



COMSOL MULTIPHYSICS -OHJELMAN KÄYTTÖ TALONRAKENNUSTEKNIIKAN LUJUUSLASKENNASSA

Friman Jari

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2012
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonrakennustekniikka
Tampereen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

FRIMAN, JARI:

Cosol Multiphysics -ohjelman käyttö talonrakennustekniikan lujuuslaskennassa

Opinnäytetyö 46 s., liitteet 10 tiedostoa.
Kesäkuu 2012

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Cosol Multiphysics -ohjelmaa käyttäen yksinkertaisia esimerkkejä lujuuslaskennasta ja tutkia ohjelman soveltuvuutta lujuuslaskennan tehtävien havainnollistamiseen. Lisäksi opinnäytetyöhön liitettiin lyhyt uusille käyttäjille suunnattu käyttöohje, joka koostettiin talonrakennustekniikan näkökulmasta tarkasteltuna.

Rakennemallit tehtiin yksinomaan Cosol Multiphysics -ohjelmaa käyttäen. Vaikka ohjelma sisältää useita fysiikkamalleja, käytettiin opinnäytetyössä vain kiinteän mekaniikan fysiikkaa koska se on talonrakennustekniikan näkökulmasta tärkein.

Opinnäytetyön oli oltava ohjemainen ja helposti ymmärrettävissä. Työ ei korvaa ohjekirjaa tai kurssia ohjelman käytöstä, vaan auttaa aloittelijaa lähestymään talonrakennustekniikan ongelmia oikealla tavalla käyttäen Cosol Multiphysics -ohjelmaa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering
Option of Structural Engineering

FRIMAN, JARI:

Using Comsol Multiphysics for tensile strength calculation in structural engineering

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 10 files.

June 2012

The main goal of this bachelor's thesis was to make simple examples of tensile strength calculation using Comsol Multiphysics and study its suitability for demonstrating problems in tensile strength calculation. In addition, a short guide was added which is targeted for new users interested in structural engineering of civil engineering.

The structural models were made exclusively using Comsol Multiphysics. Although the program includes various models of physics, solid mechanics was chosen because it is the most important in structural engineering.

The thesis was to be guide-like and easily understandable. The thesis was not meant to replace the manual or a course in using the program, but help a beginner to approach the problems in structural engineering from the right angle.

Key words: structural designing, tensile strength, Comsol Multiphysics

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 JOHDANTO	5
3 KÄYTTÖOHJE	7
3.1 Lähtötiedot ja parametrit	7
3.2 Työtasot ja mallinnus	11
3.3 Materiaalit ja voimat	16
3.4 Laskenta ja tulokset.....	22
4 ESIMERKIT	31
4.1 Normaalivoima.....	31
4.2 Taivutus.....	34
4.3 Leikkaus	36
4.4 Lävistys	39
4.5 Vääntö	41
5 YHTEENVETO	44
LÄHTEET.....	45
LIITTEET	46

1 JOHDANTO

Työ on tehty Tampereen ammattikorkeakoululle opetuskäyttöön. Työn tavoitteena oli tehdä ohjeet Comsol Multiphysics -ohjelman käytöstä sekä yksinkertaisia esimerkkejä lujuuslaskennan perustapauksista talonrakennustekniikassa.

Mallinnustyö on tehty Comsol Multiphysics -peruskurssin oppeihin perustuen sekä käyttäen ohjekirjaa ja valmistajan keskustelupalstalla esiintyneitä neuvoja.

Valmis työ on kaksiosainen, joista ensimmäinen koostuu raportista, jossa käydään läpi ohjelman käyttöönotto ja tärkeimmät seikat mallinnuksessa talonrakennustekniikan näkökulmasta. Toisessa osassa on esitetty yksinkertaisia lujuuslaskennan esimerkkitehtäviä. Esimerkeissä käytetyt mallit on liitetty mukaan opinnäytetyön sähköiseen versioon.

