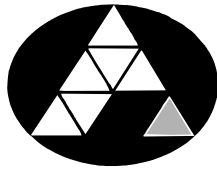


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikka

Vesa Kähkönen

MONITOIMISEN NIVELAURAN SUUNNITTELU

Opinnäytetyö
Toukokuu 2012



POHJOIS-KARJALAN
AMMATIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ

Toukokuu 2012

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3

80200 JOENSUU

p. (013) 260 6800 p. (013) 260 6906

Tekijä(t)

Vesa Kähkönen

Nimeke

Monitoimisen nivelauran suunnittelu

Toimeksiantaja

Metallipalvelu Hartikainen Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli kehittää ja suunnitella monitoiminen nivelaura traktoriin. Työ tehtiin toimeksiantona ja sen aihe on peräisin toimeksiantajalta. Tarve monitoimisen nivelauran kehittämiseksi on tullut yrityksen asiakkailta. Lähtökohtiin kuului lisätä ja tukea suunniteltavalla laitteella toimeksiantajayrityksen tuotevalikoimaa.

Tuotekehitystyö tehtiin projektiluontoisesti ja toteutuksessa käytettiin apuna menetelmiä muutamista eri systemaattisista tuotekehitysmenetelmistä. Suunnittelutyön aikana tehty osien ja kokoonpanojen mallinnus sekä työpiirustusten teko toteutettiin Solidworks-ohjelmistolla. Suunnitellun rakenteen lujuustarkastelussa käytettiin apuna Ansys-ohjelmistoa.

Tuotekehitystyön tuloksena saatiin vaatimuksien mukaisen nivelauran työpiirustukset. Toimeksiantajassa rajattiin prototyypin valmistus ja testaus opinnäytetyön ulkopuolelle, joten sitä ei toteutettu tämän työn puitteissa. Työn lopputuotteena saadut työpiirustukset jäävät opinnäytetyön ulkopuolelle, koska ne ovat läheinen osa toimeksiantajan liiketoimintaa.

Työlle luontainen jatko olisi prototyypin valmistus ja testaus, sekä suunnitelmien viimeistely näistä saatujen kokemusten perusteella. Prototyypin testaukseen voisi liittää myös rakenteiden todellisten jännitysten tutkimisen venymäliuska-anturein, jonka jälkeen niitä pystyisi vertaamaan laskennallisiin arvoihin.

Kieli

suomi

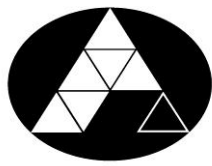
Sivuja 45

Liitteet 1

Liitesivumäärä 1

Asiasanat

nivelaura, tuotekehitys, koneensuunnittelu



NORTH KARELIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
May 2012
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering
Karjalankatu 3
FIN 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. 358-13-260 6500

Author(s)
Vesa Kähkönen

Title
Designing a Multifunctional Articulated Plow

Commissioned by
Metallipalvelu Hartikainen Ltd.

Abstract

The topic of this thesis was to generate and design a multifunctional articulated plow for a tractor. The product development was carried out under contract and the subject was given by the client. The need for articulated plow development is based on customers' feedback. The purpose for designing this product was to increase and support the product range of the client company.

The R&D work was carried out as a project and some systematic design methods were used to help carry out the project. During the design process the modeling of the parts and assemblies, as well as making work drawings were made with Solidworks software. The stress calculations for the designed constructions were made with Ansys software.

As a result of R&D work were work drawings which meet the requirements of the requirement list were yielded. In the contract manufacturing and testing of the prototype were excluded of this thesis, so they were not done in this thesis. Work drawings which are the product of this project are excluded of this thesis, since they are closely linked to the client's business.

A natural continuation to this work would be manufacturing and testing the prototype and finishing work drawings based on these phases. Prototype testing could also include real tension inspection of the constructions by the strain gauges. After that the result could be compare to the calculation results.

Language
Finnish

Pages 45
Appendices 1
Pages of Appendices 1

Keywords

articulated plow, R&D, machine planning

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	5
2	SYSTEMAATTINEN TUOTEKEHITYS.....	6
2.1	VDI 2222	6
2.2	QFD-menetelmä.....	8
2.3	Valmistustekniikat huomioon ottava suunnittelu.....	10
3	TUOTEKEHITYSPROJEKTI	11
4	NIVELAURAN KEHITYSPROJEKTI	12
5	LÄHTÖTIETOJEN KERÄÄMINEN	13
5.1	Käyttöympäristö.....	13
5.2	Rakenteelta vaadittavat ominaisuudet.....	14
6	VAATIMUSTEN MÄÄRITTÄMINEN	14
7	RATKAISUVAIHTOEHTOJEN KEHITTÄMINEN	15
7.1	Siipien rakenne.....	16
7.2	Turvesiivet	17
7.3	Lumisiivet	18
7.4	Teränlaukaisun jousen mitoitus	19
7.5	Nivelrunгон rakenne.....	22
7.6	Ruuviliitoksen mitoitus.....	23
7.7	Sivuttaiskellunnan toteutus	26
7.8	Kiinnitysrunгон rakenne.....	27
8	LUJUUSLAKENNASSA KÄYTETTÄVÄN VOIMAN MÄÄRITYS	28
9	LUJUUSTARKASTELU	29
9.1	Analyysin kulku	30
10	NIVELAURAN LUJUUSTARKASTELU.....	32
10.1	Turvesiipien lujuustarkastelu	32
10.2	Lumisiipien lujuustarkastelu	36
10.3	Nivel- ja kiinnikerunгон lujuustarkastelu.....	38
11	TUOTEKEHITYSPROJEKTIN VIIMEISTELY	40
12	POHDINTA.....	43
	LÄHTEET	45
	LIITTEET	
	Liite1 Vaatimusluettelo	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on kehittää ja suunnitella monikäyttöinen nivelaura traktoriin, käyttäen apuna nykyaikaisia suunnittelumenetelmiä. Nivelaura on auratyypin, jossa on keskellä nivel ja nivelen molemmin puolin kiinnittyneet siivet. Siipiä pystytään kääntämään hydraulisesti, jolloin aura saadaan kerääväksi, jommallekummalle puolelle auravaksi tai kärkiauraksi. Monitoimisen nivelauran ajatuksena on, että sitä voidaan käyttää kesällä turvetuotannon tarpeissa ja talvella lumen auraukseen. Tämä vaatimus asettaa tiettyjä haasteita suunniteltavalle tuotteelle.

Toimeksiantona suoritettava nivelauran suunnitteleminen käsittää työn alussa määriteltäviä vaatimuksia vastaavan nivelauran suunnittelun ja tarvittavien valmistusdokumenttien tekemisen. Koko kehitysprojektin ajan otetaan huomioon CE-merkinnän vaatimukset, jotta tuote on CE-merkittävässä. Suunnitelmien pohjalta tehtävä prototyypin valmistus ja sen testaus on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Opinnäytetyö on tutkimuksellinen ja tutkimustyössäni on tukeuduttu alan kirjallisuuteen. Työn alkuvaiheessa tutustutaan erilaisiin systemaattisiin tuotekehitysmenetelmiin. Niitä käytetään soveltaen suunnittelutyössä ja tarkoituksena on samalla luoda yritykselle eräänlainen malli tuotekehitysprojektin kulusta. Tarvittavat lujuustarkastelut tehdään pääosin tietokonepohjaisella lujuuslaskentaohjelmalla. Opinnäytetyön tavoitteena on mahdollisimman hyvin käyttötarkoitukseen soveltuvan nivelauran valmistamiseen tarvittavien suunnitelmien luominen ja samalla työtä tehdessä henkilökohtaisen ammattitaidon lisääminen.

Nivelaura suunnitellaan Metallipalvelu Hartikainen Oy:lle, joka on metallialan monitoimiyritys. Yritys on perustettu vuonna 2006 ja sen tuotantotilat sijaitsevat Juuassa. Yrityksessä tehdään sekä alihankintaa että omia tuotteita, tarvittaessa asiakkaalle toteutetaan tarvittava tuote aina suunnittelusta loppuasennukseen saakka. Alihankinnassa suurimpana osa-alueena ovat turvetuotannon työkonet. Omissa tuotteissa yrityksellä on joitakin turvetuotannon tarpeisiin olevia tuotteita, mutta myös muihin tarkoituksiin suunnattuja tuotteita valmistetaan ja kehitetään, tästä esimerkkinä Rajax-rajamerkit. Suunniteltavalla nivelaurlalla on tarkoitus tukea ja lisätä yrityksen tuoterepertuaaria.

2 SYSTEMAATTINEN TUOTEKEHITYS

Tuotekehityksellä tarkoitetaan toimintaa, jonka päämääränä on kehittää uusi tai parantaa entistä tuotetta. Se on monivaiheinen prosessi, jossa pyritään täyttämään asetetut tavoitteet mahdollisimman hyvin, ottaen huomioon tekniset ja taloudelliset näkökannat. Tuotekehitystoiminnan onnistuminen onkin yksi tärkeimmistä tekijöistä yrityksen menestymisen kannalta. [1.]

Nykyisin tuotteiden elinikä on lyhentynyt ja tiukentunut kilpailu edellyttää alenevia kustannuksia sekä laadultaan parempia tuotteita. Jotta tuotekehitys pystyy vastaamaan näihin haasteisiin, on kehitetty lukuisia systemaattisia suunnittelumenetelmiä, joissa ratkaistavat ongelmat käsitellään askelittain tai niihin keskitytään tietyn näkökannan avulla. Suunnitteluprosessiin liittyy nykyisin tiiviisti myös markkinointi ja valmistus, joka oikein suoritettuna tuottaa aikaisempaa kilpailukykyisempiä tuotteita. [1.]

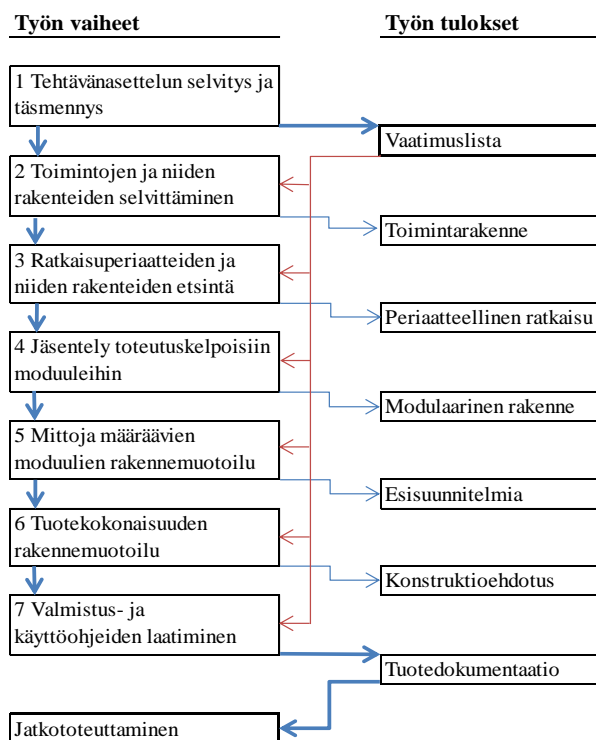
Tutustuin tarkemmin muutamaankin systemaattiseen suunnittelumetodiin ja niiden periaatteisiin. Menetelmät joita jatkossa hieman tarkemmin esittelen, ovat Saksasta lähtöisin oleva suunnittelumetodi VDI 2222:nen, asiakaslähtöinen suunnittelu QFD ja valmistustekniikat huomioon ottava suunnittelu DFMA. Tarkastelemani menetelmät ovat yleisesti käytössä olevia tuotekehitys- ja suunnitteluprosessin työkaluja, mutta niitä käytetään yrityksissä harvoin täysin samankaltaisina. Monella yrityksellä on omiin tarpeisiin muokattu tuotekehitysprosessi, jossa voidaan käyttää työkaluina eri menetelmien osia. Käytin itsekin nivelauran suunnitteluprojektissa soveltaen eri menetelmiä.

2.1 VDI 2222

VDI 2222 on Saksassa 70-luvulla kehitetty suunnittelumetodi. Tämä tuotekehitystoiminnan seuraamisen työkalu on laadittu huomioiden laajaa käyttöä koneenrakennuksen suunnittelusta aina ohjelmistojen suunnitteluun. Yleisiä tavoitteita on teknisen toiminnon täyttyminen, huomioon ottaen taloudellinen toteuttaminen sekä ihmisten ja ympäristön turvallisuuden säilyminen. Menetelmä konkretisoituu neljään päävaiheeseen: tuotekehitysprojehtin valinta, tehtävän määrittely, kehittäminen ja viimeistely. Kuviossa 1 on

esitetty metodin mukaisen tuotekehitystyön kulun periaate, joka on jaoteltu vielä hive-
nen tarkemmin seitsemään vaiheeseen. [2.]

Ensimmäinen vaihe tuotekehitysprojektia valittaessa on tehtävänasettelun selvitys ja
täsmennys. Tämän vaiheen tärkein tuotos on vaatimuslista, johon laadittuja määrittämiä
seurataan koko tuotekehitysprosessin ajan. Vaatimuslistan teon jälkeen selvitetään toi-
minnot ja jaetaan ne mahdollisiin osatoimintoihin, joista syntyy toimintorakennekaavio.
Kun toiminnot on saatu selvitettyä, etsitään niille ratkaisuperiaatteita. Työkaluna tähän
vaiheeseen on morfologinen laatikko, minkä avulla saadaan aikaiseksi muutamia peri-
aatteellisia ratkaisuja. Saadut ratkaisut jäsenellään moduuleiksi, joiden tähtäimenä on
tuotteen modulaarinen rakenne. Luonnostelutyössä ensimmäisenä suunnitellaan mittoja
määräävät rakenteet ja ne arvioidaan pistelaskentaan perustuvalla teknistaloudellisella
arvioinnilla, jonka jälkeen saadaan tehtyä esisuunnitelma. Tämän valmistuttua voidaan
tehdä tuotekokonaisuuden rakennemuotoilu ja konstruktioehdotus. Samalla määritellään
pääosin valmistusmenetelmät, alihankinnat ja ostettavat komponentit. Viimeisenä vai-
heena ennen jatkototeuttamista on valmistus- ja käyttöohjeiden laatiminen, jossa tavoit-
teena on mahdollisimman standardien mukainen esitystapa. [2.]



Kuvio 1. Kehitystyön yleinen kulku VDI 2222:sen mukaan [2].

Mielestäni VDI 2222:sen mukaan tehdyn suunnittelutyön kulku on selkeä ja ehkä tämän takia se on ainakin aikaisemmin ollut melko yleisesti käytetty systemaattinen suunnittelumenetelmä. Käytin projektin toteutuksessa pitkälle kyseisin menetelmän kuvamaa suunnittelutyön kulkua. Metodissa ei kuitenkaan oteta niin hyvin huomioon asiakkaan ja valmistuksen näkökantoja, kuin jatkossa esiteltävissä menetelmissä. Näitten seikkojen johdosta en käyttänyt suunnittelutyössä pelkästään VDI 2222:sta.

