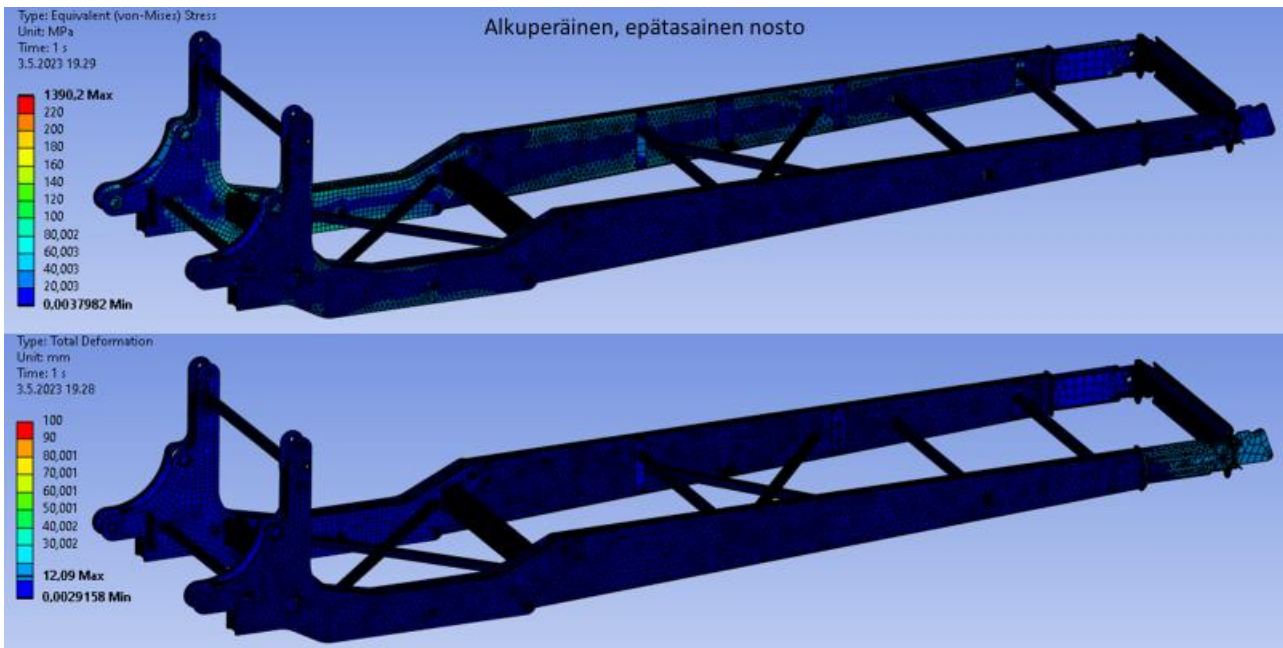
FEM-analyysien tuloksissa jännitys on esitetty visuaalisesti siten, että punainen väri tarkoittaa 220 MPa:n ylittävää jännitystä, josta värit vaihtuvat 20 MPa:n välein siten, että tummansininen väri on alle 20 MPa. Kokonaistaipuman tuloksissa punainen taas tarkoittaa yli 90 mm:n taipumaa, josta värit vaihtuvat 10 mm:n välein.

Dynaamisen tilanteen analyysin tuloksista kuviossa 10 nähdään, että kuljetin kestää kaksinkertaisen painovoiman aiheuttaman kuormituksen hyvin. Jännitykset ovat kauttaaltaan matalia. Taitto-osassa suurimmat jännitykset ovat kotelorakenteen reunoilla, jossa jännitys on pääsääntöisesti 40 ja 60 MPa:n välillä. Enemmän jännitystä kohdistuu kuljettimen alaosaan, joka kannattelee vapaana roikkuvan kuljettimen painoa. Alaosan varsissa jännitys liikkuu 50 ja 80 MPa:n välillä, nousten epä-jatkuvuuskohtissa jopa 120 MPa:iin. Koska jännitykset johtuvat rungon taipumisesta, juoksee rungon keskellä tummansininen viiva, jossa jännitys on lähellä nollaa, suurimpien jännitysten ollessa venyneessä yläreunassa ja puristuneessa alareunassa. Kuljetin taipuu päästään suurimmillaan 44 mm, mikä ei noin seitsemän metrin pituisessa kuljettimessa ole valtavasti.



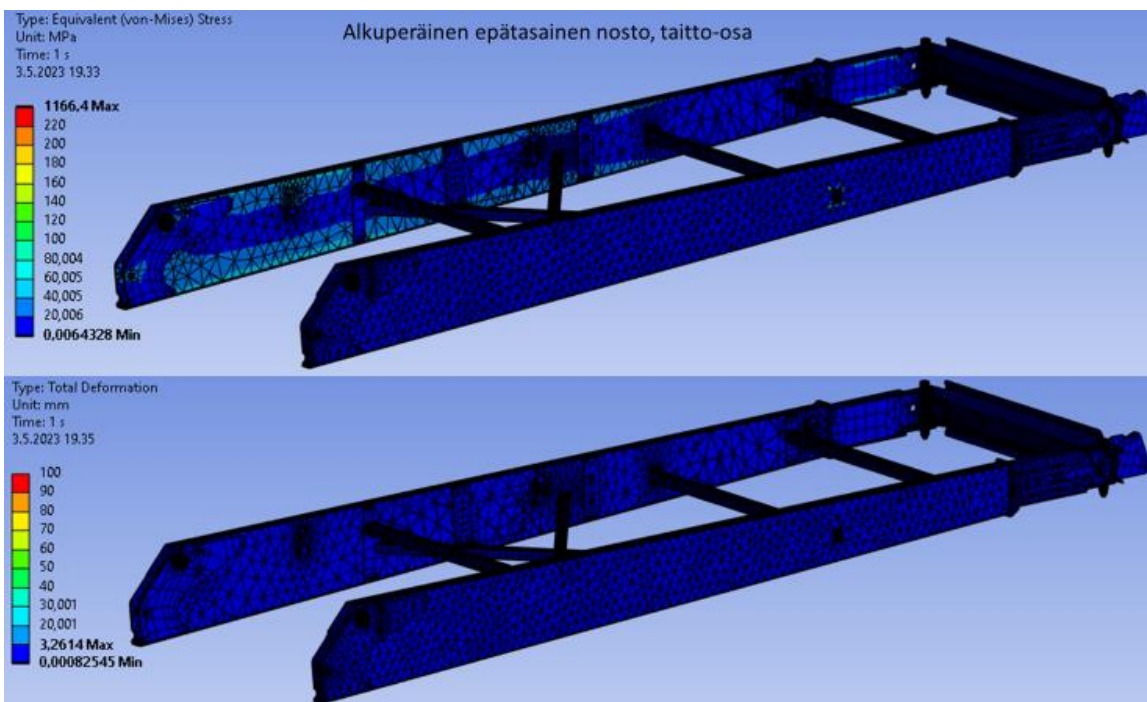
Kuvio 10. Dynaamisen kuormitustilanteen jännitys (yllä) ja taipuma (alla)