2 OHJELMAN KÄYTTÖ

Cosol Multiphysics -ohjelmaa käytetään ensisijaisesti pienten rakenneosien mallinnukseen joihin vaikuttaa useita samanaikaisia voimia. Ohjelma mahdollistaa eri fysiikkamallien yhdistämisen ja yhteisvaikutuksien laskemisen. Cosol Multiphysics -ohjelmaa ei ole tarkoitettu arkkitehtisuunnitelmien tekoon eikä sillä ole tarkoitus millään tavalla arvioida rakennetta kokonaisuutena. Ohjelmaan mallinnetaan vain osat, jotka on tarkoitus laskea. Vaikuttavat voimat, kuormat ja tuet lisätään näkymättöminä voimina mallinnuksen yhteydessä.

Ohjelman mallinnustyökalu on nopeasti omaksuttavissa jos AutoCAD-piirrustusten teko on ennestään tuttua. Piirtäminen ei kuitenkaan ole yhtä sujuvaa kuin erikseen piirrustusten tekemiseen tarkoitetuilla ohjelmilla. Siksi on suositeltavaa piirtää suunnitelma AutoCAD-piirrustuksena ja tuoda se ohjelmaan käyttäen Cosol Multiphysics CAD Import -moduulia. Tätä ohjetta tehtäessä CAD Import -moduuli ei ollut käytettävissä.

Mallinnus on syytä tehdä huolellisesti järjestyksessä. Virhe lähtötiedoissa, erityisesti kappaleen osien sijainnissa suhteessa toisiinsa, tai mallinnuksen alkuvaiheessa teettää paljon ylimääräistä työtä myöhemmin. Ohjelma käsittelee kappaleita pikemminkin graafisina muotoina kuin yhtenä kokonaisuutena. Tämä lähestymistapa vähentää virheiden mahdollisuutta, mutta teettää paljon ylimääräistä työtä jos malliin pitää tehdä pieniäkin muutoksia jälkeenpäin.

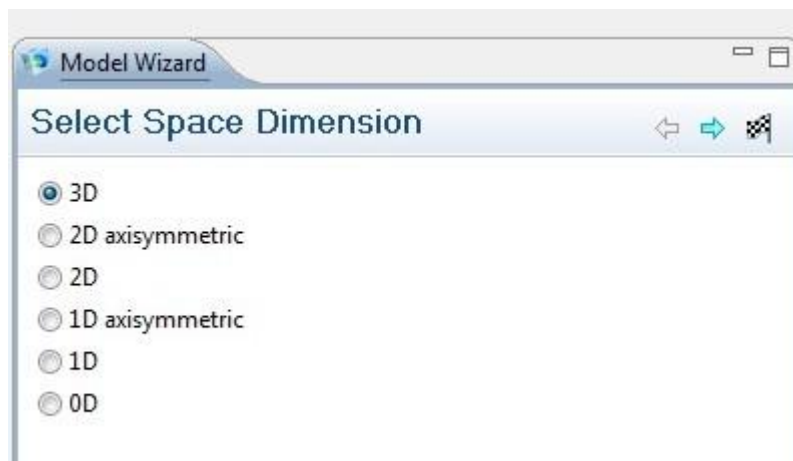
Talonrakennustekniikan näkökulmasta ohjelma on varsin kahtiajakoinen. Kiinteiden aineiden mekaniikkaa käyttämällä saadaan näyttävämpiä malleja, jotka ovat helpommin ymmärrettävissä, mutta mallin analysointi perustuu lähinnä vain von Mises -rasitustestiin, joka laskee automaattisesti voimien yhteisvaikutuksen.

Toisena vaihtoehtona on käyttää palkkien mekaniikkaa, joka antaa huomattavasti enemmän yksityiskohtaista tietoa malliin kohdittuvista voimista, mutta jokainen palkki käsitellään kaksiulotteisena jolloin malli ei ulkonäöltään ole yhtä realistinen ja siten vaikeampi käyttää esimerkkinä.