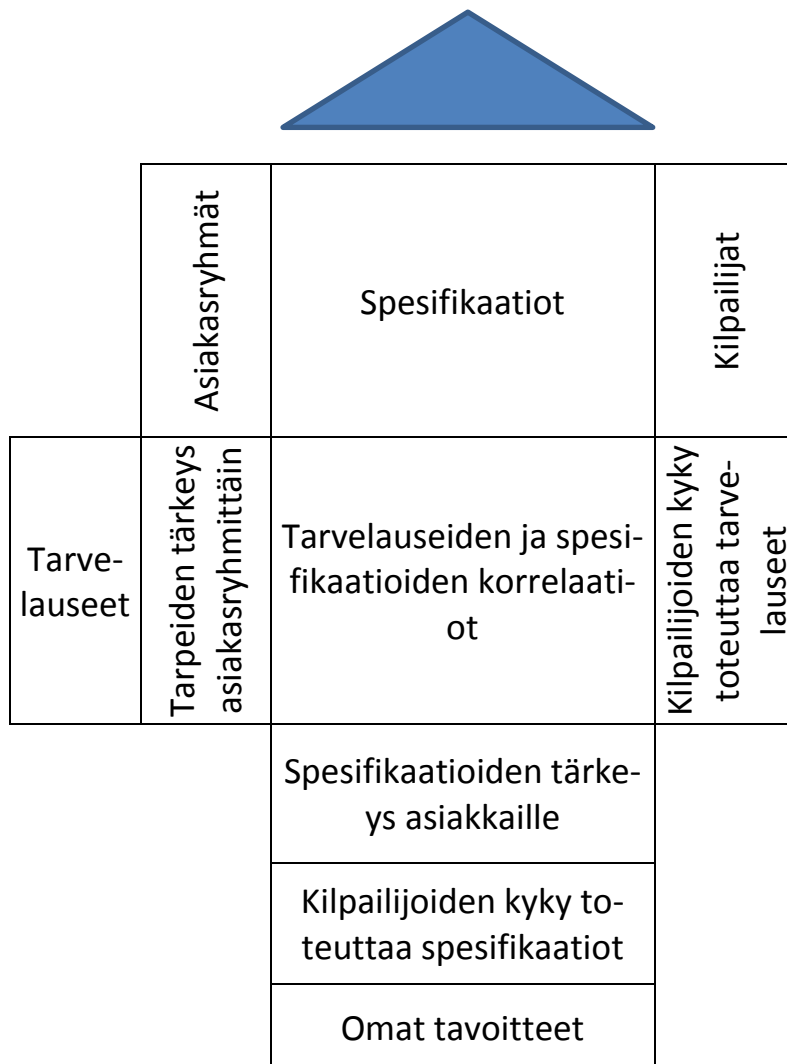
2.2 QFD-menetelmä

Quality Function Deployment:in (QFD) kehitys on saanut alkunsa Japanissa 1970-luvun puolivälissä. Menetelmän keskeinen ajatus on asiakaslähtöinen tuotekehitys ja asiakastarpeiden muuttaminen mitattaviksi tavoitteiksi. Tyypillistä on, että esimerkiksi määrittelmä kevyesti toimivasta ovesta ei ole riittävä, vaan kevyen toiminnan määrittelmään tulee olla voiman lukuarvo. Tarpeet asetetaan tärkeysjärjestykseen ja näin niitä kohden on helpompi edetä konseptisuunnitteluvaiheessa. Samalla pystytään vertaamaan omaa tuotetta kilpailijoiden tuotteisiin, erityisesti asiakkaiden tarpeista lähtevillä mitattavilla ominaisuuksilla. Yksi tärkeimmistä tavoitteista on myös suunnitella laatu tuotteeseen sen sijasta, että se tarkastettaisiin vasta valmiista tuotteesta. [3.]

QFD-menetelmän keskeisin työkalu on ns. laatutalo, joka on esitetty kuviossa 2. Laatutalon tekeminen aloitetaan tunnistamalla asiakkaat ja asiakasryhmät. Seuraavaksi otetaan selvää heidän tarpeistaan ja muutetaan ne tarvelauseiksi. Tarpeet asetetaan tärkeysjärjestykseen asiakkaan näkökannalta, ne voidaan arvioida esimerkiksi asteikolla 1–5. Laatutaloon kirjataan myös oman tuotteen kilpailijat ja arvioidaan niiden kyky toteuttaa asiakkaiden tarpeet. Tärkein vaihe laatutalon tekemisessä on määrittää, miten mitataan tuotteen vaatimukset. Tämän jälkeen voidaankin tehdä asiakastarpeiden perusteella muodostetut spesifikaatiot ja asettaa riippuvuudet spesifikaatioiden ja asiakastarpeiden välille. Spesifikaatioiden merkitystä asiakkaille tarkastellaan ja arvioidaan myös kilpailijoiden kyky toteuttaa ne. Lopuksi määritellään omalle tuotteelle asetetut tavoitteet. [3.]

Mielestäni yksi QFD-menetelmän hyvistä puolista on asiakastarpeiden tarkka määrittely, jossa tarpeet muutetaan mitattavaksi tavoitteiksi. Saatuja lukuarvoja voidaan esimerkiksi käyttää helposti hyödyksi suunniteltavia rakenteita mitoittaessa. En kuitenkaan toteuttanut tämän työn aiheena olevaa suunnitteluprojektia pelkästään kyseisellä mene-

telmällä, koska katsoin laatutalon tekemisen melko suuritöiseksi. Kehitettävälle tuotteelle ei ollut myöskään täysin samaan tarkoitukseen olevaa tuotetta, joten vertailu olisi ollut hankalaa. Käytin kuitenkin menetelmän periaatteita muun muassa keskustelemalla tuotteelta vaadittavista ominaisuuksista useimpien sidosryhmien kanssa ja ottamalla esille tulleet tarpeet huomioon suunnittelutyössä. Tutkin myös markkinoilla olevien nivelaurojen ominaisuuksia (taulukko 1) ja pystyin jonkin verran käyttämään saatuja tietoja suunnittelutyön tukena saatuja.



Kuvio 2. QFD-menetelmän laatutalo [3].

2.3 Valmistustekniikat huomioon ottava suunnittelu

DFMA tulee sanoista Design For Manufacturing and Assembly. Sen kehitys sai alkunsa teollisuusrobotiikan kehittymisen myötä 1970-luvun lopulla. Menetelmän avulla tuotteet pyritään suunnittelemaan valmistustekniikat huomioon ottaen siten, että rakenne on mahdollisimman yksinkertainen ja virheetön valmistaa sekä kokoonpanna. DFMA-ajattelun keskeinen tekijä on kokoonpano. Se toimii koko tuotteen ja suunnittelun yhdistävänä tekijänä. Sen perusteella määräytyy tuotteen kokoonpanon onnistuminen ja myös tuotteen elinkaaren myöhemmissä vaiheissa tapahtuvan ylläpitotoimenpiteiden ja huollon helppous. Mitä monimutkaisempi kokoonpano on, sitä enemmän siihen sisältyy riskejä. Siksi kokoonpanoissa pyritäänkin välttämään ylimääräisiä osia. Suunnittelijoiden avuksi onkin kehitetty erilaisia menetelmiä, joiden avulla voi yksinkertaistaa ja analysoida kokoonpanoja. Toinen asia, johon myös pyritään vaikuttamaan, on kokoonpanoon kuuluvien toimintojen yksinkertaistaminen. Niinpä DFMA koostuukin kahdesta osiosta DFM:stä ja DFA:sta. [4.]

DFM, valmistettavuus, sisältää menetelmiä ja järjestelyjä, jotka yksinkertaistavat tuotekokonaisuuden valmistamista ja alentavat näin valmistuskuluja. Apuvälineenä tässä käytetään usein tietokonepohjaista menetelmää, joka käyttää peruseräiteitä, tarkastuslistojaan ja peukalosääntöjään auttamaan suunnittelemaan tuote joka on helpompi valmistaa. Nämä apuvälineet edesauttavat tuotetta myös toimimaan paremmin ja luotettavammin, näyttämään siistimmältä ja helpottamaan huollettavuutta. Kuitenkin päälimmäisenä ajatuksena on aina valmistuskulujen alentaminen. [4.]

DFA, kokoonpantavuus, on systemaattinen tuotekehitysmenetelmä, jossa hyödynnetään olemassa olevaa kokoonpanoprosessia kehitysprojekteissa. Sen tavoitteena on tuotteen rakenteen ja kokoonpanosuorituksen yksinkertaistaminen. Monesti tämä johtaa toimintojen yhdistämiseen modulaariseksi rakenteeksi ja osien määrän vähenemiseen. Se taas tuo tuotteeseen samankaltaisia positiivisia ominaisuuksia kuten DFM. Työkaluina kokoonpantavuudenkin parantamiseksi ovat erilaiset tietokoneohjelmat, jotka arvioivat kokoonpantavuutta. [4.]

DFMA:n keskeisenä ajatuksena oleva valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden helppous on tuotteelle ja sen kilpailukyvyille tärkeitä ominaisuuksia. Kyseinen ajattelu onkin

hyvä sisällyttää jokaiseen tuotekehitysprojektiin. Itselläni ei ollut menetelmän käytössä tarvittavia ohjelmistoja, mutta sovelsin sen periaatteita muilla keinoin. Pysin ottamaan varsinkin ratkaisuvaihtoehtoja kehitellessä ja suunnitellessa valmistettavuuden sekä koonpantavuuden näkökannat huomioon, jotta tuote olisi näiden osalta optimaalinen.

3 TUOTEKEHITYSPROJEKTI

Tuotekehitysprojekti on rajattu koskemaan tiettyä tuotetta, projektilla on oma organisaationsa, tavoitteensa ja aikataulunsa. Tuotekehitystoiminta on taas useiden kehitysprojektien kokonaisuus. Periaatteelliselta rakenteeltaan tuotekehitysprojekti ei juurikaan eroa muista projekteista. [3.]

Tuotekehitysprojektiä aloittaessa, projektin asettamisvaiheessa määritellään projektinlähtökohdat, rajaus ja tavoite. Isommissa projekteissa olisi järkevää tehdä jonkinasteinen esiselvitys projektin kannattavuudesta. Jokaisesta projektista tulisi sen toteuttamisen helpottamiseksi laatia projektisuunnitelma, johon kirjataan tavoitteet, resurssit, aikataulutus, välietapit jne. Kustannusten arviointi ja niiden seuranta on myös olennainen osa tuotekehitysprojektiä. Tärkeä tiedonlähde tässäkin asiassa on aikaisemmin toteutetut samankaltaiset projektit. Projektin suunnittelussa olisi varauduttava myös riskeihin ja arvioitava vaikutusten suuruus. Projektioorganisaatiolla tulisi olla myös rohkeutta lopettaa projekti, jos sitä suunnitellessa tai toteutettaessa tulee ilmi jokin sellainen asia tai ongelma, jonka takia projektia ei kannata jatkaa. [3.]

Projektin suunnittelua ja toteutusta helpottamaan on nykyään tarjolla useita tietokoneohjelmia. Niillä on vaivatonta toteuttaa aikataulutus ja resurssien jako. Niiden seuranta on helppoa ja mahdollisten muutosten vaikutus esimerkiksi aikataulussa on selkeästi nähtävissä. [3.]

Kun projekti on lähestymässä loppuaan, viimeinen mutta ei vähäisin vaihe on projektin päättäminen. Tuotekehitysprojekti katsotaan päätetyksi, kun kehityksen kohteena oleva tuote on saatu valmistukseen ilman ongelmia. Dokumentit viimeistellään ja arkistoidaan tarkasti, jotta ne olisivat hyödynnettävissä myös tulevissa projekteissa. Usein pidetään

myös päätöskokous, jossa esitellään projektin loppuraportti ja arvioidaan työn onnistumista. [3.]

4 NIVELAURAN KEHITYSPROJEKTI

Tarve tuotteen kehittämiseksi tuli Metallipalvelu Hartikaisen asiakkailta. Alkuperäinen käyttötarkoitus oli turvetuotannon tarpeissa. Laitteella tulisi pystyä tasaamaan aumoja sekä keräämään jyrksinturvetta nostettaessa syntyvä kaksoiskarhe yhdeksi karheeksi, jolloin turve on tehokkaammin uudelleen kerättävissä. Jo ennen projektin toimeksiannon saamista kehitimme ajatusta yhdessä yrityksen toimitusjohtajan Kari Hartikaisen kanssa, ja saimme idean etukuormainkiinnitteisestä nivelaurasta, joka soveltuisi noihin tarpeisiin. Se olisi muutettavissa myös talveksi lumen auraukseen, jolloin auran käyttöaika saadaan pitkäksi ja näin urakoitsijalle kannattavaksi investoinniksi.

Toimeksiannon saatua tein projektisuunnitelman, johon jaottelin työn eri osa-alueet ja määritin aikataulun. Aikataulu oli sinällään melko väljä, toimeksiantajan puolelta vaatimuksena oli suunnitelmien luovutus vuoden 2012 toukokuun loppuun ja aloin tehdä työtä vuoden 2011–2012 vaihteessa. Tavoitteena oli selkeästi vaatimusten mukaisen nivelauran kehittäminen ja valmistusdokumenttien luonti. Välietappeina projektissani oli vaatimusten ja lähtötietojen määrittäminen, ratkaisuvaihtoehtojen kehittäminen, 3D-mallin luominen, lujuustarkastelu ja valmistusdokumenttien teko. Käytin suunnittuprosessin apuna työvaiheita erilaisista suunnittelumetodeista, joita edellä esittelin.

Auran osat mallinsin Solidworks-ohjelmistolla, joka on kolmiulotteisten rakenteiden suunnitteluun soveltuva ohjelmisto. Ohjelmistolla on vaivatonta tehdä erilaisia luonnoksia ja niiden hahmottaminen on helppoa kolmiulotteisuuden vuoksi. Myös toiminnallisten tarkastelujen, kuten liikeratojen, teko on sujuvaa ja tämän ansiosta monet virheet voidaan huomata jo suunnittelun aikana. Lujuustarkastelun suoritin koulussa käytössä olevalla Ansys-ohjelmistolla.

5 LÄHTÖTIETOJEN KERÄÄMINEN

Aloitin suunnitteluprojektin lähtötietojen keräämisellä. Tässä vaiheessa tein yhteistyötä paljon Metallipalvelu Hartikaisen toimitusjohtajan Kari Hartikaisen kanssa. Hänellä on pitkäaikainen kokemus turve- ja traktoriurakoinnista, joten hänen näkemyksensä ja kokemuksensa olivat tässä vaiheessa tärkeitä.

Lähtötietoja kerätessäni tutustuin myös muihin Suomen markkinoilla oleviin nivelauroihin. Kartoittaessani näitä auroja selveni käsitys siitä, että vastaavia monikäyttöisiä nivelauroja ei markkinoilla ole. Keräsin niistä tiettyjä teknisiä tietoja, jotka nähtävissä taulukossa 1. Käytin keräämiäni tietoja suunnittelutyön tukena.

Nivelaura kiinnittyy traktorin etukuormaajaan pikakiinnikkeillä ja markkinoilla on vajaa kymmenen eri pikakiinnikemallia. Selvitin alkuvaiheessa niiden vaatimat mitat kiinnikepinnalta, jotta auran pystyttäisiin helposti asentamaan mikä kiinnikemalli tahansa.

Nivelaurojen vertailutaulukko

Pvm 21.1.2012

Laatija Vesa Kähkönen

Auramerkki	Malli	Työleveys	Siipien korkeus (mm)	Siipien kulma	Paino (kg)	Varo hydraulikassa	Sähköventtiili	Laukaisu terissä	Teräkulma	Sivuttaiskellunta
FMG	NA 320	3200-2650	1100	*∠ 38°	760	Lisävaruste	Lisävaruste	x	Suora	x
	320	3200-2750	1000	*∠ 35°	820		x	x	Suora	x
Snowstar	NL 330	3300-	650-1000	*∠ 35°	790	x	x	x	Suora	x
Snowek	N 320	3200-2470	900	*∠ 38°	690	x	x	x	Positiivinen	x
Soukkio	3.2	3200-2600	850	*∠ 35°	710	x	x	x	Suora	x
STARK	NL3150R	3150-2765	1150	*∠ 35°	910	x	x	x	Positiivinen	x
TOP	NA 320	3200-2650	1100	*∠ 35°	620	Lisävaruste	Lisävaruste	x		x
VAMA	ENA3200K	3200-2690	800-1000	*∠ 36°	900	x	x	x	Suora	x

Taulukko 1. Taulukkoon koottu markkinoiden yleisimpien nivelaurojen teknisiä tietoja.

5.1 Käyttöympäristö

Monikäyttöisyytensä vuoksi nivelauraa käytetään monenlaisissa käyttöympäristöissä ja -tehtävissä. Tämä asettaa suunniteltavalle tuotteelle omat haasteensa, ovathan Suomessa jo olosuhteet kesä- ja talviaikaan varsin erilaiset. Myös nivelauran käyttöympäristön olosuhteet turve- tai lumiurakoinnin kesken eroavat toisistaan suuresti.

Kesällä turvetuotannossa tulipalon syttymisherkkyys on suuri ja asia tulee ottaa huomioon myös työlaitteita suunniteltaessa. Suon pinta on myös usein pehmeä ja mahdollinen

uppoaminen tai auran terän haukkaaminen ajon aikana tulisi ehkäistä. Käyttöympäristön olosuhteet ovat myös erittäin likaiset ja pölyiset.