Kuvion 11 epätasaisen noston tuloksissa havaitaan, että jännitykset kohdistuvat lähinnä kuljettimen vasemmalle puolelle, minne asetettiin kuljetinta pystyyn vetävä voima. Jännitykset ovat alhaiset, nousten suurimmillaan vain 80 MPa:iin. Rungon taipumakin on hyvin vähäinen, vasemman puolen taipuessa ylös noin 7 mm ja oikean puolen taipuessa alas noin 11 mm. Kuljetin siis taipuu kiereen ja päiden ero on yhteensä noin 18 mm.



Kuvio 11. Epätasaisen noston jännitys ja taipuma

Taitto-osan analyysistä kuviossa 12 havaitaan samankaltaiset tulokset. Jännityksiä on vain hydraulisylinterin tuottaman voiman puolella, ja ne jäävät suurimmillaan vain 50 MPa:iin. Runko ei myöskään taivu juuri ollenkaan.



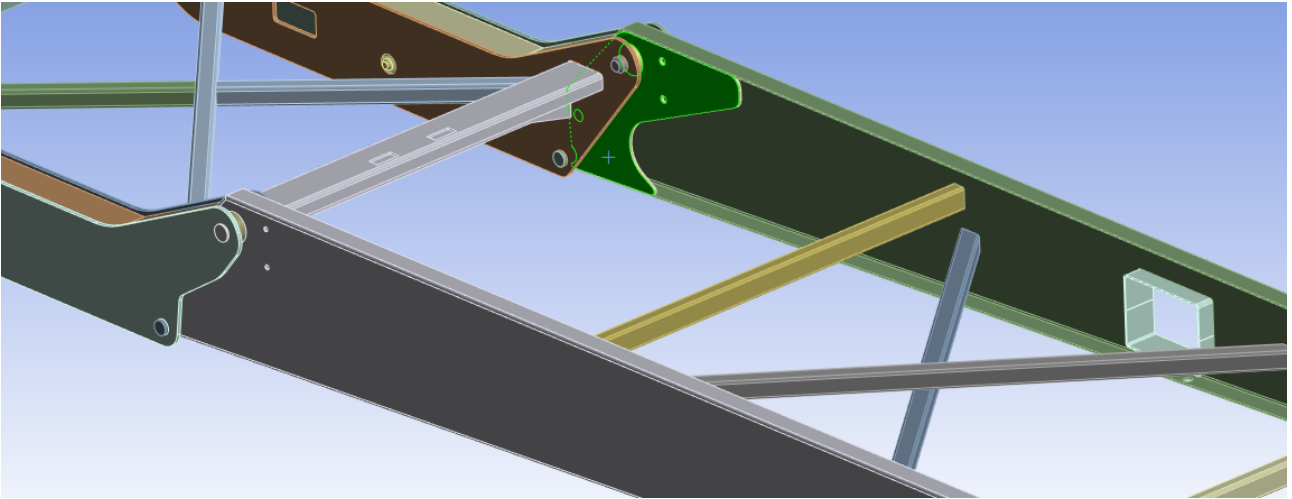
Kuvio 12. Taitto-osan epätasaisen noston jännitys ja taipuma

Alkuperäisen kuljettimen rungon FEM-analyysin tuloksista voitiin päätellä, että etenkin taitto-osan rakennetta oli mahdollista keventää, sillä siihen kohdistuu vain vähäistä jännitystä. Varsinkin nivelkohdan kaksinkertainen levyrakenne vaikuttaa ylivoimaisesti. Vaikuttaa myös siltä, että taitto-osan toinen ongelmakohta, taivutetun levyn sulkeva levy voitaisiin ehkä poistaa. Myös kuljettimen alaosan kaksinkertaiseen rakenteeseen kohdistuu todella vähän jännitystä. Tulosten perusteella voitiin alkaa suunnittelemaan runkoa kevyemmäksi ja valmistettavammaksi.

