



**TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
ÅBO YRKESHÖGSKOLA**

Opinnäytetyö

**SOLIDWORKS SIMULATION
– TULOSTEN RAPORTOINTI**

Vesa Ritvanen

Kone- ja tuotantotekniikka

2010

Kone- ja tuotantotekniikka	
Tekijä: Vesa Ritvanen	
Työn nimi: SolidWorks Simulation – tulosten raportointi	
Tuotekehitystekniikka	Ohjaaja Mika Seppänen
Opinnäytetyön valmistumisajankohta 2010	Sivumäärä 31
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin SolidWorks Simulation lujussimulointiohjelmiston integroituvuutta työn teettäjäyrityksen sellaisiin suunnittelutehtäviin, joissa tarvitaan lujuuslaskentaa. Ohjelmiston simulointimahdollisuudet ja raportointityökalut ovat kattavuudeltaan niin laajat, että oli tarve perehtyä ohjelmiston tuottamien tulosten raportointiin kyseisen yrityksen tarpeisiin.</p> <p>Tulosten raportointiin perehdyttiin ohjelmiston hankintapäätökseen eniten vaikuttaneen suunnittelutyön yhteydessä. Samasta ongelmakohdasta saatiin ohjelman eri työkaluin monenlaisia, niin graafisia kuin numeerisiakin tuloksia. Näitä vertailtiin keskenään ja niistä valittiin suunnittelutyön ominaisuuksien kannalta oleelliset. Tulosten esitystapojen valinnassa huomioitiin suunnittelutyön vaiheet, koska välivaiheista ei ole tarpeellista tallentaa niin täydellistä informaatiota käytetyistä suureista ja muista simuloinnin kannalta oleellisista määrittelyistä kuin viimeisestä tuotantoon menevästä tuotteen lopullisesta versiosta.</p> <p>Tämän opinnäytetyön yhteydessä suunnitellun laitteen lujustarkastelut ovat hyvin samankaltaisia kuin yrityksessä useimmiten tehtävät lujuuslaskentatyöt, joten oli helppo havaita mitkä ohjelman tarjoamat työkalut soveltuvat parhaiten myös tulevien suunnitteluprojektien lujussimulointien raportointeihin, joten työtä voidaan pitää ohjeena jatkossa tehtäviä simulointeja varten. Työn aikana ohjelmisto osoittautui erittäin hyödylliseksi lujuuslaskentaa vaativissa suunnittelutehtävissä. Yrityksessä saatiin kattava näkemys siitä, miten lujussimuloinnit kannattaa raportoida sekä suunnittelun aikana että lopullista arkistointia varten. Työ loi hyvän pohjan lujussimulointitöiden suorittamiselle. Simulointityötä ei ole yrityksessä jatkuvasti, joten tämänkaltaisesta raportoinnin ohjeesta on hyötyä tulevaisuudessa, ettei tarvitse miettiä uudelleen sopivia raportoinnin menetelmiä.</p>	
Hakusanat: lujuuslaskenta, simulointi	
Säilytyspaikka: Turun ammattikorkeakoulun kirjasto	

Mechanical and Industrial Engineering	
Author: Vesa Ritvanen	
Title: SolidWorks Simulation – Reporting of The Results	
Specialization line Research and Development Engineering	Instructor Mika Seppänen
Date 2010	Total number of pages 31
<p>This thesis focused on the suitability of the SolidWorks Simulation strength simulation software for the company's design studies where strength calculations are needed. There is such a wide range of tools for reporting the results of the simulations in the software that it was necessary to get acquainted with the reporting for the needs of the company.</p> <p>The reporting of the results was studied within the design project that mainly influenced the decision to purchase the software. From one simulation problem it is possible to get many different kinds of results such as graphical and numerical. These were compared with each other and the essential results were selected by the qualities of the design project. The different phases of the design process were taken into account in selecting the proper presentation for the results. For example, in the early phases only simple notes need to be saved whereas in the final product more specific reports are needed.</p> <p>The company's common strength calculations are very similar to the strength calculations of the product that was designed within this thesis. That is why it was relatively easy to see which tools of the software will be most suitable for the strength simulations of the design projects in the future. Therefore, the thesis could also be used as a guide for future simulations. During the project, the software proved to be very useful for the design projects where strength calculations are needed. The company got a comprehensive understanding of how simulations should be reported both during the design cycles and for the final filing. The work created a good template for the simulation processes. There is no continual simulation work in the company so this kind of guide for the reporting of the simulations will come in handy in the future, because you don't have to find out proper methods for reporting again.</p>	
Keywords: strength analysis, simulation	
Deposit at: Turku University of Applied Sciences Library	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	KUVAUKSET PÄÄTTÖTYÖHÖN LIITTYVISTÄ OHJELMISTOISTA	7
2.1	Solidworks	7
2.2	Solidworks Simulation	9
2.3	eDrawings	9
2.4	Pro/Engineer	9
3	ELEMENTTIMENETELMÄN HISTORIAA	10
4	LUJUUSOPIN ELEMENTTIMENETELMÄN TAUSTAA	11
4.1	Perusteita	11
4.2	Elementtiverkko	11
4.3	Solmusuureet	12
4.4	Ekvivalenttiset solmukuormitukset	13
4.5	Solmusuureiden ratkaiseminen	14
4.6	Ratkaisu elementin alueessa	14
5	ANALYSOINNIN VAIHEET YLEISESTI	15
5.1	Rakenteen idealisointi analyysiä varten	15
5.2	Elementtiverkko	15
5.3	Reunaehdot	15
5.4	Kuormitukset ja elementtien ominaisuudet	16
5.5	Analysointi	17

5.6	Tulosten tarkastelu	17
6	LUJUUSANALYYSIPROJEKTI	18
7	SIMULOINNIN RAPORTOINTI	19
7.1	Kohdistusvaunun simulointi osakokonaisuuksittain	20
7.1.1	Yläleuan ensimmäisen version simulointi	23
7.1.2	Yläleuan lopullisen version simulointi	27
7.1.3	Alaleuan simulointi	28
7.1.4	Rungon simulointi	29
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	30

LIITTEET

Liite 1. Yläleuan lopullisen mallin automaattinen raportti

KUVAT

Kuva 1:	Vanha kohdistusvaunu.	18
Kuva 2:	Lähes valmiit uudet kohdistusvaunut.	19
Kuva 3:	Kohdistusvaunu.	21
Kuva 4:	Pyykkipoika.	21
Kuva 5:	Yläleuka.	22
Kuva 6:	Alaleuka.	22
Kuva 7:	Runko.	23
Kuva 8:	Yläleuan voimat.	24
Kuva 9:	Yläleuan jännitykset.	25
Kuva 10:	Leikkauskuva yli 134MPa olevista jännityksistä.	25
Kuva 11:	Kokonaissiirtymät.	26
Kuva 12:	EDrawings malli simuloinnin tuloksista.	26
Kuva 13:	Lopullisen yläleuan jännitys jakauma.	27
Kuva 14:	EDrawings malli lopullisesta yläleuasta.	28

Kuva 15: Alaleuan 50MPa ylittävät jännitykset.	29
Kuva 16: Rungon jännitys jakauma, jossa muodonmuutosta on liioiteltu noin 230 kertaista.	30

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni tarkoitus on tutkia numeeriseen elementtimenetelmään perustuvan lujuusanalyysiohjelmiston Solidworks Simulationin integroituvuutta sellaisiin yrityksen suunnitteluprosesseihin, joissa tarvitaan lujuuslaskentaa. Työn teettäjä on vuonna 1985 perustettu insinööritoimisto S.T. Ritvanen Oy, jossa lujuuslaskenta on aiemmin toteutettu manuaalisesti lujuuslaskennan kaavoja hyväksi käyttäen. Siksi yritykseen hankittiin Solidworks Simulation -lujuussimulointiohjelmisto parantamaan suunnitteluprosesseja. Simulationiin sisältyvät raportointityökalut ovat kattavuudeltaan niin laajoja, että on tarve perehtyä ohjelmiston tuottamien tulosten raportointiin nimenomaan kyseisen pienen insinööritoimiston tarpeet huomioiden.

Suurin osa yrityksen projekteista on täysin uusien teräsrakenteiden ja koneiden suunnittelua, joten laskennasta saadaan monia välivaiheita, joiden perusteella mallia parannetaan. Jokaisesta välivaiheesta ei ole mielekästä arkistoida muuta kuin tärkeimpiä yksityiskohtia.

2 KUVAUKSET PÄÄTTÖTYÖHÖN LIITTYVISTÄ OHJELMISTOISTA

2.1 Solidworks

SolidWorks 3D -ohjelmisto on kehitetty mekaniikkasuunnittelun ja muotoilun tarpeisiin. Ohjelmisto käsittää osa-, pinta- ja kokoonpanomallinnuksen sekä ohutlevytoiminnot. Ohjelmisto tuottaa automaattisesti mm. piirustukset, osaluettelot, osanumeroinnin sekä tilavuus- ja massalaskelmat.

SolidWorks on helppo oppia ja käyttää, koska huippuergonomiseksi hiottu käyttöliittymä on tuttua Windowsia. Alusta alkaen Windows-käyttöjärjestelmään

suunniteltu ohjelmisto mahdollistaa muiden Windows-sovellusten helpon integroinnin esimerkiksi Microsoft Office tuoteperheeseen ja takaa yhteensopivuuden muihin Windows-pohjaisiin järjestelmiin.

SolidWorks -ohjelmistolla suunnitellaan tuotteet osina ja osista tehdään kokoonpanoja samalla logiikalla kuin koneenrakentajakin toimii. Ohjelma sisältää vakiona dynaamisen törmäystarkastelun. Liikkuvien mekanismien tarkastelua helpottaa SolidWorksin ainutlaatuinen, tähän saakka vain erillisten kinematiikkaohjelmien ominaisuus, jossa kohtaavat kappaleet liikuttavat toisiaan.

Piirustusdokumentit viittaavat suoraan todellisiin osiin ja ne ovat aina ajan tasalla. Muutossuunnittelu on nopeaa. Kaikki malliin, kokoonpanoon, piirustuksiin tai osaluetteloon tehdyt muutokset päivittyvät aina automaattisesti. Piirustukset ja osaluettelot syntyvät suunnittelun sivutuotteena, samoin asennusohjeiden ja huolto-ohjeiden räjäytyskuvat. Nämä voidaan esittää myös animaationa, jos SolidWorks Animator -lisäohjelma on otettu käyttöön. SolidWorks sisältää myös pintamallinnusominaisuuksia, jotka ovat erityisen tärkeitä kuluttajatuotteita valmistaville yrityksille tai muotintekijöille.