Suunniteltu talviaikainen käyttö on tie- ja piha-alueiden aurausta. Talvella auratessa, varsinkin piha-alueita, voi lumen peitossa olla yllättäviä esteitä. Niihin törmäämiseen tulee varautua auran rakenteessa, riittävän kestävällä rakenteella ja ylikuormitus-suojilla. Molemmissa käyttötarkoituksissa kertyy rakenteisiin helposti turvetta tai lunta ja tämän tapahtuminen tulisi minimoida.

5.2 Rakenteelta vaadittavat ominaisuudet

Monikäyttöisyys aiheuttaa auran rakenteelle monenlaisia haasteita, mutta tekemällä suunnittelutyö kunnolla se pystyy vastaamaan näihin haasteisiin. Auran rakenteen tulisi olla kestävä, ja turvetuotannon tarpeisiin soveltuvan muunnelman on oltava mahdollisimman kevyt. Rakenne täytyy suunnitella mahdollisimman helpoksi ja kustannustehokkaaksi valmistaa. Siipien tärkein ominaisuus on saada ne sekä keräävään, että auravaan asentoon ja rakenteessa on oltava sivuttaiskellunta, jotta auran siivet seuraavat mahdollisimman hyvin työskentelytason pinnan muotoja.

Rakenteen on oltava käyttäjäturvallinen ja -ystävällinen. Tämän toteuttaakseen ja rakennetta turvataksaan siivissä tulee olla jonkinlaiset turvamekanismit, mahdollisen äkilliseen esteeseen törmäämisen vuoksi. Huoltotarpeet tulisi olla vähäiset ja suunnittelussa huomioidaan niiden helppo suorittaminen. Erittäin tärkeää on myös se että muuntaminen kesä- ja talvikäyttöön on mahdollisimman nopeaa ja yksinkertaista.

6 VAATIMUSTEN MÄÄRITTÄMINEN

Kerätyt lähtötiedot määrittelevät hyvin pitkälle myös vaatimukset ja niitäkin määriteltäessä teimme yhteistyötä Kari Hartikaisen kanssa, jotta hyvin paljon suunnittelutyön lopputulokseen vaikuttavat vaatimukset olisivat mahdollisimman oikeita. Käytin tässä työvaiheessa apuna VDI 2222:sen vaatimuslistaa, joka liitteenä 1. Päädyin käyttämään

vaatimuslistaa, koska siinä määritellään vaatimukset selkeästi, ja niitä on helppo seurata suunnitteluprojektin eri vaiheissa. Sitä voi käyttää myös apuna mahdollisissa kehitys- ja konstruktioneuvotteluissa, jolloin osanottajat saadaan nopeasti samalle tiedon tasolle ja kaikki oleelliset arviointiperusteet ovat kaikille selvillä [2].

Vaatimuslista on luettelo tuotteen kaikista vaatimuksista ja toivomuksista, jotka halutaan toteuttaa. Vaatimukset luokitellaan kolmeen luokkaan. Kiinteät vaatimukset tulee täyttää kaikissa tilanteissa. Vähimmäisvaatimukset täytetään tiettyyn vähimmäisarvoon saakka, mutta sen ylittäminen toivottuun suuntaan on suotavaa. Toivomukset taas huomioidaan mahdollisuuksien mukaan. [5.]

7 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN KEHITTÄMINEN

Luonnoksia ja eri ratkaisuvaihtoehtoja piirsin käsin sekä 3D-mallinusohjelmalla. Syntyneistä kolmiulotteisista luonnostelumalleista oli helppo lähteä aikanaan viemään suunnittelua eteenpäin. Jaottelin rakenteen kolmeen osa-alueeseen, jotka ovat kiinnitysrunko, nivelrunko ja siivet. Luonnostelin jokaisesta muutaman ratkaisuvaihtoehdon. Luonnosten vertailuun ja parhaan ratkaisuvaihtoehdon hakemiseen olisi muun muassa QFD-menetelmässä ja VDI 2222:ssa omat työmenetelmät. Katsoin kuitenkin, että nämä ovat sellaisenaan hieman monimutkaisia ja eivät suoraan olleet aivan sopivia käyttööni tässä suunnitteluprojektissa.

Niinpä laadin oman pistelaskuun perustuvan taulukon (taulukko 3). Ratkaisuvaihtoehtoja verrataan vaatimuslistan niihin vaatimuksiin, jotka tarkasteltavaa kohdetta koskevat. Verrattaessa ratkaisuvaihtoehtoja näiden vaatimusten perusteella saadaan tuotteen kokonaisuutta ajatellen paras ratkaisu selville. Jos jokin vaatimuslistan ulkopuolinen vaatimus on tärkeä, sen voi vertailuun lisätä. Jokainen ratkaisu pisteutetään asteikolla 1-3 sen mukaan, kuinka hyvin ratkaisu toteuttaa vaatimuksen. Ratkaisuvaihtoehdon saamat pisteet lasketaan yhteen ja eniten pisteitä saanut ratkaisu on vertailun paras vaihtoehto.

7.1 Siipien rakenne

Kehittelytyössä läksin liikkeelle nivelauran siipien rakenteen ratkaisuvaihtoehtojen kehittemisestä. Katsoin tämän olevan ensimmäinen vaihe, koska saatu rakenne määrittää hyvin pitkälle myös auran muita rakenteellisia ratkaisuja.

Jo kehitysprojektin alusta lähtien on ollut tiedossa, että kesäaikaisen käytön tärkeimpiä toimintoja on siipien ominaisuus kerätä turve karheelle. Tämän toiminnon toteuttaakseen on siivissä oltava keskinivelen seudulla jonkinlainen aukko. Tärkeää siiville on myös mahdollisimman kevyt rakenne. Talvikäytössä rakenne saa taas olla järeämpi, koska käyttökin on raskaampaa. Lumisiivissä tulee olla jonkinlainen terälaukaisumekanismi esteeseen ajon varalta. Turvesiivissä riittää pelkkä ylikuormitus-suoja hydraulikassa, koska siipien teränä on periksi antava harja.

Luonnosteluvaiheessa kehitelin kaksi ratkaisuvaihtoehtoa. Ensimmäisessä luonnoksessa nivelauran siivet ovat kiinteästi keskeltä nivelöidyt ja niissä on keskellä poistettavat palat turvekäytön vaatimuksien täyttämiseksi. Toisessa ratkaisuvaihtoehdossa on vaihdettavat siivet erikseen kesä- ja talvikäyttöön.

Kuten vertailutaulukosta (kuvio 3) huomaa ratkaisuvaihtoehto, jossa on vaihdettavat siivet sai enemmän pisteitä. Taulukosta saatu piste-ero ei ole suuri, mutta muutama tärkeä asia kallisti valinnan tähän toteutukseen. Ensimmäinen suuri heikkous kiinteillä siivillä on keskellä olevan nivelpisteen sijoittuminen korkealle siiven alalaidasta, joka aiheuttaa rakenteeseen ylimääräisiä rasituksia. Näin on vaihdettavien siipien turve mallisakin, mutta kovemmalle rasitukselle joutuviissa lumisiivissä nivelpiste voidaan tuoda riittävän alas. Toinen tärkeä asia on, että turvesiivistä pystytään tekemään kevyempirakenteiset ja näin ollen saataisiin helposti toteutettua kevyt nivelaura kesäaikaiseen käyttöön.

NIVELAURAN SIIPIEN RAKENNE

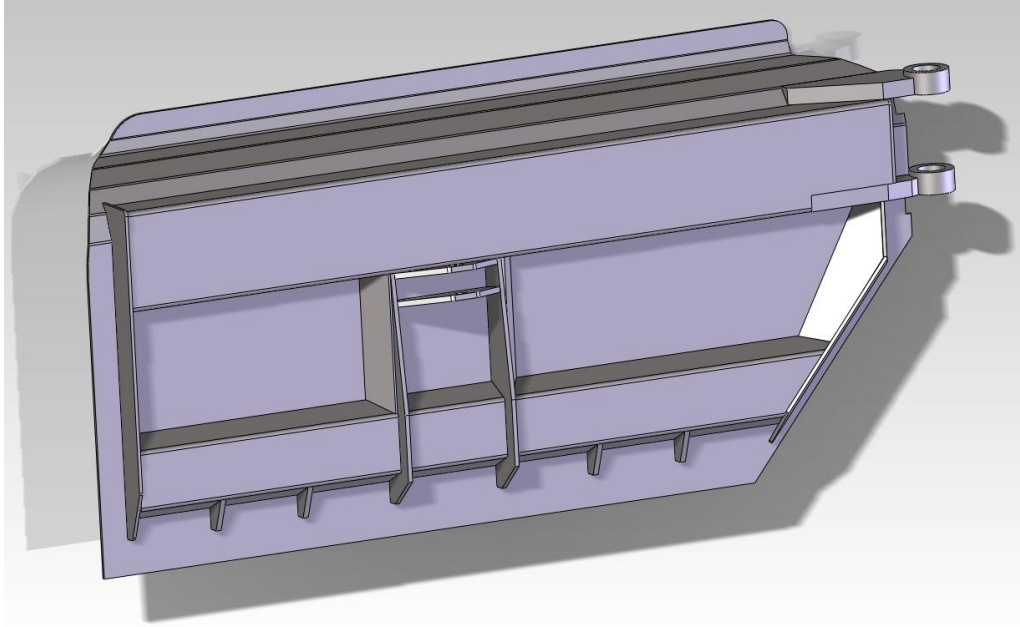
Vaatus	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2
	Aurassa kiinteät siivet ja keskellä poistettavat palat turvekäyttöön	Aurassa vaihdettavat siivet kesä- ja talvikäyttöön.
Turvamekanismi esteeseen ajon varalta	3	3
Auran oltava keräävä ja levittävä	3	3
Auran tulee kestää 6500kg:n painoisen traktorin työntövoiman	2	3
Mahdollisimman kevyt ja kestävä.	1	3
Laitteen oltava käyttäjälleen turvallinen.	3	3
Helppo ja kustannustehokas valmistaa.	2	1
Auran kuljetus rahtiautossa mahdollista.	3	3
Sovelluttava ympärivuotisiin käyttöolosuhteisiin	2	3
Helppo ja nopea huoltaa	3	3
Vähäiset huoltokohteet	3	2
Oltava hinnaltaan kilpailukykyinen muihin markkinoilla oleviin nivelauroihin	3	2
Valmistettavissa yrityksen omalla laitekannalla	3	3
Yhteensä	31	32

Taulukko 3. Vertailutaulukko nivelauran siipien rakenteesta

7.2 Turvesiivet

Luonnostellessani siipiä päädyin rakenteeseen, joka muodostuu yhtenäisestä etulevystä ja kahdesta sen takapuolelle tulevasta kantatusta profiilista. Ne muodostavat kokoonpantuna hitsatun kotelorakenteen. Monessa markkinoilla olevassa nivelaurassa siiven takaosassa on pelkästään yksi korkea kantattu profiili. Päädyin kuitenkin kahteen kapeaan profiiliin, koska näin rakenteesta saadaan jäykempi ja kevyempi. Myös sylinteri- ja nivelkorvakoiden kiinnitys on helpompi toteuttaa suunnittelemaani rakenteeseen.

Siivissä on myös keskinivelen puolella aukko, joka mahdollistaa turpeen läpikulkemisen siinä vaiheessa, kun sitä kerätään uudelleen karheelle (ks. kuva 1). Tämän vuoksi nivelkorvakot tulevat melko ylös ja heikentävät rakennetta jonkin verran.

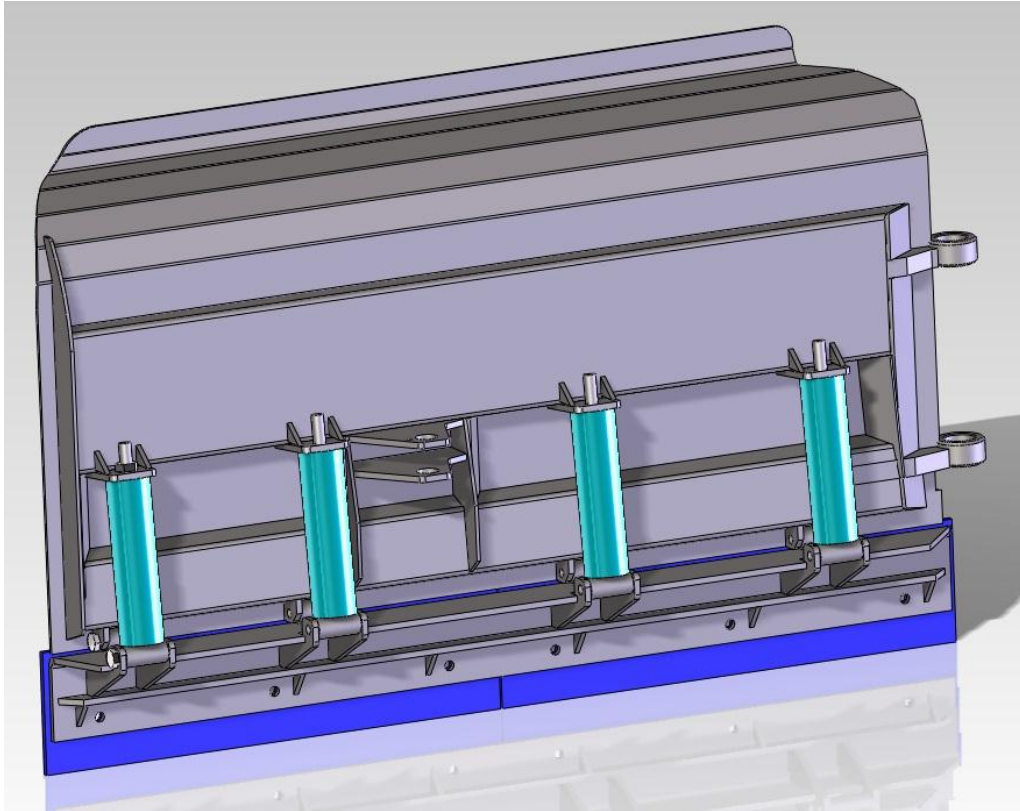


Kuva 1. Turvesiiven luonnos

7.3 Lumisiivet

Lumisiipien toteutuksessa käytin samaa perusrakennetta kuin suunnittelemissani turvesiivissä. Rakenne on kuitenkin hivenen erilainen (kuva 2), koska siipien nivelpuolen päädyssä ei tarvitse olla aukkoa turpeen kulun mahdollistamiseksi. Näin ollen pystyin laskemaan nivelkorvakoiden paikkaa alemmas ja etäämmäs toisistaan, jolloin rakenne on paljon kestävämpi.

Lumisiipiin täytyi suunnitella myös teränlaukaisumekanismi, suojaamaan rakennetta äkillisen esteeseen törmäämisen varalta. Tutkin muita markkinoilla olevia nivelaoramalleja ja huomasin, että laukaisu on kaikissa toteutettu jousikuormitteisella mekaniemillä. En lähtenyt kehittämään ratkaisuun mitään uuden tyyppistä mekaniismia, koska se olisi saattanut viedä kohtuuttomasti aikaa ja vaarantaa projektin aikataulun.



Kuva 2. Luonnosteltu lumisiipi.

7.4 Teränlaukaisun jousen mitoitus

Kuten jo edellä kävi ilmi, terän laukaisussa käytetään kierrejousia. Niiden sekä laukaisumekanismin mitoituksessa käytin vaadittavan laukaisuvoiman määrittämiseksi apuna luvussa 9 laskettua traktorin työntövoimaa. Terärakenteen tulisi mielestäni antaa periksi kyseisellä voimalla, koska se on määritelty sulan maan kitkalla. Talvella jäisillä ja lumisilla pinnoilla kitkaolosuhteet ovat aina huonommat. Toisaalta jousivoima ei saa olla liian pienikään, jottei terä anna liian helposti periksi ja esimerkiksi polanteen poisto olisi tällöin hankalaa.