6 Rungon suunnittelu

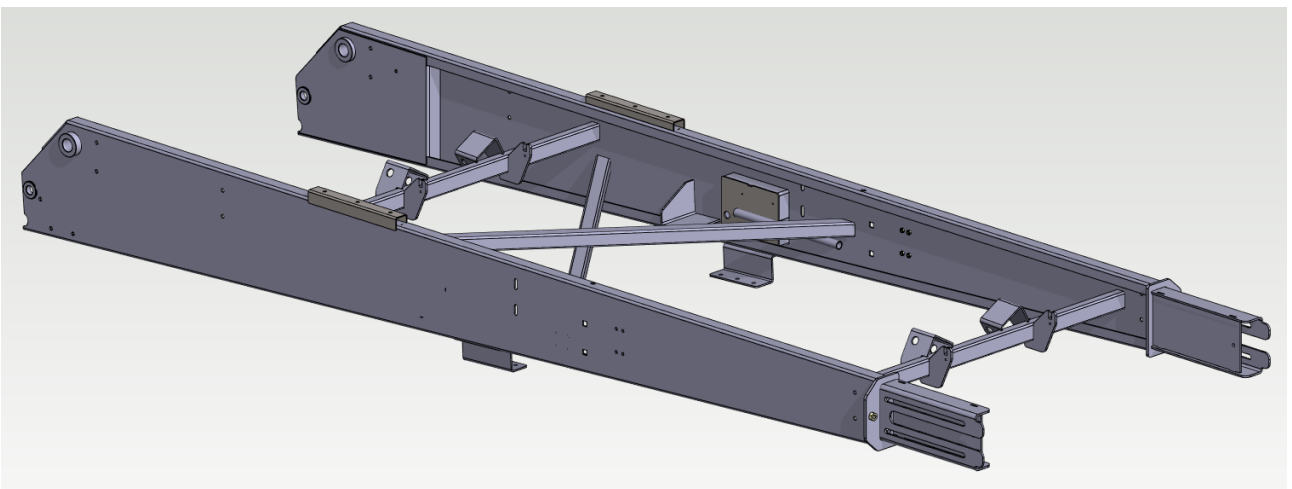
Alkuperäisen kuljettimen rungon FEM-analyysin tulosten ja tiedossa olevien valmistuksen ongelmakohtien perusteella lähdettiin suunnittelemaan runkoa edullisemmaksi. Mieleissä pidettiin myös DFMA-menetelmän periaatteet, etenkin osien määrän pienentäminen ja valmistusmenetelmien huomioiminen. Suunnittelu eteni iteratiivisesti siten, että runkoon tehtyjä muutoksia analysoitiin säännöllisesti FEM:llä, jolloin eri vaihtoehtojen lujuutta pystyi vertaamaan toisiinsa ja alkuperäiseen runkoon.

Luonnollisena lähtökohdiana oli kokeilla, miten kuljettimen runko käyttäytyisi, jos ongelmakohtina olleet levyt poistettaisiin. Alkuperäisen rungon FEM-laskentamallia muokattiin Ansysissa yksinkertaisesti poistamalla kyseiset levyt ja muokkaamalla muita osia hieman siten, että ne sopivat järkevästi yhteen. Kuviossa 13 nähdään, kuinka taitto-osan kotelorakenteen taivutetun levyn sisästä on poistettu levy ja nivelkohdasta on poistettu toiset paksut vahvikelevyt. Sisäpuoliset vahvikelevyt (korostettu vihreällä) jätettiin hyvin pienin muutoksin sulkemaan rungon pää. Tämän version analyysin tuloksista selvisi, että jännitykset eivät kasvaneet kovin paljoa, vaikka rungosta poistettiin merkittäviä osia. Lupaavien tulosten perusteella runkoa lähdettiin kehittämään tästä eteenpäin.



Kuvio 13. Ensimmäisiä kehitysversioita Ansysissa

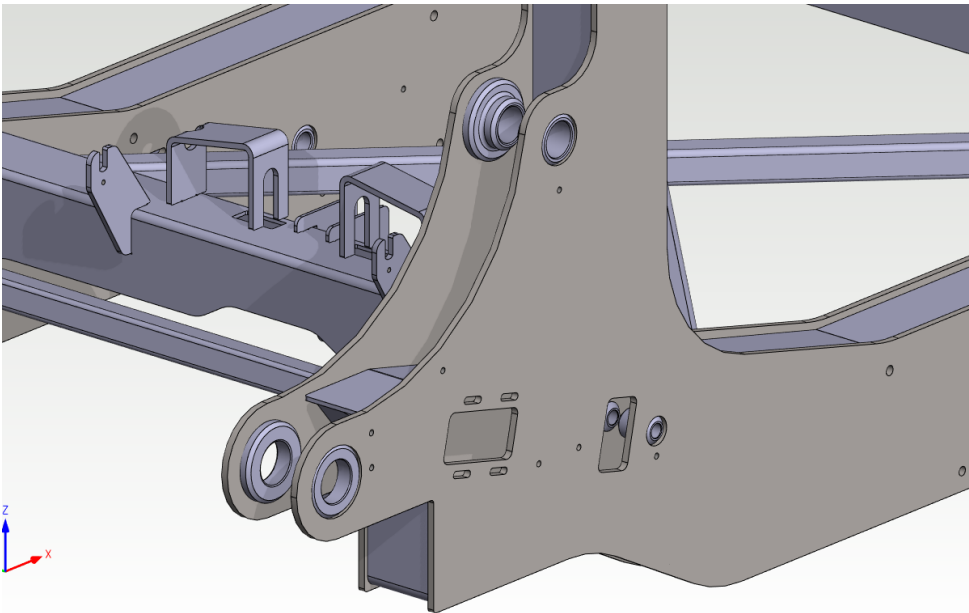
Kuljettimen taitto-osan rakenne kehittyi lopulta kuviossa 14 esitettyyn muotoon. Tärkeimpänä muutoksena U:n muotoisen taivutetun levyn reunat on taivutettu vielä toiset 90 astetta C:n muotoon. Tämä antaa rungolle lisää jäykkyyttä hyvin edullisesti verrattuna alkuperäiseen hitsattuun levyyn. Nivelkohtaa vahvistava levy on myös muotoiltu uudelleen ja sen toinen pää on taivutettu sisään siten, että se muodostaa suljetun kotelon. Kotelo estää veden ja lian pääsyn hankalasti puhdistettavalle alueelle, ehkäisten korroosiota. Lisäksi levyn paksuus vaihdettiin kahdeksasta neljään millimetriin, koska niin paksulle levyille ei ollut tarvetta ja se on nyt saman paksuinen kuin taivutettu C-levy. Taitto-osaa kääntävien hydraulisylinterien tapeille piti paksujen vahvistuslevyjen poistamisen takia tehdä holkit, mutta tämä on silti todennäköisesti edullisempi tapa.