3 KÄYTTÖOHJE

3.1 Lähtötiedot ja parametrit

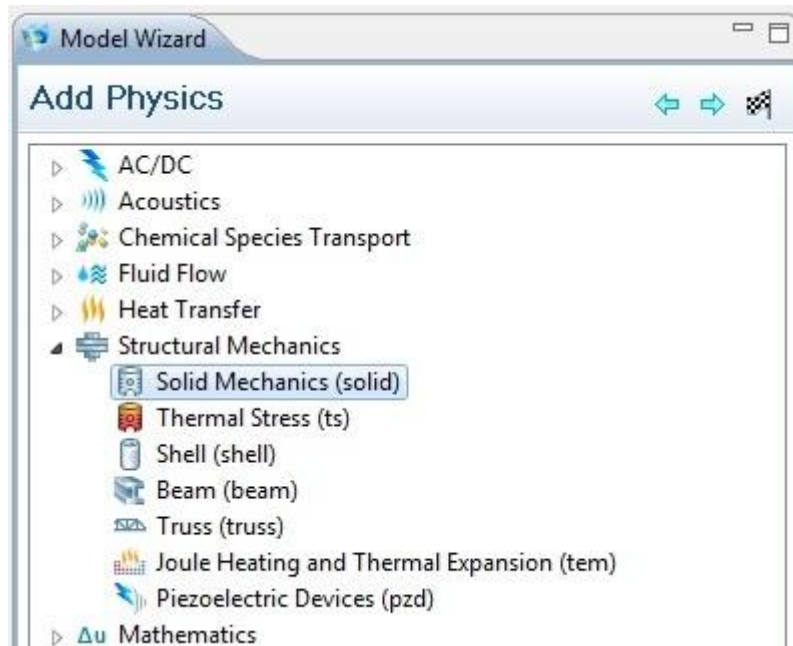
Työ aloitetaan valitsemalla kaksi- tai kolmiulotteinen mallinnus. Ohjeessa käytetään kolmiulotteista mallia, koska suurimmat erot muihin ohjelmiin verrattuna tulevat esiin piirtotyökaluissa kolmiulotteisia kappaleita käsiteltäessä (kuva 1).



KUVA 1. Ulottuvuuksien valinta.

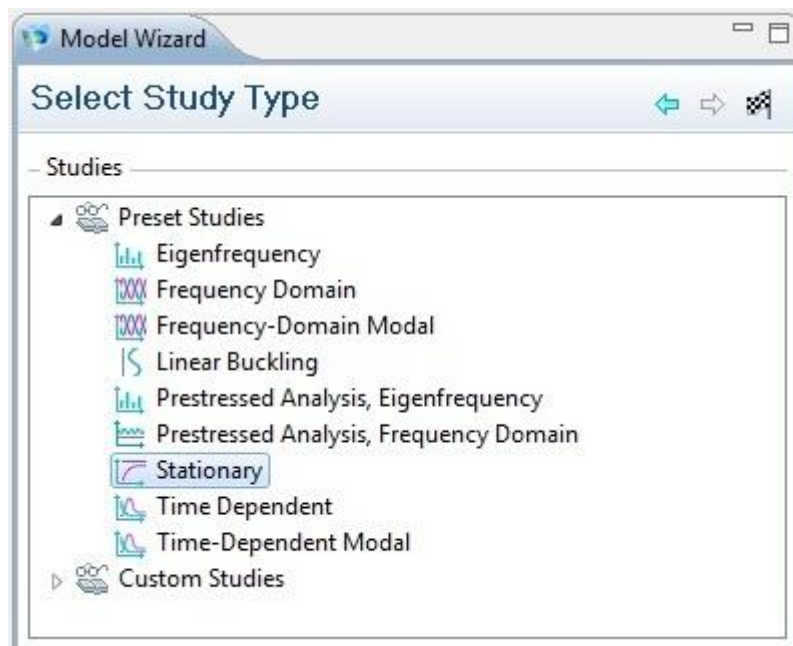
Fysiikaksi valitaan "Solid mechanics" eli kiinteiden aineiden mekaniikka. Muita rakennustekniikassa hyödyllisiä fysiikkamalleja ovat "Beam" eli palkit, "Truss" eli ristikot ja joissain erikoistapauksissa "Heat transfer" eli lämmön siirtyminen, jos lämmön vaikutusta rakenteessa tarvitsee tarkastella (kuva 2).