Suunniteltuani mekanismin pystyin laskemaan sen avulla tarvittavan jousivoiman ja huomasin, että sopivia jousia ei tunnetuilla toimittajilla ollut vakioimituksena. Niinpä ne joudutaan teettämään mittatilaustyönä ja mitoitin jousen laskennallisesti.

Mekanismissa käytettävä kierrejousi on rakenteeltaan pyörähdyssymmetriselle lieriö tai kartio pinnalle kieritetty lanka. Tällä tavoin saadaan hyvin hyödynnettyä langan kimmoisen muodonmuutoskykyä ja saadaan aikaan kohtalainen siirtymä. Joustokäyrä on

melko lineaarinen, joten voiman ja siirtymän välillä on tarkka suhde. Kierrejousia valmistetaan sekä veto- että puristusjousia, joista viimeisemmäksi mainittua käytetään tässä sovelluksessa. [6.]

Yksittäistä jousia kuormittavaksi voimaksi muodostui laskennan perusteella 6500N. Itse jousen mitoituksen alkaessa tulee ensimmäiseksi arvata kierrehalkaisija [6]. Mekanismin sopii hyvin jousi joka on kierrehalkaisijaltaan 70 mm. Halkaisijan valinnan jälkeen voidaan laskea jousen langan alustava halkaisija [6].

$$d_{al} = (0,005 \cdot F \cdot D_m \left(\frac{mm^2}{N} \right))^{1/3} [6, s. 208.]$$

missä:

F jousivoima
D_m jousen kierrehalkaisija

$$d_{al} = (0,005 \cdot 6500N \cdot 70mm \left(\frac{mm^2}{N} \right))^{1/3} = 13 \text{ mm}$$

Valitsin alustavasti tarkasteltavaksi langan halkaisijan 15 mm, minkä jälkeen selvitetään laskennallisesti jousen leikkausjännitys.

$$\tau_i = \frac{8 \cdot D_m \cdot k_G \cdot F}{\pi \cdot d^3} [6, s. 208.]$$

missä:

k_G reunajännityksen korjauskerroin 1,32 [6, s. 209]
d jousen langan halkaisija

$$\tau_i = \frac{8 \cdot 70mm \cdot 1,32 \cdot 6500N}{\pi \cdot (15mm)^3} = 453 \text{ N/mm}^2$$

Jousi on melko suurikokoinen, joten se kannattaa valmistaa seosteräksestä pehmeäksi hehkutetussa tilassa. Muotoilun jälkeen ne karkaistetaan ja päästetään, jolloin jouset saavuttavat niiltä vaaditut ominaisuudet. Langan ollessa halkaisijaltaan 15 mm, sallittu leikkausjännitys on 760 N/mm² [6]. Verrattaessa tähän arvoon laskennallisesti selvitettyä leikkausjännitystä, voidaan suunnitellulla langan paksuudella leikkausjännityksen todeta olevan turvallisella tasolla. Seuraavassa vaiheessa lasketaan jousen joustomatka yhtä kierrosta kohti.

$$s_y = \frac{8 \cdot D_m^3 \cdot F}{G \cdot d^4} \text{ [6, s. 208.]}$$

missä:

G liukukerroin, kuumamuotoiltu jousilanka 78500 N/mm² [6, s. 197.]

$$s_y = \frac{8 \cdot (70\text{mm})^3 \cdot 6500\text{N}}{78500 \text{ N/mm}^2 \cdot (15\text{mm})^4} = 4,5\text{mm}$$

Yhden kierroksen joustomatkan selvittyä voidaan selvittää tarvittavien jousikierrosten määrä n_f [6]. Suunnitellussa mekanismissa joustomatka on 50 mm.

$$n_f = \frac{50\text{mm}}{4,5\text{mm}} = 11,2$$

Kierrosten lukumääräksi valitaan tämän perusteella 11,5. Jousen ollessa melko paksuhko kannattaa päät puristaa yhteen ja hioa suoriksi. Tällöin lopullinen kierrosmäärä saadaan seuraavasti:

$$n_t = n_f + 1,5 \text{ [6, s. 210]}$$

$$n_t = 11,5 + 1,5 = 13$$

Jousen vapaata pituutta määrittäessä lasketaan ensimmäiseksi yhteenpuristetun jousen pituus.

$$L_{bl} = (n_f + 1,5) \cdot d \text{ [6, s. 210]}$$

$$L_{bl} = (11,5 + 1,5) \cdot 15\text{mm} = 195\text{mm}$$

Tämän jälkeen seuraa vähimmäisvälyksen laskenta.

$$S_a = x \cdot d \cdot n_f \text{ [6, s. 210]}$$

missä:

x kerroin, $0,02 \cdot (D_m/d + 1) = 0,02 \cdot (70\text{mm}/15\text{mm} + 1) = 0,113$

$$S_a = 0,113 \cdot 15\text{mm} \cdot 11,5\text{mm} = 19,5\text{mm}$$

Jousen pituuden määrittämiseen tulee laskea myös joustomatka.

$$s = (n_f \cdot s_y) \text{ [6, s. 210.]}$$

$$s = (11,5\text{mm} \cdot 4,5\text{mm}) = 51,75\text{mm}$$

Yhteen puristetun jousen pituuden, vähimmäisvälyksen ja jousen joustomatkan selvittyä voidaan niiden perusteella laskea lopuksi jousen vapaa pituus.

$$L_0 = L_{bl} + S_a + s \text{ [6, s. 211]}$$

$$L_0 = 195\text{mm} + 19,5\text{mm} + 51,75\text{mm} = 266,25\text{mm}$$

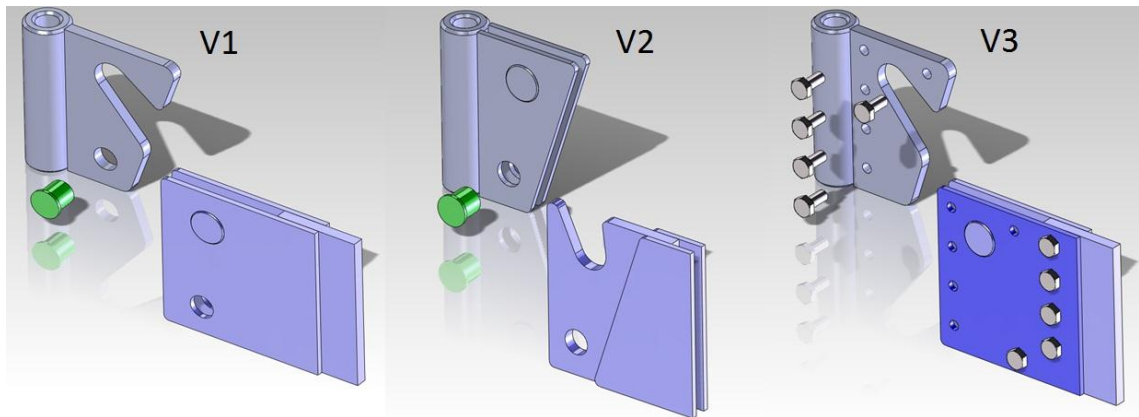
Edellä esitetyllä tavalla saatiin mitoitettua teränlaukaisuun tarvittavan jousen mitat. Laskennan tuloksena saatu jousi, jonka langan paksuus on 15 mm, kierrehalkaisija 70 mm ja vapaa pituus on 266 mm, sopii hyvin myös suunnitellun lumisiiven rakenteisiin. Näitten mittojen pohjalta voidaan prototyypin valmistusvaiheessa tilata jouset mittati-laustyönä.

7.5 Nivelrunгон rakenne

Nivelrunko on rakenne siipien ja kiinnitysrungon välillä. Siihen kiinnittyy myös siipien kääntämiseen tarvittavat hydraulisylinterit, joten rakenteeseen kohdistuu melko suuria rasituksia ja sen on oltava näin ollen kestävä. Nivelrungoksi luonnostelin kaksi erityyppistä ratkaisua. Ne olivat putkipalkkirakenne ja hitsattu kotelorakenne muotoon leikatuista levyistä. Vertaillessani niitä päädyin hitsattuun kotelorakenteeseen. Suurin tekijä ratkaisuun oli, että putkipalkeista tehtynä riittävän vääntöjäykän rakenteen teko olisi monimutkaisempaa ja kalliimpaa.

Tärkeä yksityiskohta rakenteessa on siipien kiinnittämiseen oleva holkki ja sen kiinnitys nivelrunkoon. Erityishuomio siihen oli kiinnitettävä, koska siivet ovat vaihdettavat ja niiden vaihto tulisi olla mahdollisimman helppoa. Kehittelin tähän yksityiskohtaan kolme ratkaisuvaihtoehtoa, jotka ovat kuvassa 3. Luonnoksien holkkiosiin kiinnittyy nivel-tappi ja siivet. Erillään olevat levyosat tulevat hitsaamalla nivelrunkoon.

Holkin kiinnityksessä päädyin ratkaisuvaihtoehtoon kolme. Vaihtoehdot yksi ja kaksi olisivat helpompia ja halvempia toteuttaa, mutta liitokseen kohdistuu monenlaisia rasituksia ja ajan myötä tulevan välyksen säätö olisi erittäin vaikeaa. Kolmosvaihtoehto perustuikin kitkaliitokseen, jota voidaan kiristää tarvittaessa. Siipien vaihdon tulisi olla tälläkin ratkaisulla melko nopea ja helppo toimenpide: Irrotetaan viisi pulttia ja sylinterin siivenpuoleiset tapit. Siivet jäävät yhdeksi paketiksi nivelen kanssa ja ovat näin helppo asentaa uudelleen takaisin paikalleen.



Kuva 3. Nivelrunгон liitoksen luonnoksia.

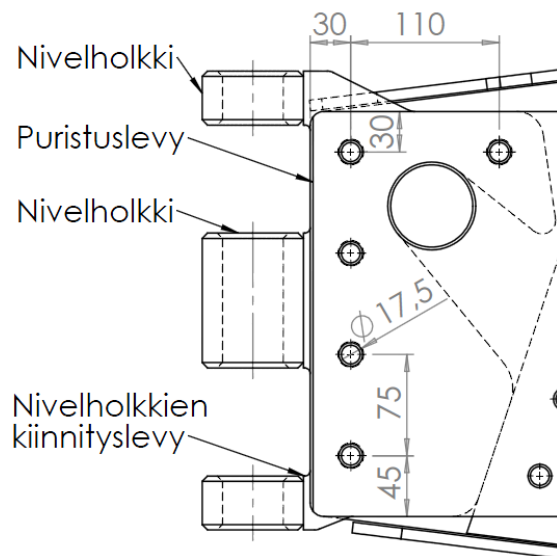
7.6 Ruuviliitoksen mitoitus

Päädyttyäni nivelrunгон liitoksen rakenteessa pulttiliitokseen, tuli se suunnitella ja mitoitaa tarkemmin. Käytin liitoksen mitoituksessa standardin EN 1993, Eurocode 3, mukaista toimintapataa.

Eurocode 3, teräsrakenteiden suunnittelu, on yhdenmukaistettu eurooppalainen ohjeisto teräsrakenteiden suunnitteluun. Standardeissa esitetään yhteiset rakennesuunnittelu-säännöt jokapäiväiseen käyttöön rakenteiden ja rakenneosien suunnittelua varten. Liitoksien suunnitteluun käytetään standardia EN 1993-1-8, liitosten mitoitus. Kyseisessä osiossa on käsitelty pääasiallisesti staattisesti kuormitettujen liitosten ja kiinnitysten mitoitus, jotka on toteutettu hitsaus-, pultti-, tappi- tai niittiliitoksilla. [7.]

Suunniteltu liitos on leikkausjännityksen rasittama kiinnitys, johon kohdistuu jossakin määrin iskuja. Ensimmäisenä valitaan standardin mukainen kiinnitysluokka. Päädyin kiinnitysluokkaan B, joka on käyttörajatilassa liukumisen kestävä kiinnitys. Tässä luokassa käytetään esijännitettyjä ruuveja, lujuusluokaltaan 8.8 tai 10.9 ja liukumista käyttörajatilassa ei sallita [7]. Esivalittujen ruuvien koko on M16 ja lujuusluokka 10.9.

Tämän jälkeen tarkastellaan täyttääkö luonnosteltu liitos keskiöväli, pääty- ja reunaetäisyydet. Keskiövälin miniarvo on 2,2 kertaa reiän halkaisija, maksimissaan 200mm ja pääty- sekä reunaetäisyyden miniarvo tulee olla 1,2ertainen reiän halkaisijaan nähden [7]. Kuvassa 4 nähtävissä liitoksen mitoitusluonnos, joka täyttää edellä mainitut ehdot.



Kuva 4. Ruuviliitoksen mitoitusluonnos.

Mitoitusehtojen täytyttyä liitoksen tulee täyttää myös muita ehtoja, jotka täytyy tarkastella laskemalla. Ensimmäiseksi lasketaan käytettävän ruuvin esijännitysvoiman mitoitussarvo, standardin määrittämällä tavalla:

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s, [7].$$

missä:

f_{ub} ruuvien vetomurtolujuus, lujuusluokka 10.9 = 1000 N/mm²

A_s ruuvien jännityspoikkipinta-ala, ruuvilla M16 = 157mm²

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 157 \text{ mm}^2 = 109900 \text{ N}$$

Tulos vastaa vain yhden ruuvien muodostamaa esijännitysvoimaa. Luonnostelemassani liitoksessa on kuitenkin viisi ruuvia, joten saatu tulos on viisikertainen ja ruuvien muodostama esijännitysvoima yhteensä 549,5 kN.

Esijännitysvoiman laskemisen jälkeen, tulee selvittää liukumiskestävyyden mitoitussarvo, joka lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3,ser}} \cdot F_{p,C}, [7].$$

missä:

k_s ruuvien reiän muodon aiheuttama kerroin, normaali pyöreä = 1

n kitkapintojen lukumäärä, tarkasteltavassa kohteessa 2

μ	kitkakerroin 0,2, käsitteettömät metallipinnat
$\gamma_{M3,ser}$	liukumiskestävyuden osavarmuusluku, suositeltava arvo luokassa B = 1.1

$$F_{s,Rd} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,2}{1.1} \cdot 549500N = 199818N = 199,8kN$$

Liitosta rasittava voima on määritelty luvussa 9 ja on suuruudeltaan 38,2 kN. Kuten laskettuja arvoja verratessa huomaa, on suunniteltu liitos liukumiskestävyydeltään yli viisinkertainen. Lievä ylimitoitus ei kuitenkaan tässä kohden ole haitaksi, koska liitokseen kohdistuu myös dynaamista kuormitusta, joka voi olla hetkellisesti määriteltyä rasitusta suurempaa.

Liukumiskestävyuden ehdot täytyttyä lasketaan leikkauskestävyyden arvo ruuvia kohden, jota murtorajatilan leikkausrasitus ei saa ylittää [7]. Leikkauskestävyys leikettä kohden lasketaan seuraavalla tavalla:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}, [7].$$

missä:

α_v	kerroin, lujuusluokalla 10.9 = 0,5
f_{ub}	ruuvien vetomurtolujuus, lujuusluokalla 10.9 = 1000 N/mm ²
A_s	ruuvien jännityspoikkipinta-ala, ruuvilla M16 = 157mm ²
γ_{M2}	ruuvien kestävyuden osavarmuusluku, 1,25

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 157 \text{ mm}^2}{1,25} = 62800N = 62,8kN$$

Saatu tulos vastaa yhden pultin leikkauskestävyyden arvoa ja kuten edellä jo mainittu, niin koko liitosta rasittava voima on 38,2 kN. Laskenta osoittaa, että vaikka suunniteltu kitkaliitos antaisi periksi, liitoksen osat pääsisivät liikkumaan ja koko liitosta rasittava leikkausvoima kohdistuisi pelkästään pulttien poikkipinta-alaan, ne kestäisivät rasituksen hyvin.

Viimeisenä lasketaan reunapuristuskestävyys, jota myöskään murtorajatilan leikkausrasitus ei saa ylittää [7].