SolidWorks toimii yhdessä useimpien Suomen markkinoilla olevien CAM-ohjelmien kanssa, esimerkiksi MasterCAM, SurfCAM, EdgeCAM, AlphaCAM, EXAPT ja PowerMill. Ohutlevyosien työstöohjeet voidaan siirtää suoraan konekielisenä levytyökeskukseen, laser- tai polttoleikkaukseen. Vastaanottopäässä voi olla esimerkiksi Nestix- tai Optimax -ohjelmat.

SolidWorks on panostanut paljon avoimeen kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon, mikä tarkoittaa tehokasta 3D-mallitiedostojen ja piirustusten siirtoa muista CAD-ohjelmista Solidworksiiin ja tiedon siirtoa SolidWorksista muihin CAD-ohjelmiin. SolidWorks lukee sujuvasti AutoCAD -dokumentteja ja SolidWorks -mallista voidaan tuottaa suoraan AutoCADin piirustusdokumentteja.

Tiedonsiirtoformaateista voidaan käyttää mm. IGES, STEP, DXF, DWG, Parasolid, SAT (ACIS), STL, VDAFS, VRML, Pro/ENGINEER, Unigraphics, SolidEdge, Inventor, Cadkey ja Catia Graphics -formaatteja. (CadWorks [viitattu 17.4.2010].)

2.2 Solidworks Simulation

”SolidWorks Simulation on SolidWorksiin lähdekooditasolla integroitu, jokaisen suunnittelijan helppokäyttöinen lujuuslaskentamoduli. Se sisältää lineaarisen/staattisen lujuusanalyysin, myötörajan tarkastelun, lämpöanalyysin sekä nurjahdukset. Malliin tehdyt muutokset ovat välittömästi analysoitavissa ilman hidastavia tiedonsiirtoja, tuloksien näkyessä SolidWorks työpöydällä. Jännitykset, siirtymät, myötörajat, ominaistajuudet sekä lämmönsiirtymät nähdään havainnollisina väritulosteina.” (CadWorks [viitattu 17.4.2010].)

2.3 eDrawings

”EDrawingsilla on hyvä siirtää suunnittelutietoa eri sidosryhmien välillä. Voit lähettää SolidWorks -malleja tai piirustuksia muille tarkasteltavaksi sähköpostilla pakatussa muodossa. Vastaanottajan ei tarvitse asentaa koneeseensa erillisiä katseluohjelmia, sillä EXE-muodossa lähetetty eDrawings -paketti sisältää piirustuksen ja mallin lisäksi myös katseluohjelman. Kommunikaatio eri sidosryhmien välillä helpottuu ja tehostuu.” (cadON [viitattu 12.3.2010].)

2.4 Pro/Engineer

”Pro/ENGINEER on maailman johtava 3D-suunnitteluohjelmisto. PTC loi aikanaan teollisuuden 3D-markkinan tuomalla markkinoille parametriseen ja assosiatiiviseen Pro/ENGINEER 3D-suunnitteluohjelmiston. Siitä lähtien Pro/ENGINEER on ollut käytetyin 3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmisto.” (Convia [viitattu 15.4.2010].)

3 ELEMENTTIMENETELMÄN HISTORIAA

Lentokoneteollisuuden piirissä 1950-luvun alkupuolella tehtiin ensimmäiset merkittävät elementtimenetelmän soveltamiset rakenteiden lujuusanalyysiin. Elementtimenetelmä -termi (finite element method, FEM) esiintyi ensimmäisen kerran noin vuonna 1960. Tuolloin pyrittiin sauvarakenteissa luonnolliselta tuntuvaa ”elementtikäsittelyä” eli rakenteen jakamista pienempiin tarkasteltaviin osiin laajentamaan muihinkin rakenteisiin intuitiivisesti. Samaan aikaan tapahtunut tietokoneiden kehittyminen teki tämäntyyppiset laskumenetelmät käytännössä mahdollisiksi.

1960-luvun puolivälissä vasta ymmärrettiin elementtimenetelmän ja jo klassisen Ritzin likimääräismenetelmän samankaltaisuus. Tämä loi samalla matemaattisen pohjan siihen saakka pääasiassa insinöörien kehittämälle elementtimenetelmälle. Molemmissa menetelmissä valitaan sopivat likimääräisfunktiot kuvaamaan tuntematonta suuretta. Tarkasteltava alue jaetaan elementtimenetelmässä tätä varten osa-alueisiin eli elementteihin, ja yksi funktio kuvaa ratkaisua vain tiettyjen elementtien alueella. Lisäksi approksimaatio valitaan elementtimenetelmässä niin, että funktioiden aluksi tuntemattomat kertoimet ovat samalla tutkittavan suureen arvoja elementtien tietyissä pisteissä eli niin sanotuissa solmupisteissä. Tuntemattomilla parametreilla ei yleensä ole mitään fysikaalista vastinetta Ritzin menetelmässä. Tämä laajennus tekee epäsäännöllisten alueiden ja reunaehtojen käsittelyn huomattavasti helpommaksi kuin Ritzin menetelmässä, mutta johtaa usein suurempiin yhtälöryhmiin. Tosin matemaatikko Courant oli tehnyt jo vuonna 1943 tämän suuntaisen laajennuksen Ritzin menetelmään, mutta laskentakapasiteetin puuttuessa sitä ei voitu silloin soveltaa.

1960-luvulta lähtien elementtimenetelmän matemaattisten perusteiden ymmärtäminen on merkittävästi laajentanut sovelluskohteita. Rakenteiden analyysiin alun perin tarkoitettua menetelmästä on tullut tärkeä matemaattinen menetelmä osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeeriseksi ratkaisemiseksi. Alkuperäinen käyttötarkoitus on kuitenkin säilynyt, ja elementtimenetelmä nykyään on insinöörin

jokapäiväinen työkalu. Ensimmäiset elementtimenetelmän sovellutukset Suomessa ovat 1960-luvun lopulta. Suomen korkeakouluissa opetus puolestaan käynnistyi 1970-luvun alussa. (Hakala, Matti, 1994, 13.)

4 LUJUUSOPIN ELEMENTTIMENETELMÄN TAUSTAA

4.1 Perusteita

Lujuusopin elementtimenetelmän perusyhtälöt voidaan johtaa kaikille rakennetyypeille lähtemällä liikkeelle lujuusopin perussuureita hallitsevista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä tai näiden kanssa ekvivalenteista työ- ja energiaperiaatteista. Perusyhtälöt muodostetaan elementtien alueissa toteutettavan interpoloinnin avulla ja niistä saadaan tarkasteltavalle tehtävälle likiratkaisu. Kolmiulotteisille solidirakenteille ja pintarakenteille (levyt, laatat ja kuoret) interpolointiin perustuva elementtimenetelmä on ainoa mahdollinen. Ristikko- ja kehärakenteille on mahdollista käyttää myös yksinkertaisempaa suoraa elementtimenetelmää, jolloin perusyhtälöt muodostetaan sauva- ja palkkiteoriaa käyttäen. Koska interpolointia ei suorassa elementtimenetelmässä käytetä, johtaa se sovellettavan teorian puitteissa tarkkaan ratkaisuun.

4.2 Elementtiverkko

Lujuusopin perusdifferentiaaliyhtälöiden analyttinen ratkaiseminen onnistuu vain yksinkertaisen geometrian, kuormituksen ja tuennan omaavissa perustapauksissa. Elementtimenetelmässä geometrisesti mutkikas kappale jaetaan äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan tarpeeksi yksinkertaisia. Näitä jako-osia sanotaan elementeiksi. Kolmiulotteisen kappaleen elementteinä käytetään neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, joiden reunapinnat voivat olla tasoja tai yksinkertaisia kaarevia pintoja. Näitä sanotaan tetraedri-, kiila- ja tiiliskivielementeiksi vastaavasti. Pintarakenteiden yhteydessä käytetään neli- ja kolmisivuisia tasoelementtejä, joiden reunaviivat voivat olla suorita tai yksinkertaisia käyriä viivoja. Tasoelementtejä sanotaan nelikulmio- ja

kolmioelementeiksi. Viivarakenteissa käytetään janaelementtejä, tyypillisiä janaelementtejä ovat sauva- ja palkkielementti. Lisäksi on käytössä suuri joukko harvinaisempia elementtejä erityistarkoituksiin, kuten esimerkiksi kontaktielementit, liitoselementit, särön kärjen elementit ja puoliäärettömät elementit.

Kappaleiden jako-osina käytettävien elementtien koko voi vaihdella paljon tarkasteltavan ongelman luonteesta riippuen, myös tietyn kappaleen eri osissa voi esiintyä suuria kokovaihteluja. Kappaleen elementtijaossa voidaan käyttää samanaikaisesti erityyppisiä ja muotoisia sekä erilaiset geometriset ja materiaaliominaisuudet sisältäviä elementtejä, mikä tekee elementtimenetelmästä joustavan yhdistettyjen rakenteiden käsittelyssä. Kappale kuvataan elementtijoukolla, jota sanotaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Elementtiverkko kuvaa todellista kappaletta usein vain likimääräisesti varsinkin pinta- ja solidirakenteilla, mikä aiheuttaa saataviin tuloksiin virhettä. Tämä mallinnusvirhe ei lujuuslaskennassa ole kovin merkittävä, mikäli käytetään kaarevareunaisia ja riittävän pieniä elementtejä. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiinsa tietyissä pisteissä, joita sanotaan solmuksi. Elementtiverkko koostuu joukosta elementtejä, jotka liittyvät toisiinsa solmuissa.

4.3 Solmusuureet

Elementtiverkon solmuihin liittyvät tietyt, lujuuslaskennan kannalta kiinnostavat suureet, jotka jakaantuvat siirtymä- ja voimasuureisiin. Siirtymäsuureita ovat translaatio ja rotaatiosiihtymät. Voimasuureisiin kuuluvat jännityskomponentit, kannattimen poikkileikkauksen rasitukset ja pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet. Käytettävät solmusuureet riippuvat siis suuresti siitä, minkä tyyppisestä elementistä on kyse.