Paremmat tulokset esimerkkimallista saisi käyttämällä palkkien mekaniikkaa, mutta koska ohje käsittelee ensisijaisesti mallinnusta ja kiinteiden aineiden kolmiulotteinen mallinnus on huomattavasti palkkien mallinnusta vaikeampaa, käytetään ohjeessa kiinteiden aineiden mekaniikkaa.



KUVA 2. Fysiikkamallin valinta.

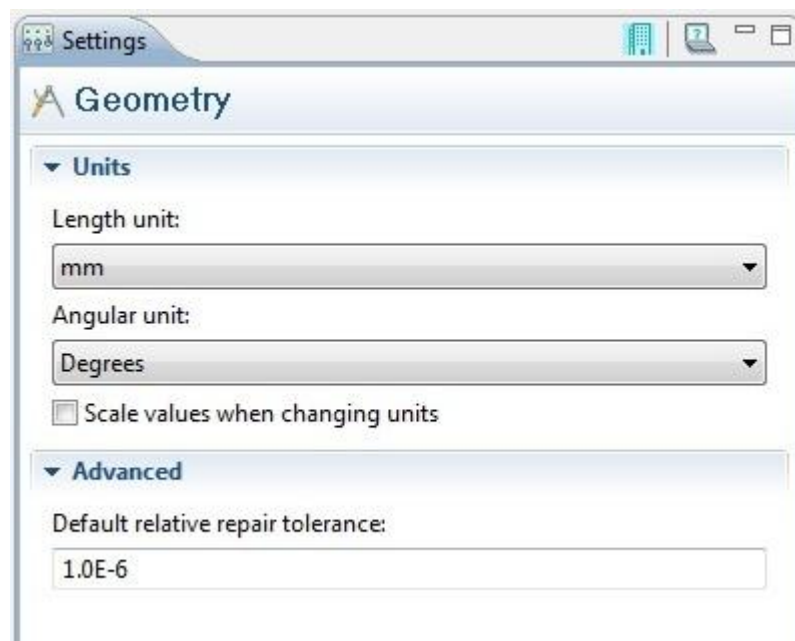
Kolmanneksi valitaan tutkimustapa. Yksinkertaisissa lujuuslaskennan ongelmissa, joissa ratkaistaan kuormia riittää kun valitaan "Stationary". Monimutkaisemmat tarkastelutavat ovat mahdollisia ja niitä voidaan lisätä vielä tarvittaessa kun malli on valmis (kuva 3).



KUVA 3. Tutkimustavan valinta.

Päänäkymä jakautuu kahteen osaan, jossa oikealla on graafinen ikkuna ja vasemmalla mallin rakennuspuu, "Model builder". Painamalla rakennuspuun otsikoita oikealla hiiren painikkeella saa esiin keskeisimmät työkalut. Mallin rakentaminen kannattaa käydä läpi järjestyksessä ylhäältä alas.

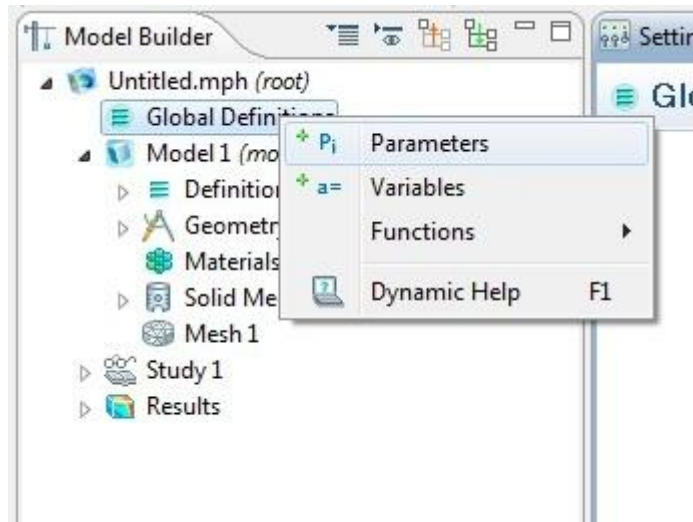
Ensin muutetaan geometriassa käytettävä mittayksikkö mallin kannalta järkeväksi (kuva 4).