Kuvio 14. Taitto-osan rungon lopullinen rakenne

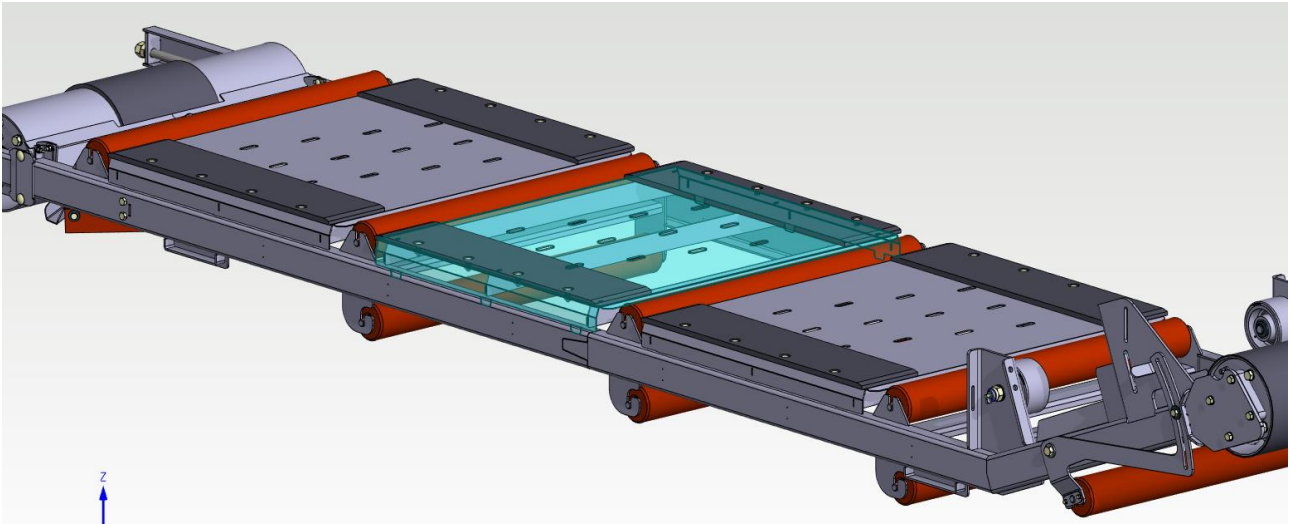
Taitto-osan poikkipalkkien päistä on poistettu ylimääräiset tukilevyt, joille ei FEM:n perusteella ollut lujuuden kannalta tarvetta. Palkit hitsataan nyt kiinni suoraan taivutetun runkolevyn sisäpintaan. Lisäksi yksi poikkipalkki, jolla ei ollut muuta tehtävää kuin rakenteen jäykistäminen poistettiin kokonaan. Lopuksi runkorakenteen muutosten takia tehtiin varusteiden kannattimiin pieniä muutoksia ja parannuksia, jotta ne sopivat kiinni uuteen runkoon.

Taitto-osan tapaan alaosan rungosta poistettiin nivelen ja hydraulisylinterien kiinnityksen aluetta vahventavat paksut levyt. Kiinnityksiä tukemaan tehtiin kuviossa 15 näkyvät uudet holkit. Holkkien leveät laipat jäykistävät kriittisiä kohtia ja auttavat voimia siirtymään helpommin. Uusien holkkien takia osien määrä ei vähentynyt alarungossa, mutta paino putosi huomattavasti.

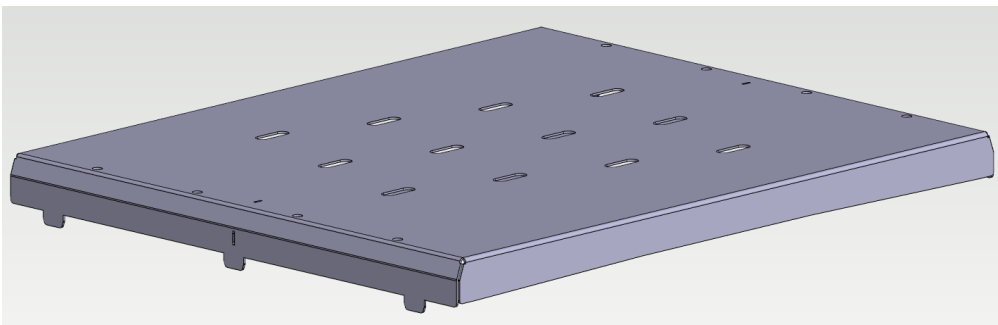


Kuvio 15. Alaosan rungon lopullinen rakenne

Kuviossa 16 näkyvään alakuljettimeen ei juuri tullut kehitysideoita, koska se oli jo valmiiksi varsin yksinkertainen ja hyvin mietitty rakenne. Yksi valmistettavuutta parantava muutos tehtiin kuitenkin kuljettimen hihnan alla lepääviin kolmeen pohjalevyyn. Yhdessä pohjalevyssä on kolme hitsattua tukilevyä. Laitimaiset tukilevyt voitiin poistaa ja sen sijaan taivuttaa pohjalevyn reunat tueksi kuvion 17 tapaan. Ratkaisu vähentää hitsauksen määrää ja siten tekee pohjalevystä edullisemmän.