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}, [7].$$

missä:

$$k_1 \quad \text{kerroin, } 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 2,5 = 2,8 \frac{30}{17,5} - 2,5 = 2,3$$

$$\alpha_b \quad \text{kerroin, } \frac{e_2}{3 \cdot d_0} = \frac{30}{3 \cdot 17,5} = 0,057$$

$$f_u \quad \text{liitoksen materiaalin murtolujuus, S460 M = 530 N/mm}^2 [8, \text{ s. 262.}].$$

$$d \quad \text{ruuvien nimellishalkaisija, 16mm}$$

$$t \quad \text{tarkasteltavan liitoksen seinämävahvuus, 20mm}$$

$$\gamma_{M2} \quad \text{reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, 1,25}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,3 \cdot 0,057 \cdot 530 \text{ N/mm}^2 \cdot 16 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm}}{1,25} = 17787 \text{ N} = 17,8 \text{ kN}$$

Edellä laskettu tulos antaa arvon yksittäisen ruuvien reiän reunapuristuskestävyydestä. Ruuviliitoksen ruuvien määrän ollessa viisi kappaletta, liitoksen lopullinen reunapuristuskestävyys on 89 kN, joka on reilusti enemmän kuin siihen kohdistuva rasitus.

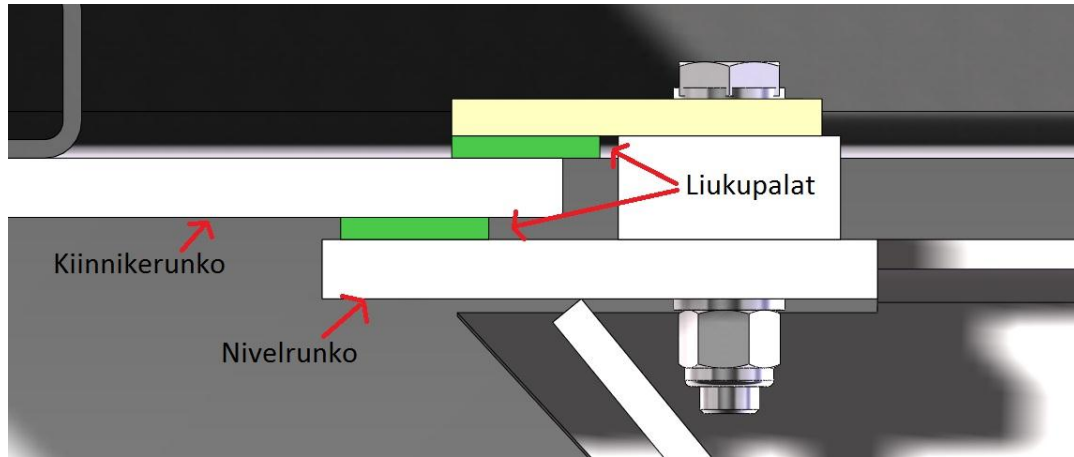
Luonnostellun ruuviliitoksen analysointi standardin mukaisella tavalla osoittaa, että se kestää hyvin sille määritetyt rasitukset. Se on jopa hieman ylimitoitettu, mutta kuten edellä mainitsin, vaikeasti arvioitavien dynaamisten rasitusten vuoksi, lievä ylimitoitus on tässä kohden suotavaa.

7.7 Sivuttaiskellunnan toteutus

Nivelaudessa tarvitaan sivuttaiskellunta, jotta siivet seuraisivat mahdollisimman tarkkaan aurattavan tason pintaa ja auraustulos olisi mahdollisimman hyvä. Luonnostelemassani kokonaisrakenteessa katsoin toiminnon olevan helpoin toteuttaa nivel- ja kiinnitysrungon välille. Luonnostelin yksityiskohdasta kaksi ratkaisua, kellunnan toteutuksen nivelrakenteella tai liukulevyillä.

Vertailllessani vaihtoehdot, päädyin suunnitella sivuttaiskellunnan liukulevyillä. Rakenne on yksinkertaisempi, halvempi ja kestävämpi, kuin nivelillä tehty kellunta. Liukurakenne vaatii myös vähän tilaa ja nostettaessa aura ylös se vakauttaa itsensä sivuttaissuunnassa. Rakenne, nähtävissä kuvassa 5, on tarvittaessa helppo purkaa. Huoltokohtei-

ta vähentääkseni, suunnittelin kelluntaan vaihdettavat kulutusmuovista tehdyt kulutuspalat, jotka vähentävät rasvauksen tarvetta. Muovilaatua valittaessa tuli huomioida että se kestää riittävästi pintapainetta.



Kuva 5. Sivuttaiskellunnan rakenne.

7.8 Kiinnitysrungon rakenne

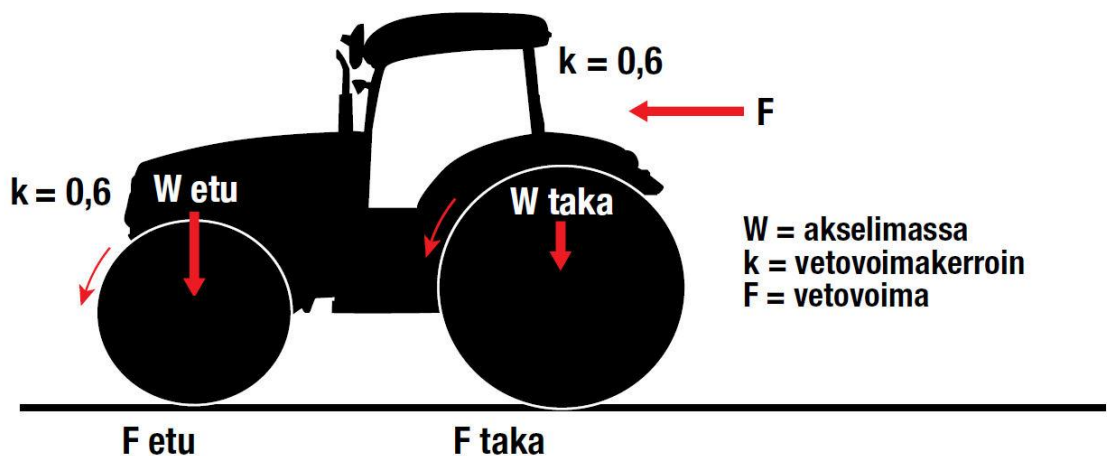
Kiinnitysrungon tärkeimmät tehtävät on toimia kiinnitysalustana nivelrunгон ja etukuormaajan pikakiinnikkeiden välissä. Kiinnitys- ja nivelrunгон välillä tulee pystyä toteuttamaan myös edellä luonnosteltu sivuttaiskellunta. Kuten jo lähtötietoja selvittäessä tuli esille, että traktorin etukuormaajan pikakiinnikemalleja lukuisia ja vaatimuksena on että kaikki ovat helposti kiinnitettävissä kiinnitysrunkoon.

Luonnostelin tähänkin yksityiskohtaan vertailtavaksi kaksi eri ratkaisuvaihtoehtoa. Ne olivat putkipalkkirakenne ja levyleikkeistä tehty kiinnikerunko. Paremmaksi vaihtoehdoksi nousi putkipalkkirakenteella toteutettu kiinnitysrunko. Tämän ratkaisun suurimpia vahvuuksia, verrattuna levyleikkeistä tehtyyn rakenteeseen on rakenteen yksinkertaisuus ja helppo valmistettavuus. Rakenteeseen on myös hyvin toteutettavissa luonnosteltu sivuttaiskellunta.

8 LUJUUSLAKENNASSA KÄYTETTÄVÄN VOIMAN MÄÄRITYS

Lujuuslaskennassa tarvittavien voimien määrittäminen on yleensä aina hieman haasteellista. Varsinkin tässä työssä kaikkia rasituksia on erittäin hankala arvioida, koska nivelaaraan kohdistuu käytön aikana monenlaisia dynaamisia kuormia. Rakennetta rasittavat voimat tulee kuitenkin tavalla tai toisella määrittää ja niinpä päädyin laskemaan vaatimuslistan mukaisen traktorin vetokyvyn ja käyttämään saatua tulosta apuna mitoituksessa ja lujuustarkastelussa.

Traktorin vetokyvyn perustekijöitä ovat akselipaino, pyöriin moottorista voimansiirron kautta välittyvä kehävoima sekä pyörän ja maan pinnan välinen kitka. Teoriassa traktori vetää maksimissaan massansa verran. Pyörien luisto ja vierintävastus ovat kuitenkin välttämättömiä pahoja, minkä vuoksi teoreettista vetokykyä ei käytännössä saavuteta. Perinteisistä kumipyörätraktoreista paras vetokyky saavutetaan nelivetoisella traktorilla. Sen kaikki pyörät vetävät ja kasvattavat vetokykyä, toisin kuin takavetoisessa traktorissa. Vetokyky ilmaistaan prosenttiluvulla, joka kuvaa vetohyötysuhdetta, eli kuinka suuri osuus akselimassasta on kyseisissä olosuhteissa muunnettavissa vetovoimaksi. Nelivetoisella traktorilla vetokyky on noin 60 % akselimassasta, sama voidaan ilmaista laskennallisen kertoimenä 0,6 (kuva 6). [9.]



Kuva 6. Traktorin vetokyvyn tekijät [9].

Vetovoima voidaan käsittää myös työntövoimana ja käytiin auraan tulevien rasiusten määrittelyssä työntövoiman laskennassa edellä esitettyä teoriaa.

Ensin lasketaan etu- ja taka-akselin vetovoiman erikseen.

$$F_a = W \cdot g \cdot k \text{ [9]}.$$

missä:

W = akselimassa

g = maan vetovoima

k = vetokykykerroin [9].

$$F_e = 2500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,6 = 14,7 \text{ kN}$$

$$F_t = 4000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,6 = 23,5 \text{ kN}$$

Tämän jälkeen summataan ne yhteen, mistä muodostuu kokonaisvetovoima.

$$F = F_e + F_t = 14,7 \text{ kN} + 23,5 \text{ kN} = 38,2 \text{ kN}$$

Laskettu voima kertoo vetovoiman, jonka keskimäärin nelivetoinen traktori painoltaan 6500 kg, saa aikaan. Saatu tulos on ehkä hieman summittainen lujoustarkastelua ajatellen, mutta rakennetta rasittavat voimat on parempi määritellä mieluummin hieman ylisuuriksi, jotta rakenteesta tulee varmasti riittävän luja. Mielestäni tämä periaate toteutuu, koska monesti käyttöolosuhteissa, joissa auraa tullaan käyttämään, renkaan ja maan välinen kitka on melko huono ja vetovoimakin näin ollen pienempi.

9 LUJUUSTARKASTELU

Valaisen ennen työssä suoritettujen lujoustarkastelujen esitystä hieman tietokonepohjaisen lujoustarkastelun perusteita, jotta niitä vähemmän tunteville ne tulisivat paremmin tietoon. Esittelen ensin käytettävän FEM menetelmän perusteita ja tämän jälkeen itse lujusanalyysin suorittamisen vaiheet.

Nykyisin hiemankin monimutkaisempien rakenteiden yleisimmäksi lujuuden tarkasteluvälineeksi on noussut erilaiset lujuuslaskentaan kehitetyt tietokoneohjelmistot. Ne käyttävät lujuuden analysoinnissa elementtimenetelmää eli FEM (Finite Element Met-

hod). Menetelmällä voidaan mallintaa lähes millainen kappale, kokonaisuus, materiaaliominaisuus tai kuormitus tahansa. Sen avulla voidaan tehdä ratkaisuja jännitysten laskennasta aina lämpötilan jakaumiin. [10.]

FEM-menetelmässä rakenne jaetaan pienempiin osiin eli elementteihin, jotka on kytketty toisiinsa solmupistein. Yhdistelemällä elementtejä, tihentämällä ja harventamalla niiden verkkoa mallinnetaan tarkasteltava kohde. Elementtien muodostamaa mallia voidaan kuvitella jousien muodostamaksi systeemiksi, joka ulkoisen kuorman vaikuttaessa muuttaa muotoaan kunnes systeemi on uudelleen tasapainossa. Laskentaverkossa olevien solmupisteiden koordinaattien ja määriteltyjen materiaalin ominaisuuksista muodostuu jäykkyysmatriisi. Tähän yhdistetään edelleen kuormitus, jonka jälkeen saadaan selville jokaisen solmupisteen siirtymä ja tämän avulla kappaleessa vaikuttavat jännitykset. Koska tällaisen systeemin ratkaiseminen vaatii monimutkaisia yhtälöryhmiä, on tietokoneen käyttö välttämätöntä. [10.]

9.1 Analyysin kulku

Analyysiä tehdessä ensimmäinen vaihe on idealisoida CAD-ohjelmalla tehty malli. Idealisointi tarkoittaa yleensä sitä, että rakenteesta yksinkertaistetaan sellaisia piirteitä ja yksityiskohtia, joiden mallintaminen on vaikeaa, mutta niiden vaikutus analyysin lopputulokseen on vähäistä. Toinen mahdollisuus on käyttää hyödyksi kappaleen symmetriaa ja tarkastella pelkästään toista puoliskoa. Näiden toimenpiteiden avulla saadaan rajoitettua laskennan vaatimaa laskentakapasiteettia ja aikaa merkittävästi. [10.]

Mallin idealisoinnin jälkeen muodostetaan elementtiverkko, joka tehdään nykyisin useasti ohjelmassa automaattisesti. Elementtiverkko tulee kuitenkin tarkastaa ja sitä voidaan muokata tarvittaessa. Koska analyysin tulokset saadaan yleensä ainoastaan elementin keskipisteestä, niin kannattaa elementtiverkkoa tihentää kohdissa joissa tulokset halutaan mahdollisimman tarkkoina. [10.]

Edellä kuvattujen vaiheiden päätyttyä määritetään reunaehdot, jotka määräytyvät rakenteen tuennan mukaan. Kappale täytyy tukea jollain tavalla jotta se ei lähtisi liikkumaan ja nämä tukilaitteet on kuvattava mahdollisimman todenmukaisesti elementtimallissa reunaehdoilla. Tukilaitteiden kohdalla oleviin solmupisteisiin määritetään kiinnityksiä,

jotka estävät sen siirtymät tiettyyn suuntaan. Esimerkiksi niveltuki kiinnittää rakenteen siirtymät, muttei kiertymiä. Tällöin tuen kohdalla olevasta solmupisteestä kiinnitetään pelkästään siirtymät. Reunaehtojen määrittämiseen on kiinnitettävä riittävästi huomiota, koska niiden virheellisyys on suurin syy FEM-laskennalla saatuihin virheellisiin tuloksiin. [10.]

Toinen haasteellinen ja huomiota vaativa vaihe on kuormitusten määrittäminen. Koska kuormitukset ovat monesti epämääräisiä sekä hankalasti mitattavia, joudutaan niiden arvioinnissa käyttämään usein yksinkertaistuksia ja suurta haarukkaa. Kuormitukset muodostetaan elementtimallin solmupisteisiin tai elementteihin, yleensä piste-, viiva-, tai pintakuormina. Analyysiin voidaan ottaa mukaan myös tilavuus ja lämpökuormien vaikutukset. [10.]

Ennen varsinaista laskentaa on määriteltävä myös materiaalin elastiset ominaisuudet ja elementtien ominaisuudet. Poikkipintasuureet, levyn paksuus tai eri osien paksuudet määräytyvät monesti jo 3D-mallissa. Määritettävänä arvoina on yleensä kimmokerroin ja Poissonin vakio. Kun kaikki analyysiin tarvittava on määritetty ja muodostettu, itse laskenta kestää muutamista sekunneista tunteihin riippuen mallin koosta. [10.]

Laskennan valmistuttua viimeisenä vaiheena on tulosten tarkastelu. Tuloksissa kiinnitetään yleisesti huomiota rakenteen muodonmuutoksiin ja jännityksiin. Niiden jakautuminen esitetään monesti väripintoina, joista tulokset ovat helposti havaittavissa. Vaikka FEM-laskennalla on suhteellisen helppoa toteuttaa lujoustarkasteluja, niin sillä voi tehdä myös helposti vääriä tuloksia. [10.]