KUVA 4. Geometriset asetukset.

Kaikki työhön liittyvät vakiot kannattaa heti aluksi lisätä parametreihin ja nimetä ne tunnuksin, jotta niiden hyödyntäminen työn aikana on helpompaa ja arvojen vaihtaminen yksinkertaisempaa.

Painetaan oikealla hiiren painikkeella "Global definitions" ja valitaan "Parameters" (kuva 5).



KUVA 5. Parametrien valinta.

Parametrit lisätään antamalla jokaiselle parametrille tunnus, arvo, yksikkö ja kuvaus (kuva 6).

 A screenshot of the 'Settings' dialog box for 'Parameters'. It shows a table with columns for Name, Expression, Value, and Description. The table contains five rows of parameter definitions.

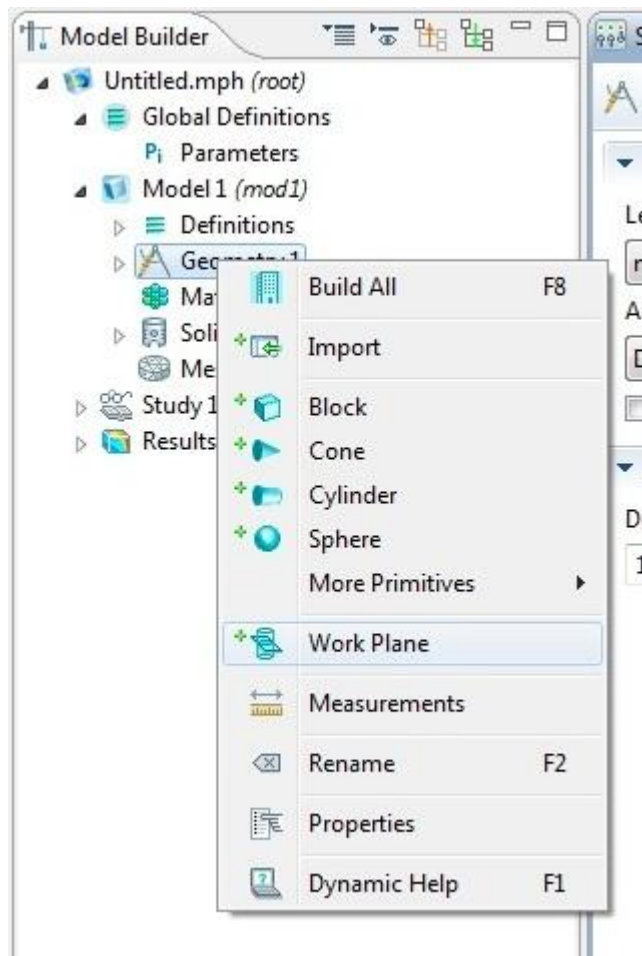
Name	Expression	Value	Description
L1	6000[mm]	6 m	Palkin pituus
L2	50[mm]	0.05 m	Tuen pituus
W	50[mm]	0.05 m	Palkin leveys
H	150[mm]	0.15 m	Palkin korkeus
P1	5000[N]	5000 N	Pistekuorma 1
F1	10000[N]	10000.0 N	Pintakuorma 1

KUVA 6. Parametrien lisäys.