Kuvio 16. Alkuperäinen alakuljetin



Kuvio 17. Uusi pohjalevy

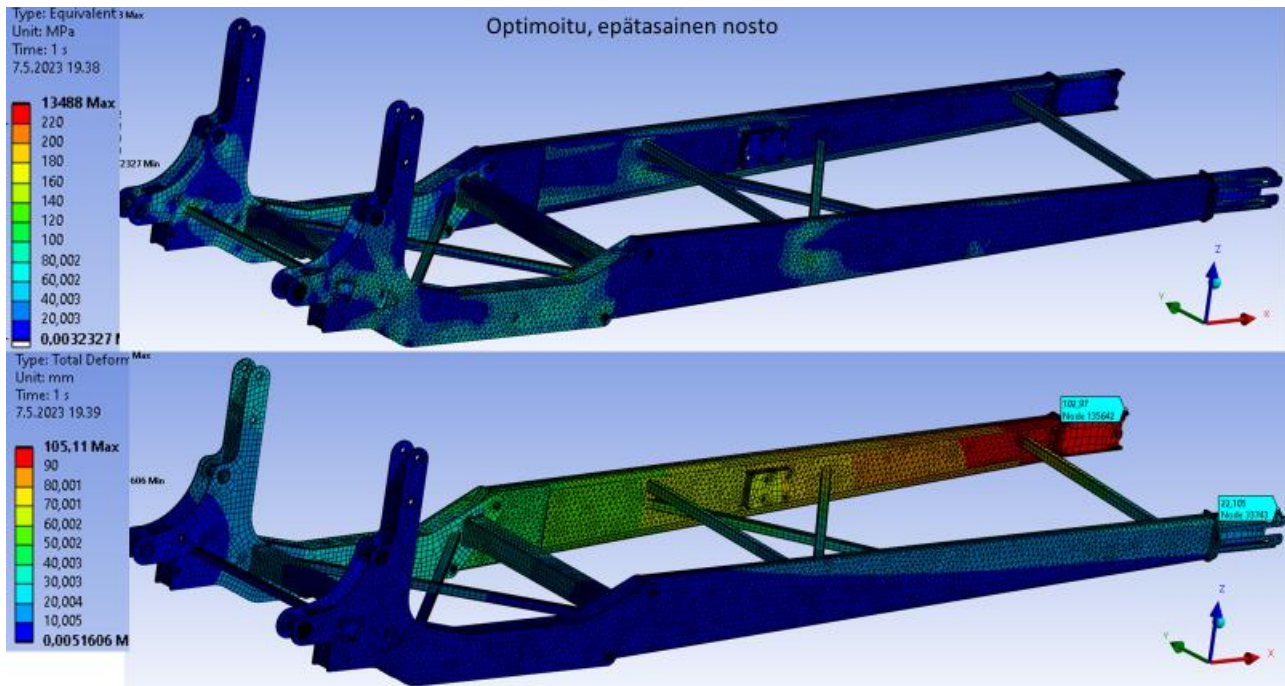
7 Tulokset

7.1 Optimoidun rungon FEM-analyysin tulokset

Optimoidulle rungolle tehtiin vielä FEM-analyysi, jotta lopullisen rakenteen jäykkyyttä ja kestävyyttä voidaan verrata alkuperäiseen. Analyysi tehtiin samoille kolmelle kuormitustilanteelle samoin määrityksin, kuin luvussa 5.1 on kuvattu.

Kuviossa 18 esitetyn dynaamisen tilanteen tapauksessa huomataan, että jännitykset eivät ole kasvaneet rakenteessa. Koska runko on keventynyt huomattavasti, painovoima rasittaa sitä vähemmän ja jännitys on jopa pienentynyt joissain kohdissa. Samasta syystä runko myös taipuu vain 39,7 mm, noin 5 mm vähemmän kuin alkuperäinen. Suurin jännitys on alaosan varsissa noin 100 MPa.

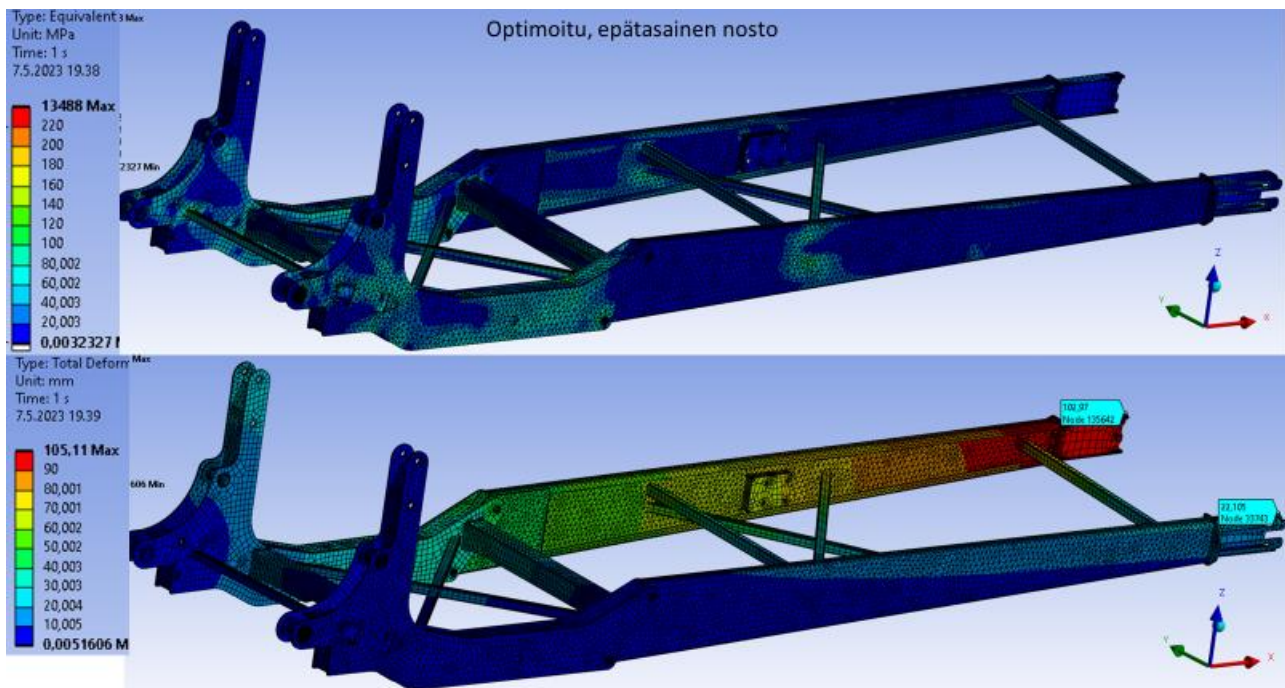
Voidaan siis todeta, että väärinkäyttötilanteessa kuljetin auki ajettaessa, yläkuljettimen kestävyys ei ole heikentynyt, vaan mahdollisesti jopa hieman parantunut.