Koska elementtiverkossa on tavallisesti suuri määrä solmuja ja elementtejä, joita joudutaan käsittelemään yksittäisinä ja kokonaisuutena, tarvitaan solmusuureille looginen ja yksinkertainen merkintäteknikka. Elementtimenetelmässä on hyödyllistä käyttää matriisilaskentaa, joten solmusuureet järjestetään pystyvektoreiksi. Koska elementtimenetelmän pystyvektorit auki kirjoitettuna voivat olla hyvin tilaa vieviä, kirjoitetaan ne usein rivinsuuntaisesti tilan säästämiseksi. Tällöin ne merkitään

aaltosulkeisiin erotukseksi todellisista vaakavektoreista, jotka ovat hakasulkeissa. Puhuttaessa solmusta tai elementistä lokaalisti käytetään solmusuureiden symboleina pieniä kirjaimia ja vastaavasti verkkotason solmusuureiden symboleina ovat isot kirjaimet (jännityksille käytetään aina pieniä kirjaimia). Jos solmun tai elementin numero on ilmaistava solmusuureessa, se merkitään yläindeksiksi. Vielä on otettava huomioon suunta, johon solmusuureen mittaus tapahtuu. Mittaus voi tapahtua elementtiverkkoon liittyvässä globaalikoordinaatistossa tai elementtiin kiinnitetyssä lokaalikoordinaatistossa. Mikäli mittaussuunta on ilmaistava, se merkitään suurelle alaindeksiksi isolla kirjaimella globaalimittauksessa ja pienellä kirjaimella lokaalimittauksessa. Jos sekaannuksen vaaraa ei ole, jätetään solmusuureista indeksit pois.

4.4 Ekvivalenttiset solmukuormitukset

Edellä ajateltiin alustavasti ulkoisten kuormitusten vaikuttavan vain elementtiverkon solmuihin pistevoimina ja -momentteina. Rakenteeseen voi näiden lisäksi kohdistua elementin alueella olevia kuormituksia eli elementtikuormituksia, kuten esimerkiksi palkkielementillä tasainen kuormitus tai levyelementillä reunapaine. Ne voidaan ottaa huomioon ekvivalenttisten solmukuormitusten avulla. Tämä tarkoittaa sitä, että elementtikuormitukset muunnetaan tietyn samanarvoisuusperiaatteen avulla solmuihin vaikuttaviksi pistekuormituksiksi. Sauva- ja palkkirakenteilla periaatteena on, että ekvivalenttiset solmukuormitukset ja elementtikuormitukset aiheuttavat rakenteelle samat solmusiirtymät. Kaikkiin tapauksiin soveltuva yleisempi periaate saadaan tarkastelemalla

elementtikuormituksen tekemää mekaanista työtä.

Käytännössä elementtikuormitusten huomioonottaminen ekvivalenttisina solmukuormituksina merkitsee sitä, että solmukuormitusvektorin $\{F\}$ tiettyihin alkioihin lisätään ekvivalenttisten solmukuormitusten mukaiset termit. Ekvivalenttisilla solmukuormituksilla täydennettyä solmukuormitusvektoria sanotaan elementtiverkon kokonaiskuormitusvektoriksi ja sitä merkitään symbolilla $\{R\}$. Edellä kuvailtua kokonaiskuormitusvektorin muodostamistapaa kutsutaan sijoittelusummaukseksi

4.5 Solmusuureiden ratkaiseminen

Elementtimenetelmässä ratkaistaan ensimmäiseksi solmusuureet. Tämän jälkeen lasketaan elementtien alueilla tuntemattomat suureet niiden tunnetuista solmuarvoista lähtien. Viivarakenteilla tämä voidaan tehdä tarkasti, mutta yleisempien rakenteiden tapauksessa joudutaan tyytymään likiratkaisuun interpolointia käyttäen.

Solmusuureiden ratkaiseminen on elementtimenetelmässä keskeinen tehtävä. Tarjolla on useita ratkaisumenetelmiä, jotka eroavat toisistaan lähinnä siinä, missä järjestyksessä solmusuureet ratkaistaan. Tehokkaimmaksi ratkaisutavaksi on osoittautunut siirtymämenetelmä, jossa solmusiirtymät ratkaistaan ensin.

4.6 Ratkaisu elementin alueessa

Kun solmusuureet on ratkaistu, on ratkaisu saatava ulotetuksi myös solmujen ulkopuolelle elementtien alueeseen. Tämä onnistuu viivarakenteilla tarkasti lujuusopin perusteoriaa käyttäen. Esimerkiksi palkkielementin rasituskuvat voidaan määrittää, kun tunnetaan elementtikuormitukset ja rasitusten arvot elementin päissä. Samoin palkkielementin taipumaviiva voidaan laskea, kun tunnetaan elementtikuormitukset sekä taipumat ja kiertymät elementin päissä. Pinta- ja solidirakenteilla tarkkaa ratkaisua elementin alueessa ei saada solmusuureisiin nojautuen, vaan on tyydyttävä likimääräiseen ratkaisuun. Likiratkaisu perustuu siirtymien ennalta valittavaan interpolointiin solmuarvoista lähtien. Interpoloinnissa käytetään yksinkertaisia polynomeja interpolointifunktioina, jolloin tiettyyn solmusiirtymään liittyvä funktio kertoo, kuinka suuri paino sillä on elementin eri kohtien siirtymiä määritettäessä. Interpolointia käytettäessä elementin jäykkyyismatriisin ja ekvivalenttisten solmukuormitusten lausekkeet perustuvat siirtymien interpoloituihin lausekkeisiin ja ovat likimääräisiä. Elementtimenetelmällä saatavan ratkaisun tarkkuus riippuu valitusta interpoloinnista, joten siihen on elementtimenetelmässä pakko kiinnittää melkoisesti huomiota. (Lähtenmäki, 2006 [viitattu 17.4.2010].)

5 ANALYSOINNIN VAIHEET YLEISESTI

5.1 Rakenteen idealisointi analyysiä varten

Ennen varsinaista analyysiä rakenne on idealisoitava. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että rakenteesta etsitään mahdollisia symmetriatasoja sekä yksinkertaistetaan tarpeettoman monimutkaisia kohtia ja että muutetaan kuormitukset riittävän yksinkertaiseen muotoon, jotta ne voidaan koodata tietokoneelle.

5.2 Elementtiverkko

Idealisoinnin jälkeen pohditaan rakenteen jako elementteihin. Yleensä analyysin tulokset saadaan esiin vain kunkin elementin keskipisteessä tai korkeintaan muutamassa pisteessä elementin alueella. Siksi on syytä tihentää elementtiverkkoa niissä kohdin, missä analyysin tulokset halutaan mahdollisimman tarkkoina. Myös kohdat, joissa on odotettavissa suuria muutoksia tarkasteltavassa suureessa, on syytä verkottaa tavallista tiheämmällä elementtiverkolla.

Elementtiverkko muodostetaan nykyisin yhä useammin automaattisesti niin sanotulla esikäsitteijällä. Siinä rakenteen idealisoitu geometria kuvataan aluksi viivojen, pintojen ja tilavuusalkioiden avulla tai siirretään sellaisenaan CAD järjestelmästä. Elementtiverkon jako ja tiheys voidaan määrittää tiettyjen piirteiden avulla ja varsinaisesta verkotuksesta huolehtii itse ohjelma.

5.3 Reunaehdot

Rakenne on aina tuettava jollain tavalla, jotta se ei lähtisi liikkumaan. Tukilaitteet on kuvattava myös elementtimallissa tuennoilla, jotka muistuttavat mahdollisimman paljon todellista tilannetta. Tämä tapahtuu siten, että tukilaitteiden kohdalla oleville solmupisteille määritetään kiinnityksiä tiettyihin suuntiin. Esimerkiksi palkin päässä oleva kahden arvoinen tuki kiinnittää rakenteen pysty- ja vaakasuuntaisia siirtymiä vastaan, joten tuen kohdalla olevasta solmupisteestä on estettävä siirtymät

mainittuihin suuntiin. Vastaavasti kolmen arvoisesta tuesta kiinnitetään edellisten lisäksi kiertymä. Kolmiulotteisissa palkkirakenteissa on kolmannen siirtymäsuunnan lisäksi kaksi uutta kiertymää.

Rakenteen idealisoinnissa pyritään hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan symmetriaa. Symmetriatasolla voidaan rajoittaa rakenteen analysointi ainoastaan toiseen puoliskoon, jolloin säästetään huomattavasti työtä ja laskenta-aikaa. Symmetria takaa sen, että symmetriatason toiselle puolelle jäävä rakenteen osa toimii täsmälleen samalla tavalla kuin analysoitu rakenne.

Symmetria otetaan huomioon rakenteen elementtimallissa reunaehtojen avulla siten, että symmetriatasoa vastaan kohtisuora siirtymä ja mahdollinen symmetria-akselin suuntainen kiertymä kiinnitetään.

Reunaehdot ovat useimmiten syynä FEM -laskennalla saatuihin virheellisiin tuloksiin. Sen vuoksi niiden määritykseen on kiinnitettävä erityisen suurta huomiota. Pienikin poikkeama todellisista reunaehdoista saattaa saada aikaan hyvin radikaaleja muutoksia tuloksissa. Toisinaan tosin rakenteen muoto on niin hankala, että reunaehtojen kuvaaminen todellisuutta vastaavalla tavalla ei käytännössä onnistu.

5.4 Kuormitukset ja elementtien ominaisuudet

Kuormitukset muodostavat yleensä reunaehtojen ohella toisen ongelman rakenteen mallintamisessa. Tämä ongelma ei tule esiin pelkästään elementtimenetelmää käytettäessä vaan kaikissa tilanteissa. Usein kuormitukset ovat niin epämääräisiä, että ilman suurimittaisia yksinkertaistuksia niiden määrittely ei onnistu.

Elementtimalliin kuormitukset voidaan yleensä syöttää piste-, viiva- tai pintakuormina joko solmupisteisiin tai elementeille. Esikäsittelijällä voidaan määrittää kuormituksia myös laajemmille kokonaisuuksille, kuten viivoille tai pinnoille. Myös tilavuus- ja lämpökuormien vaikutukset voidaan ottaa analyysiin mukaan. Tyypillisiä tilavuuskuormia ovat oma paino tai erilaisista kiihtyvyyksistä johtuvat kuormat.

Kuormitusten lisäksi ennen analysointia on vielä määritettävä elementtien materiaali- ja mahdolliset muut ominaisuudet. Elementeille on tyypistä riippuen määritettävä yleensä ainakin kimmokertoimen ja Poissonin vakion arvot. Lisäksi saatetaan tarvita esimerkiksi palkin poikkipintasuuureita, levyn paksuutta tai komposiittirakenteen eri osien paksuuksia.