Yleisesti arvojen vaihtaminen kaikissa ikkunoissa tapahtuu kirjoittamalla lukuarvo uudelleen ja painamalla sen jälkeen "Build" tai "Build all" -ikonia. Myös grafiikoita voidaan piirtää antamalla niille ensin koko ja koordinaatit ja sitten hyväksymällä asetukset painamalla edellämainittuja ikoneita. Palaaminen aikaisempaan työvaiheeseen erityisesti piirtäessä voi mitätöidä myöhempiä työvaiheita jolloin ne täytyy käydä hyväksymässä uudelleen painamalla kyseisiä ikoneita.

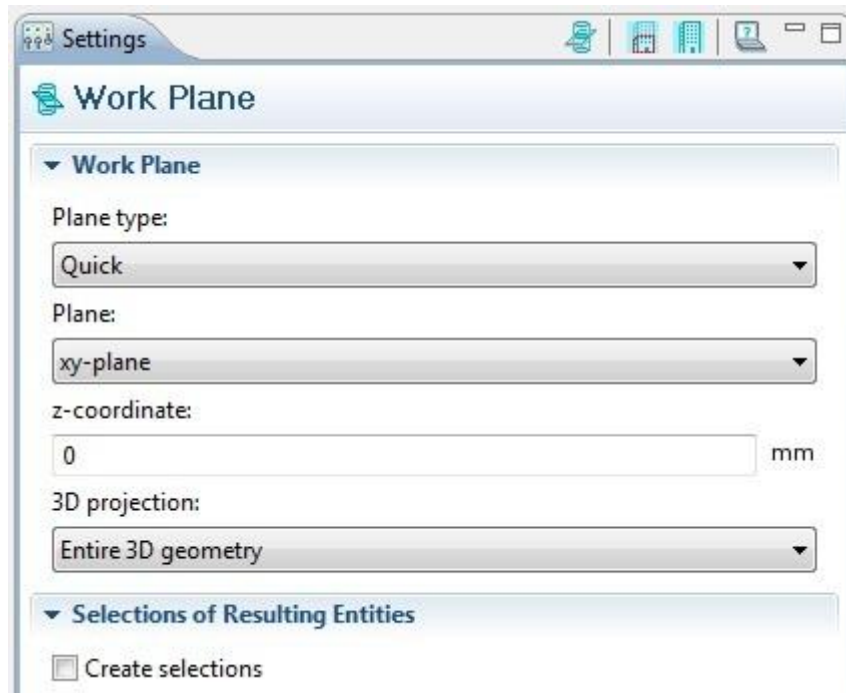
3.2 Työtasot ja mallinnus

Jokainen kappale perustuu tiettyyn kaksiulotteiseen työtasoon. Myös kolmiulotteisille kappaleille luodaan ensin kaksiulotteinen siluetti, joka sitten venytetään kolmanteen ulottuvuuteen. Painetaan oikealla hiiren painikkeella "Geometry" ja lisätään työtaso valitsemalla "Add workplane" (kuva 7). Graafinen ikkuna vaihtuu automaattisesti kaksiulotteiseen näkymään. Tyypilliset piirtotyökalut löytyvät ikkunan yläpalkista.



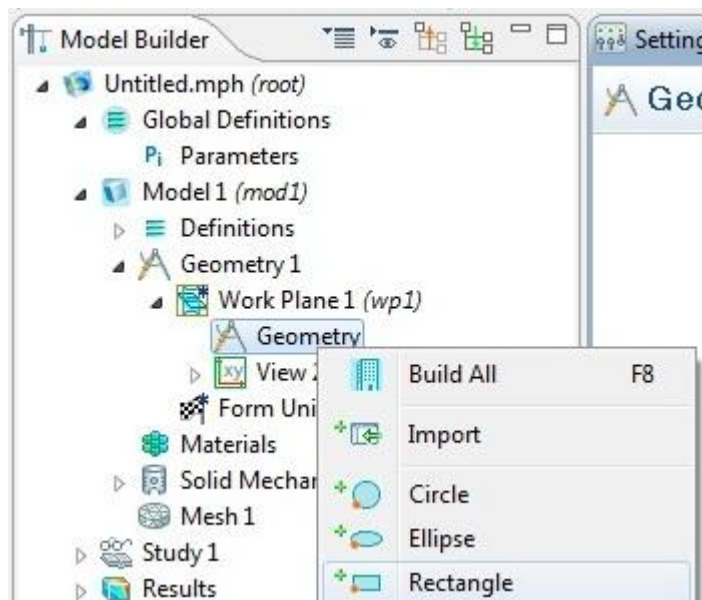
KUVA 7. Työtason lisääminen.