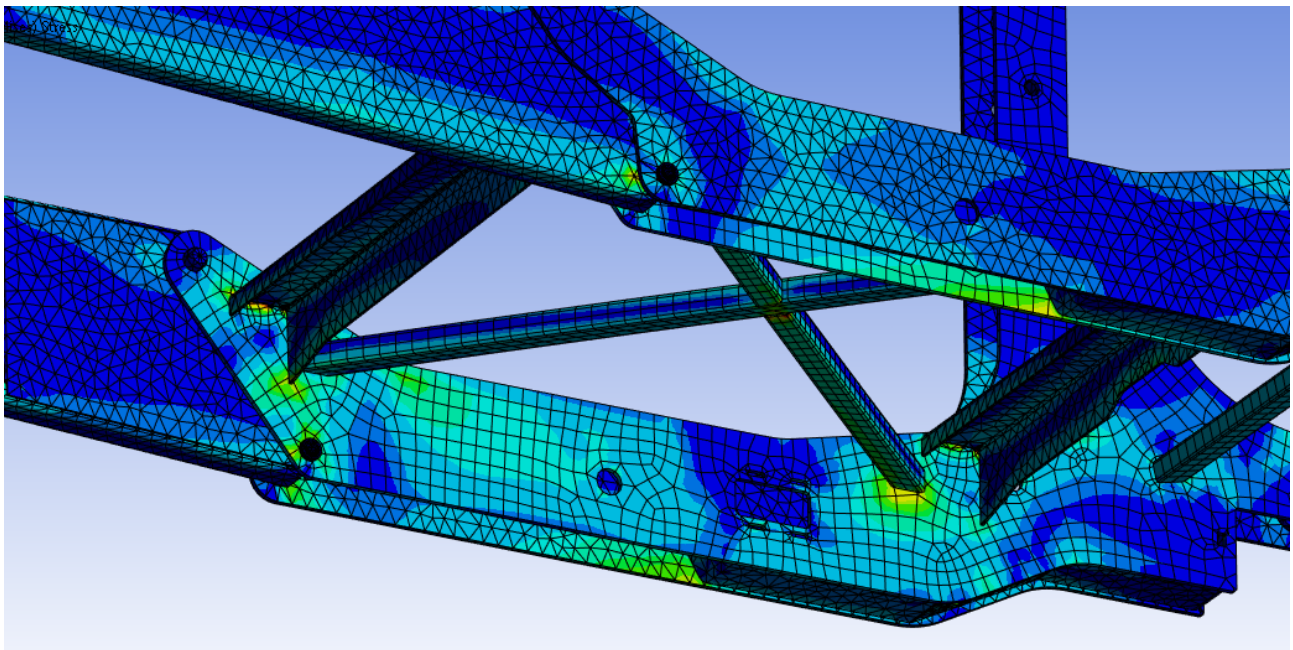
Kuvio 18. Optimoidun rungon dynaamisen tilanteen tulokset

Kuvion 19 epätasaisen nostotilanteen tuloksista huomataan, että runkoon tehdyillä muutoksilla oli huomattavia vaikutuksia. Koska runko painaa vähemmän, sama 100 000 N voima saa rungon taipumaan enemmän, lisäten jännitystä. Rungon vasemmalla ja oikealla päällä on huomattava ero, yli 80 mm. Lisääntyneen taipuman takia rungon puolien väliset poikkipalkit ja ristikotkin ovat rasittuneet ja jännitystä on myös oikealla puolella runkoa. Suurimmat jännitykset ovat juuri poikkipalkkien kiinnityskohtien alueella, sillä ne ovat voimien siirtymisen kannalta huomattavimpia epäjatkuvuuskohtia. Alarungossa jännitys on näissä kohdissa paikallisesti jopa 180 MPa (kuvio 20). Jännitykset ovat silti kaiken kaikkiaan maltilliset, eikä rungon myötämisestä ole huolta.

Rungon kestävyyttä puoltaa myös analyysissä sattunut virhe. Kuljettimen vapaassa päässä oleva vetorullan kannatin jätettiin epähuomiossa analysoitavasta 3D-mallista pois, koska sen käyttäytymistä ei ollut tarpeen tarkastella (vrt. kuvio 11). Kannatin kuitenkin sitoo rungon varsien päät yhteen ja vastustaa rungon kiertymistä. Tästä syystä optimoidun rungon taipuma ja jännitys on todellisuudessa hieman pienempi kuin FEM-analyysin tuloksissa.



