

Joonas Viljanen

KELAUSKONEEN  
MUOTTIRAKENTEEN  
SUUNNITTELU

Opinnäytetyö  
Kone- ja tuotantotekniikka


Huhtikuu 2012




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> <small>Mikkeli University of Applied Sciences</small>	<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>  12.04.2012		
<b>Tekijä(t)</b> Joonas Viljanen	<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma		
<b>Nimeke</b> Kelauskoneen muottirakenteen suunnittelu			
<b>Tiivistelmä</b>  Opinnäytetyön aiheena oli kuitukelauskoneen muottirakenteen suunnittelu Maricon Oy:lle. Työn tavoitteena oli saada toimivasta muottirakenteesta 3D-malli sekä lujuuslaskennan tulokset. Mallintamiseen käytettiin Maricon Oy:n käytössä ollutta Vertex G4-ohjelmaa, ja lujuuslaskenta suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun tiloissa Ansys Mechanical APDL:llä. Lujuuslaskennan yhteydessä käytettiin myös apuna SolidWorks 2010:tä.  Rakenteen suunnittelu ja mallintaminen suoritettiin toimeksiantajan tiloissa, jolloin yhteistyö oli vaivatonta ja syntyvät tulokset helposti yrityksen käytettävissä. Opinnäytetyön aikana tutkittiin muutamia rakennevaihtoehtoja, joista parhaaksi arvioitua lähdettiin kehittämään kohti valmista tuotetta. Muotin kehitystyön edetessä rakenteelle tehtiin yksinkertaistettuja lujuustarkasteluja turhan työn välttämiseksi. Mallintamisen jälkeen työssä siirryttiin muotin tarkempaan lujuuslaskentaan.  Opinnäytetyön tuloksena oli 3d-malli toteuttamiskelpoisesta kuitukelauskoneen muotista sekä lujuuslaskennasta saadut tulokset, jotka eivät viittaa lujuudellisiin ongelmiin muotin rakenteessa. 3d-mallin avulla on tehtävissä valmistukseen vaadittavat piirustukset, mutta ennen tätä on rakenteen yksityiskohtia kehitettävä ja haettava rakenteen mahdollisia ongelma kohtia tarkemmalla lujuustarkastelulla.			
<b>Asiasanat (avainsanat)</b>  Kuitukelaus, muotti, FEM			
<b>Sivumäärä</b> 25 + 10	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><b>Kieli</b> Suomi</td> <td style="width: 50%;"><b>URN</b></td> </tr> </table>	<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>
<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>		
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>  Työ ei ole kokonaisuudessaan julkinen.			
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b> Markku Kemppe	<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b> Maricon Oy Markku Ripatti		

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>  12.4.2012
<b>Author(s)</b> Joonas Viljanen	<b>Degree programme and option</b> Mechanical and manufacturing engineering	
<b>Name of the bachelor's thesis</b> Designing a mold of winding machine.		
<b>Abstract</b>  <p>The subject of this bachelor thesis was to design the mould structure of a filament winding machine for Maricon Ltd. The purpose was to model the structure with a 3D-modelling program and to make the strength analysis by using FEM. Vertex G4 modelling program was used and FEM program Ansys Mechanical APDL in Mikkeli University of Applied Sciences. In addition SolidWorks 2010 were used during the strength analysis.</p> <p>The 3D-designing was made in Maricon Ltd. premises. A few different structure options were studied. The best was developed in the finished product. The basic strength analyses were made during developments. After 3D-model was good enough it was time to proceed to more accurate strength analyses in Mikkeli University of Applied Sciences.</p> <p>The final result was 3D-model of the mould structure. The result doesn't indicate any major problems. Drawings for mould structure can be made by using 3D-model after some detailed design and additional strength analyses.</p>		
<b>Subject headings, (keywords)</b> Filament winding, mold, FEM		
<b>Pages</b> 25 + 10	<b>Language</b> Finnish	<b>URN</b>
<b>Remarks, notes on appendices</b> All content of this thesis isn't public.		
<b>Tutor</b> Markku Kemppe	<b>Bachelor's thesis assigned by</b> Maricon Ltd. Markku Ripatti	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	2
2	KUITUKELAUSKONE .....	2
3	TYÖN TAVOITTEET JA MENETELMÄT .....	4
4	3D-MALLINTAMINEN.....	5
4.1	VERTEX G4.....	7
4.2	RAKENTEEN SUUNNITTELU JA MALLINTAMINEN .....	8
5	LUJUUSLASKENTA.....	11
5.1	LUJUUSLASKENNAN PERUSKÄSITTEITÄ .....	13
5.2	TYÖN SUORITUS.....	15
5.2.1	GEOMETRIAN TUONTI .....	15
5.3	LASKENTAAN VAADITTAVAT MÄÄRITYKSET .....	17
5.3.1	VERKOTUS .....	19
5.3.2	TUET JA KUORMAT .....	20
5.4	TULOKSET.....	22
6	YHTEENVETO .....	23
	LÄHTEET .....	25

### LIITTEET

- 1 Real constant listaus
- 2 Rakenteen kuormat
- 3 Rakenteessa esiintyvät jännitykset
- 4 Rakenteessa esiintyvät siirtymät

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella horisontaalisen kelauskoneen muottirakenne. Suunnittelutyö tapahtuu suurimmaksi osaksi toimeksiantajan Maricon Oy:n tiloissa heidän käytössään olevilla ohjelmistoilla, jolloin arkistointi on ongelmaton ja kelauskoneiden parissa vuosia työskennelleiden apu lähellä. Rakenteen monimutkaisuudesta johtuen lujuusopillinen tarkastelu suoritetaan FEM-laskentaa apuna käyttäen Mikkelin ammattikorkeakoulun tiloissa.

Toimeksiantajalla oli toimivasta kelauskoneesta valmistukseen tarvittavat dokumentit, mutta koneeseen kiinnitettävistä muoteista ei ollut piirustuksia tai 3D-mallia. Tarjouslaskentaan ja lopulta tuotannon käynnistämiseksi tarvittavan muotin suunnittelu ja mallintaminen tarjottiin aikaisempien hyvien kokemusten johdosta opinnäytetyöksi Mikkelin ammattikorkeakoululle.

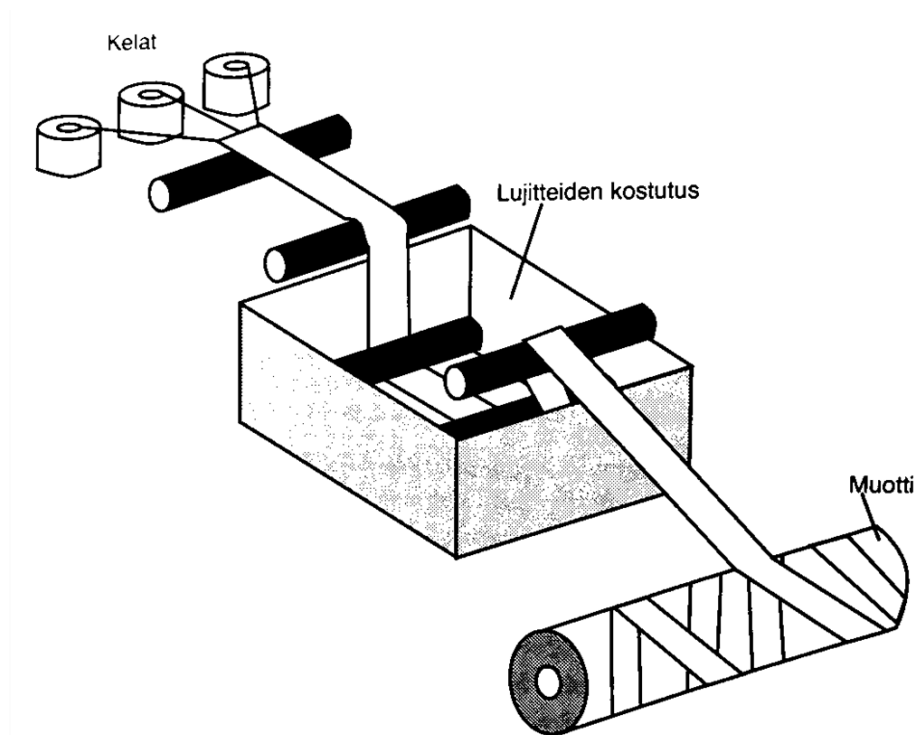
Suunniteltava muotti tulee horisontaaliseen kelauskoneeseen, jossa se pyörii vaakatasossa vain toisesta päästä tuettuna enimmillään 10 kierrosta minuutissa. Muotin tulee olla 8000 mm pitkä ja halkaisijaltaan 5000 mm. Suurien ulkomittojen johdosta muotti tulee olla helposti purettavissa segmentteihin kuorma-auton lavalla kuljettamista varten. Työhön tuo vielä pienen lisähaasteen muotinpäälle kelattavan tuotteen irrottamisen mahdollistava muotin halkaisijan pienentäminen irrotus vaiheessa.

Työ jakautui kahteen osaan. Muotin suunnittelun ohella mallintamiseen ja lopuksi lujuustarkasteluun. Opinnäytetyön aikana syntyneet rakenneratkaisut ovat salaisia ja Maricon Oy omistaa oikeudet niihin. Tästä syystä työn kirjallisesta osasta on jätetty pois muotin yksityiskohdat.

## 2 KUITUKELAUSKONE

Kuitukelaus on melko yksinkertainen komposiittien valmistusprosessi, jossa ennen kelaamista muoviaineella kyllästettyä kuitulankanippua kelataan pyörivän muotin ympärille (kuva 1). Kun haluttu ainevahvuus on saavutettu, laminaatin annetaan kovettua muotilla. Kovettumisen jälkeen valmis tuote poistetaan muotin päältä. Muottia

pyörittää tarkoitukseen suunniteltu kelauskone, jonka yhteydessä on raaka-ainehylly langoille sekä lujitteiden kostutusallas. Kelauskoneita on olemassa putkien ja säiliöiden valmistamiseen soveltuvista peruskoneista aina monimutkaisiin 7-akselisiin tietokone ohjattuihin koneisiin. Käytettävästä kelauskoneesta riippuen prosessissa voidaan hallita muun muassa kelausnopeutta, kelauskulmaa, hartsin lämpötilaa ja lankojen kireyttä. (Güneri 2001, 103.)



**KUVA 1. Kuitukelauksen periaate (Saarela 2003, 162)**

Oleellisimmat kelauskoneen ominaisuudet ovat lujitteiden tasainen jännittäminen kelauksen aikana, kelauspään ohjauksen tarkkuus ja toistettavuus eri kierroksille ja etenkin suurten muottien kohdalla muotin käsittelyn järjestely. Valmistettavien kappaleiden koolla ei ole teknistä ylärajaa, mutta suurimmat vaakasuorassa kelattavat putket ovat halkaisijaltaan 7 m ja pystysuorassa toimivilla koneilla valmistetut kappaleet halkaisijaltaan 20 m.

Kelausta käytetään eniten korroosionkestävien putkien ja säiliöiden valmistamiseen mm. kaivosteollisuuden tarpeisiin. Yleisimmin kelaushartsina toimii erilaiset polyesterialaadut sekä erityiskohteissa fenoli- ja epoksihartsit. Korkea kelausnopeus vaatii hartsilta riittävän alhaista viskositeettia nopean kostutuksen aikaansaamiseksi ja pitkän työskentelyajan takaamiseksi. Pitkän työskentelyajan tarjoamat hartsit vaativat mones-

ti korotetun kovettumislämpötilan, mikä toteutetaan lämpölamppujen tai kovetusuunin avulla. (Saarela 2003, 163.)

### **Kuitukelauksen edut**

- Kelausprosessilla on hyvä toistettavuus, jolloin pystytään tuottamaan useita, samat ominaisuudet omaavia kappaleita.
- Pienet investointi ja tuotantokustannukset.
- Mahdollisuus suurien kappaleiden valmistukseen.
- Materiaali verrattaessa prepreg-materiaaleihin
- Valmistettujen tuotteiden mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät kuitujen jatkuvuuden sekä suunnattavuuden ja menetelmän mahdollistaman suuren lujitesällön takia. (Saarela 2003; Güneri 2001.)

### **Kuitukelauksen haitat**

- Valmistettavan tuotteen monimutkaiset muodot vaativat mutkikkaan ja monesti kalliin muotin.
- Ei sovellu koverien kappaleiden valmistamiseen.
- Tuotteen valmistamiseen vaaditaan kallis muotti.
- Huono pinnanlaatu. (Güneri 2001, 103-104.)

## **3 TYÖN TAVOITTEET JA MENETELMÄT**

Työn tavoitteena oli kehittää kokonaan uudenlainen muottirakenne. Muotin rakenteen tulisi olla mahdollisimman järkevästi kuljetettavissa, koska monesti kelauskonetta tarvitaan vain esimerkiksi kaivostoiminnan perustamisvaiheessa. Rakenteen helppo purettavuus/koottavuus sekä muotin asennettavuus koneeseen tulisivat olla mahdollisimman käyttäjystävällisiä. Yksi tavoite oli myös syntyvän rakenteen hyödyntäminen suuremmissa muoteissa sekä ns. vastakärkikoneissa, joissa muotti on tuettuna molemmista päistä.

- ulkohalkaisija 5000 mm
- pituus 8000 mm

- muotin halkaisijan pienennys mahdollisuus tuotteen irrottamiseen
- varastoinnin ja kuljetusten helpottamiseksi muotti muodostuu segmenteistä
- kokoonpano pulttiliitoksilla
- rakenteen hyödyntäminen vastakärkikoneissa sekä muissa muottiko'issa.
- tuotteen maksimi massa 4000 kg

Työn suorittamiseen käytetyt ohjelmat valittiin siten, että tulokset ovat helposti toimeksiantajan käytettävissä ja perehtyminen uusiin ohjelmiin vältettäisiin. Mallinnusohjelmaksi valittiin yrityksen pääasiallisena 3D-mallinnusohjelmana toimiva Vertex G4, joka on ollut myös Mikkelin ammattikorkeakoulussa erittäin vahvassa asemassa ennen viime vuosina tapahtunutta SolidWorks:n yleistymistä. Rakenteiden analysointiin tarkoitettua ohjelmaa ei yrityksen käytössä tällä hetkellä ole, joten käytettäväksi ohjelmaksi valittiin Mikkelin ammattikorkeakoulussa useilla kursseilla käytetty Ansys.