5.5 Analysointi

Mallin määrittelyä seuraa analysointi, joka mallin koon mukaan saattaa kestää muutamista sekunneista tunteihin. Jo tavallisella tietokoneella kyetään nykyisin analysoimaan hyvinkin mutkikkaita ja isoja malleja. Analyysi on tavallisesti luonteeltaan staattinen ja lineaarinen, mikä tarkoittaa sitä, että jännitysten on pysyttävä materiaalin suhteellisuusrajan alapuolella. Tällöin kimmokerroin pysyy vakiona, ja kuormitukset ovat lepäviä eli staattisia. Yhä useammin suoritetaan nykyisin myös epälineaarisia analysointeja. Silloin siirrytään alueelle, jossa kimmokerroin tai jokin muu osa mallista ei enää käyttäydy lineaarisesti. Mahdollisia ovat myös dynaamiset analyysit, joissa voidaan tarkastella vaihtelevien kuormien vaikutusta joko väsymislujuuteen tai rakenteen värähtelyihin. Rakenteen stabiilisuutta voidaan analysoida samoin kuin lämpötila- ym. kenttien jakautumista rakenteessa.

5.6 Tulosten tarkastelu

Analyysin jälkeen tuloksia tarkastellaan jälkikäsitteijällä. Yleisimmin kiinnitetään huomiota rakenteen muodonmuutoksiin ja jännityksiin. Muodonmuutokset esitetään yleensä solmupistesiiirtymien avulla. Niistä voidaan erottaa siirtymät ja kiertymät eri akseleiden suuntaan. Jännitykset esitetään nykyisin yleensä joko väripintoina tai korkeuskäyrinä. Analyysissä jännitykset lasketaan joko solmupisteissä tai elementin alueella olevissa pisteissä. Tulosten tarkastelua varten jännitykset kuitenkin tasoitetaan koko rakenteen alueelle kokonaiskuvan saamiseksi. (Hietikko & Lehtonen 1994, 169.)

6 LUJUUSANALYYSIPROJEKTI

Tietotekniikan nopea kehitys on madaltanut pienten yritysten kynnystä hankkia FEM-laskentaan perustuvien simulointiohjelmistojen hankintaa. FEM-laskenta vaatii suurta laskentakapasiteettia, mutta nykyisin tavallisilla tietokoneillakin on jo mahdollista suorittaa yksinkertaisia lujuussimulointeja.

Yrityksessä on pitkään harkittu jonkin lujuussimulointi ohjelmiston hankintaa. Olen tutustunut muutamaani eri ohjelmistoihin kuten Finnsap, Algor, Ansys ja SolidWorks Simulation. Päädymme lopulta hankkimaan viimeksi mainitun ohjelmiston sen helppokäyttöisyyden takia. Lopullista hankintapäätöstä joudutti Aker Yardsilta saatu tilaus suunnitella ja toimittaa laivan järeiden runkolevyjen uudet kohdistusvaunut. Projekti oli niin kiireellinen, että sen lujuuksien arvioiminen ja laskenta käsin olisi ollut haasteellista projektin aikataulussa. Tämä oli ensimmäinen projekti, jossa käytin ohjelmistoa työssä. Havainnollisuuden vuoksi kuva vanhasta kohdistusvaunusta (kuva 1), jolle uusi korvaava vaunu suunniteltiin (kuva 2).



Kuva 1: Vanha kohdistusvaunu.



Kuva 2: Lähes valmiit uudet kohdistusvaunut.

Vanhan vaunun piirustuksissa oli ilmoitettu voima, joka uudenkin vaunun tulisi kestää. Laskuja suoritettiin ja runkoa vahvistettiin kriittisistä paikoista, kunnes rungon lujuus on riittävä. 3D malli on tehty Pro/Engineer -suunnitteluohjelmistolla, josta se on viety Solidworksiin laskentaa varten.

7 SIMULOINNIN RAPORTOINTI

Suunnittelu on aina aloitettava jostain. Ensimmäinen malli on harvoin lujuuden ja materiaalin käytön suhteen optimaalinen, joten sitä on usein parannettava laskujen perusteella. Kokemus auttaa alkuarvojen valinnassa paljon, jolloin iterointikertojen määrä laskee huomattavasti.

Kaikista rakenteen vaiheista on hyvä tallettaa dokumentit muistin virkistämiseksi suunnitteluprosessin aikana ja mahdollista myöhempää käyttöä varten. Tässä kohdassa on mielestäni Simulationista saatavien tulosten arkistomisominaisuuksissa puutteita.

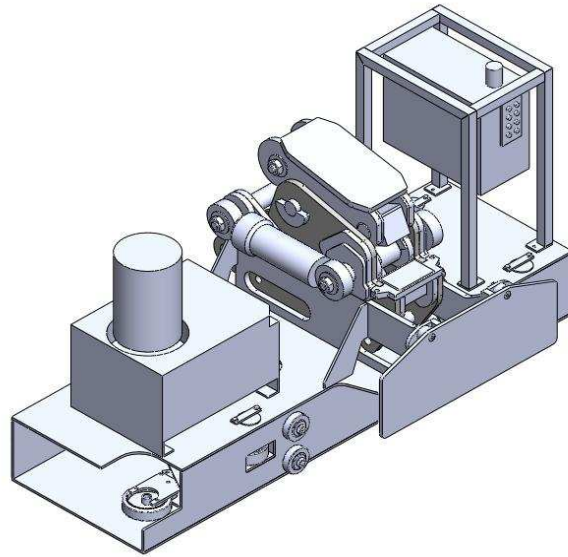
Esimerkiksi asetetut voimat pitäisi saada näkyviin voimia kuvaavien symbolien yhteydessä työalueella. Erittäin havainnollinen toiminto on Iso Clipping, jolla pystytään leikkaamaan mitoituksen kannalta tärkeän suureen valittua arvoa pienemmät arvot pois näkyvistä. Tämä toiminto on varsin kätevä, jos halutaan esimerkiksi suunnitella rakenteelle maksimijännitykseksi 75MPa. Kun määrittelee Iso Clipping 75MPa pienemmät jännitykset pois näkyvistä, niin on nopeasti silmäiltävissä, missä kohdissa rakennetta kyseinen jännitys ylittyy. Välivaiheista tulisi näkyä ainakin laskennassa käytetyt materiaalit, tuennat, voimat ja tukireaktiot, jotta voidaan myöhemmin nopeasti nähdä, ettei laskennassa ole virheellisiä lähtöarvoja. Nämä tiedot näkyvät ohjelmiston automaattisesti generoituvassa raportissa, mutta sitä ei ole mielekästä tulostaa jokaisesta välivaiheesta, koska siinä on paljon välivaiheiden kannalta turhaa tietoa. Automaattiseen raporttiin oletuksena tulostuvissa kuvissakaan yksityiskohdat eivät useimmiten näy riittävän selkeästi, jos analysoitavan rakenteet mitat ovat suuria verrattuna kriittisiin alueisiin.

Mielestäni hyviä ja havainnollisia välivaiheen dokumentteja ovat eDrawings -mallit, koska tässä muodossa tallennettuna analyysi on erittäin havainnollisesti tutkittavissa tietokoneella. Toisaalta välivaiheesta on myös tallennettava sopivia kuvankaappauksia, joihin on kuvankäsittelyohjelmalla lisättävä muutamia tietoja, joita ei saa automaattisesti näkyviin, koska eDrawings -mallit vaativat erillisen ohjelman jolloin välivaiheita ei välttämättä saada muuten näkyviin kaikilla tietokoneella.

Lopullisen rakenteen dokumentteihin lähes automaattisesti generoituva raportti on kuitenkin hyvä liittää, koska siitä selviävät yksityiskohtaisesti laskennassa käytetyt tekniset tiedot, joiden perusteella voidaan myöhemmin arvioida laskelmien oikeellisuutta.

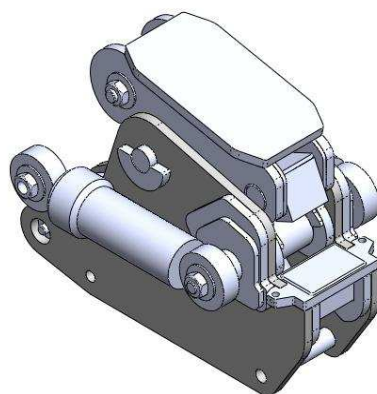
7.1 Kohdistusvaunun simulointi osakokonaisuuksittain

Kuvassa 3 on uusi kohdistusvaunu.

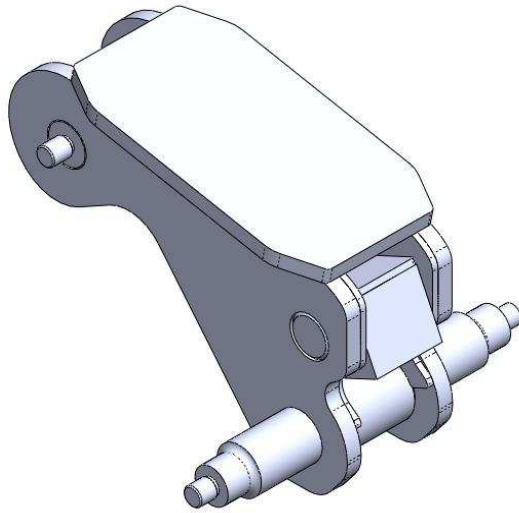


Kuva 3: Kohdistusvaunu.

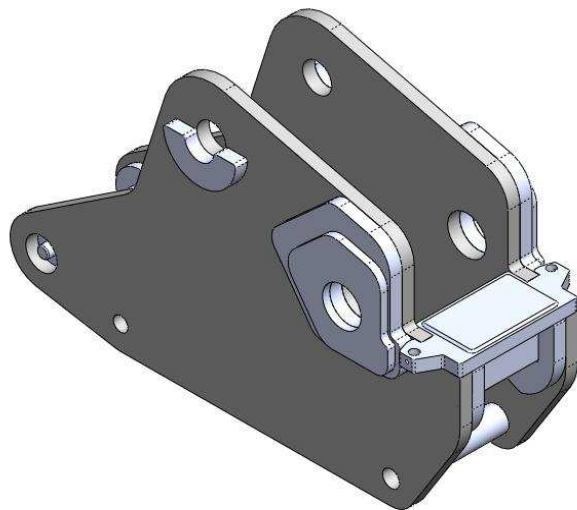
Projektin aikana puristavaa elementtiä (kuva 4) kutsuttiin pyykkipojaksi, josta simuloinnissa tarkastelun kohteena ovat yläleuka (kuva 5) ja alaleuka (kuva 6).