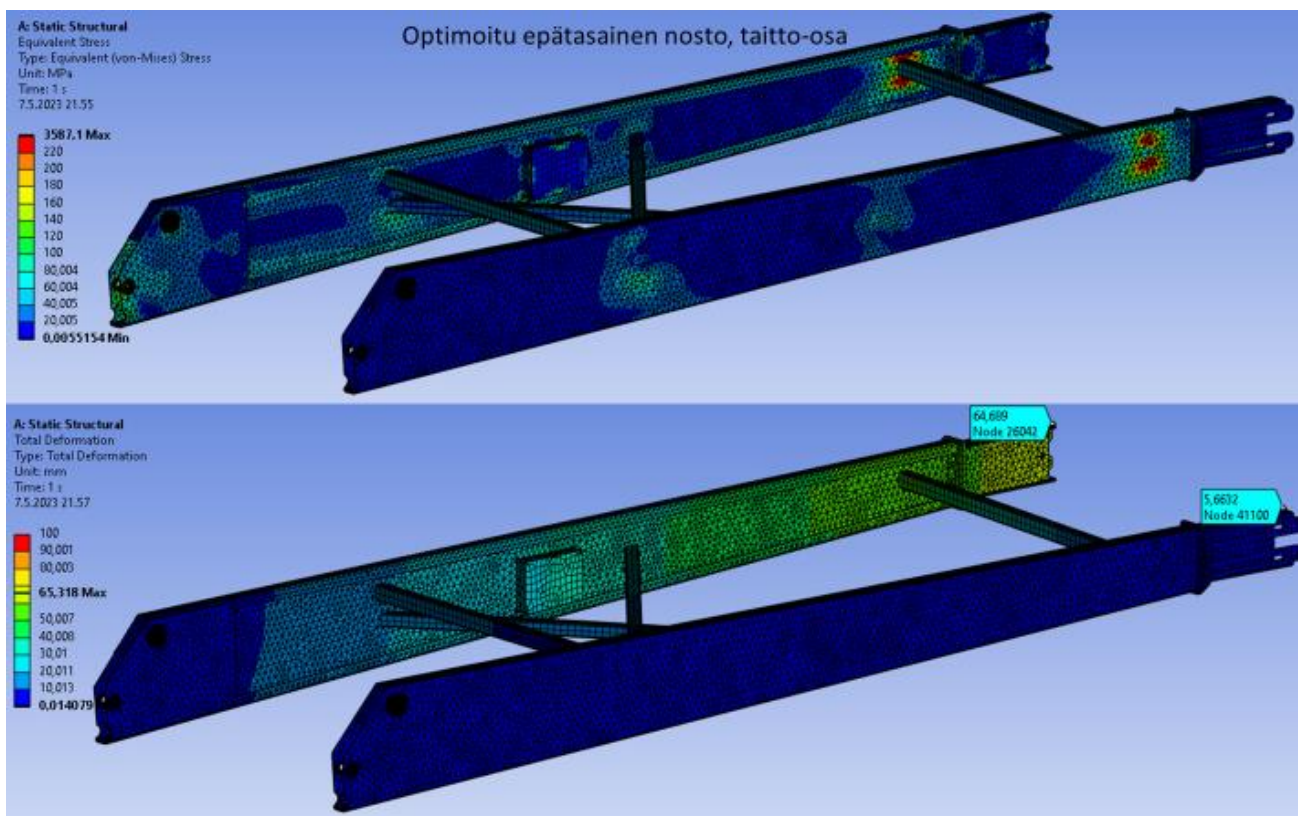
Kuvio 19. Optimoidun rungon epätasaisen nostotilanteen tulokset



Kuvio 20. Jännityskeskittymiä yläkuljettimen alaosassa

Taitto-osan analyysissä kuviossa 21 on nähtävissä samankaltaiset muutokset kuin koko yläkuljettimen epätasaisessa nostossa. Jännitys vasemmalla puolella runkoa on lisääntynyt huomattavasti,

mutta on pääsääntöisesti maltillisella tasolla. Jännitystä on keskittynyt myös oikealle puolelle runkoa poikkipalkkien kiinnityksen alueelle. Huomion arvoista on, että ylimmän poikkipalkin alueella jännitys ylittää sallitun jännityksen, ollen paikallisesti jopa 300 MPa. Rasitusta kohtaan aiheuttaa rungon vasemman ja oikean vapaan pään huomattava, yli 60 mm ero taipumassa. Sallitun jännityksen ylittyminen on kuitenkin erikoista, sillä koko yläkuljettimen epätasaisen noston tilanteessa ero oli yli 80 mm, eikä samassa kohdassa ollut juuri minkäänlaista jännitystä. Joka tapauksessa tästä ei pidä olla liian huolissaan, koska koko kuormitustilanne on todennäköisesti ylimitoitettu. Suureen jännitykseen vaikuttaa myös virheellinen vetorullan kannattimen pois jääminen, kuten edellä käsiteltiin.



Kuvio 21. Optimoidun taitto-osan epätasaisen noston tulokset

7.2 Kustannussäästö

Kuljettimen rungon optimoinnilla saatua säästöä oli vaikeaa arvioida, koska kuljettimesta ei ollut saatavilla tarkkaa kustannuserittelyä. Materiaalikustannuksesta voitiin kuitenkin tehdä karkea arvio, koska oli tiedossa, että koko kuljettimeen tarvittavien terästen ostohinta on 4 454 €. Kuljettimen teräsrungon paino ilman osto-osia on 3D-mallista mittaamalla 1 429 kg. Tästä voitiin laskea

teräksen arvioitu kilohinta $4454 \text{ €} / 1429 \text{ kg} = 3,12 \text{ €/kg}$. Lukema vaikuttaa olevan linjassa tämän hetken teräksen hintatason kanssa. Tätä kilohintaa käyttämällä on taulukossa 1 arvioitu yläkuljettimen materiaalikustannuksessa saatu säästö. Alakuljetinta ei ole otettu huomioon, koska sen paino ei juurikaan muuttunut. Yläkuljetinta onnistuttiin keventämään 124 kg, joka on 17,4 % muutos. Muutos on merkittävä ja tarkoittaa arvioidulla teräksen hinnalla noin 387 € säästöä.