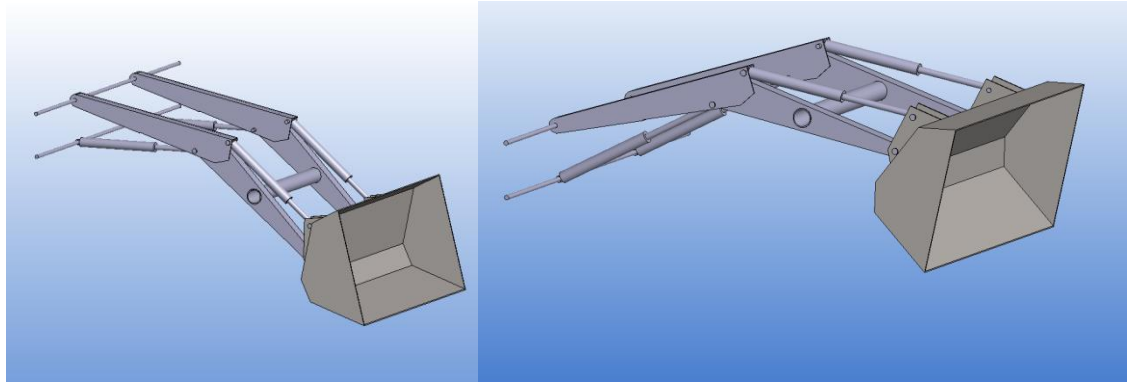
#### **4 3D-MALLINTAMINEN**

Tietokonepohjainen mallintaminen tuli laajempaan käyttöön suunnittelijoiden keskuudessa 1980-luvulla, jolloin ensimmäiset henkilökohtaiset pöytätietokoneet tulivat markkinoille. Maailman tunnetuin piirto-ohjelma AutoCad alkoi levitä myös mekaniikkasuunnittelun työkaluna nopeasti vasta 1990-luvulla. Aluksi suunnitteluohjelmat olivat kuin tietokoneella toteutettuja piirustuspöytiä. Piirustukset olivat kaksiulotteisia, eivätkä esimerkiksi alikokoonpanot ja pääkokoonpano olleet linkitettyjä toisiinsa kuten nykyaikaisissa ohjelmissa. Tästä syystä muutokset piti päivittää kaikkiin piirustuksiin manuaalisesti.

1980-luvun aikana kolmiulotteiset ohjelmistot yleistyivät ja ensimmäinen parametrisen piirremallinnusohjelmisto Pro/ENGINEER julkaistiin. Parametrisuus toi mallintamiseen mahdollisuuden valmiin mallin mittojen muuttamiseen siten, että mallin geometria muuttui vastaavasti. Tämä tehosti suunnittelutyötä huomattavasti, koska parametrisuus mahdollisti mallin mittojen muuttamisen jälkikäteen, jolloin muutokset päivittyivät automaattisesti myös kokoonpanoihin ja piirustuksiin. (Hietikko 2010, 14-15, 21.)



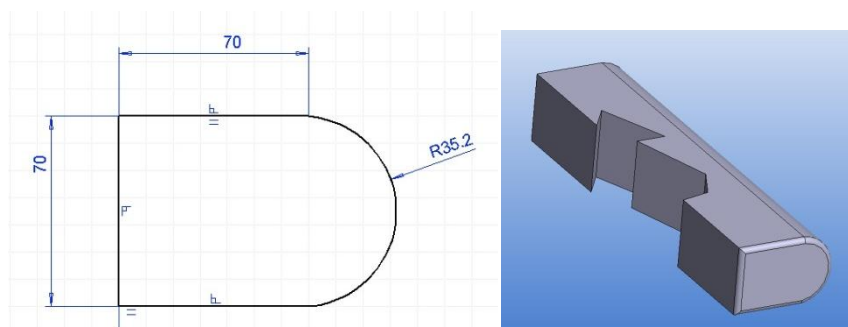
Yritysten siirtymistä käyttämään 3D-mallintamista suunnittelutyössä on vauhdittanut 3D-mallinnusohjelmien tehokkuus verrattuna 2D-ohjelmiin. Tehokkuuden lisäksi selviä hyötyjä ovat kustannussäästöt suunniteltaessa uusia tuotteita ja valmistettaessa prototyyppisiä sekä osien yhteensovittamisessa ja rakenteen toimivuuden varmistamisessa (kuva 2). (Tuhola 2008, 13.)



**KUVA 2. Etukuormaimen liikeratojen tutkinta**

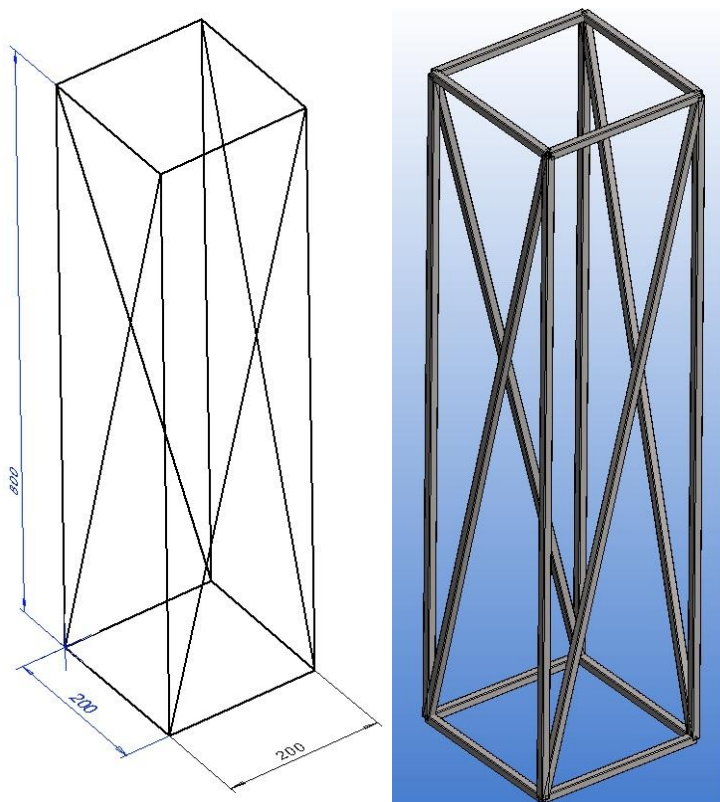
Työssä eniten käytetyt mallinnusmenetelmät osien ja kokoonpanojen luonnissa ovat 2d-sketsin ja pursotus työkalun avulla luodut osat sekä 3d-sketsin ja profiilityökalun avulla luodut rakenteet. Näistä ensin mainittu yhdistelmä mahdollistaa jo hyvin monenlaisien osien luonnin, mutta kehittyneempien mallinnus menetelmien, kuten ohutlevy työkalun, käyttö nopeuttavat mallin sekä piirustuksien luontia.

Yksinkertaisimmillaan osa luodaan piirtämällä ensin 2d-sketsi, jolle annetaan tarvittavat mitat ja tämän jälkeen pursotetaan haluttuun mittaan. Kuvassa 3 on ensin mielivaltaisen sketsi, jolle on annettu mittoja ja tästä pursottamalla saatu kappale. Osan päädyn kulmat ovat pyöristetty ja kappaleen keskeltä on leikattu pala käyttämällä poista pursottamalla menetelmää.



**KUVA 3. Osan luominen käyttämällä pursotus- ja pyöristystyökaluja**

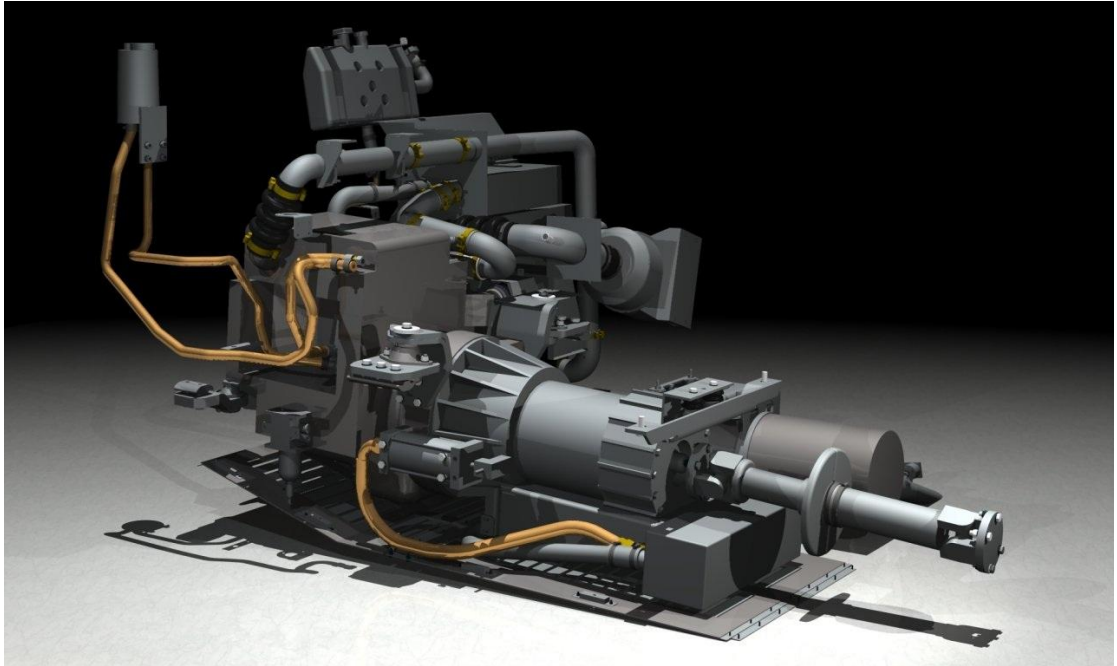
Profiili-työkalua käytettäessä piirretään yleensä 3d-sketsi, joka mahdollistaa esimerkiksi ristikkorakenteisen maston luomisen yhdellä sketsillä. Muussa tapauksessa jokainen profiili osa pitäisi mallintaa erikseen ja liittää tämän jälkeen kokoonpanossa toisiinsa. Kuvassa 4 on 3d-sketsillä luotu putkipalkki kokoonpanon rautalankamalli sekä valmis rakenne. Sketsissä luoduille viivoille määritetään käytettävät profiilit ja niiden leikkauspisteet muotoillaan halutulla tavalla esimerkiksi jiiriin. Tämän jälkeen rakenteeseen tarvittavista putkipalkeista saadaan sahauslista, josta ilmenee putkien pituudet sekä esimerkiksi jiiriliitosten yhteydessä päiden sahauskulmat.



**KUVA 4. Kokoonpanon luominen käyttämällä profiilityökalua**

#### 4.1 VERTEX G4

Vertex Systems Oy on suomalainen vuonna 1977 perustettu tietokoneohjelmistoja valmistava yritys. Vertex tarjoaa ohjelmistoja koneenrakennukseen, laitos- ja prosessisuunnitteluun, sähkö-, automaatio- ja hydraulikkasuunnitteluun, taloteollisuuden suunnitteluun ja keittiö-, kaluste- ja tilasuunnitteluun. Työssä käytettiin koneenrakennukseen soveltuvaa Vertex G4-ohjelmaa.

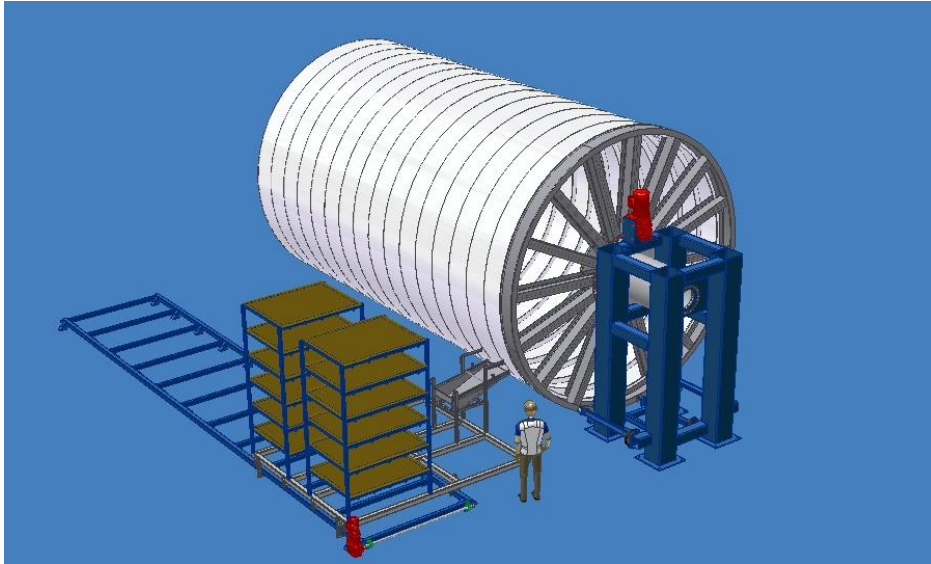


**KUVA 5. Esimerkki VerteG4:llä mallinnetusta kokoonpanosta (Vertex Systems Oy 2011)**

Vertex G4 on täysin suomenkielinen 2D- ja 3D-työskentelyyn soveltuva mekaniikka-suunnitteluohjelma. Ohjelma tukee työryhmätyöskentelyä projekti-, malli- ja piirustusarkistojen avulla. Versiosta riippuen G4 sisältää kääntäjät luotujen mallien vientiä varten standardiformaateissa esimerkiksi lujuuslaskentaohjelmiin. Ohjelma voidaan myös varustaa kevyellä lujuusanalyysisovelluksella, joka tehostaa suunnittelutyötä. (Vertex Systems Oy)

## **4.2 RAKENTEEN SUUNNITTELU JA MALLINTAMINEN**

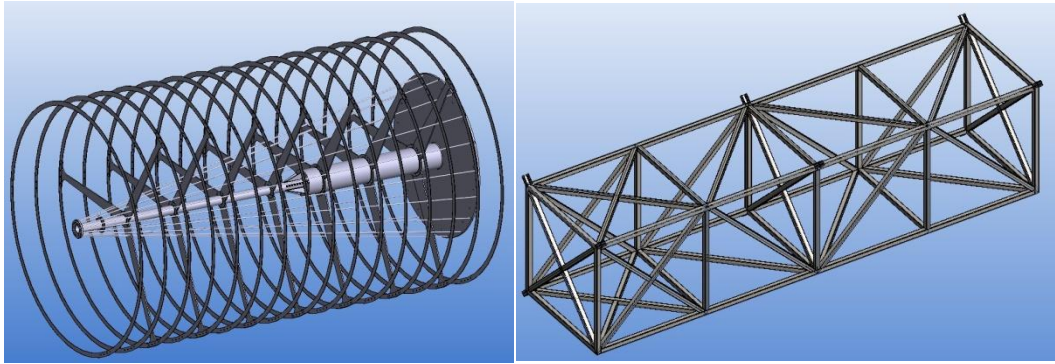
Toimivien rakenneratkaisuiden löytämisessä olivat apuna toimeksiantaja yrityksen omistaja Markku Ripatti sekä kuitukelauskoneita vuosia kehitellyt Timo Kuoksa. Ratkaisuja sekä mahdollisia ongelmakohtia haettiin yhdessä suunnittelutyön edetessä. Opinnäytetyössä ei puututtu esitekuvassa näkyvään lankahyllyyn, eikä muotin pyörittyskoneistoon. Työssä keskityttiin kuvassa 6 valkoisena näkyvän muotin rakenteeseen.