Edellä esitetty analyysin kulku on lähes samanlainen kaikissa lujuuslaskentaohjelmistoissa. Näin ollen perusteiden ollessa hallussa siirtyminen uuteen ohjelmistoon ei ole ylitsempääsemättömän vaikeaa. Sain tästä henkilökohtaista kokemusta opettelemalla työtä tehdessä uuden ohjelmiston. Se vaati paljon työtä, mutta onnistui muutamaa ongelmaa lukuun ottamatta hyvin. Vaikka ohjelmistoilla on niistä vähänkin perillä olevan helppo ja nopea tehdä lujuusanalyysijä, niin analyysin tekijällä tulee olla riittävästi tietoa ja taitoa lujoustarkastelusta. Näin hän pystyy tarkastelemaan saatujen tulosten oikeellisuuden ja tarvittaessa vaikka todentamaan jonkin kohdan käsin laskennalla.

10 NIVELAURAN LUJUUSTARKASTELU

Kun nivelauran rakenneratkaisut oli kehitetty ja niiden perusteella koko rakenne mallinnettu, suoritin lujuusanalyysin Ansys-ohjelmistolla, joka on itsenäinen lujuuslaskentaohjelmisto. Päädyin tarkastelemaan lujuudet tietokoneohjelmistolla, koska käsin laskenta olisi ollut rakenteen monimutkaisuuden vuoksi lähes mahdotonta. Valitsin käytettäväksi ohjelmaksi Ansysin, koska sillä pystyy analysoimaan lähes millä tahansa koneensuunnittelussa käytössä olevalla ohjelmistolla tehdyt mallit. Oman haasteensa työhön aiheutti vähäinen käyttökokemus kyseisestä ohjelmistosta, mutta kuten monessa muussakin asiassa, työ opetti tekijäänsä.

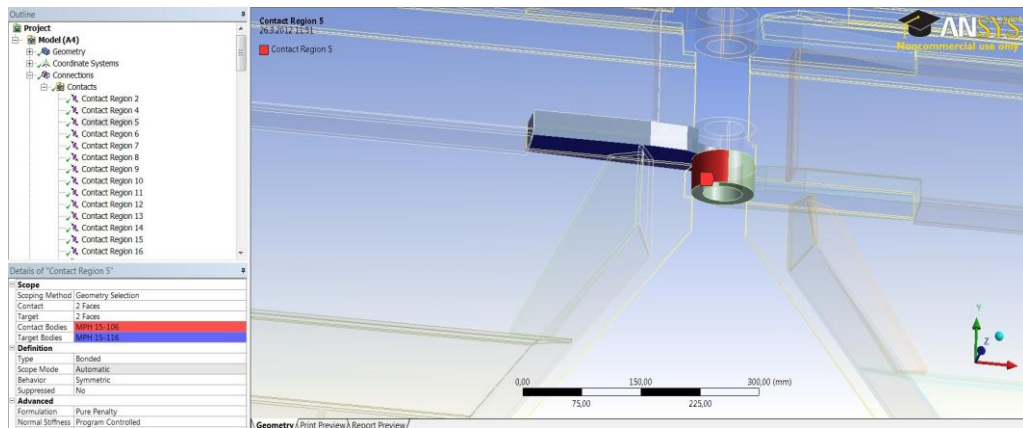
Aluksi tehtyjä malleja täytyi hieman muokata, jotta ne soveltuivat parhaalla mahdollisella tavalla lujuuslaskentaan. Idealisoin malleja poistamalla niistä turhia ja laskentaa hidastavia piirteitä. Tällaisia oli muun muassa terävät kulmat ja reiät, jotka monimutkaistavat turhaan laskentaverkkoa. Tämän jälkeen suunnitteluohjelmistolla tehdyt mallit tuli muuttaa eri tiedostomuotoon, jotta ne avautuivat lujuuslaskentaohjelmistossa. Tämä onnistui hyvin STEP-tiedostomuodolla, joka on yleinen siirrettäessä malleja eri ohjelmistojen välillä.

Kokeillessani koko nivelauran kokoonpanon lujuuslaskentaa, huomasin sen olevan hieman liian suuri kokonaisuus laskettavaksi yhdellä kertaa. Laskenta-aika oli todella pitkä ja käyttämässäni lujuuslaskentaohjelmiston lisenssissä oli rajoitettu elementtiverkkojen solmujen määrä. Rajoituksen takia laskentaverkosta tuli melko harva ja analyysi oli näin ollen epätarkka. Jouduinkin tarkastelemaan rakenteiden lujuutta kolmella pienemmällä kokoonpanolla, jotka olivat turvesiivet, lumisiivet sekä nivel- ja kiinnikerunko.

10.1 Turvesiipien lujuustarkastelu

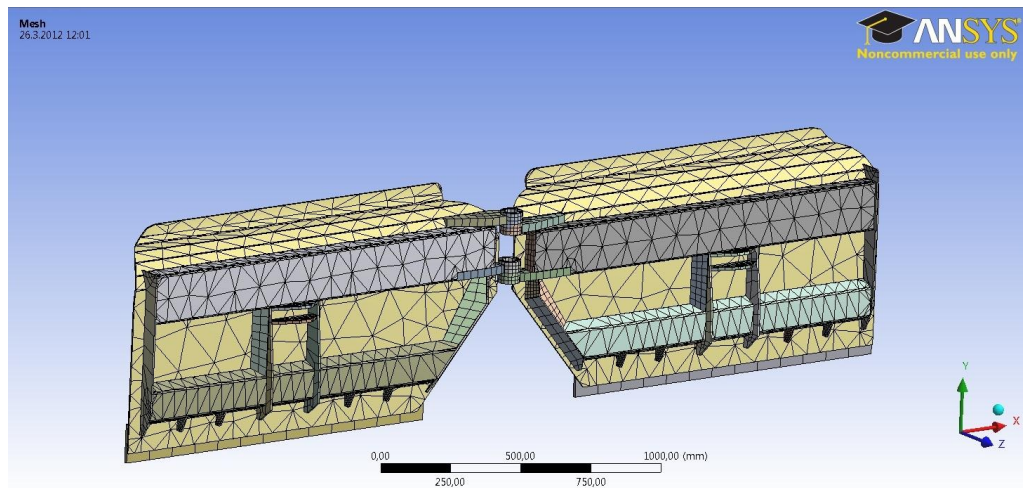
Turvetuotannon tarpeisiin suunniteltavien turvesiipien lujuustarkasteluun tein kokoonpanon, jossa oli molemmat siivet. Päädyin tähän ratkaisuun, koska siivet eivät ole aivan toistensa peilikuvia. Tuotuani mallin lujuuslaskentaohjelmaan täytyi ensimmäiseksi tarkistaa ja korjata osien väliset sidonnat, jotka määrittävät mallissa olevien osien keskinäiset kiinnitykset. Ohjelma muodostaa sidonnat automaattisesti ja niissä voi olla virheitä, jotka vääristävät laskentatulosta. Tällainen tilanne on nähtävissä kuvassa 7, jossa oh-

jelma on muodostanut sidonnan oikeanpuoleisen nivelholkin ja vasemmanpuoleisen nivelholkin kiinnikkeen välille, mikä ei vastaa todellista tilannetta.



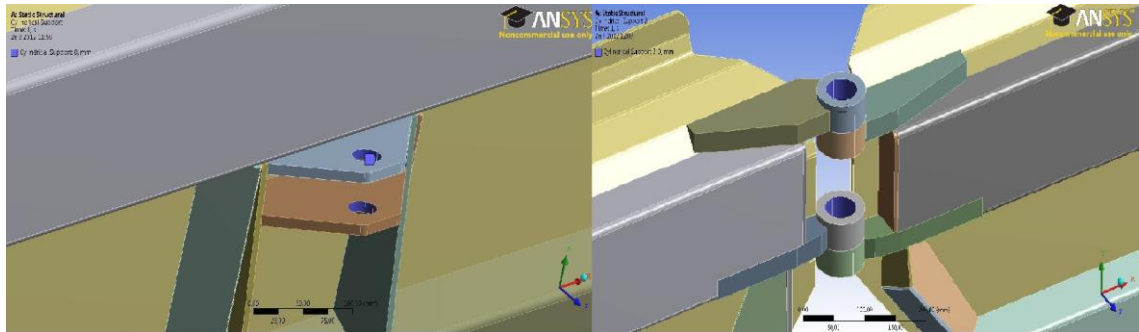
Kuva 7. Väärin määritetty sidonta, joka on oikeanpuoleisen siiven nivelholkin ja vasemmanpuoleisen nivelholkin kiinnikkeen välillä.

Saatuani mallin sidonnat kuntoon, tuli muodostaa laskentaverkko, joka esitetty kuvassa 8. Ohjelma muodosti verkon automaattisesti, minkä katsoin sen tarkastelun jälkeen olevan riittävän tarkka.



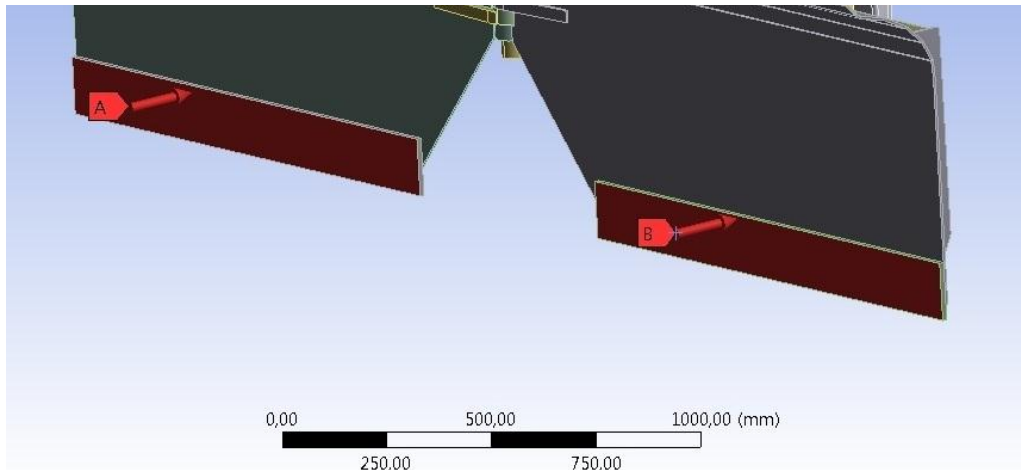
Kuva 8. Turvesiipien kokoonpano laskentaverkko muodostettuna.

Seuraavassa vaiheessa määritin turvesiipien tuennat. Kuvassa 9 on asetettu sylinterimäiset tuennat keskinivelen holkkeihin ja sylintereiden korvakeisiin kuten todellisessakin tilanteessa. Keskinivelen tuenta on lukittu joka suuntaan ja sylinterin korvakeiden sidonnassa on pystysuuntainen liike vapaa, koska todellisessakaan tilanteessa ei hydraulisylinteri välitä tämän suuntaisia voimia.



Kuva 9. Turvesiipien määritetyt tuennat.

Tuentojen määrityksen jälkeen asetin mallia rasittavan staattisen voiman, jonka laskenta esitetty luvussa 9. Mallinsin siipien alalaitoihin teräpinnat, joiden pinnalle voimat pystyi helposti määrittämään (kuva 10). Päädyin tähän ratkaisuun, koska todellisuudessaakin suurin osa voimista kohdistuu ajosuunnasta aivan siipien alalaitaan.

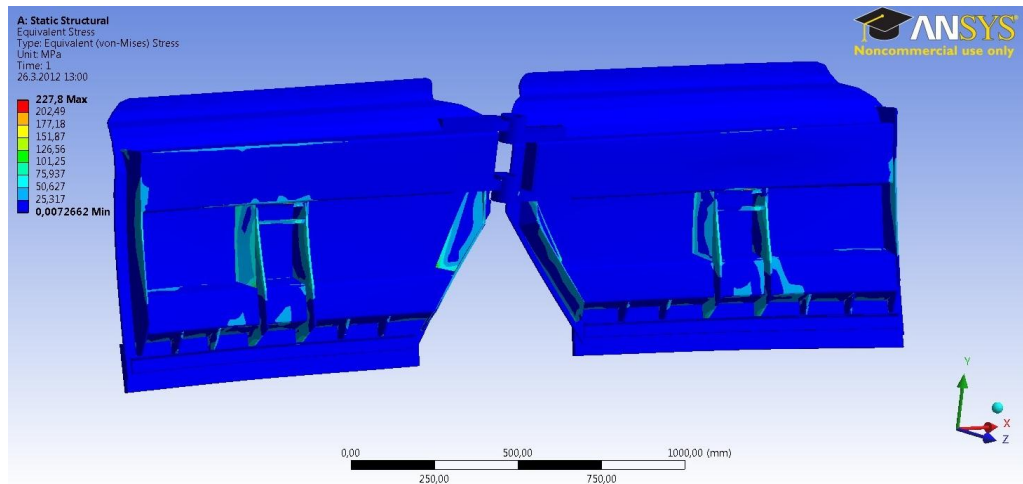


Kuva 10. Siipien alalaitaan asetetut rakennetta rasittavat voimat A ja B, joista kumpikin suuruudeltaan 19100 N.

Viimeiseksi ennen varsinaista laskentaa tuli määrittää tarkasteltavan mallin materiaalien ominaisuudet. Tämä onnistui helposti ohjelmassa olevan materiaalikirjaston ansiosta, johon on valmiiksi syötetty eri materiaalien ominaisuuksia.

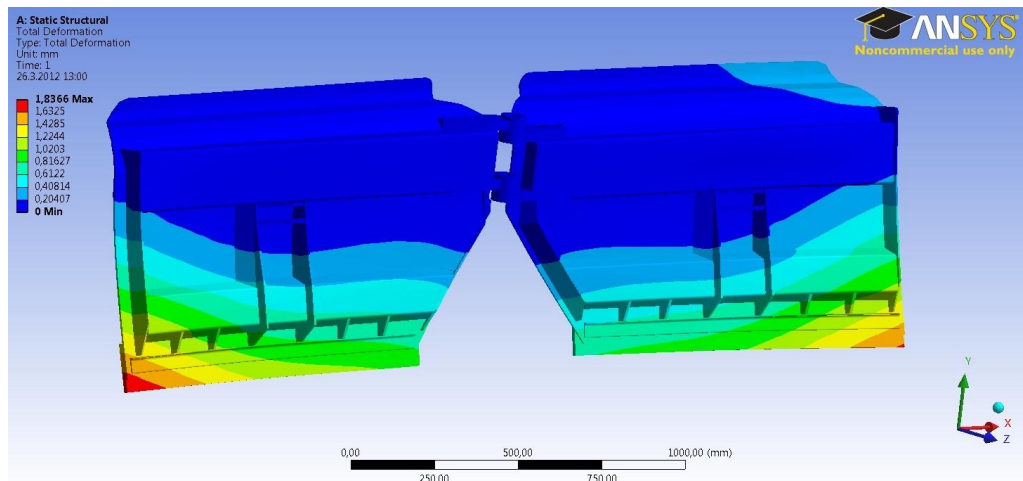
Edellä esitettyjen vaiheiden jälkeen itse laskenta ei vienyt kovinkaan montaa sekuntia ja viimeisenä vaiheena oli tarkastella saatuja tuloksia. Kuormituksesta aiheutuva von Mises -jännitys nousi suunnilleen arvoon 228 N/mm^2 . Suurimmat jännitykset esiintyvät odotetusti sylinterin korvakkeiden ympäristössä sekä keskinivelen alapuolella. Huippuarvot ovat mallin terävissä kulmissa, joten todellinen vertailujännityksen maksimi on hieman pienempi. Jännitysten jakautuminen rakenteessa esitetty kuvassa 11.

Von Mises -jännityksellä tarkoitetaan vakionmuodonvääristymisenergiyahypoteesia (VVEH), jossa materiaali vaurioituu pisteessä, missä vääristymisenergiatiheys saavuttaa materiaalille ja vauriotyypille kriittisen arvon [11]. Von Mises -jännityksen avulla laskeaan jännitysten yhdistettyä vaikutusta rakenteessa ja se onkin yleisesti käytetty vertailujännitys lujuuslaskennan yhteydessä.



Kuva 11. Jännitysjaakauma 38200 N kuormituksella.

Tarkasteltaessa maksimitaipumaa rakenteen kokonaistaipumaksi saatiin hieman alle 2 mm (kuva 12). Suurin taipuma sijaitsee siipien ulkokärjissä, kuten etukäteen oli jo oletettavissa. Taipuma ei ole kovinkaan suuri ottaen huomioon rakenteen koon.