Kuva 4: Pyykkipoika.

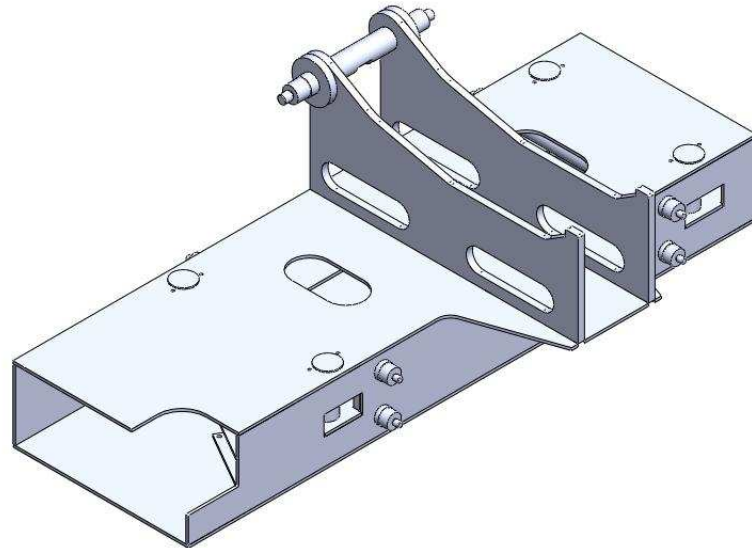


Kuva 5: Yläleuka.



Kuva 6: Alaleuka.

Kohdistusvaunun runko (kuva 7) simuloitiin omana osanaan projektia.

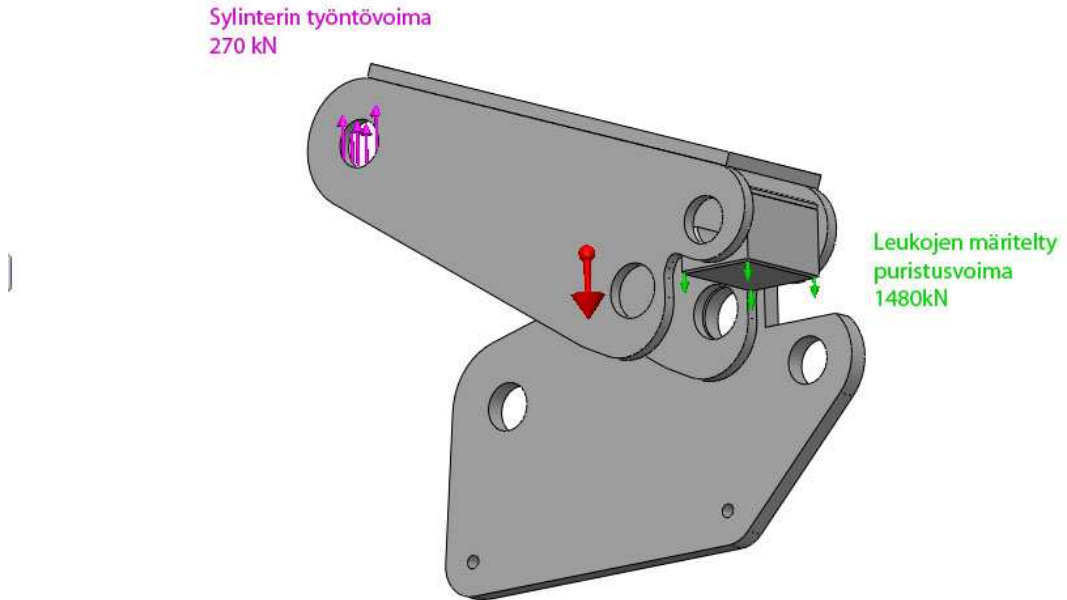


Kuva 7: Runko.

Edellä mainitut osakokonaisuudet ovat lujuusteknisiltä vaatimuksiltaan hyvin eritasoisia. Tästä syystä ne päätettiin simuloida erillisinä osakokonaisuuksina.

7.1.1 Yläleuan ensimmäisen version simulointi

Projektin ensimmäinen simulointi tehtiin yläleualle. Pyykkipojan leuat suunniteltiin käyttäen 1480 kN puristusvoimaa. Tämän puristusvoiman aikaansaavan työsylinterin työntövoiman on oltava 270 kN. Tässä vaiheessa tallennetaan jpg-kuva (kuva 8), johon merkataan kuvankäsittelyohjelmassa nämä voimat.

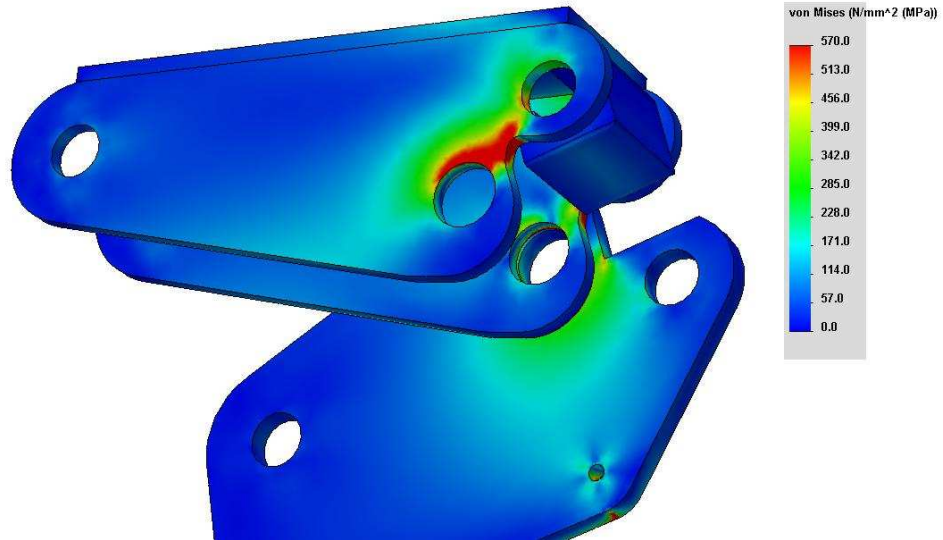


Kuva 8: Yläleuan voimat.

Tästä kuvasta voi helposti myöhemmin tarkistaa simuloinnin tässä vaiheessa käytetyt voimat avaamalla itse mallia SolidWorks Simulationissa.

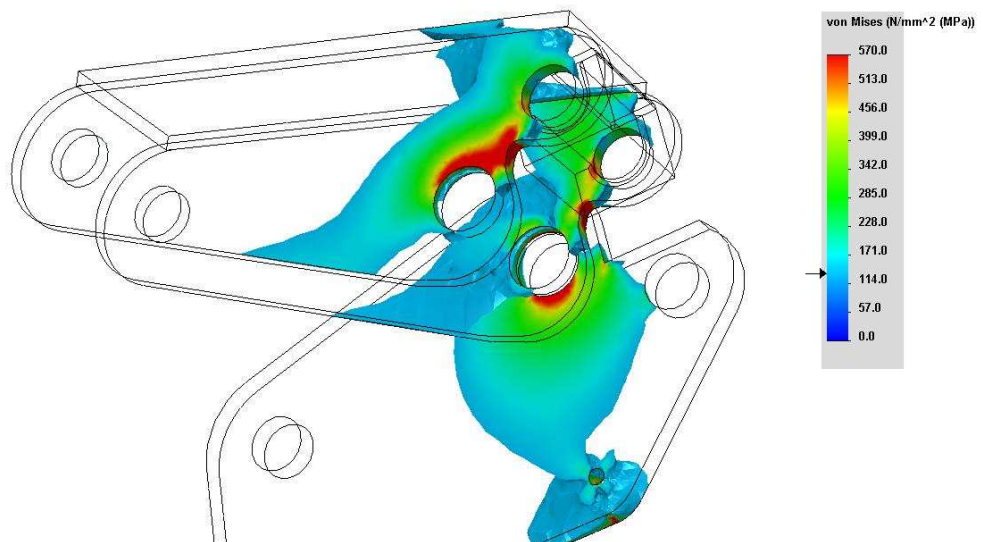
Yläleuan simuloinnin tuloksista tallennetaan seuraavat jpg-kuvat: jännitys jakauman (kuva 9), leikkauksen yli 134 MPa olevista jännityksistä (kuva 10) ja kokonaissiirtymät (kuva 11).

Model name: 03 - sim
 Study name: Study 1 h-adap
 Plot type: Static nodal stress Stress1
 Deformation scale: 1



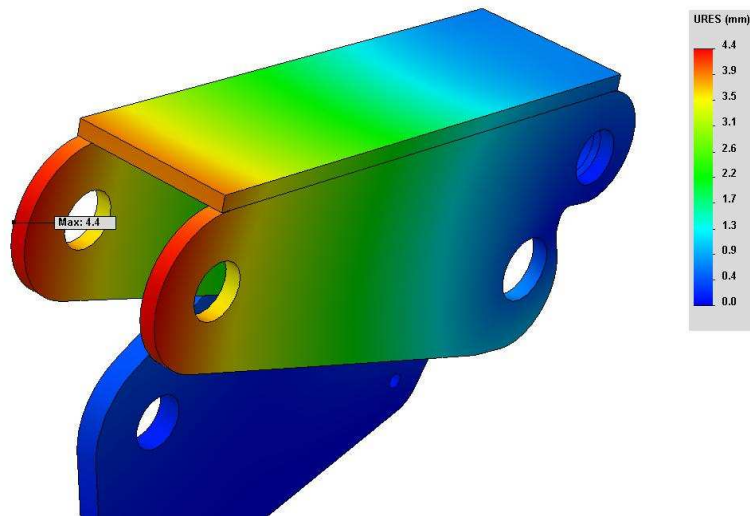
Kuva 9: Yläleuan jännitykset.