**KUVA 6. Vanhan kelauskoneen esitekuva (Rip-Pro Oy 2011)**

Suunnittelutyö aloitettiin tutustumalla tuotteeseen jo valmistettujen koneiden piirustusten ja kuvien avulla. Kuvien vähäisyys sekä piirustuksien puutteellisuus estivät saamasta tarkkaa käsitystä vanhojen muottien rakenteesta ja toiminnasta. Valitettavasti kasattuun ja käytössä olevaan koneeseen tutustuminen ei ollut mahdollista. Myös muiden valmistajien vastaaviin tuotteisiin tutustuttiin, mutta niiden rakenteen ja käytettävyyden suuri eroavuus suunniteltavaan koneeseen esti hyvien ratkaisujen jatkokehittämisen ja siirtämisen suunniteltavaan kelauskoneeseen.

Alkuvaiheessa erilaisia mahdollisia rakenteita haettaessa tutkittiin muun muassa maston tyylistä vaijereilla tai tangoilla tuettua muottia (kuva 7), mutta tämäkin rakenne arvioitiin hankalaksi toteuttaa järkevästi. Muotin tuenta vain toisesta päästä sekä ulkohalkaisijan muuttamisen mahdollistavan rakenteen johdosta moni aluksi hyvältä vaikuttava ratkaisu kaatui kestävää ja käytännöllistä rakennetta haettaessa. Lopulta päätettiin erilaisiin ristikoihin ja kuvassa 7 näkyvän ristikon ympärille päätettiin aloittaa muotin suunnittelu.



**KUVA 7. Hylätty rakenne vasemmalla sekä kehityskelpoinen oikealla**

Suunnittelussa pyrittiin edulliseen ja yksinkertaiseen valmistettavuuteen. Muottia mallinnettaessa käytettiin mahdollisuuksien mukaan profiili työkalua, joka helpottaa huomattavasti piirustuksien tekoa mahdollistaen automaattisten sahauslistojen luonnin. Rakenne suunniteltiin suureksi osin putkipalkeista ja laser leikatuista valmistetuista levyosista. Kuvassa 7 näkyvä muotin keskiristikko saisi olla hitsattu rakenne, kunhan se olisi siirrettävissä maantiellä tavallisella kuljetuskalustolla kuten muutkin muotin osat. Ristikon mittoja haettaessa pyrittiin myös siihen, että sama ristikko kävisi mahdollisen monen erikokoisen muotin keskirakenteeksi.

Muotin keskelle tulevasta jäykästä ristikkopalkista on useita etuja verrattuna muihin läpikäytyihin rakennevaihtoehtoihin. Näistä tärkeimpinä rakenteen jäykistävä vaikutus sekä saman rakenteen hyödynnettävyys muissa muottiko'issa. Muotti olisi voitu rakentaa myös ilman keskiristikkoa, jolloin muotin ulkokehä olisi kantanut kuorman. Tällöin muotin halkaisijan muuttaminen olisi ollut vaikeaa ilman, että rakenteen jäykkyys olisi kärsinyt. Tässä vaiheessa ristikolle tehtiin alustavia lujuustarkasteluja, joiden jälkeen aloitettiin muotin ulkokuoren suunnittelu.

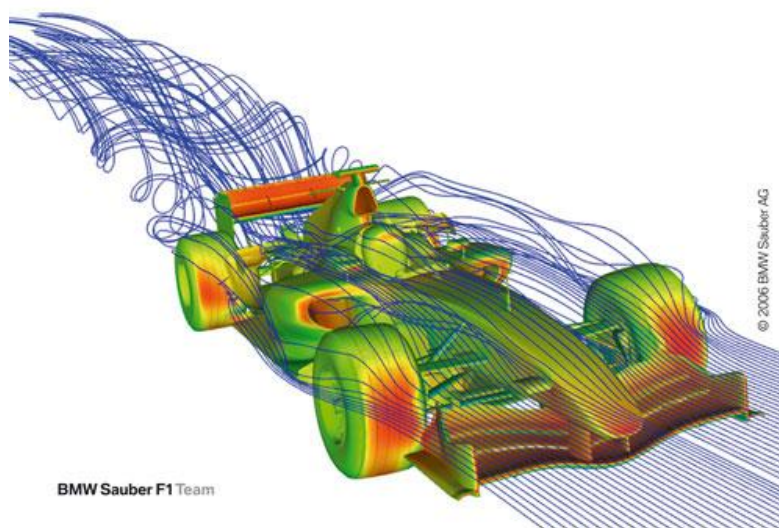
Muotin uloin osa muodostuu neljästä elementistä kuljetuksen sekä valmistamisen helpottamiseksi. Neljästä elementistä kaksi ovat täysin samanlaisia ja loput kaksi liitoksesta johtuen hieman erilaisia. Elementit ovat hitsattuja rakenteita, jotka ovat jäykistetty laserleikatuilla vanteilla ja putkipalkeilla ulkokuoren ollessa ohutta peltiä. Asiakkaan halutessa ulkopeltinä voidaan käyttää tavallisen teräksen sijasta ruostumatonta terästä, jolloin puhtaanapito helpottuu ja korroosion sieto lisääntyy. Muotin ulkokuoren elementit ovat pulttiliitoksilla kiinni toisissaan sekä keskiristikossa joten muotin asennus ja irrottaminen kelauskoneesta ei vaadi tulitöitä.

Tuotteen irrottamisen mahdollistavan supistusmekanismin suunnittelu oli haasteellista, koska rakenteen todellista käyttäytymistä muottia supistettaessa oli vaikeaa simuloida. Muotin halkaisijaa pienennettäessä kaksi ulkokuoren elementtiä myötävät tarvittavan määrän, jotta liito voi mennä limittäin. Liitoksen suunnittelussa jäi lopulta kaksi käyttökelpoista rakennetta jäljelle joista toista tullaan todennäköisesti käyttämään valmistettavissa muoteissa.

Tässä vaiheessa opinnäytetyötä todettiin mallinnetun muotin rakenteen olevan riittävän valmis ja työssä siirryttiin seuraavaan vaiheeseen, jossa tutkitaan 3D-mallissa toimivaksi todetun rakenteen lujuusopillista käyttäytymistä.

## 5 LUJUUSLASKENTA

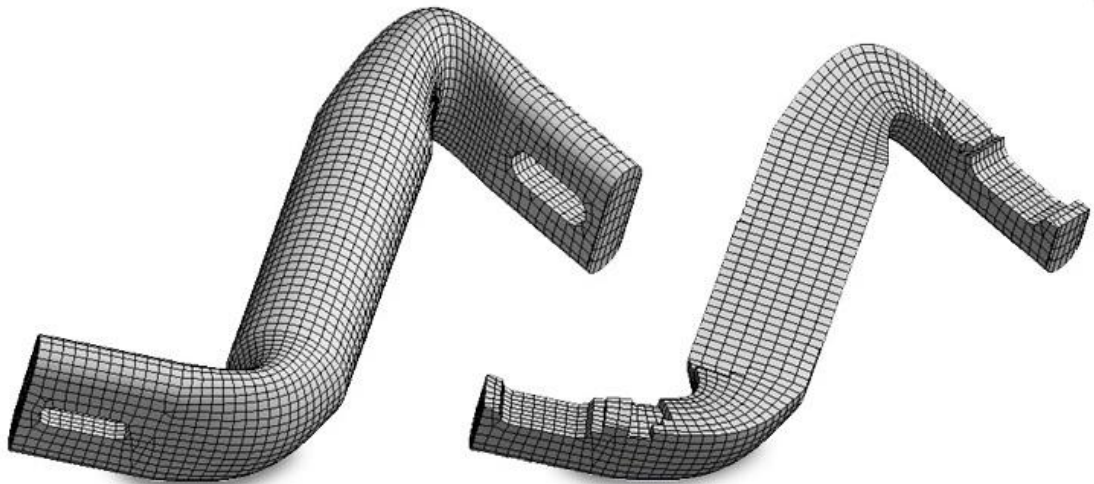
Työssä käytettiin rakenteen muodonmuutoksen ja rakenteessa esiintyvien jännitysten selvittämiseen FEM-laskentaohjelmaa. FEM tarkoittaa elementtimenetelmällä suoritettavaa laskentaa ja tulee sanoista Finite Element Method. Elementtimenetelmä on tehokas työkalu vaativien lujuusopillisten ongelmien ratkaisemiseen. Tietokoneella simulointi vähentää prototyyppien valmistamisen tarvetta ja näin laskee monien tuotteiden valmistuskustannuksia sekä mahdollistaa suunnitteluvirheiden huomaamisen aikaisessa vaiheessa. Kuvassa 8 on kilpa-auton aerodynamiikan tutkimuksen tuloksista luotu graafinen esitys.



**KUVA 8. F1-auton aerodynamiikan tutkiminta (BMW Sauber 2006)**

Yksinkertaiset rakenteet voidaan laskea käsin elementtimenetelmää käyttäen, mutta vähänkin monimutkaisemmat ongelmat vaativat tietokonepohjaista laskentaa. Nykyisin menetelmää käytetään lähes kaikilla tekniikan aloilla mm. lämmönsiirron, virtausopin, geomekaniikan, kallionmekaniikan, sähkötekniikan ja akustiikan ongelmien ratkaisemiseen (Outinen 2007, 24).

Elementtimenetelmä perustuu tutkittavan rakenteen jakamiseen elementteihin jotka yhdistyvät toisiinsa solmujen avulla. Yksinkertaisimmillaan elementti on suora viiva, joka alkaa ja päättyy solmuun esimerkiksi sauvoista tai palkeista muodostuvissa rakenteissa kuten opinnäytetyössä tutkittu rakenne. Monimutkaisimmillaan elementti on kolmiulotteinen kappale kuten prisma, tetraedri tai kuutio joista muodostuu koko tutkittavan kappaleen täyttävä elementtiverkko kuten kuvassa 9. Menetelmällä tutkitaan solmujen siirtymiä, mitkä paljastavat rakenteessa esiintyvät jännitykset ja muodonmuutokset.



**KUVA 9 Esimerkki kolmiulotteisista elementeistä (Ansys 2006)**

Mikkelin ammattikorkeakoulussa käytetään elementtimenetelmää käsittelevillä lujuusoppiin kursseilla Ansys Mechanical APDL -ohjelmaa. Mechanical APDL on erittäin monipuolinen, mutta kokoonpanojen analysointiin kankea. Mikkelin ammattikorkeakoulun Ansys lisenssiin sisältyy myös ulkoasultaan ja käytettävyydeltään nykyaikaisempi Ansys Workbenche, johon kokoonpanot siirtyvät standardiformaateissa tai suoraan yhteensopivasta mallinnusohjelmasta.

Ansyes Mechanical ja Ansyes Workbench ovat laaja-alaisia FEM-laskentaohjelmia, jotka mahdollistavat yksinkertaisten ongelmien mallintamisesta aina vaativiin analyyseihin. Ohjelmat mahdollistaa virtaus, akustiikka, rakenne, lämpö ja sähkömagneettiset analyysit. Sama ohjelma palvelee esimerkiksi lääketieteellisten ongelmien parissa työskenteleviä tutkijoita ja teräsrakenteiden suunnittelijoita.

Tutustuin Ansyes Workbencheen Ansyes Customer Portalin kautta, josta löytyy paljon ohjeita ja harjoitustehtäviä ratkaisuihin (Ansyes Customer Portal). Myös ohjelman mukana tulevasta sähköisestä ohjeesta oli suuri apu. Lopullisten tulosten selvityksessä käyttämäni Mechanical APDL oli jo valmiiksi tuttu, joten ohjeiden lukemisen tarve oli vähäisempi, mutta jälleen ohjelman mukana tuleva erittäin laaja opas oli tarpeen.

## 5.1 LUJUUSLASKENNAN PERUSKÄSITTEITÄ

Osiassa käydään lyhyesti lävitse lujuuslaskennan peruskäsitteet.

### Voima

Voiman lyhenne on  $F$  ja yksikkö newton [N]. Voimalla on suunta ja suuruus eli se on vektorisuure. Maan pinnalla massan aiheuttama voima rakenteelle lasketaan käyttäen maan vetovoiman aiheuttamaa kiihtyvyyttä ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ellei kappaleeseen kohdistu muita kiihtyvyyksiä. Laskennassa kiihtyvyytenä käytettiin  $10 \text{ m/s}^2$ .

(1)

= massa [kg]

= kiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]



## **Jännitys**

Jännitys kuvaa rakenteen kuormittumista voiman johdosta. Jännityksen tunnus on  $\sigma$  ja yksikkö Pa [N/m<sup>2</sup>]. Rakenteessa esiintyviä jännityksiä nimitetään normaali-, leikkaus-, taivutus- ja vääntöjännitykseksi jännityksen aikaansaavan kuorman mukaan.

## **Myötö- ja murtoraja**

Myötöraja on pienin jännitys, joka saa rakenteessa aikaan pysyvän muodonmuutoksen, mutta ei johda rakenteen tuhoutumiseen.

Murtoraja on jännitys, joka johtaa rakenteen tuhoutumiseen.

## **Neliömomentti (jäyhyysmomentti)**

Neliömomentin tunnus on I ja yksikkö m<sup>4</sup>. Se kuvaa poikkileikkauksen ominaisuutta vastustaa taipumaa poikkileikkauksen tietyn akselin suhteen. Yksinkertaisten poikkileikkauksien neliömomentti voidaan laskea helposti kaavojen avulla, mutta monesti se katsotaan teräsvalmistajien profiilitaulukoista tai lasketaan tietokoneella.