Taulukko 1. Yläkuljettimen materiaalikustannuksen arvio

	Teräksen hinta (€/kg)	Massa (kg)	Materiaali- kustannus (€)
Alkuperäinen	3,12	712	2221,44
Optimoitu	3,12	588	1834,56
Erotus		124	386,88
Muutos		-17,4 %	-17,4 %

Työn kustannuksen säästöä oli vaikeaa arvioida ilman tietoa työtunnin hinnasta ja työvaiheiden kestosta, mutta säästö on todennäköisesti merkittävä. Yläkuljettimesta saatiin poistettua suurimmat valmistuksen ongelmakohdat. Hitsaus on varmasti aikaa vievimpiä työvaiheita kuljettimen valmistuksessa ja poistettujen osien myötä hitsisauman määrä väheni useita metrejä. Poistettujen suurten levyjen takia täytyi tehdä joitakin uusia osia kuten holkkeja, mutta osien määrä yläkuljettimessa väheni silti yhteensä seitsemällä. Alakuljettimessa osien määrä väheni kuudella osien yhdistämisen myötä, ja myös tarvittavan hitsin määrä väheni hieman.

8 Pohdinta

8.1 Luotettavuus ja eettisyys

Opinnäytetyöhön ei liittynyt erityisiä eettisyyskysymyksiä, koska siinä ei esimerkiksi käsitelty henkilötietoja. Toimeksiantajan käyttöön antamaa luottamuksellista materiaalia kuten 3D-malleja, piirustuksia ja kustannustietoa kuitenkin käsiteltiin erittäin huolellisesti. Materiaalia säilytettiin siten, että siihen ei ollut muilla pääsyä, ja lopuksi tarpeeton materiaali tuhottiin. Lisäksi yleisesti ottaen työssä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä, muun muassa käyttämällä ja merkitsemällä lähteitä oikein ja plagioimatta.

FEM-analyytien tuloksiin tulee suhtautua varauksella, koska niihin liittyy huomattavaa epävarmuutta. Kuormitustilanteiden määrittely analyysia varten oli odottamattoman hankalaa. Määrittelyt kuitenkin tehtiin niin, että kuormitukset ovat varmasti todellisuutta suuremmat, joten kuljettimen kestävyys voidaan luottaa. Lisäksi optimoidun rungon analyyseissä tehtiin virhe, mutta siinäkin tapauksessa virhe on turvallisella puolella, eli runko on analyyseihin tuloksia kestävämpi.

8.2 Johtopäätökset ja kehittämisehdotukset

Opinnäytetyön tavoitteena oli optimoida kuljettimen runkoa siten, että se olisi edullisempi valmistaa ja silti tarpeeksi luja. Työn tuloksena saatiin optimoidun rungon 3D-mallit ja niiden FEM-analyyseihin tulokset. FEM-tulokset osoittavat, että kehittämistyössä on kuljettimen lujuuden osalta todennäköisesti onnistuttu. Yläkuljettimen materiaalikustannuksia saatiin pienennettyä 17,4 %, joten myös valmistuksen kulujen pienentämisessä on jossain määrin onnistuttu. Kustannusten säästöä kokonaisuudessaan ei kuitenkaan onnistuttu arvioimaan, joten kehittämistyön rahallinen hyöty jäi vielä suurelta osin epävarmaksi.

Jatkotoimenpiteenä tulisi kuljettimelle ehdottomasti tehdä kunnollinen kustannusarvio. Kustannusarviolla varmistetaan tehtyjen muutosten kannattavuus ja saadaan tietoa siitä, miten kuljetinta kannattaisi kehittää jatkossa. Lisäksi tulisi yhteistyössä valmistuksen kanssa käydä kuljettimeen tehdyt muutokset läpi, jotta varmistetaan muutosten toimivuus valmistettavuuden kannalta ja saadaan lisää jatkokehitysehdotuksia. Kun muutosten vaikutukset on käytännössä todettu, on kuljetinta mahdollista optimoida vieläkin paremmin.

Lähteet

50 vuotta arvoa jätteestä. N.d. Artikkelin Tanan sivustolla. Viitattu 24.3.2023. <https://tana.fi/fi/50-vuotta/>.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. & Knight, W. A. 2011. Product Design for Manufacture and Assembly. Kolmas painos. Boca Raton: CRC Press.

Hietikko, E. 2021. Palkki: lujuuslaskennan perusteet. Neljäs painos. Helsinki: BoD – Books on Demand.

Hietikko, E. 2021. Tuotekehitystoiminta. Neljäs painos. Helsinki: BoD – Books on Demand.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas: näin kirjoitan opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kutz, M. 2014. Mechanical Engineers' Handbook, Volume 2: Design, Instrumentation, and Controls. Neljäs painos. Hoboken: John Wiley & Sons. Viitattu 9.2.2023. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2004. Hyvin suunniteltu – puoliksi valmistettu. Toinen painos. Helsinki: Suomen robotiikkayhdistys.

Liu, G. R. & Quek, S. S. 2014. The Finite Element Method: A Practical Course. Toinen painos. Elsevier Butterworth-Heinemann. Viitattu 6.2.2023. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Poli, C. 2001. Design for manufacturing: a structured approach. Boston: Butterworth-Heinemann. Viitattu 20.3.2023. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Rao, S. S. 2005. The Finite Element Method in Engineering. Neljäs painos. Elsevier Butterworth-Heinemann. Viitattu 6.2.2023. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Tana from waste to value. N.d. Tanan sivuston etusivu. Viitattu 24.3.2023. <https://tana.fi/fi/>.

Tanan tarina. N.d. Artikkelin Tanan sivustolla. Viitattu 24.3.2023. <https://tana.fi/fi/tietoa-meista/tanan-tarina/>.

Tana tuotteet. N.d. Artikkelin Tanan sivustolla. Viitattu 24.3.2023. <https://tana.fi/fi/tana-tuotteet/>.

Tietoa meistä. N.d. Artikkelin Tanan sivustolla. Viitattu 24.3.2023. <https://tana.fi/fi/tietoa-meista/>