Model name: 03 - sim
 Study name: Study 1 h-adap
 Plot type: Static nodal stress Stress IsoC 134MPa
 Deformation scale: 1
 Element Volume = 39.12 %



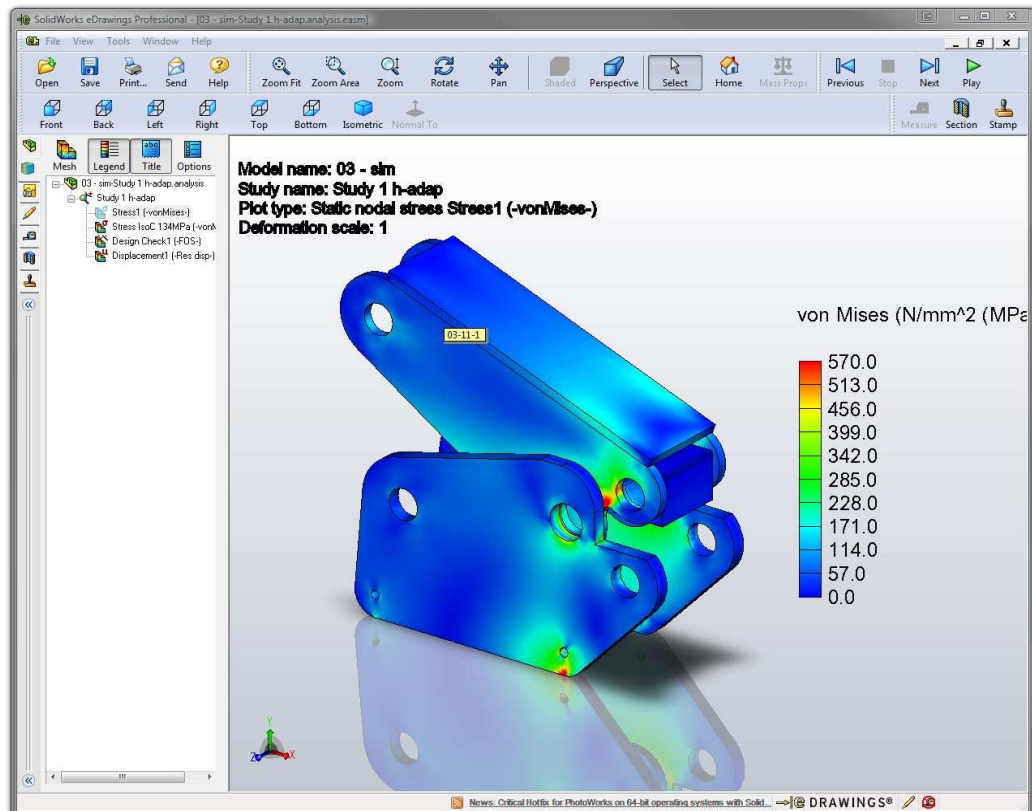
Kuva 10: Leikkauskuva yli 134MPa olevista jännityksistä.

Model name: 03 - sim
 Study name: Study 1 h-adap
 Plot type: Static displacement Displacement1
 Deformation scale: 1



Kuva 11: Kokonaissiirtymät.

Nämä kaikki edellä mainitut tulokset tallennetaan myös eDrawings- malliksi (kuva 12), josta rakenteen suunnittelija voi tarkastella kriittisiä alueita. EDrawings 3D -mallia suunnittelija voi pyörittää omalla tietokoneellaan reaaliaikaisesti.



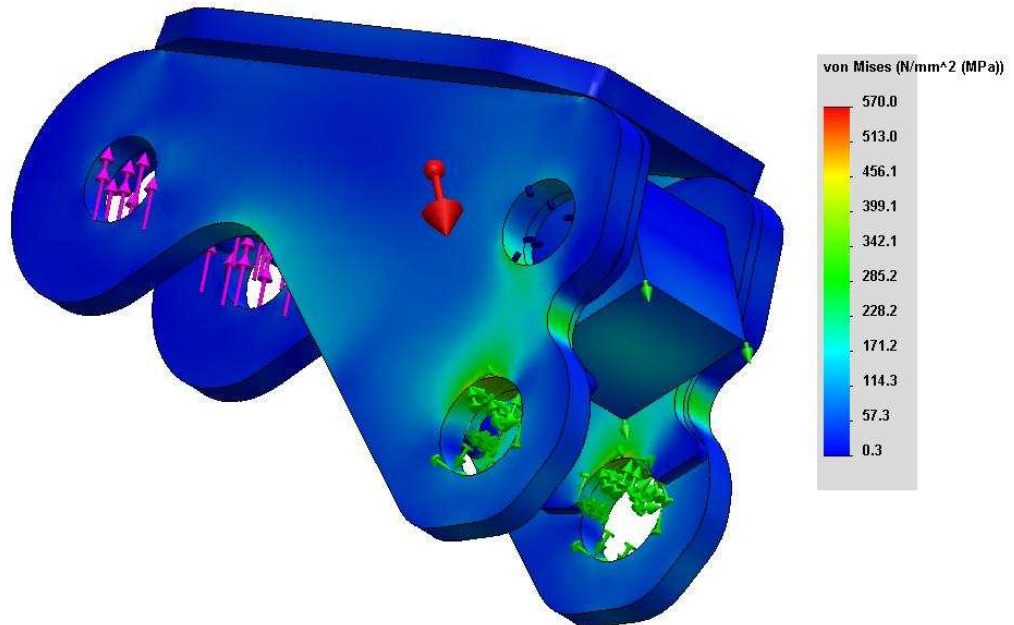
Kuva 12: EDrawings malli simuloinnin tuloksista.

Simuloinnin ensimmäisen vaiheen tulokset osoittavat, että kyseinen malli ei ole riittävän vahva. Näiden tulosten pohjalta on suunniteltava uusi malli.

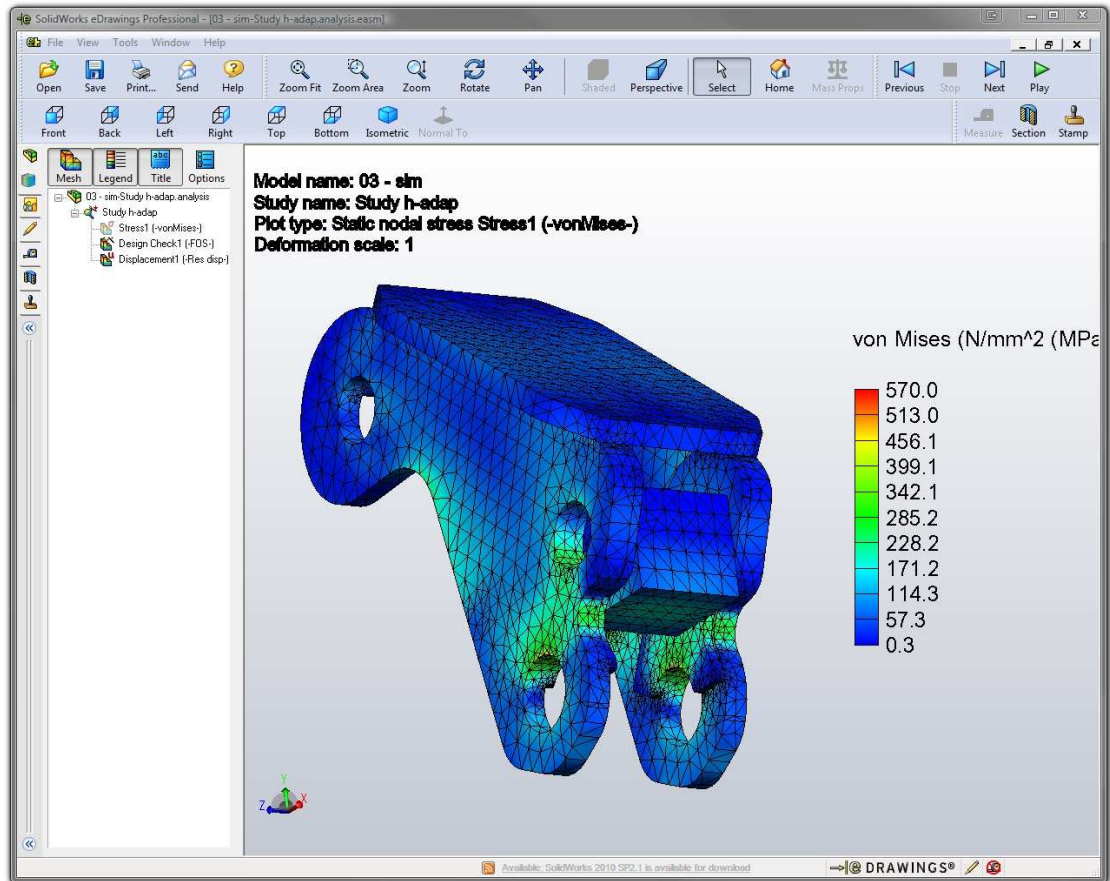
7.1.2 Yläleuan lopullisen version simulointi

Simulointeja suoritettiin kaiken kaikkiaan kolmelle eri versiolle yläleuasta. Lopullisesta versiosta tallennettiin käytetyt voimat ja tulokset vastaavasti kuin edellä esitettiin ensimmäisestä versiosta. Esimerkkinä yläleuasta jännitysjaakauma (kuva 13) ja eDrawings malli (kuva 14).

Model name: 03 - sim
Study name: Study h-adap
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1



Kuva 13: Lopullisen yläleuan jännitysjaakauma.



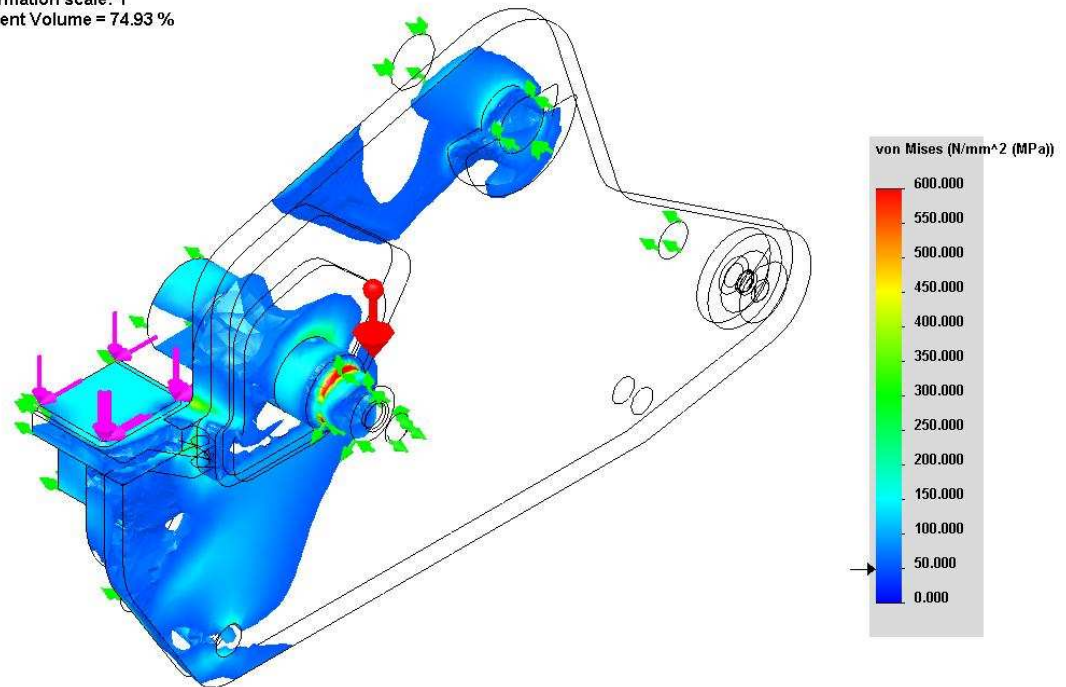
Kuva 14: EDrawings malli lopullisesta yläleuasta.