## **Steinerin sääntö**

Steinerin sääntöä käytetään esimerkiksi kun kaksi profiilia on hitsattu yhteen ja niiden yhteistä neliömomenttia vaaditaan lukuunlaskelmissa.

Suoran (pisteen) suhteen laskettu neliömomentti

(2)

= pintakeskiön suhteen laskettu neliömomentti [mm<sup>4</sup>]

= pinta-ala [mm<sup>2</sup>]

= pisteiden välimatka [mm]

(Outinen 2007, 411)

## Vertailujännitys

Vertailujännitys ottaa huomioon kaikki rakenteessa esiintyvät jännitykset ja näin ollen antaa todellisimman kuvan rasiustilasta, jota voidaan verrata käytetyn materiaalin myötö- tai murtorajaan. Työssä käytetään vakiovääritysmisenergiyahypoteesia (VVEH) vertailujännityksen selvittämiseen.

## **5.2 TYÖN SUORITUS**

Työn laskentaosuus suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun tiloissa käyttäen elementtimenetelmään perustuvaa Ansys Mechanical APDL:ää. Alkuperäisen suunnitelman mukaan laskenta oli tarkoitus suorittaa Ansys Workbenchillä, mutta ohjelmaan tutustumisen ja käytön harjoittelun jälkeen selvisivät koulun käytössä olleen oppilaitoslisenssin rajoitteet. Lisenssi ei mahdollistanut näin suuren rakenteen laskentaa, joten ennen laskentaohjelman vaihtamista selvitettiin mahdollisuutta käyttää Tieteen tietotekniikan keskuksen tutkimustyöhön tarkoitettu lisenssiä. Koska työstä saatuja tuloksia on tarkoitus käyttää kaupalliseen tarkoitukseen ei tämäkään lisenssi ollut käytävissä.

Ohjelman vaihdon johdosta Ansys Mechanical APDL:ään laskentamallia yksinkertaistettiin, mikä osoittautui hyväksi ratkaisuksi.

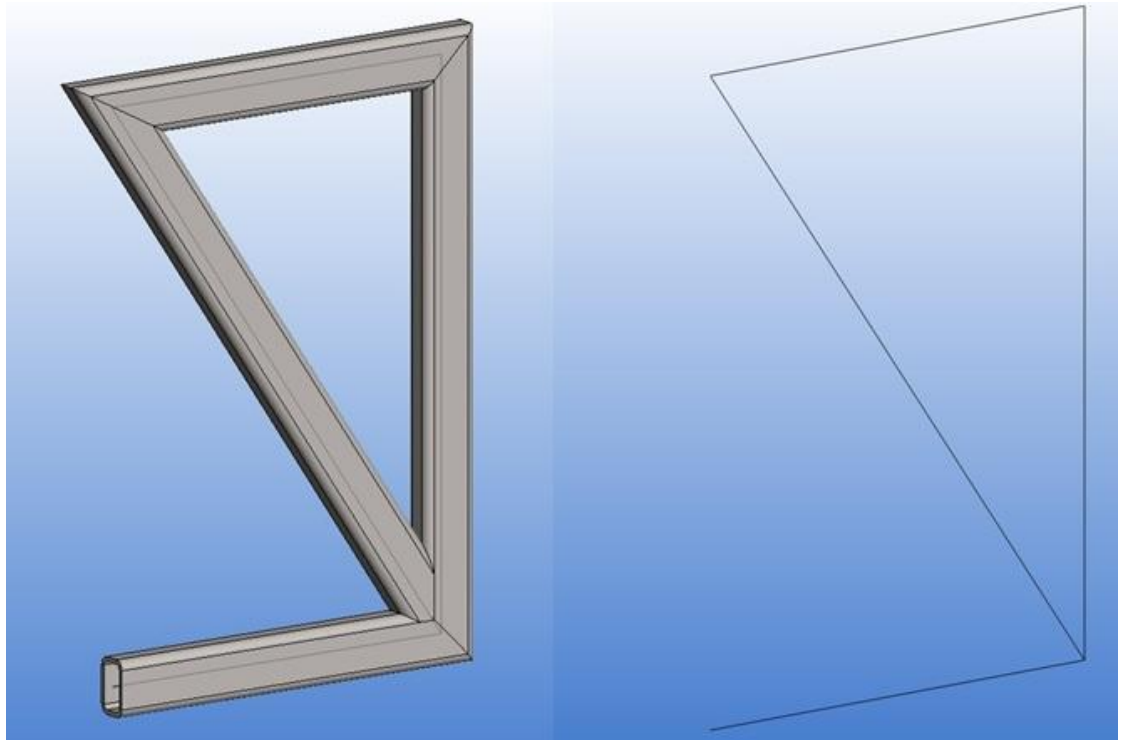
Työn kirjallisessa osassa ei käydä läpi laskennan suorittamista Ansys Workbenchillä, koska ohjelmasta ei saatu tuloksia ulos lisenssirajoitusten johdosta. Seuraavissa kappaleissa käydään laskenta läpi vaihe vaiheelta Ansys Mechanical APDL:ää käyttäen.

### **5.2.1 GEOMETRIAN TUONTI**

Laskennan ensimmäinen vaihe on mallin geometrian luominen Ansys-ohjelmaa käyttäen tai sen tuominen mallinnusohjelmasta. Yksinkertaisten rakenteiden luonti onnistuu Mechanical APDL:llä helposti, mutta monimutkaisemmat rakenteet on helpompi tuoda mallinnusohjelmasta. Tuonnissa käytetään standardiformaattia, tässä tapauksessa IGS-tiedostomuotoa.

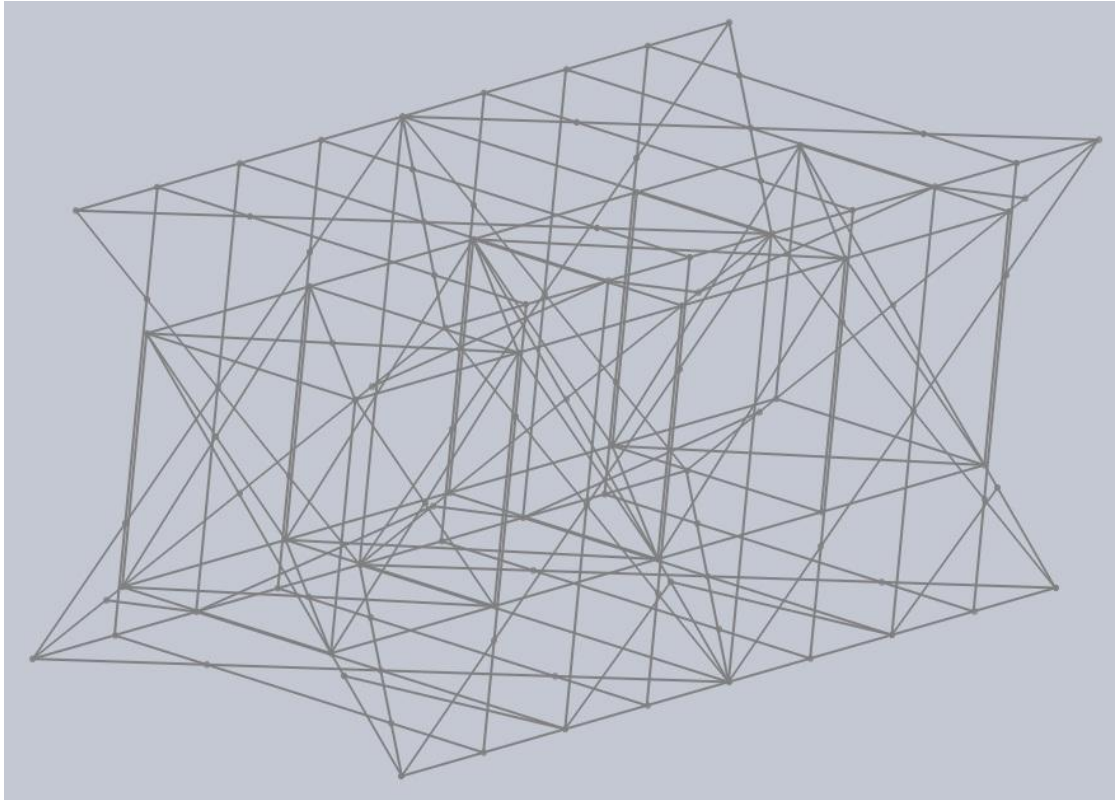
Tässä tapauksessa laskentaohjelmaan vietäväksi geometriaksi riitti rautalankamalli muotin kantavista rakenteista. Yrityksistä huolimatta profiilien pyyhkäisyviivoista muodostuvan rautalankamallin tallentaminen IGS-tiedostoksi ei onnistunut Vertex G4:lla, joten avuksi otettiin kilpaileva mallinnusohjelma SolidWorks.

Kuvassa 10 on esitetty neljästä suorakaideprofiilisesta putkesta muodostuva kokoonpano sekä laskentaohjelmaan vietävä rautalankamalli, joka muodostuu profiilien pintakeskiöiden kautta kulkevista suorista.



**KUVA 10. Oikealla esimerkki laskentaohjelmaan tuotavasta geometriasta**

Rautalankamallin luominen muotin kantavista rakenteista SolidWorksiä käyttäen onnistui melko helposti. Kaikki viivat piirrettiin yhteen 3D-sketsiin, jonka jälkeen se tallennettiin IGES-tiedostomuotoon. Mallintamista hidasti sketsin monimutkaisuudesta johtuneet ongelmat mallin ehdoissa, mutta nekin saatiin lopulta toimimaan halutulla tavalla. Jotta sketsissä olevat viivat tulisivat IGES-tiedostoon oli tallennus asetuksista valittava kohta "Export sketch entities". Kuvassa 11 muotista luotu rautalankamalli valmiina.



**KUVA 11. SolidWorksilla luotu rautalankamalli laskentaohjelmaan vietäväksi**

Tutkittavan rakenteen geometrian ollessa Ansysin ymmärtämässä muodossa voitiin aloittaa työskentely laskentaohjelmalla. Ansysissä IGES-tiedosto tuodaan kohdasta file --> import --> IGES. Aukeavasta ikkunasta voidaan halutessaan säätää tuontiase-  
tuksia, mutta tässä tapauksessa siihen ei ollut tarvetta.

### **5.3 LASKENTAAN VAADITTAVAT MÄÄRITYKSET**

Työssä käytettiin Ansysin Beam 4 -palkkielementtiä. Elementeille määritettiin ohjelmassa poikkileikkaussuureet (poikkileikkausten pinta-alat, neliömomentit, poikkileikkausten ulkomitat sekä keskiristikolla myös massa) real constant kohtaan. Poikkileikkausten ulkomittoja ei tarvita laskentaan, mutta niiden avulla Ansys muuttaa rautalankamallin viivat ulkoasuiltaan rakenteessa käytetyiksi putkipalkeiksi ja näin muun muassa helpottaa mallin oikeellisuuden tarkistamista sekä selkeyttää graafisia tuloksia. Rakenteessa käytettiin kaikkiaan 10:tä real constantia, jotta lujuuslaskennassa mahdollisesti selviävien ongelmien kohtien muuttaminen ennen uudelleen laskentaa olisi helpompaa.

Muotissa oleva kahdesta vastakkaisesta kulmaraudasta muodostuva pitkittäinen liitos, joka mahdollistaa valmiin tuotteen irrottamisen mallinnettiin laskentamallissa u-palkiksi, koska liitos on periaatteessa u-palkki liitoksen jäykän mekanismin johdosta.

Muotti muodostuu neljästä elementistä jotka liitetään toisiinsa, jolloin ulkoristikon pitkät putket tulevat vastakkain. Laskennassa kaksi putkipalkkia yhdistettiin ja niille laskettiin yhdistetty neliömomntti.

Muiden käytettyjen profiilien poikkileikkaussuureet löytyivät Rautaruukin internet-sivuilta.

Alla lista työssä käytetyistä Real constanteista. Ensimmäinen numero kertoo real constantin numeron ohjelmassa ja esimerkiksi 80x4 on putkipalkki 80mm x 80mm x 4mm.

1. Keskiristikon pitkät putket	80x4
2.Keskiristikon pysty/vaaka putket	80x4
3.Keskiristikon vinot putket	80x4
4.Keskiristikon päissä sekä keskellä olevat ristiin menevät putket	80x4
5.Säteensuuntaiset putket	80x4
6.Ulosvetojäykkäjäät	80x40x3
7.Ulkoristikon pitkät putket	2X 80x40x3
8.Ukoristikon ristiin menevät putket	60x40x3
9.Ulkoristikon poikittaiset putket	60x40x3
10.Muotin liitos, kaksi kulmarautaa korvattu laskentamallissa u-palkilla.	80x45

Real constant 7:lle laskettiin kahden putkipalkin yhteinen neliömomntti y- ja z-suunnassa.

$I_y$ -suunnassa neliömomntti = yhden 80x40x3 putkipalkin neliömonetti  $I_y * 2$

$I_z$ -suunnassa neliömomentti Steinerin säännön mukaan

(2)

Liitteessä 1 listattuna kaikki laskennassa käytetyt real constantit Ansysistä tulostettuna.

### 5.3.1 VERKOTUS

Tutkittava rakenne jaetaan verkottamalla solmuihin sekä elementteihin. Solmut ovat pisteitä joissa elementit kiinnittyvät toisiinsa. Verkotettaessa valitaan käytettävä elementtityyppi, joka tässä tapauksessa oli 3-ulotteinen palkkielementti Beam 4. Alkuperäisen suunnitelman mukaan rakenne olisi tuotu 3d-mallina ja verkotettu kuten kuvassa 9, mutta rakenteen suuren koon johdosta elementtejä olisi tarvittu huomattavasti koulun lisenssin sallimaa suurempi määrä. Tuomalla pelkän rautalankamallin tarvittiin rakenteen verkottamiseen elementtejä vain murto-osa verrattuna alkuperäiseen suunnitelmaan ja myös laskenta yksinkertaistui.

Verkotus tehtiin Ansys Mechanical APDL:ssä MeshTool työkalulla. Työkalu mahdollista suurien rakenteiden helpomman verkottamisen käyttäessä useita real constantia. Jokaiselle rautalankamallin viivalle määritettiin käytettävä real constant aikaisemmin luodusta listasta (liite 1). Malli olisi voitu myös verkottaa nopeasti käyttäen muutamaa real constantia, mutta silloin rakenteessa käytettäviä putkipalkkiprofiileja ei olisi voitu tarvittaessa muuttaa yksityiskohtaisesti.