Kuva 12. Kuormituksen aiheuttama rakenteen maksimitaipuma on hieman alle 2 mm.

Turvesiipien rakenne on suunniteltu valmistettavaksi rakenneteräksestä S 355. Kyseisen materiaalin myötölujuus on 355 N/mm^2 [8, s. 262]. Rakenteen varmuusluku määritellään yleensä vertaamalla materiaalin myötölujuutta R_m rakenteessa esiintyvään suurimpaan sallittuun jännitykseen δ_{sall} [11].

$$n = \frac{R_m}{\delta_{sall}} [11, \text{s. } 57.]$$

$$n = \frac{355 \text{ N/mm}^2}{228 \text{ N/mm}^2} = 1,56$$

Liikkuvien työkoneiden rakennuksessa käytetään yleisesti melko pieniä varmuuslukuja, jotta rakenteista ei muodostuisi turhan raskaita. Näin ollen edellä laskettu varmuus on riittävä tarkastellussa rakenteessa. Maksimitaipuma ei myöskään muodostunut kovin suureksi, joten rakenteen voi todeta suoritetun analyysin perusteella olevan staattisessa kuormituksessa riittävän luja.

10.2 Lumisiipien lujuustarkastelu

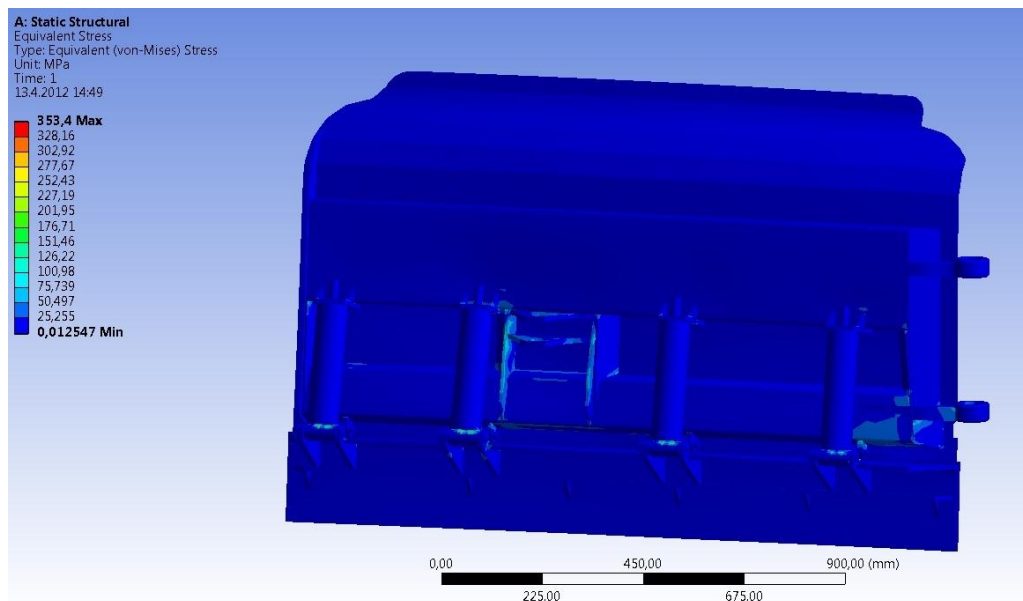
Talvikäyttöön tarkoitettujen lumisiipien lujuustarkastelussa idealisoin mallia sen symmetrisyyttä hyväksikäyttäen. Kummatkin siivet ovat samanlaisia ja valitsin analysoitavaksi vain toisen siiven, koska sain näin laskentaverkosta tarkemman. Toinen idealisointia vaativa kohde oli terän laukaisumekanismi. Siinä oleva jousi ja sen käyttäytyminen olisi erittäin hankalaa mallintaa lujuuslaskentaohjelmassa. Niinpä mallinsin jousen tilalle umpinaisen tangon, joka kuvaa rakenteessa erittäin jäykkää joustaa. Näin sain yksinkertaistettua laskentaa huomattavasti, sen ollessa kuitenkin lähellä todellista tilannetta.

Ennen itse laskentaa tehtävät määritykset oli paljon nopeampi tehdä kuin turvesiipien lujuuslaskennassa, koska mallin sidontojen ja laskentaverkon muodostaminen tapahtui aivan samanlaisin vaihein. Myös tuennat ja rasittava voima olivat samoissa kohden.

Lujuusanalyysin tuloksena von Mises -jännitykseksi lumisiiven rakenteessa muodostui 353 N/mm^2 . Jännityshuippu sijaitsee jäykistetyssä teränlaukaisumekanismissa, yksinkertaistetun jousen ja sen nivelholkin terävässä reunassa, joten todellinen maksimijänni-

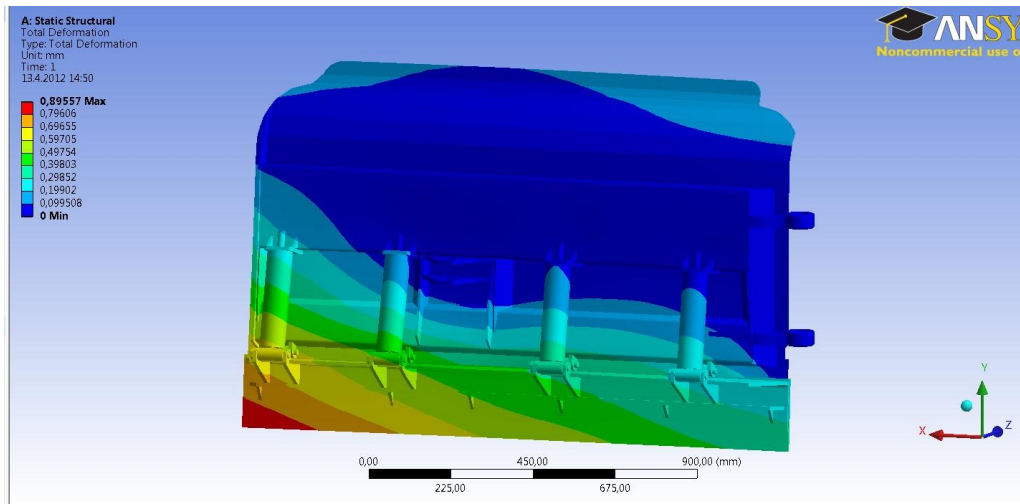
tys rakenteessa on jonkin verran alhaisempi. Muuten jännitys jakauman huippuarvot sijaitsevat sylinterin korvakkeen ja alemman nivelkorvakon ympäristössä. Lumisiiven rakenne on kuitenkin keveyden ja lujuuden maksimoimiseksi suunniteltu valmistettavaksi rakenneteräksestä Optim 650 MC. Kyseisen teräksen myötölujuus on 650 N/mm^2 [12]. Näitten arvojen perusteella voidaan laskea rakenteen varmuusluku.

$$n = \frac{650 \text{ N/mm}^2}{353 \text{ N/mm}^2} = 1,84$$



Kuva 13. Lumisiiven lujuusanalyysin tuloksena saatu jännitys jakauma.

Vaikka analyysistä saatu vertailujännityksen arvo oli suurempi kuin vastaava turvesiipin, niin taipumat lumisiivessä olivat pienempiä. Asetetun kuormituksen aiheuttama kokonaistaipuman arvoksi tuli hieman alle 1 mm (kuva 14). Tulos vastasi hyvin ennakkokäsityksiä, koska lumisiivet oli suunniteltu jäykemmiksi kuin turvesiivet.



Kuva 14. Lumisiiven maksimimuodonmuutos.

Lujuusanalyysin tuloksen perusteella laskettu varmuusluku valmistusmateriaalin myötölujuuten nähden on hyvällä tasolla, se oli 1,84. Maksimitaipumat ovat myös erittäin maltilliset. Vaikka teränlaukaisun jousimekanismin yksinkertaistaminen tuo laskentaan pientä epävarmuutta, niin analyysin tuloksista voidaan päätellä rakenteen olevan tarpeeksi luja.

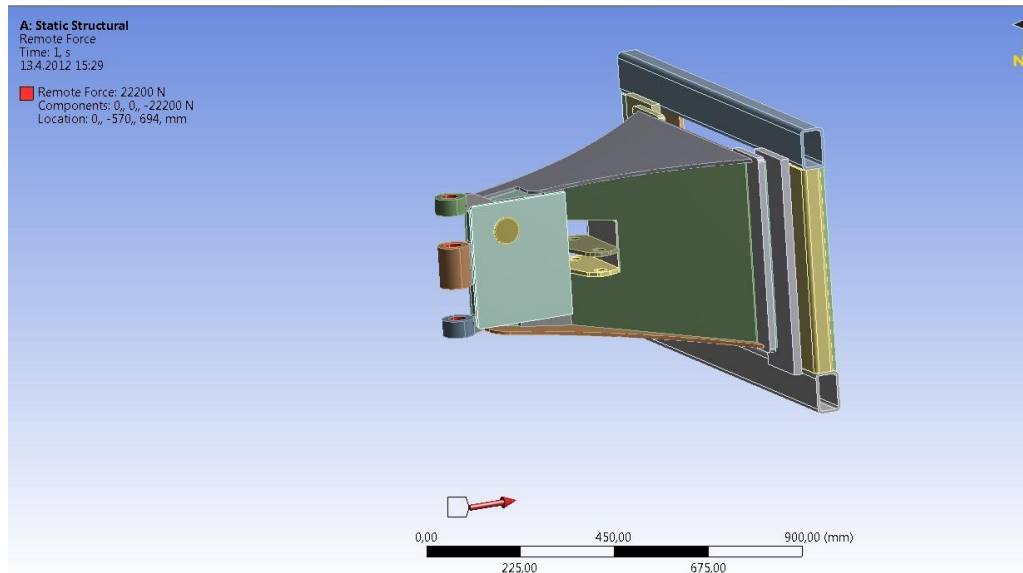
10.3 Nivel- ja kiinnikerungon lujuustarkastelu

Tarkastelin nivel- ja kiinnikerungon lujuutta yhdessä kokoonpanossa, koska niissä olevien osien lukumäärä ei noussut kovinkaan suureksi. Idealisoin mallia poistamalla siinä olevan ruuviliitoksen reiät, koska tarkastelin liitoksen lujuuden jo aikaisemmin käsin laskennalla.

Suurin haaste analysoitavassa mallissa oli siihen tulevien voimien määrittäminen. Siipien ja hydraulisynteroiden kautta kulkevat rasitukset kohdistuvat nivelholkkeihin ja sylinterin korvakkeisiin. Rasittavan voiman jakautumisen arvioiminen näiden välillä on hyvin hankalaa. Olettamukset lujuustarkastelussa tulee aina kuitenkin tehdä riittävällä varmuudella, asettaen tarkasteluun pahin mahdollinen tilanne.

Kohdistin molemminpuolisiin sylinterin korvakkeisiin kumpaankin 5000 N suuruisen voiman. Näin ollen keskiniveltä rasittavaksi voimaksi tuli 22000 N. Koska koko nivelauraa rasittava voima kohdistuu siipien alalaitaan, aiheuttaa se vääntörasituksen nivelrunkoon ja tämäkin tuli ottaa huomioon. Jotta analyysi kuvastaisi todellista tilannetta

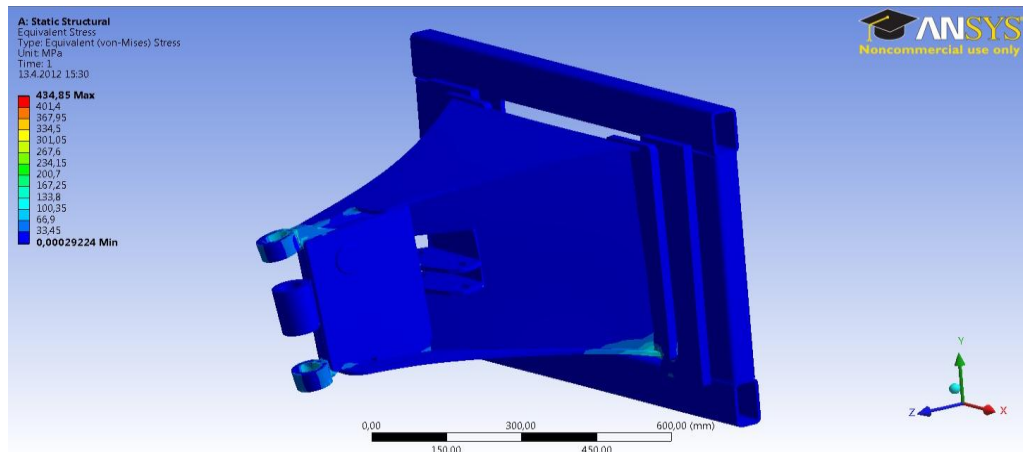
mahdollisimman hyvin, siirsin keskiniveltä rasittavan voiman alaspäin, joka kuvassa 15. Voiman sijainniksi määritin saman etäisyyden missä siiven alareuna sijaitsee. Turvesiivissä kyseinen etäisyys on suurempi, joten käytin sitä. Tuennan asetin kiinnikerungon pintaan, johon etukuormaajan pikakiinnikkeet kiinnitetään.



Kuva 15. Nivelholkkeihin kohdistuva voima.

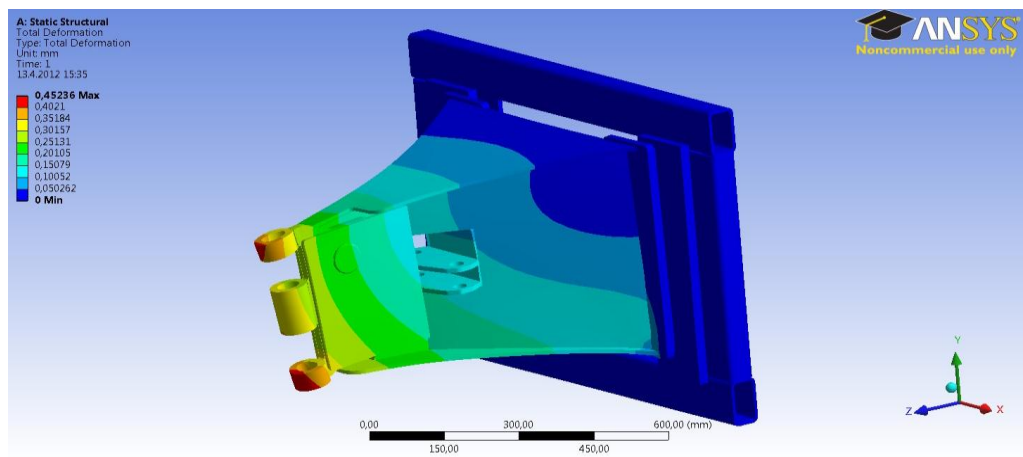
Laskennan tuloksena sain von Mises -jännitykseksi 435 N/mm^2 . Tämänkin lujuusanalyysin maksimijännityksen huippukohta sijaitsi terävissä kulmassa, ylimmän nivelholkin ja sen kiinnikelevyn liitoksessa. Jännitysten nousua liitoksien terävissä kulmissa voisi hillitä mallintamalla niihin tulevat hitsaussaumamat. Se olisi kuitenkin paljon aikaa vievää, joten jouduin rajaamaan sen tämän työn ulkopuolelle. Muualla jännitykset pysyivät alle arvon 300 N/mm^2 . Käytinkin varmuusluvun laskennassa kyseistä arvoa. Materiaalina tarkasteltavassa kohteessa rakenneteräs S 460 M. Teräksen myötölujuus 460 N/mm^2 [8, s. 262].

$$n = \frac{460 \text{ N/mm}^2}{300 \text{ N/mm}^2} = 1,53$$



Kuva 16. Nivel- ja kiinnikerunkoon muodostuva jännitysjaakauma.

Maksimitaipumaksi analyysin perusteella tuli hieman alle 0,5 mm. Taipuma ei ole kovin suuri ja se sijaitsee nivelkorvakon rakenteessa, joka nähtävissä kuvassa 17.



Kuva 17. Nivel- ja kiinnikerungon maksimitaipuma.