Lopullisesta mallista tallennetaan myös fyysinen paperiversio (LIITE 1) arkistoon, joka sisältää ohjelman lähes automaattisesti luovan raportin.

7.1.3 Alaleuan simulointi

Alaleuka simuloitiin vastaavasti kuin yläleuka muutamalla iterointikierröksellä. Esimerkkikuva alaleuasta, josta on leikattu Iso Clipping toiminnolla 50MPa pienemmät jännitykset pois (kuva 15).

Model name: 02 - Sim
 Study name: Study 1
 Plot type: Static nodal stress Stress IsoC 50MPa
 Deformation scale: 1
 Element Volume = 74.93 %

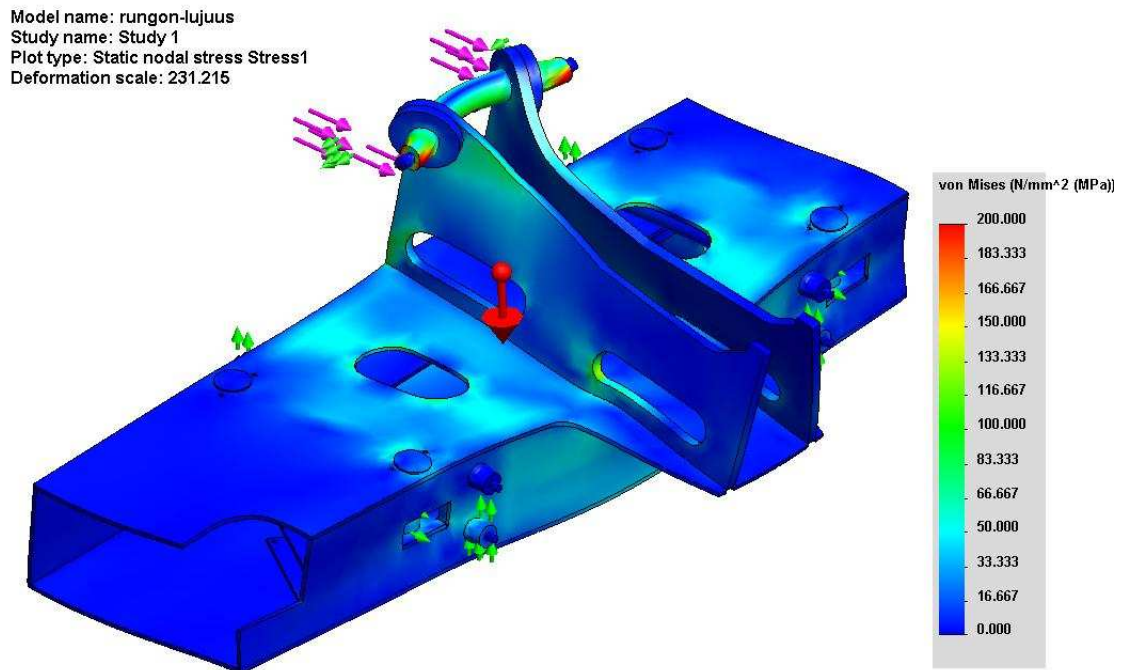


Kuva 15: Alaleuan 50MPa ylittävät jännitykset.

Alaleuan simuloinnista tehdään vastaava fyysinen paperiversio arkistoon kuin yläleuan simuloinnista.

7.1.4 Rungon simulointi

Runko simuloitiin vastaavasti kuin aiemmin esitetyt kohdistusvaunun osakokonaisuudet. Runko on lujuusteknisesti huomattavasti yläleukaa ja alaleukaa yksinkertaisempi, joten sen rakenteen suunnittelu onnistui kokemuksen pohjalta heti ensimmäisellä kerralla niin hyvin, että simuloinnilla vain todettiin sen olevan kunnossa. Rungon simuloinnista arkistoidaan vastaavat raportit kuin muistakin tässä työssä esitellyistä simuloinneista. Kuvassa on esitetty rungoksimuloinnin jännitysjaakauma muodonmuutosta noin 230 kertaa liioittelemalla (kuva 16).



Kuva 16: Rungon jännitysjaakauma, jossa muodonmuutosta on liioiteltu noin 230 kertaisesti.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoite onnistui mielestäni hyvin. SolidWorks Simulationin lujussimulointien tulosten raportoinneille saatiin luotua pohja, josta on hyvä jatkaa ja kehittää tulosten raportointimenetelmiä. Ohjelmiston käyttöönotto yrityksessä sujui hyvin. Työtä tehdessäni opin käyttämään ohjelmistoa samalla myös paremmin. Ohjelmiston raportoinnista on vielä johtopäätöksenä todettava, että se ei sovellu erityisen joustavasti tuotekehitykseen suuntautuneen pienyrityksen käyttöön. Välivaiheet ja tulokset on mahdollista arkistoida, mutta paikoitellen esiintyy kankeutta, koska joitain tietoja joudutaan manuaalisesti syöttämään arkistoitaviin tiedostoihin. Tällöin ovat vaarana inhimillisistä tekijöistä johtuvat virheet. Toivoisin hieman joustavampia työkaluja muutamiin tässä työssä esitettyihin yksityiskohtiin.

Lähteet

Hietikko, Esa & Lehtonen, Uljas, 1994, Lujuuslaskennan perusteet, Keuruu: Otava

Hakala, Matti, 1994, Lujuusopin elementtimenetelmä, Espoo: Otatieto Oy.

Lähteenmäki, Matti, 2006, K-12120 Elementtimenetelmän perusteet, [viitattu 18.4.2010]. Saatavissa http://home.tamk.fi/~mllahten/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf.

Convia Oy. Pro/Engineer. [viitattu 15.4.2010]. Saatavissa <http://www.convia.fi/fi/tuotteet/proengineer-wildfire>.

CadWorks Oy. SolidWorks. [viitattu 15.4.2010]. Saatavissa <http://www.cadworks.fi/modules/system/stdreq.aspx?P=53&VID=default&SID=620858567698129&S=0&C=20696>.

cadON Oy. SolidWorks eDrawings Professional. [viitattu 12.3.2010]. Saatavissa <http://www.cadon.fi/default.asp?viewID=2496>.

CadWorks Oy. SolidWorks Simulation. [viitattu 12.3.2010]. Saatavissa <http://www.cadworks.fi/modules/system/stdreq.aspx?P=38&VID=default&SID=553018444398018&S=1&A=closeall&C=23087>.

Stress analysis of 03 - sim

Author: Vesa Ritvanen

Company: S.T. Ritvanen Oy

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. Simulation helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

Table of Contents

Table of Contents	2
List of Figures	2
Kohdistusvaunun yläleuka	3
Assumptions	3
Model Information	3
Study Properties	3
Units	4
Material Properties	4
Loads and Restraints	4
Connector Definitions	5
Contact	5
Mesh Information	5
Design Scenario Results	6
Sensor Results	6
Reaction Forces	6
Free-Body Forces	6
Bolt Forces	6
Pin Forces	6
Study Results	7
Conclusion	9

List of Figures

03 - sim-Study h-adap-Stress-Stress1	8
03 - sim-Study h-adap-Displacement-Displacement1	8
03 - sim-Study h-adap--Design Check1	9

Kohdistusvaunun yläleuka

Summarize the FEM analysis on 03 - sim

Assumptions**Model Information**

Document Name	Configuration	Document Path	Date Modified
03 - sim	Default	E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03 - sim.SLDASM	Mon Mar 08 16:17:54 2010
03-1/03-10-1		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-10.sldprt	Sat Mar 06 20:13:26 2010
03-1/03-10-2		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-10.sldprt	Sat Mar 06 20:13:26 2010
03-1/03-11-1		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-11.sldprt	Wed May 20 07:58:46 2009
03-1/03-14-1		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-14.sldprt	Sat Mar 06 20:13:25 2010
03-1/03-14-2		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-14.sldprt	Sat Mar 06 20:13:25 2010
03-1/03-15-1		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-15.sldprt	Wed May 20 07:58:46 2009
03-1/03-15-2		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\03-15.sldprt	Wed May 20 07:58:46 2009
03-1/10-1/10-10-1		E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\10-10.sldprt	Sat Mar 06 20:02:34 2010
02-10-1	Default	E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\02-10.SLDPRT	Tue May 19 11:46:55 2009
02-10-2	Default	E:\Omat\Opinnäytetyö - 613 - Wm2\613-5 - Vaunu\02-10.SLDPRT	Tue May 19 11:46:55 2009

Study Properties

Study name	Study h-adap
Analysis type	Static
Mesh Type:	Solid Mesh
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Thermal Effect:	Input Temperature
Zero strain temperature	298.000000

Units	Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Friction:	Off
Ignore clearance for surface contact	Off
Use Adaptive Method:	h-Adaptive

Units

Unit system:	SI
Length/Displacement	m
Temperature	Kelvin
Angular velocity	rad/s
Stress/Pressure	N/mm ² (MPa)

Material Properties

No.	Body Name	Material	Mass	Volume
1	03-1/03-10-1	S355	24.3484 kg	0.00312159 m ³
2	03-1/03-10-2	S355	24.3484 kg	0.00312159 m ³
3	03-1/03-11-1	S355	22.9408 kg	0.00294113 m ³
4	03-1/03-14-1	S355	2.20357 kg	0.000282509 m ³
5	03-1/03-14-2	S355	2.20357 kg	0.000282509 m ³
6	03-1/03-15-1	S355	6.12518 kg	0.00078528 m ³
7	03-1/03-15-2	S355	6.12518 kg	0.00078528 m ³
8	03-1/10-1/10-10-1	S355	7.19666 kg	0.000922648 m ³

Material name:	S355
Description:	
Material Source:	
Material Model Type:	Linear Elastic Isotropic
Default Failure Criterion:	Max von Mises Stress
Application Data:	

Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	2.1e+011	N/m ²	Constant
Poisson's ratio	0.28	NA	Constant
Shear modulus	7.9e+010	N/m ²	Constant
Mass density	7800	kg/m ³	Constant
Tensile strength	5.2e+008	N/m ²	Constant
Yield strength	3.55e+008	N/m ²	Constant
Thermal expansion coefficient	1.3e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	43	W/(m.K)	Constant
Specific heat	440	J/(kg.K)	Constant

Loads and Restraints

Fixture

Restraint name	Selection set	Description
Restraint-1 <03-1/03-10-1, 03-1/03-10-2, 03-1/03-14-1, 03-1/03-14-2>	on 4 Face(s) with displacement 0.000000 m rotation 0.000000 rad along radial. rotation 0.000000	

	rad along circumferential. displacement 0.000000 m rotation 0.000000 rad along axial.	
Restraint-2 <03-1/10-1/10-10-1>	on 1 Face(s)Roller/Sliding	

Load

Load name	Selection set	Loading type	Description
Force-1 <03-1/03-10-2, 03-1/03-15-2, 03-1/03-15-1, 03-1/03-10-1>	on 4 Face(s) apply force 2.7e+005 N normal to reference plane with respect to selected reference PLANE1 using uniform distribution	Sequential Loading	
Gravity-1	Gravity with respect to with gravity acceleration 9.81 m/s ² normal to reference plane	Sequential Loading	

Connector Definitions

Connector name	Selection set	Loading type	Description
Pin Connector-1 <03-1/03-14-1, 03-1/10-1/10-10-1>	Pin Connectors on 2 Face(s); no pin translation; with rotational stiffness of 0.00000 N-m/rad	Sequential Loading	
Pin Connector-2 <03-1/03-10-1, 03-1/10-1/10-10-1>	Pin Connectors on 2 Face(s); no pin translation; with rotational stiffness of 0.00000 N-m/rad	Sequential Loading	
Pin Connector-3 <03-1/03-14-2, 03-1/10-1/10-10-1>	Pin Connectors on 2 Face(s); no pin translation; with rotational stiffness of 0.00000 N-m/rad	Sequential Loading	
Pin Connector-4 <03-1/03-10-2, 03-1/10-1/10-10-1>	Pin Connectors on 2 Face(s); no pin translation; with rotational stiffness of 0.00000 N-m/rad	Sequential Loading	

Contact

Contact state: Touching faces - Bonded

Mesh Information

Mesh Type:	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4 Points

Element Size:	23.036 mm
Tolerance:	1.1518 mm
Quality:	High
Number of elements:	35057
Number of nodes:	57534
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:03
Computer name:	XW4600

Design Scenario Results

No data available.

Sensor Results

No data available.

Reaction Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Body	N	-114106	-243765	0.00846919	269150

Free-Body Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Body	N	-0.00889652	7.8954	-0.0414596	7.89552

Free-body Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Body	N-m	0	0	0	1e-033

Bolt Forces

No data available.

Pin Forces

Pin Connector-1

Type	X-Component	Y-Component	Z-Component	Resultant
Shear Force (N)	-3302.4	-3.206e+005	0	3.2062e+005
Axial Force (N)	-0	-0	-306.55	-306.55
Bending moment (N-m)	4363.5	70.663	0	4364.1
Torque (N-m)	-0	-0	-1.5766e-011	-1.5766e-011

Pin Connector-2

Type	X-Component	Y-Component	Z-Component	Resultant
Shear Force (N)	3298.5	-3.4834e+005	0	3.4835e+005
Axial Force (N)	-0	-0	-8555	-8555
Bending moment (N-m)	-2152.6	-175.65	0	2159.7
Torque (N-m)	-0	-0	-1.5766e-011	-1.5766e-011

Pin Connector-3

Type	X-Component	Y-Component	Z-Component	Resultant
Shear Force (N)	-3232.8	-3.2111e+005	0	3.2113e+005
Axial Force (N)	-0	-0	235.56	-235.56
Bending moment (N-m)	-4465.9	-72.143	0	4466.5
Torque (N-m)	0	0	-1.5768e-011	1.5768e-011

Pin Connector-4

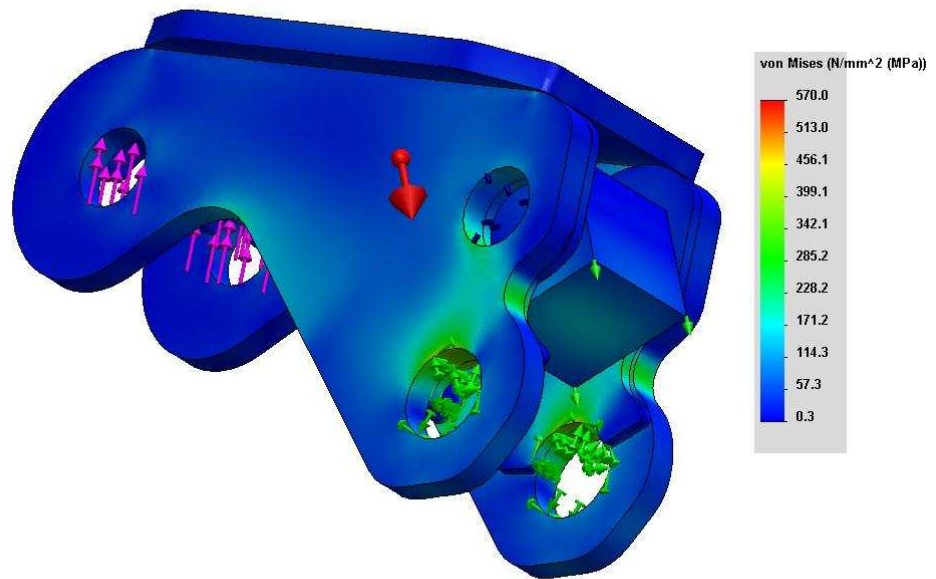
Type	X-Component	Y-Component	Z-Component	Resultant
Shear Force (N)	3236.7	-3.4779e+005	0	3.4781e+005
Axial Force (N)	-0	-0	8626	-8626
Bending moment (N-m)	2136.9	177.27	0	2144.2
Torque (N-m)	0	0	-1.5769e-011	1.5769e-011

Study Results

Default Results

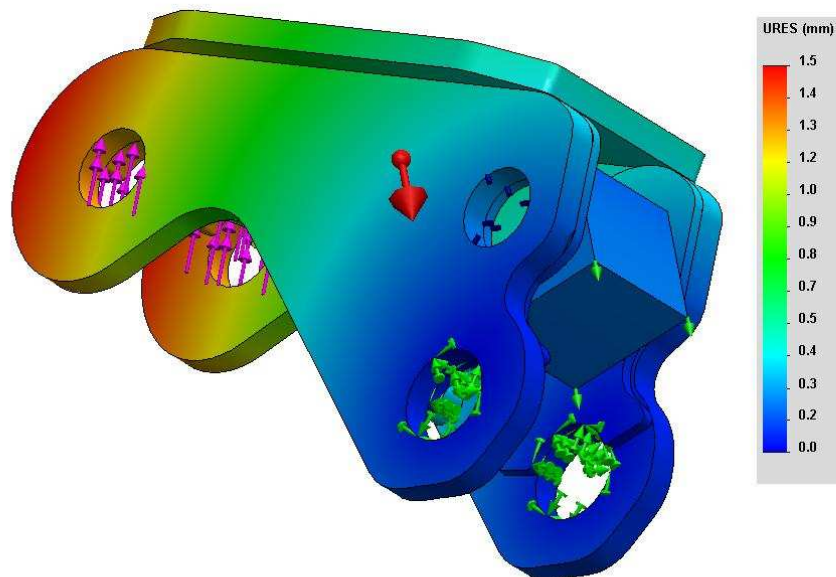
Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises Stress	0.322367 N/mm ² (MPa) Node: 51332	(372.558 mm, 681.779 mm, 50.9987 mm)	738.849 N/mm ² (MPa) Node: 18642	(386.315 mm, 733.943 mm, -73.0021 mm)
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.0313363 mm Node: 40300	(287.794 mm, 509.057 mm, -63 mm)	1.53252 mm Node: 14513	(-107.144 mm, 977.503 mm, -97.9878 mm)

Model name: 03 - sim
 Study name: Study h-adap
 Plot type: Static nodal stress Stress1
 Deformation scale: 1



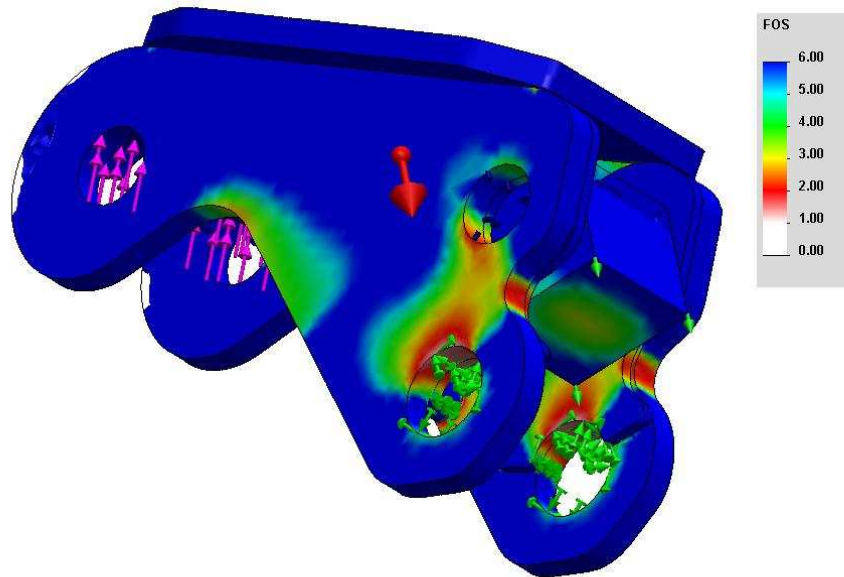
03 - sim-Study h-adap-Stress-Stress1

Model name: 03 - sim
 Study name: Study h-adap
 Plot type: Static displacement Displacement1
 Deformation scale: 1



03 - sim-Study h-adap-Displacement-Displacement1

Model name: 03 - sim
Study name: Study h-adap
Plot type: Factor of Safety Design Check1
Criterion : Max von Mises Stress
Factor of safety distribution: Min FOS = 0.56



03 - sim-Study h-adap--Design Check1

Conclusion

Comments:
Rakenne OK