Verkotettaessa tulee huomioida, että rakenteessa olevien liitosten kohdille tulee solmut, muussa tapauksessa liitosta ei synny laskentamallissa kohtiin joissa putkipalkit risteävät toisensa. Asia huomioitiin jo rautalankamallia tehdessä piirtämällä esimerkiksi x:n muotoinen rakenne 4:tä viivasta jolloin x:n keskelle tulee verkotettaessa solmu johon kaikki neljä viivaa päättyvät.

### 5.3.2 TUET JA KUORMAT

Ristikko tuettiin jäykästi neljästä pisteestä, jotka näkyvät kuvassa 12 rakenteen oikeassa päässä liloilla nuolilla. Näistä pisteistä muotti on tarkoitus kiinnittää sitä pyörittävään koneeseen.

Laskennassa käytetty kuorma muodostui tuotteen ja rakenteen massasta kerrottuna varmuuskertoimella. Koska rakenne pyörii käytön aikana tarkasteltiin rakenteen käyttäytymistä viidessä eri asennossa. Asennoista neljä saatiin pyöryttämällä rakennetta neljästi 90 astetta ja viidenneksi tapaukseksi valittiin pahin asento edellä mainittujen neljän asennon väliltä. Tällöin muotti on siten, että liitoskohta on ylhäällä. Kaikki kuormitustilanteet selviävät tarkemmin liitteestä 2.

Muotille kelattavan valmiin tuotteen massaksi arvioitiin 4000 kg ja rakenteen massaksi saatiin Vertexin massan laskentaominaisuutta käyttäen 6720 kg. Nämä jaettiin rakenteen kuormaksi siten, että tuotteen aiheuttama kuorma kohdistuu uloimman ristikon yläosaan, rakenteen keskellä olevan ristikkopalkin massa otettiin huomioon asettamalla maanvetovoima kerrottuna varmuusluvulla 1,5 vaikuttamaan siihen ja loput rakenteen massasta asetettiin tasaisesti uloimman ristikon 36 solmulle kuvan 5 osoittamalla tavalla.

Seuraavassa on selitetty kuvassa 12 olevan kuormitustapauksen tilanteessa kuorman jakautuminen.  $F_a$  on solmukuorma ristikon alaosassa ja  $F_y$  solmukuorma ristikon yläosassa.

Rakenteen alaosassa oleviin solmuihin kohdistuva kuorma  
 $= (\text{rakenteen kokonaismassa} - \text{keskiristikon massa}) / \text{solmujen lkm joihin kuorma kohdistuu} * \text{varmuuskerroin} * \text{maanvetovoima}$

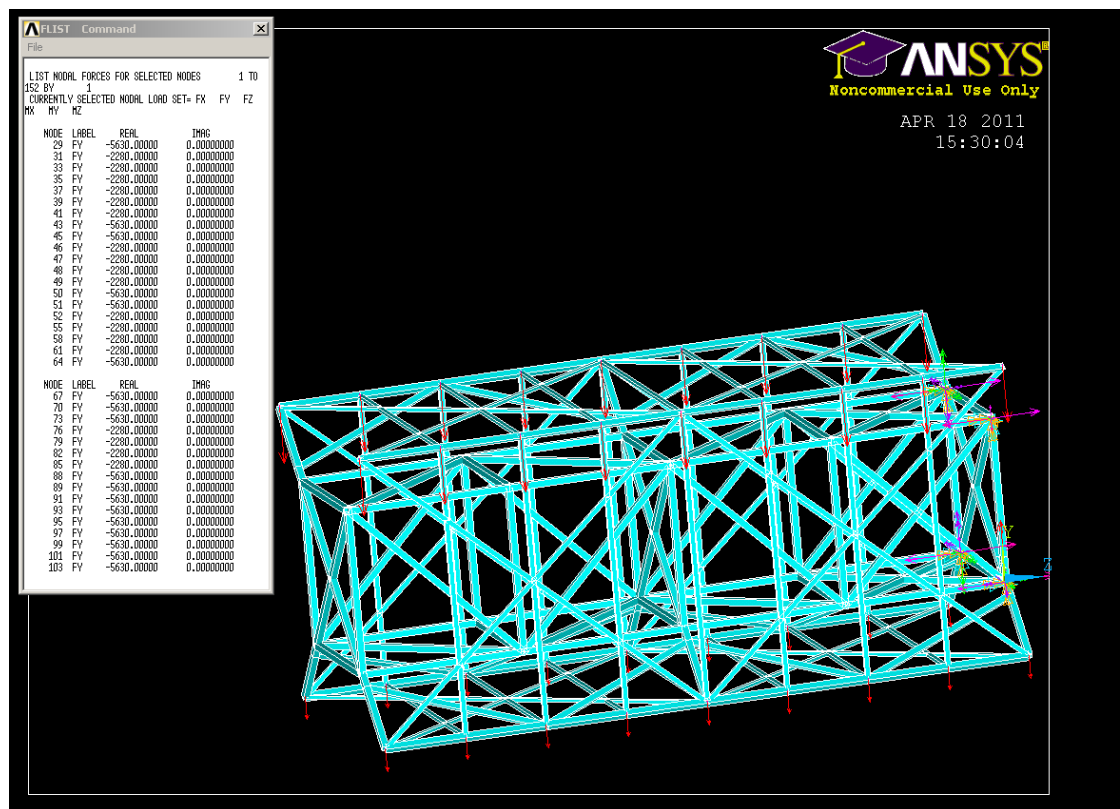
(1)

Rakenteen yläosassa oleviin solmuihin kohdistuva kuorma

=[(rakenteen kokonaismassa - keskiristikon massa) / solmujen lkm. joihin kuorma kohdistuu \* varmuuskerroin \* maanvetovoima] + [tuotteen massa / solmujen lkm. joihin kuorma kohdistuu \* varmuuskerroin \* maanvetovoima]

(1)

Rakenteen keskellä olevan ristikkopalkin massasta johtuva kuorman lujuuslaskentaohjelma laskee keskiristikon tiheyden sekä käyttäjän määrittelemän kappaleeseen kohdistuvan kiihtyvyyden avulla, joka tässä tapauksessa on maan vetovoima kerrottuna varmuuskertoimella 1,5.



KUVA 12. Kuorman jakautuminen rakenteeseen. Lyhyet punaiset nuolet rakenteen alaosassa 2280N ja pidemmät yläosassa 5630N.



## 5.4 TULOKSET

Laskentaohjelmasta päädyttiin tulostamaan rakenteessa kuormituksen osalta veto- ja puristusjännitykset ja vakiovääristymisenergiähypoteesia (VVEH) avulla vertailujännitykset. Molemmissa tulosten tarkastelussa tyydyttiin graafiseen tarkasteluun. Ohjelmasta olisi saanut myös elementti kohtaiset tulokset tekstinä, mutta niin tarkkoja tuloksia ei tarvittu eikä laskentamallin epätarkkuuden takia olisi ollut edes järkevää tarkastella. Tulosten tarkastelu mallissa, jossa on paljon elementtejä, on myös huomattavasti havainnollisempaa graafisena kuin tekstimuodossa.

Rakenteen kuormitusta kuvaavien tulosten lisäksi tutkittiin solmujen siirtymiä. Teräsrakennetta kuormitettaessa se muuttaa aina enemmän tai vähemmän muotoaan. Muotti käyttäytyi kaikissa tutkituissa asennoissa lähes samanlailla, kuten liitteen 3 *Rakenteen esiintyvät jännitykset* tuloksista voi nähdä. Tämän takia tyydyttiin tulostamaan vain yksi venymä kuva, jossa siirtymät olivat suurimpia.

Liitteessä 3 on esitetty kaikkien rakenteen tutkittujen asentojen tulokset. Kuvia tarkastelemalla havaitaan, että jännityksissä [MPa] ei ole suuri eroja eri asentojen kesken. Muotin kiinnityspäässä on havaittavissa suuria pistemäisiä jännitysalueita, jotka johtuvat enimmäkseen jännitysten laskentatavan aiheuttamista epätodellisista jännityksistä terävissä nurkissa sekä laskentamallissa käytetystä muotin tuennasta näistä pisteistä. Muilta osin esiintyvät jännitykset jäävät maltillisiksi mahdollistaen edullisen S355 teräksen käyttämisen. Myös muotin pyörimisestä aiheutuva dynaaminen kuorma väsyttää teräsrakennetta, joten staattisten jännitysten on syytäkin jäädä pieniksi.

Siirtymää tutkittiin, koska suuret siirtymät rasittavat muottia pitkällä aikavälillä ja käytettävyydenkin kannalta muotin tulisi olla riittävän jäykkä. Liitteen 4 siirtymä kuvasta nähdään muotin asento, jossa siirtymät ovat suurimmat. Muissa asennoissa siirtymät olivat lähes samoja, kuten jännitystuloksien (liite 3) perusteella voitiin jo päätellä, joten niiden esittämistä ei nähty tarpeellisena. Siirtymän yksikkönä on mm ja kuvan siirtymä on x-akselin suuntaista eli solmujen siirtymää maata kohti.

## 6 YHTEENVETO

Työ jakautui kahteen osaan. muotin suunnittelun ohella mallintamiseen ja lopuksi lujuustarkasteluun. Ajankäytöllisesti suunnittelu ja mallintaminen veivät noin 2/3 ja lujuustarkastelu loput 1/3.

Suunnittelutyön edetessä mahdollisia ongelma kohtia haettiin jatkuvasti, jotta välttyttäisiin turhalta työltä. Työn vaiheiden tarkka suunnittelu säästi uudelleen tekemiseltä, mutta vaati paljon kokeiluja yksinkertaistetuilla ongelmilla.

Rakenteen mallintamisesta saatiin hyviä tuloksia. Kehitystyön edetessä monta esiin tullutta ongelmaa ratkaistiin ja tuote saatiin täyttämään työssä asetetut rajaehdot. Muotista luodussa 3D-mallissa käytettiin profiileista muodostuvien osien mallintamisessa mahdollisimman paljon profiilityökalua piirustusten luonnin helpottamiseksi ja erilaisien osien määrä minimoitiin. Mallintamisen tuloksena yritys sai käyttöönsä 3d-mallin muotista, josta haluttujen muutosten ja jatko kehittämisen jälkeen on helposti tehtävissä muotin valmistamiseen vaadittavat työkuvat.

Ennen työkuvienv luontia on kuitenkin paneuduttava muun muassa muotin supistamiseen käytettävään tekniikkaan. Opinnäytetyön aikana tutkituista mekanismeista on varmasti apua lopulliseen ratkaisuun, mutta rakenteen käyttäytymisen simulointi tietokoneella on melko hankalaa, joten ensimmäinen rakennettava muotti opettanee paljon.

Lujuuslaskenta vaati työssä eniten itsenäistä työskentelyä ja tiedon hankintaa. Laskennan tulokset eivät paljastaneet suuria ongelmakohtia, joten rakenteen jatkokehitykselle voitiin näyttää vihreää valoa. Ennen muotin valmistamista tullaan todennäköisesti tekemään uusi lujuuslaskenta rakenteelle kokonaisuudessa sekä tarvittaville yksityiskohdille. Lujemman teräksen käyttöä muotin tuennan lähellä olisi mielestäni hyvä harkita.

Suurimmat haasteet työssä olivat muotin tuentatavasta aiheutuvat rajoitteet sekä tuotteen irrottamisen mahdollistavan kutistusmekanismin sisällyttäminen rakenteeseen.

Työ opetti paljon käytännön suunnittelutyöstä insinööritoimistossa. Opinnäytetyön aikana mallinnustekniikkani kehittyi kohti järkevää mallintamista ja opin tavan suunnitella tuotteita ideasta valmiiksi. Opinnäytetyö oli erittäin opettavainen ja antoi hyvät eväät työelämään siirtymiseen.

## LÄHTEET

Ansys Customer Portal. Yrityksen asiakkaille kohdennettu tukisivusto.  
<https://www1.ansys.com/customer/> Luettu 22.3.2011

Güneri Akovali. 2001. Handbook of Composite Fabrication. Shrewsbury: Rapra Technology.

Hietikko Esa. 2010. SolidWorks - Tietokoneavusteinen suunnittelu 2011. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Outinen, H., Salmi, T., Vulli, P. 2007. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus (Klingendahl Paino).

Rautaruukki. Yrityksen internetsivut. <http://www.ruukki.fi/>. Luettu 1.4.2011

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M., Komppa, V. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys (Hakapaino).

Tuhola, E., Viitanen, K. 2008. 3D-mallintaminen suunnittelun apuvälineenä. Tampere: Tammertekniikka (Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino).