Nivelrunгон lujuusanalyysin tuloksena saatiin varmuusluvuksi 1,53. Vaikka varmuuslukua laskiessani käytin saatua pienempää maksimivertailujännityksen arvoa, niin rakenteen vähäinen kokonaistaipuma osoittaa, että se kestää siihen kohdistuvat rasitukset.

11 TUOTEKEHITYSPROJEKTIN VIIMEISTELY

Viimeistely on työvaihe, jonka eteneminen vaihtelee hieman tuotteen mukaan. Kaikki viimeistelytyöt sisältävät valmistuksessa tarvittavien dokumenttien laatiminen kehityksen konstruktion perusteella. Tässä vaiheessa suunnitellaan myös mahdollisen prototy-

pin valmistus ja testaus. Prototyypin valmistuksesta ja testauksesta saatujen kokemusten perusteella tehdään viimeistellyt suunnitelmat. Joissakin tapauksissa voidaan valmistaa ennen massatuotantoa myös ns. nollasarja. [1.]

Viimeistelyn ensimmäisessä vaiheessa tehdään tuotteen yksityiskohtien viimeistely. Tällöin päätetään muun muassa lopulliset valmistusmateriaalit, toleranssit, työmenetelmät jne. Myös tarvittavat kokoonpano- ja osapiirustukset, sekä niitä täydentävät kirjalliset työselostukset laaditaan. [1.]

Prototyypivaihe sisältää prototyypin valmistamisen suunnitelmien pohjalta, testauksen sekä tulosten analysoinnin ja suunnitelmien tarkistamisen. Prototyyppi voidaan tehdä parhaiden valmistusmenetelmien löytämiseksi ja/tai sen teknisten ja taloudellisten ominaisuuksien selvittämiseksi. Joskus prototyyppi voidaan tehdä paljon aikaisemmassa vaiheessa tuotekehitysprojektia, esimerkiksi luonnosteluvaiheessa ennen työpiirustusten tekemistä. [1.]

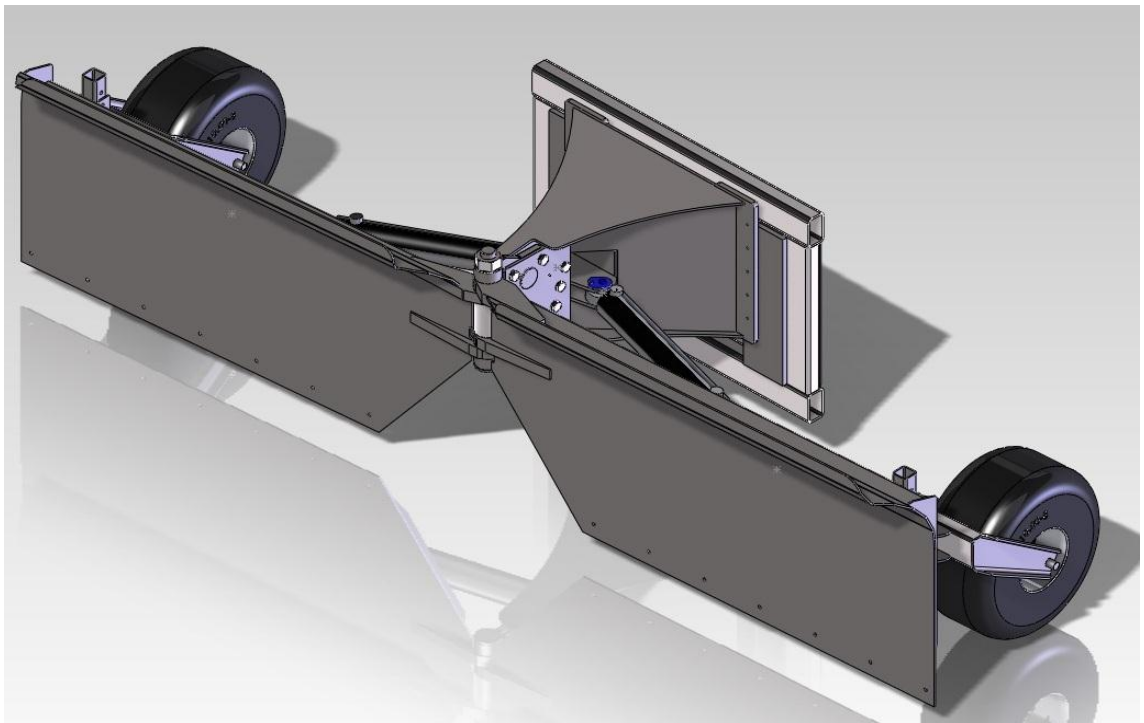
Prototyypivaiheen perusteella korjatut suunnitelmat tulee tarkistaa ennen tuotannon alkamista, jotta ne olisivat standardien ja yrityksen työtapojen mukaisia sekä valmistusystävällisiä. Vaikka tuotteen tuotanto alkaa se ei tarkoita täydellistä tuotekehitystyön päättymistä, vaan sitä on jatkettava, jotta tuote pysyy kilpailukykyisenä. Tässä työssä on suurena apuna käyttäjiltä tuleva palaute ja nämä kokemukset ovat myös erittäin arvokkaita muita tuotekehitysprojekteja toteuttaessa. [1.]

Nivelauran suunnittelu- ja kehitysprojektin viimeistelyvaihe alkoi sen jälkeen kun konstruktiio oli muodostettu kehitetyistä ratkaisuvaihtoehdoista. Suunnitellun rakenteen kestävyys oli myös tarkasteltu ja se on todettu riittäväksi lujuusanalyysin pohjalta.

Ensimmäisenä viimeistelin 3D-mallit, joihin tein muutamia muutoksia yksityiskohtiin lujuusanalyysin havaintojen pohjalta. Kuvassa 18 nähtävissä viimeistelty nivelauran malli, jossa on turvesiivet paikoillaan. Kun kaikki osien mallit ja kokoonpanot olivat valmiina, saattoi alkaa työ- ja kokoonpanopiirustusten tekeminen. Niiden tekeminen vei jonkin verran aikaa, mutta muuten työvaihe sujui ongelmitta. Tähän vaikutti osaltaan se, että nykyisillä 3D-suunnitteluohjelmistoilla näiden tekeminen on melko vaivatonta. Kolmeulotteisen mallin ollessa valmis sen kuvannot ovat helposti tuotavissa piirustus-

pohjalle. Tämän jälkeen tehdään mitoitus, tolerointi ja syötetään muut piirustukseen laitetut tiedot. Kokoonpanopiirustuksissa osaluetteloiden teko tapahtuu ohjelman avulla automaattisesti.

Toimeksiannossa määriteltiin, että prototyypin valmistus ja testaus kuuluu toimeksiantajalle, joten tämän työn puitteissa viimeistelyvaihe jäi hieman normaalia lyhyemmäksi. Työ- ja kokoonpanopiirustusten valmistuttua oli tuotekehityksen viimeistelyvaihe ja samoin kuin koko toimeksiannossa määritelty kehitystyö valmis.



Kuva 18. Viimeistellyn turvesiivillä varustetun nivelaurean 3D-malli.

12 POHDINTA

Tehtävänantona monitoimisen nivelauran kehitysprojekti oli mielenkiintoinen. Tiedostin sen olevan haastava, mutta katsoin samalla siinä olevan hyvät mahdollisuudet ammatilliseen kehitykseen. Prototyypin valmistus ja testaus olisi ollut mielenkiintoista sisällyttää työhön, mutta aikataulun takia se rajattiin projektin ulkopuolelle.

Jälkikäteen ajatellen edellä mainittu rajausta oli järkevä ja muutenkin työn rajaukset onnistuivat. Osittain tämän takia suunnittelussa aikataulussa pysyttiin hyvin, vaikka muutamat työvaiheet veivät suunniteltua pitemmän ajan. Tuotteelta vaadittavaan CE-merkintään tarvittavien asiakirjojen laadinta rajattiin työn ulkopuolelle, mutta sen vaatimukset on huomioitu koko tuotekehitysprojektin ajan.

Perehtyminen tarkemmin muutamiin systemaattisiin suunnittelu- ja tuotekehitysmenetelmiin työn alkuvaiheessa selvensi niiden periaatteita ja työmenetelmiä. Niihin tutustussa tarkentui myös tuotekehitystyön erilaiset näkökannat, jotka on hyvä ottaa huomioon työtä tehdessä. Menetelmien oppeja käytin soveltaen, jotta projektin toteuttamisesta saataisiin yritykselle sopiva ja toteutukseltaan riittävän jouheva tuotekehitysprojektin malli. Mielestäni työn toteutuksen kulku sujui hyvin ja uskoisin samantapaisen kehitystyön etenemisen sopivan toimeksiantaja yritykselle.

Työn kulku meni pitkälti systemaattisen suunnittelumetodin VDI 2222:sen mukaan, jakautuen neljään osioon, jotka ovat tuotekehitysprojektin valinta, tehtävän määrittely, kehittäminen ja viimeistely. Muun muassa vaatimuksia määriteltäessä käytin myös asiakaslähtöisen suunnittelun QFD-menetelmän periaatteita ja tein selvitystyötä muista nivelauroista, joiden ominaisuuksia pystyin käyttämään vertailukohtana. Valmistustekniikat ja kokoonpanon huomioon ottavan suunnittelun DFMA:n periaatteet huomioin erityisesti ratkaisuvaihtoehtojen kehittämisvaiheessa. Laatimani arvostelutaulukko ratkaisuvaihtoehtojen arviointiin on melko yksikertainen, mutta palveli tarkoitustaan hyvin.

Itse suunnittelutyö oli melko monipuolinen, jota tehdessä opintojen aikana opitut asiat nivoutuivat hyvin yhteen. Konstruktiossa on monia yksityiskohtia, joiden ratkaisemiseksi sai luonnosteluvaiheessa käyttää melko vapaasti luovaa ajattelua. Vertailin luonnostelemiani ratkaisuja ja pyrin hakemaan jokaiseen järkisyyn perustellun parhaan mah-

dollisen ratkaisun. Ratkaisuissa joutui monesti tasapainoilemaan valmistettavuuden, osatoiminnon toteuttamisen ja kestävyiden välillä, jotta tuotteesta muodostuisi mahdollisimman hyvä ja kustannustehokas.

Suurin oppiminen tapahtui lujuuslaskentaa tehdessä. Lujuustarkasteltavat rakenteet ovat melko monimutkaisia geometrialtaan, joten niiden analysointi käsilaskennalla olisi ollut lähes mahdotonta. Lisätyötä tässä vaiheessa aiheutti uuden lujuuslaskentaohjelman opettelu, mutta eteen tulleista ongelmista selvittiin koulun ammattitaitoisen henkilöstön opastuksella ja tutustumalla aiheesta olevaan teoriatietoon. Haasteita toi myös mallien idealisointi analyysiä varten, sekä siinä käytettävien voimien määrittäminen. Pääsin lujuuslaskennassa uskottaviin tuloksiin, mutta useiden muuttujien takia lopullinen varmuus rakenteiden kestävydestä selviää prototyyppejä testatessa. Mielenkiintoinen jatke työlle olisi ollut tutkia käytännössä valmistetun rakenteen todellisia jännityksiä venymäliuskaantureiden avulla ja verrata niitä laskennallisiin arvoihin.

Työn aikana kehitetty ja suunniteltu nivelausta vastaa mielestäni määritellyjä vaatimuksia. Työn tuloksena saatujen suunnitelmien lopullinen onnistuminen ja kehitetyn nivelaustan soveltuminen käyttötarkoitukseensa nähdään tietenkin vasta tulevaisuudessa prototyypin valmistuksen ja testauksen yhteydessä.

LÄHTEET

1. Jokinen Tapani. 2001. Tuotekehitys. Otatieto Oy. Hakapaino Oy Helsinki 2001. ISBN 951-672-313-6.
2. Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz. Koneensuunnitteluoppi. Suomen metalliteollisuuden Keskusliitto. Metalliteollisuuden Kustannus Oy Porvoo 1990. ISBN 951-817-468-7.
3. Hietikko Esa. 2008. Tuotekehitystoiminta. Savonia-ammattikorkeakoulun kuntayhtymä. Kopijyvä Oy Kuopio 2010. ISBN 978-952-203-093-1.
4. Lempiäinen Juhani, Savolainen Jari. Hyvin suunniteltu – puoliksi tehty. Suomen robotiikka yhdistys ry. Hakapaino Oy Helsinki 2003. ISBN
5. Tuomaala Jorma. Luova koneensuunnittelu. Tammertekniikka ky. Gummerus kirjapaino Oy Jyväskylä 1995. ISBN 951-9004-62-9.
6. Blom Seppo, Lahtinen Pekka, Nuutio Erkki, Pekkola Kari, Pyy Seppo, Rautiainen Hannu, Sampo Arto, Seppänen Pekka, Suosara Eero. Koneenelimet ja mekanismit. Edita Publishing Oy. Edita Prima Oy Helsinki 2006. ISBN 951-37-2903-6.
7. Standardi SFS-EN 1993-8. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun verkkolienssi. www.sales.sfs.fi/sfs. 19.3.2012.
8. Airila Mauri, Ekman Kalevi, Hautala Pekka, Kivioja Seppo, Kleimola Matti, Martikka Heikki, Miettinen Juha, Niemi Erkki, Ranta Aarno, Rinkinen Jari, Salonen Pekka, Verho Arto, Vilenius Matti, Välimaa Veikko. Koneenosien suunnittelu. WSOYpro Oy, WSOYpro Oy Helsinki 2010. ISBN 978-951-0-20172-5.
9. Tapio Riipinen. Miten traktorin vetokyky muodostuu. Koneviesti (7), 12-14.
10. Esa Hietikko. Palkki. Kustannusosakeyhtiö Otava. Otavan kirjapaino Oy Keuruu 2004. ISBN 951-1-19187-X.
11. Outinen Hannu, Salmi Tapio. Lujuusopin perusteet. Pressus Oy. Klingendahl Paino Oy Tampere 2004. ISBN 952-9835-64-7.
12. Rautaruukki Oyj verkkosivut. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-jaratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-MC#tab3>. 14.4.2012.

Vaatusluettelo		Metallipalvelu Hartikainen Oy
Laatija/t	Vesa Kähkönen	
laat. Pvm.	18.1.2012	
Versio no	1	
Sivu no	Tuote	
1	Monitoiminen nivelaura	
Muutos pvm	KV VV T	VAATIMUS
	KV	1. GEOMETRIA
	KV	Auran leveys keräävässä asennossa vähintään 2400mm.
	KV	Kiinnityspinnan sovelluttava traktorin pikakiinnikkeisiin.
	VV	Oltava turvamekanismi esteeseen ajon varalta.
		2.KINEMATIikka
	KV	Auran oltava keräävä ja levittävä
	KV	Auran siivet saavat kääntövoimansa traktorin hydraulikasta
	KV	Aurassa oltava sivuttaiskellunta
		3. VOIMAT
	KV	Auran tulee kestää 6500 kg:n painoisen traktorin työntövoiman.
		4.ENERGIA
	KV	Turpeen ja lumen siirtoon tarvittava energia saadaan traktorin työntövoimasta.
		5.MATERIAALIT
	T	Mahdollisimman kevyt ja kestävä.
		6.TURVALLISUUS
	KV	Laitteen oltava käyttäjälleen turvallinen.
	VV	Laitetta suunniteltaessa otettava huomioon sitä koskevat turvallisuusmääräykset.
		7.VALMISTUS
	Y	Helppo ja kustannustehokas valmistaa.
		9.KULJETUS
	VV	Auran kuljetus rahtiautossa mahdollista.
		10.KÄYTTÖ
	VV	Sovelluttava ympärivuotisiin käyttöolosuhteisiin
		11.KUNNOSSAPITO
	KV	Helppo ja nopea huoltaa
	KV	Vähäiset huoltokohteet
		12.KUSTANNUKSET
	VV	Oltava hinnaltaan kilpailukykyinen muihin markkinoilla oleviin nivelauriin
	T	Valmistettavissa yrityksen omalla laitekannalla
		13.TOIMITUSAIKA
	KV	Suunnittelutyöt oltava valmiina 31.5.2012
		KV=kiinteä vaatimus VV=vähimmäisvaatimus T=toivomus