Vertex Systems Oy. Yrityksen Internet-sivut. <http://www2.vertex.fi/>. Luettu 11.5.2011

## Real constant listaus

LIST REAL SETS		1 TO	10 BY	1			
REAL CONSTANT	SET	1	ITEMS 1 TO	6			
1175.0	0.11104E+07		0.11104E+07	80.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	1	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.92200E-02	
REAL CONSTANT	SET	2	ITEMS 1 TO	6			
1175.0	0.11104E+07		0.11104E+07	80.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	2	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.92200E-02	
REAL CONSTANT	SET	3	ITEMS 1 TO	6			
1175.0	0.11104E+07		0.11104E+07	80.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	3	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.92200E-02	
REAL CONSTANT	SET	4	ITEMS 1 TO	6			
1175.0	0.11104E+07		0.11104E+07	80.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	4	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.92200E-02	
REAL CONSTANT	SET	5	ITEMS 1 TO	6			
1175.0	0.11104E+07		0.11104E+07	80.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	5	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.92200E-02	
REAL CONSTANT	SET	6	ITEMS 1 TO	6			
661.00	0.17560E+06		0.52250E+06	80.000	40.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	6	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	7	ITEMS 1 TO	6			
855.00	0.11138E+07		0.12958E+07	80.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	7	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	8	ITEMS 1 TO	6			
541.00	0.13440E+06		0.25380E+06	60.000	40.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	8	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	9	ITEMS 1 TO	6			
541.00	0.13440E+06		0.25380E+06	60.000	40.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	9	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	10	ITEMS 1 TO	6			
1103.0	0.10594E+07		0.19329E+06	45.000	80.000	0.0000	
REAL CONSTANT	SET	10	ITEMS 7 TO	12			
0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

1 ELEMENTS

U  
ROT  
F  
NFOR  
NMOM  
RFOR  
RMOM  
ACEL

PRRSOL Command

```
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE
**** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING ****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
```

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	28366.	35432.	0.16992E+06	0.35402E+07	-0.24901E+07	0.11189E+07
10	-35733.	47440.	-0.17041E+06	0.34918E+07	0.26203E+07	0.58739E+06
11	-27292.	38126.	0.14988E+06	0.49146E+06	-0.14807E+06	0.19313E+06
16	34660.	42463.	-0.14539E+06	0.21162E+07	-0.97608E+06	-0.14539E+07

TOTAL VALUES  
VALUE 0.42564E+08 0.16345E+06 0.17462E+09 0.96477E+07 -0.99074E+06 0.46559E+06

ANSYS  
Noncommercial Use Only

APR 19 2011  
16:00:21

FLIST Command

```
LIST NODAL FORCES FOR SELECTED NODES 1 TO 103 BY 1
CURRENTLY SELECTED NODAL LOAD SET= FX FY FZ
MX MY MZ
```

NODE	LABEL	REAL	IMAG
29	FY	-5630.00000	0.000000000
31	FY	-2280.00000	0.000000000
33	FY	-2280.00000	0.000000000
35	FY	-2280.00000	0.000000000
37	FY	-2280.00000	0.000000000
39	FY	-2280.00000	0.000000000
41	FY	-2280.00000	0.000000000
43	FY	-5630.00000	0.000000000
45	FY	-5630.00000	0.000000000
46	FY	-2280.00000	0.000000000
47	FY	-2280.00000	0.000000000
48	FY	-2280.00000	0.000000000
49	FY	-2280.00000	0.000000000
50	FY	-5630.00000	0.000000000
51	FY	-5630.00000	0.000000000
52	FY	-2280.00000	0.000000000
55	FY	-2280.00000	0.000000000
58	FY	-2280.00000	0.000000000
61	FY	-2280.00000	0.000000000
64	FY	-5630.00000	0.000000000
67	FY	-5630.00000	0.000000000
70	FY	-5630.00000	0.000000000
73	FY	-5630.00000	0.000000000
76	FY	-2280.00000	0.000000000
79	FY	-2280.00000	0.000000000
82	FY	-2280.00000	0.000000000
85	FY	-2280.00000	0.000000000
88	FY	-5630.00000	0.000000000
89	FY	-5630.00000	0.000000000
91	FY	-5630.00000	0.000000000
93	FY	-5630.00000	0.000000000
95	FY	-5630.00000	0.000000000
97	FY	-5630.00000	0.000000000
99	FY	-5630.00000	0.000000000
101	FY	-5630.00000	0.000000000
103	FY	-5630.00000	0.000000000

1 ELEMENTS

U  
ROT  
F  
NFOR  
NMOM  
RFOR  
RMOM  
ACEL

PRRSOL Command

```
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE
**** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING ****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
```

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	-42453.	-34660.	-0.14639E+06	-0.97608E+06	0.21162E+07	0.14539E+07
10	-47440.	35733.	-0.17041E+06	0.26203E+07	0.34918E+07	-0.58739E+06
11	-28126.	27292.	0.14988E+06	0.14807E+06	0.49146E+06	-0.19313E+06
16	-34660.	-42453.	0.16992E+06	-0.24901E+07	0.35402E+07	-0.11189E+07

TOTAL VALUES  
VALUE -0.16345E+06 -0.37762E+08 0.87311E+09 -0.99074E+06 0.96477E+07 -0.46559E+06

ANSYS  
Noncommercial Use Only

APR 19 2011  
16:04:28

FLIST Command


```
LIST NODAL FORCES FOR SELECTED NODES 1 TO 103 BY 1
CURRENTLY SELECTED NODAL LOAD SET= FX FY FZ
MX MY MZ
```

NODE	LABEL	REAL	IMAG
29	FX	2280.00000	0.000000000
31	FX	2280.00000	0.000000000
33	FX	5630.00000	0.000000000
35	FX	5630.00000	0.000000000
37	FX	5630.00000	0.000000000
39	FX	2280.00000	0.000000000
41	FX	2280.00000	0.000000000
43	FX	2280.00000	0.000000000
45	FX	2280.00000	0.000000000
46	FX	5630.00000	0.000000000
47	FX	5630.00000	0.000000000
48	FX	2280.00000	0.000000000
49	FX	2280.00000	0.000000000
50	FX	2280.00000	0.000000000
51	FX	2280.00000	0.000000000
52	FX	5630.00000	0.000000000
55	FX	5630.00000	0.000000000
58	FX	5630.00000	0.000000000
61	FX	5630.00000	0.000000000
64	FX	2280.00000	0.000000000
67	FX	2280.00000	0.000000000
70	FX	2280.00000	0.000000000
73	FX	2280.00000	0.000000000
76	FX	2280.00000	0.000000000
79	FX	2280.00000	0.000000000
82	FX	2280.00000	0.000000000
85	FX	2280.00000	0.000000000
88	FX	5630.00000	0.000000000
89	FX	5630.00000	0.000000000
91	FX	5630.00000	0.000000000
93	FX	5630.00000	0.000000000
95	FX	5630.00000	0.000000000
97	FX	5630.00000	0.000000000
99	FX	5630.00000	0.000000000
101	FX	5630.00000	0.000000000
103	FX	5630.00000	0.000000000

1 ELEMENTS

U  
ROT  
F  
NFOR  
NMOM  
RFOR  
RMOM  
ACEL

APR 19 2011  
16:07:22



▲ FLIST Command

File

LIST NODAL FORCES FOR SELECTED NODES 1 TO 103 BY

CURRENTLY SELECTED NODAL LOAD SET= FX FY FZ

NODE	LABEL	REAL	IMAG
29	FY	2280.00000	0.00000000
31	FY	5630.00000	0.00000000
33	FY	5630.00000	0.00000000
35	FY	5630.00000	0.00000000
37	FY	5630.00000	0.00000000
39	FY	5630.00000	0.00000000
41	FY	5630.00000	0.00000000
43	FY	2280.00000	0.00000000
45	FY	2280.00000	0.00000000
46	FY	5630.00000	0.00000000
47	FY	5630.00000	0.00000000
48	FY	5630.00000	0.00000000
49	FY	5630.00000	0.00000000
50	FY	2280.00000	0.00000000
51	FY	2280.00000	0.00000000
52	FY	5630.00000	0.00000000
55	FY	5630.00000	0.00000000
58	FY	5630.00000	0.00000000
61	FY	5630.00000	0.00000000
64	FY	2280.00000	0.00000000
67	FY	2280.00000	0.00000000
70	FY	2280.00000	0.00000000
73	FY	2280.00000	0.00000000
76	FY	5630.00000	0.00000000
79	FY	5630.00000	0.00000000
82	FY	5630.00000	0.00000000
85	FY	5630.00000	0.00000000
88	FY	2280.00000	0.00000000
89	FY	2280.00000	0.00000000
91	FY	2280.00000	0.00000000
93	FY	2280.00000	0.00000000
95	FY	2280.00000	0.00000000
97	FY	2280.00000	0.00000000
99	FY	2280.00000	0.00000000
101	FY	2280.00000	0.00000000
103	FY	2280.00000	0.00000000

▲ PRRSOL Command

File

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

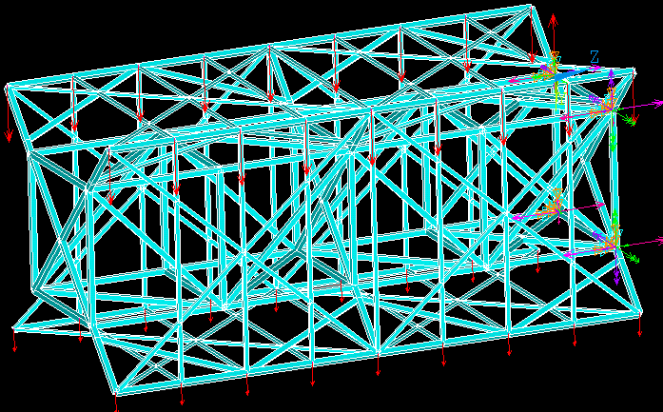
\*\*\*\*\* POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING \*\*\*\*\*

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1  
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	-27540.	-33909.	-0.16994E+06	-0.35530E+07	0.24659E+07	-0.91879E+06
10	36286.	-48300.	0.17043E+06	-0.34960E+07	-0.26727E+07	-0.77577E+06
11	27164.	-37906.	-0.14983E+06	-0.48838E+06	0.14690E+06	0.19234E+06
16	-55910.	-45330.	0.14935E+06	0.21122E+07	0.18391E+07	0.14681E+07


TOTAL VALUES  
VALUE -0.42201E-08 0.16345E+06 -0.32014E-09 -0.96496E+07 0.97291E+06 -0.39942E+06



1 ELEMENTS

U  
ROT  
F  
NFOR  
NMOM  
RFOR  
RMOM  
ACEL

APR 19 2011  
16:08:26



▲ FLIST Command

File

LIST NODAL FORCES FOR SELECTED NODES 1 TO 103 BY

CURRENTLY SELECTED NODAL LOAD SET= FX FY FZ MX MY MZ

NODE	LABEL	REAL	IMAG
29	FX	-5630.00000	0.00000000
31	FX	-5630.00000	0.00000000
33	FX	-2280.00000	0.00000000
35	FX	-2280.00000	0.00000000
37	FX	-2280.00000	0.00000000
39	FX	-5630.00000	0.00000000
41	FX	-5630.00000	0.00000000
43	FX	-5630.00000	0.00000000
45	FX	-5630.00000	0.00000000
46	FX	-2280.00000	0.00000000
47	FX	-2280.00000	0.00000000
48	FX	-5630.00000	0.00000000
49	FX	-5630.00000	0.00000000
50	FX	-5630.00000	0.00000000
51	FX	-5630.00000	0.00000000
52	FX	-2280.00000	0.00000000
55	FX	-2280.00000	0.00000000
58	FX	-2280.00000	0.00000000
61	FX	-2280.00000	0.00000000
64	FX	-5630.00000	0.00000000
67	FX	-5630.00000	0.00000000
70	FX	-5630.00000	0.00000000
73	FX	-5630.00000	0.00000000
76	FX	-5630.00000	0.00000000
79	FX	-5630.00000	0.00000000
82	FX	-5630.00000	0.00000000
85	FX	-5630.00000	0.00000000
88	FX	-2280.00000	0.00000000
89	FX	-2280.00000	0.00000000
91	FX	-2280.00000	0.00000000
93	FX	-2280.00000	0.00000000
95	FX	-2280.00000	0.00000000
97	FX	-2280.00000	0.00000000
99	FX	-2280.00000	0.00000000
101	FX	-2280.00000	0.00000000
103	FX	-2280.00000	0.00000000

▲ PRRSOL Command

File

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

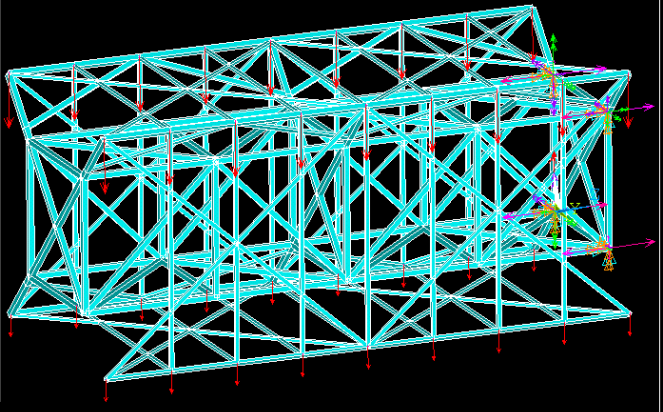
\*\*\*\*\* POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING \*\*\*\*\*

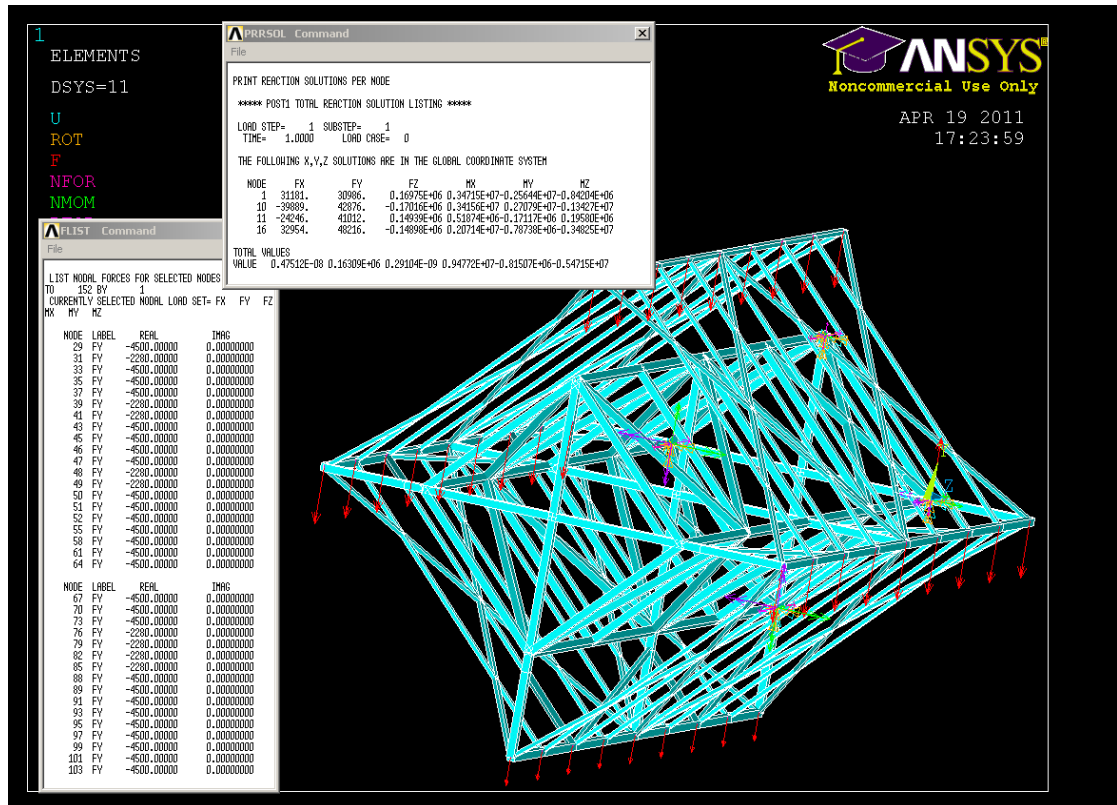
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1  
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	43338.	35910.	0.14935E+06	0.10391E+07	-0.21122E+07	-0.14881E+07
10	48300.	-36286.	0.17043E+06	-0.26727E+07	-0.34960E+07	0.77577E+06
11	37906.	-27164.	-0.14983E+06	0.14690E+06	-0.48838E+06	0.19234E+06
16	33909.	27540.	-0.16994E+06	0.24659E+07	-0.35530E+07	0.91879E+06

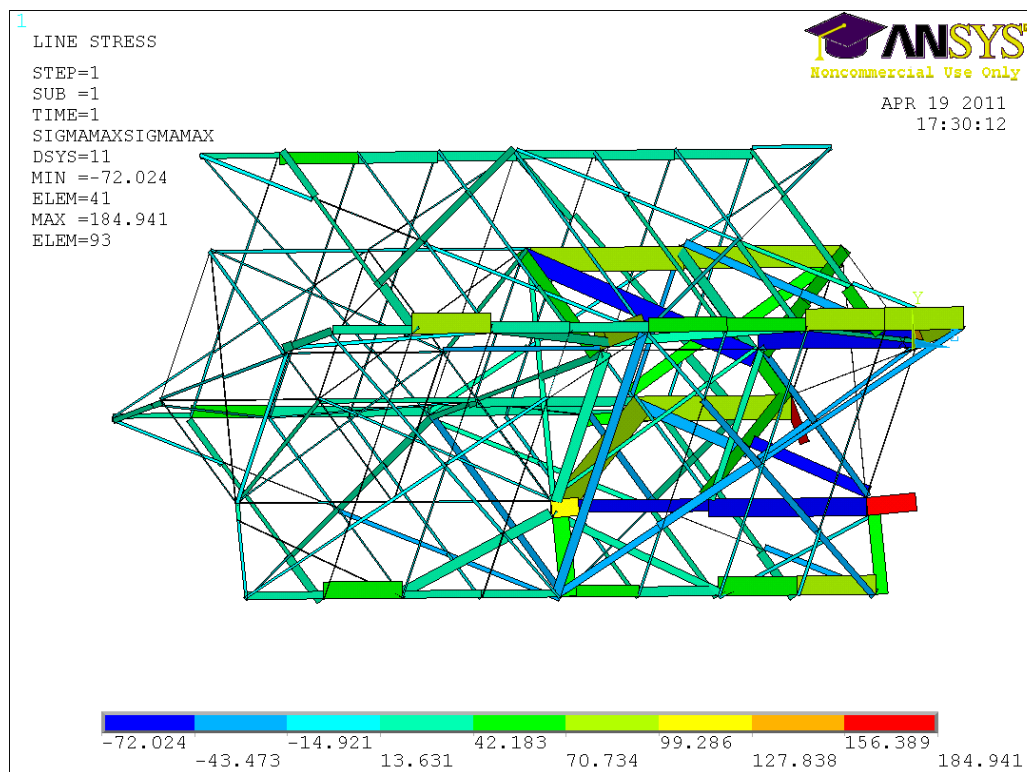
TOTAL VALUES  
VALUE 0.16345E+06 0.38053E+08 -0.10186E-08 0.97291E+06 -0.96496E+07 0.39942E+06



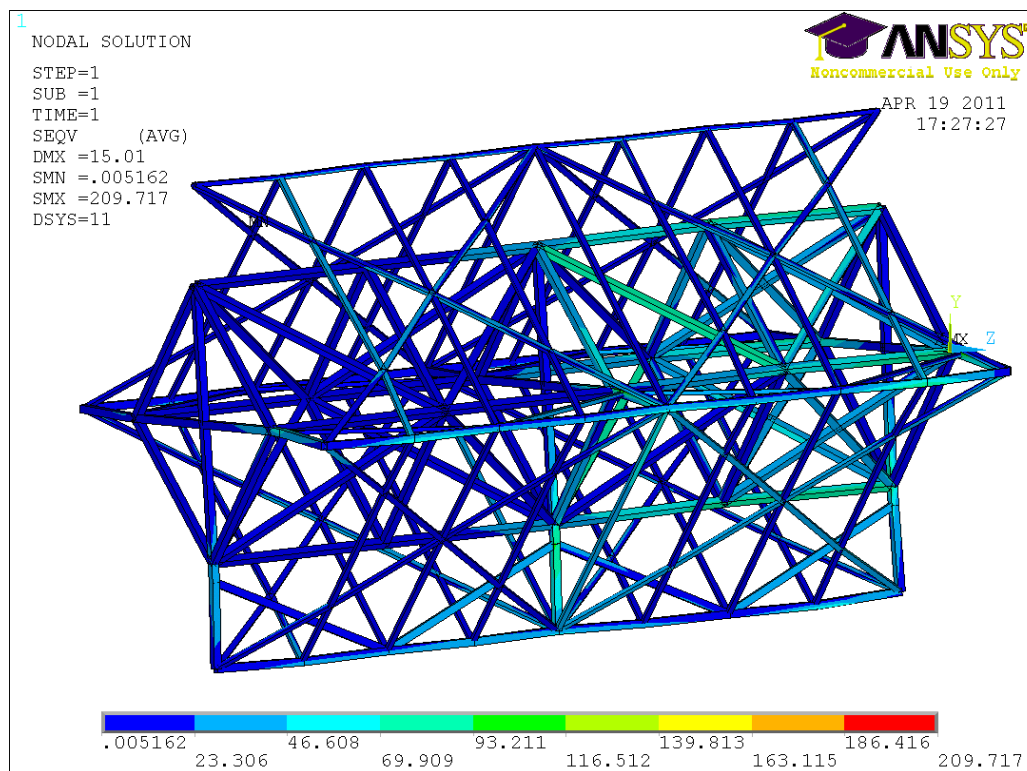




Tapaus 45°

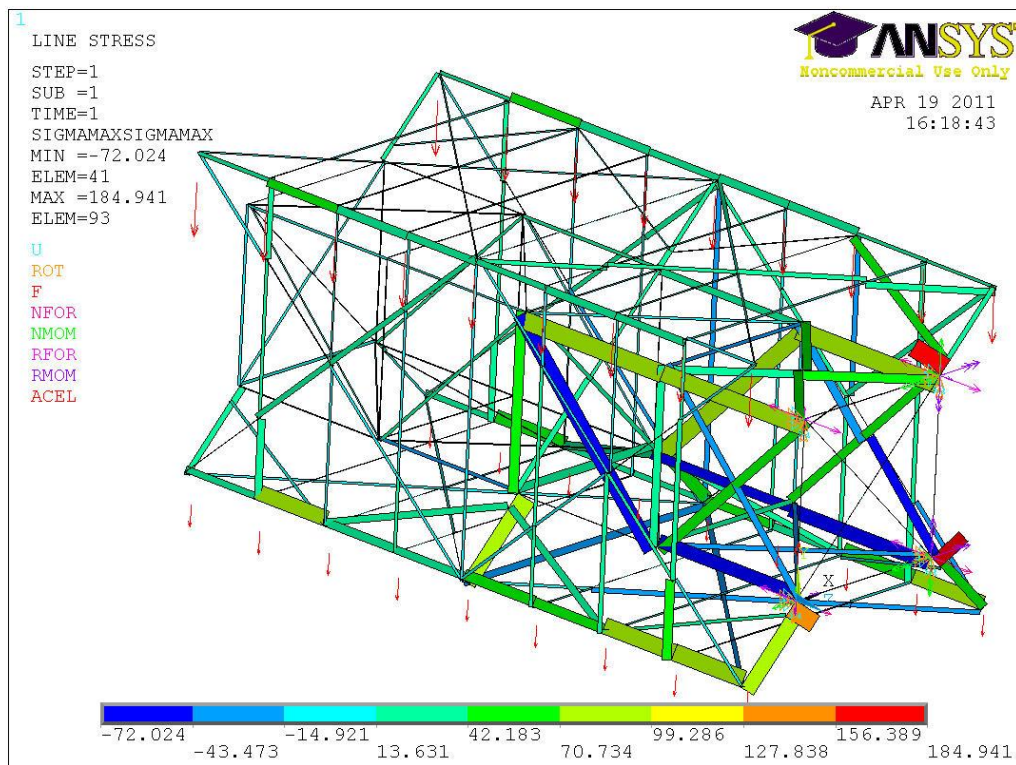


Sigma max

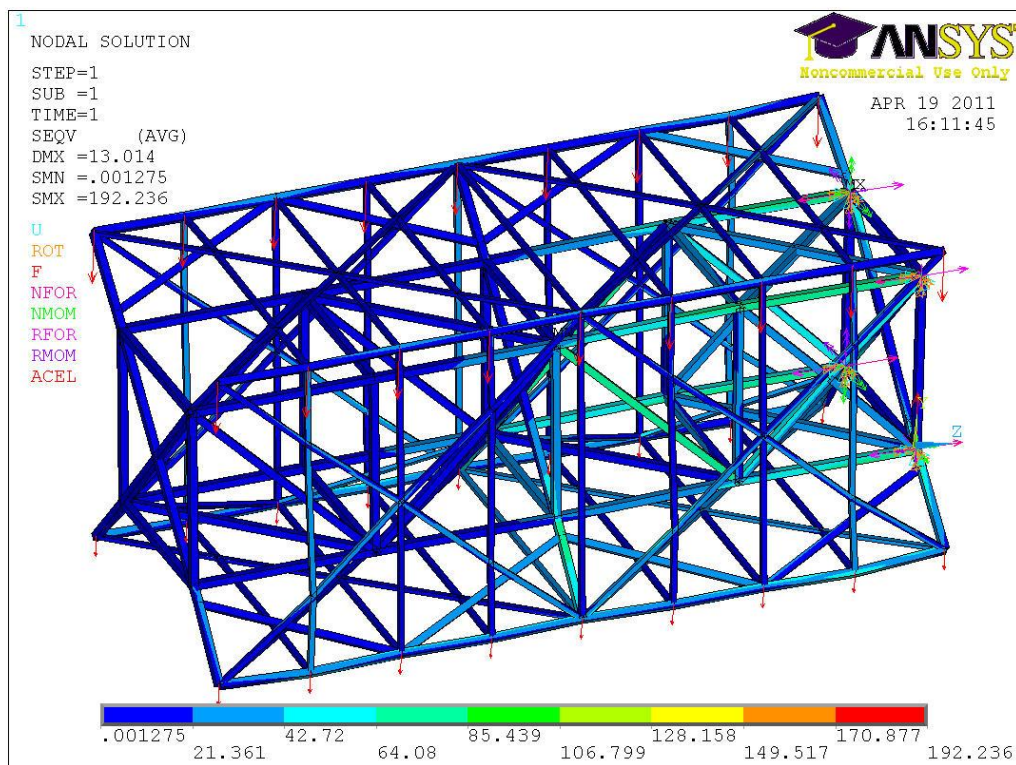


Von Mises

Tapaus 1

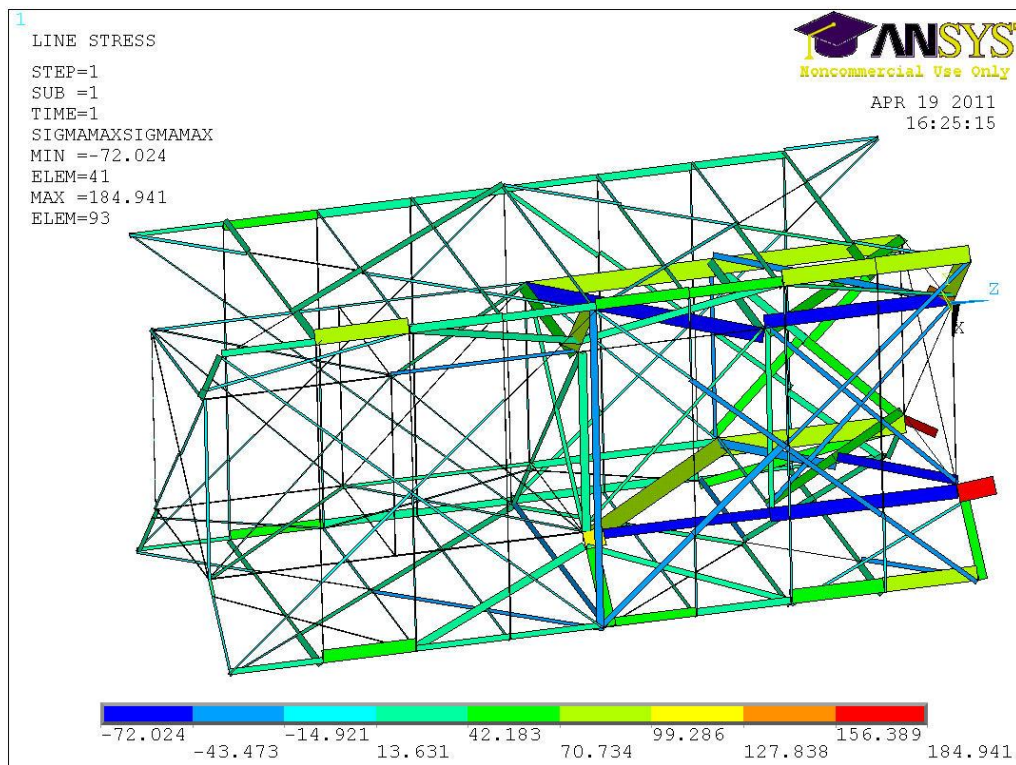


Sigma max

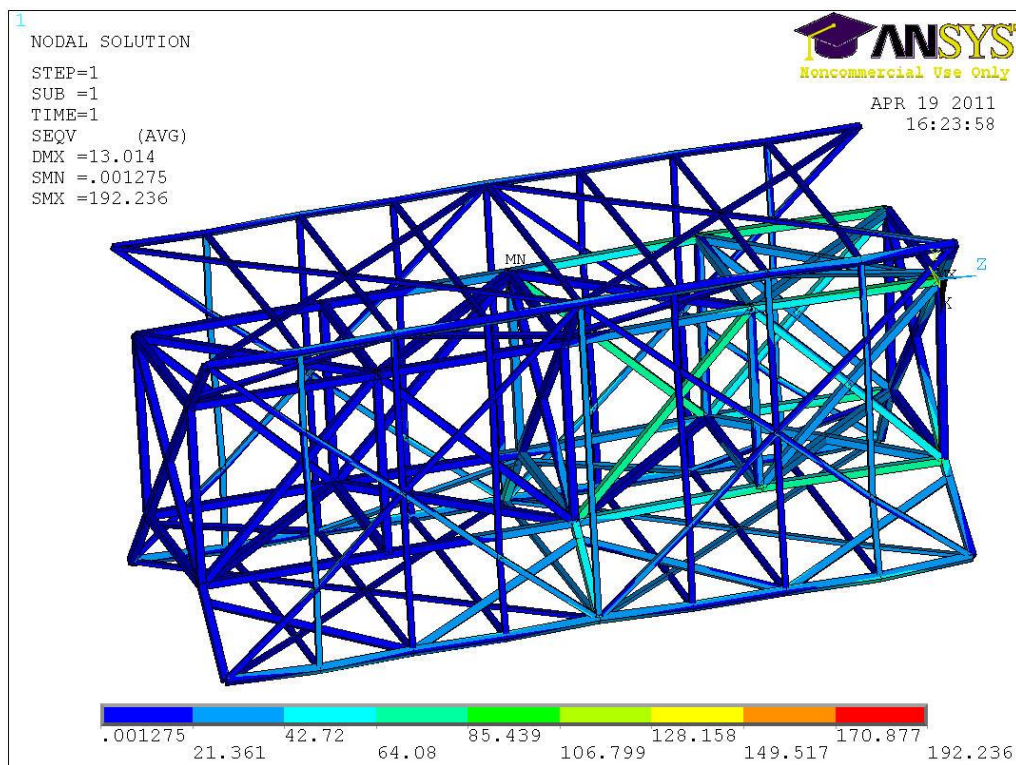


Von Mises

Tapaus 2

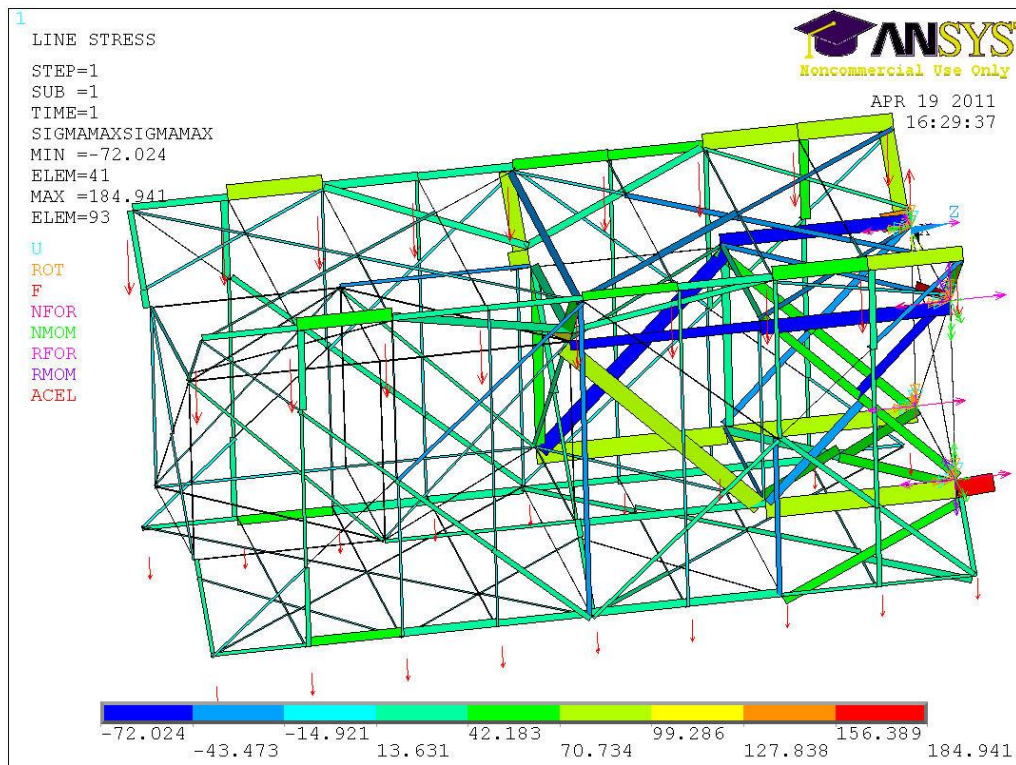


Sigma max

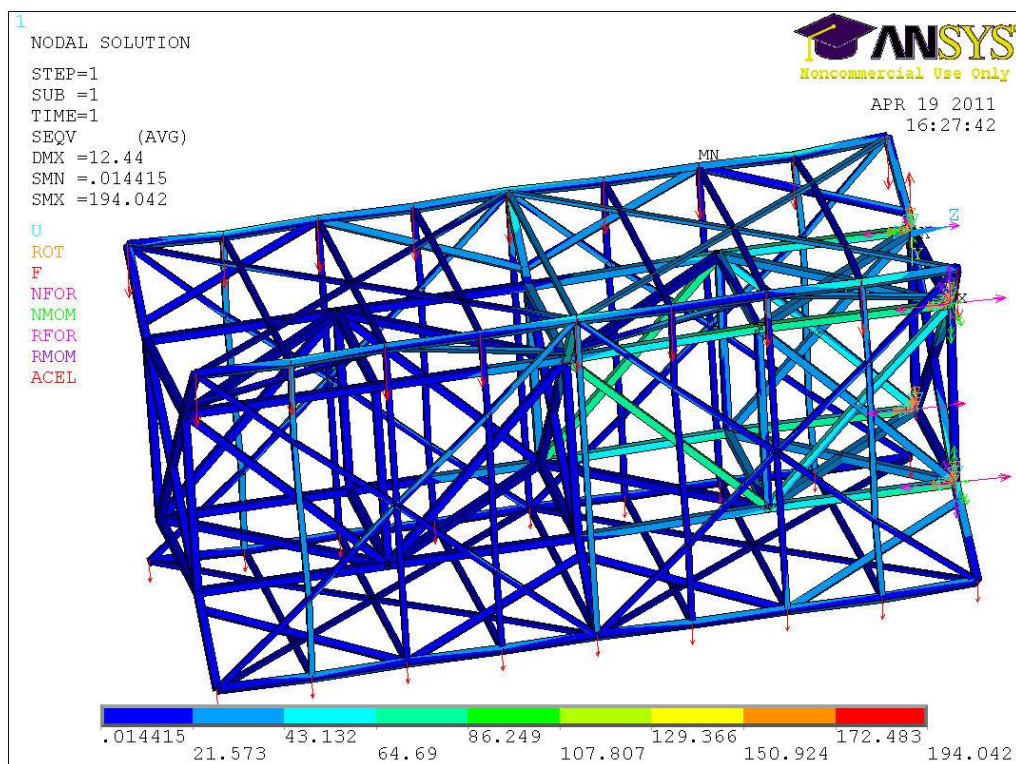


Von Mises

Tapaus 3

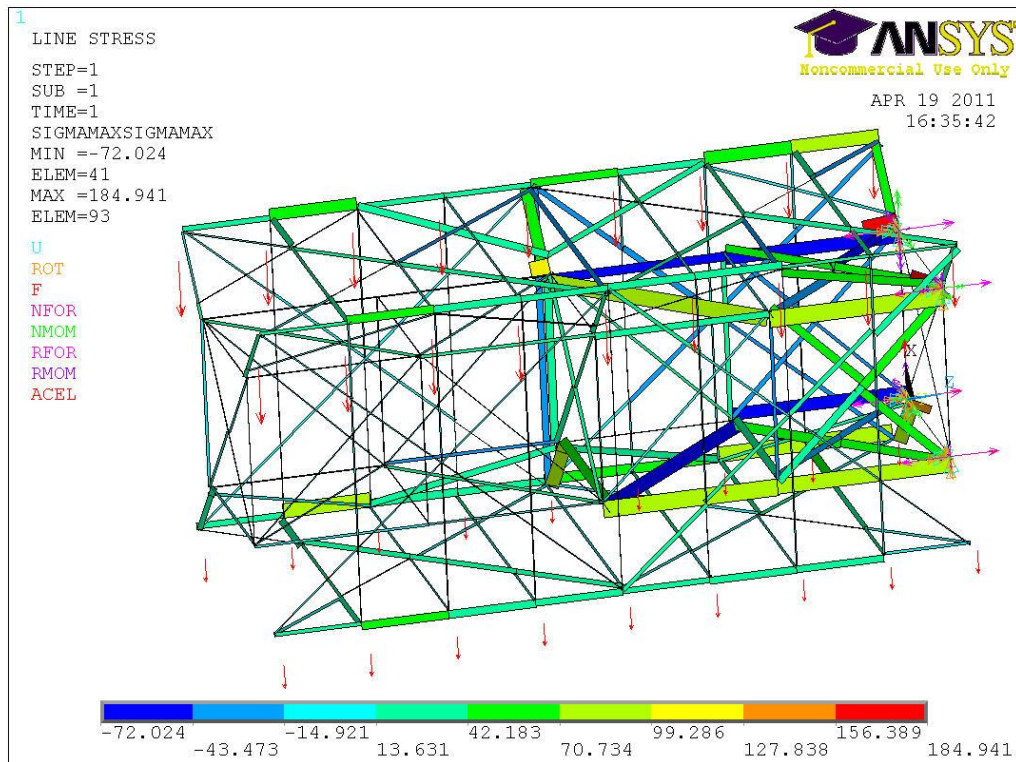


Sigma max

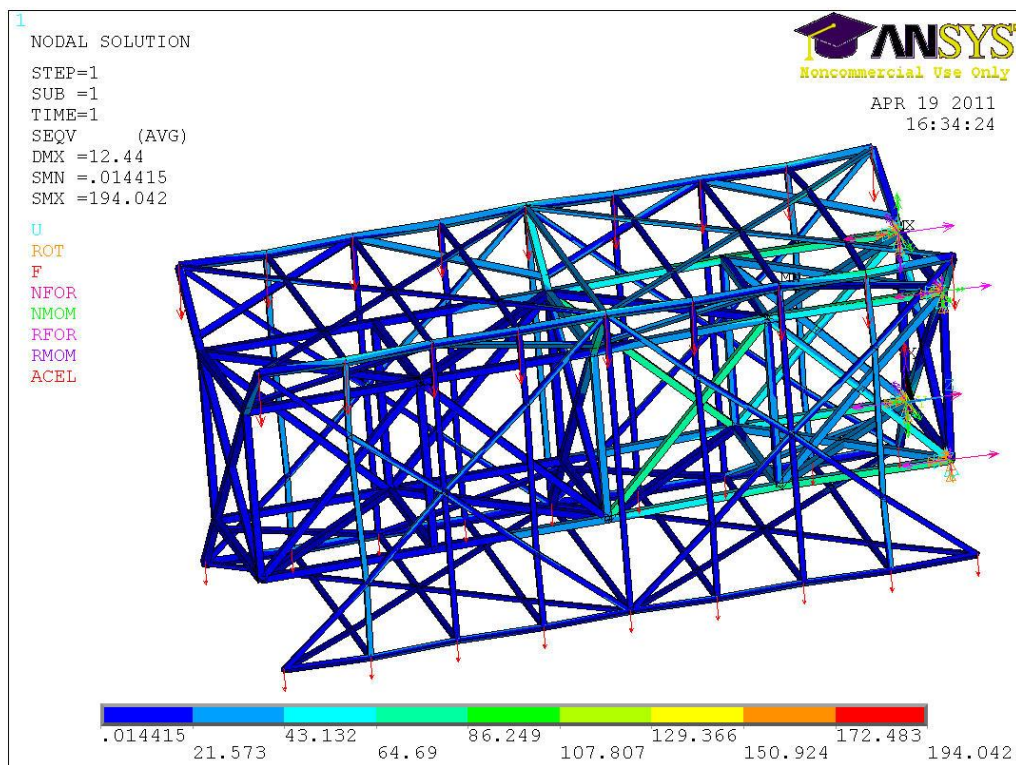


Von Mises

Tapaus 4

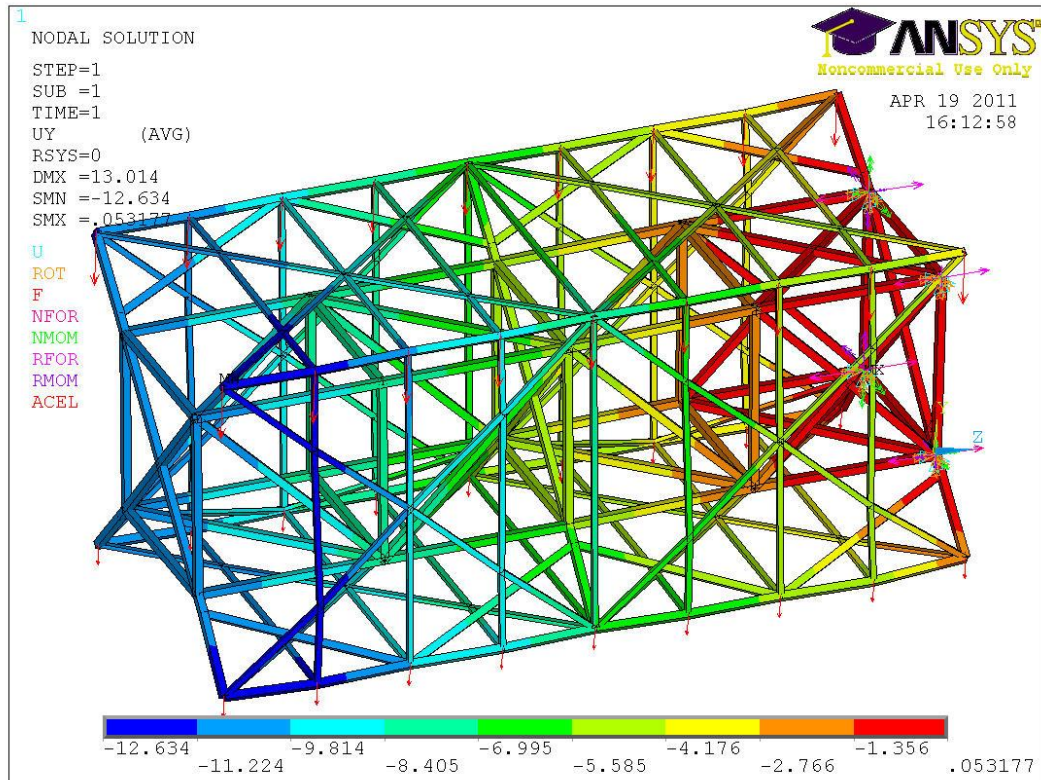


Sigma max



Von Mises

Rakenteen esiintyvät siirtymät



Siirtymät