Työtasolle valitaan suunta globaalien akseleiden suhteen. Lisäksi voidaan muuttaa työtason korkoa suhteessa jo piirrettyihin mallin osiin (kuva 8).



KUVA 8. Työtason asetukset.

Lisätään työtasoon suorakaide palkkia varten (kuva 9) ja annetaan nelikulmiolle parametreista mitat (kuva 10).

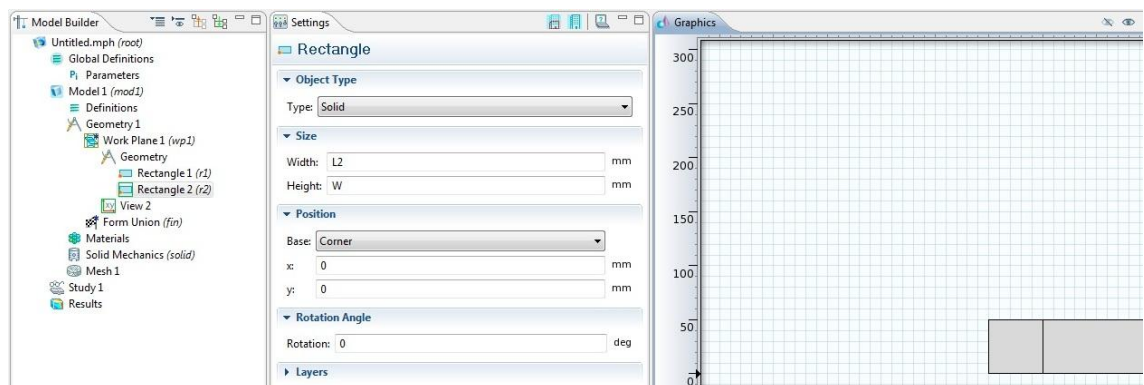


KUVA 9. Suorakaiteen lisääminen.

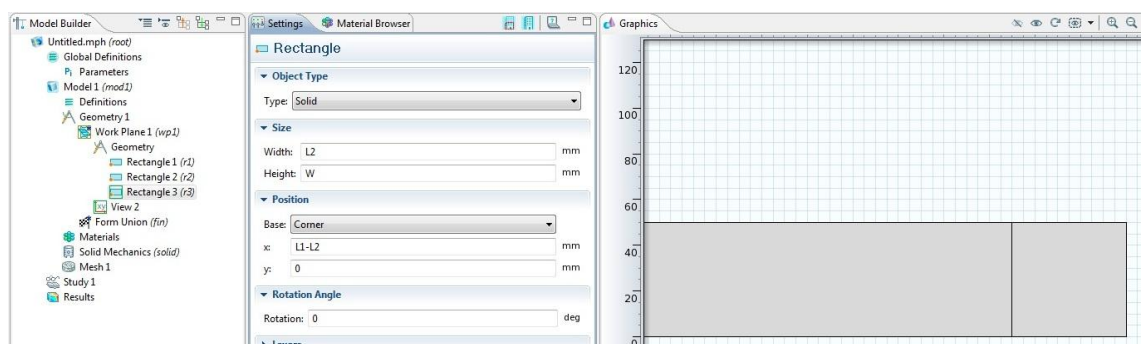


KUVA 10. Suorakaiteen mittojen lisääminen.

Lisätään toinen ja kolmas suorakaide palkin tukia varten (kuvat 11 ja 12). Jälkimmäisen tuen koordinaateissa viitataan jälleen parametreihin jotta tuki pysyy oikealla paikallaan vaikka palkin mittoja muutettaisiin.

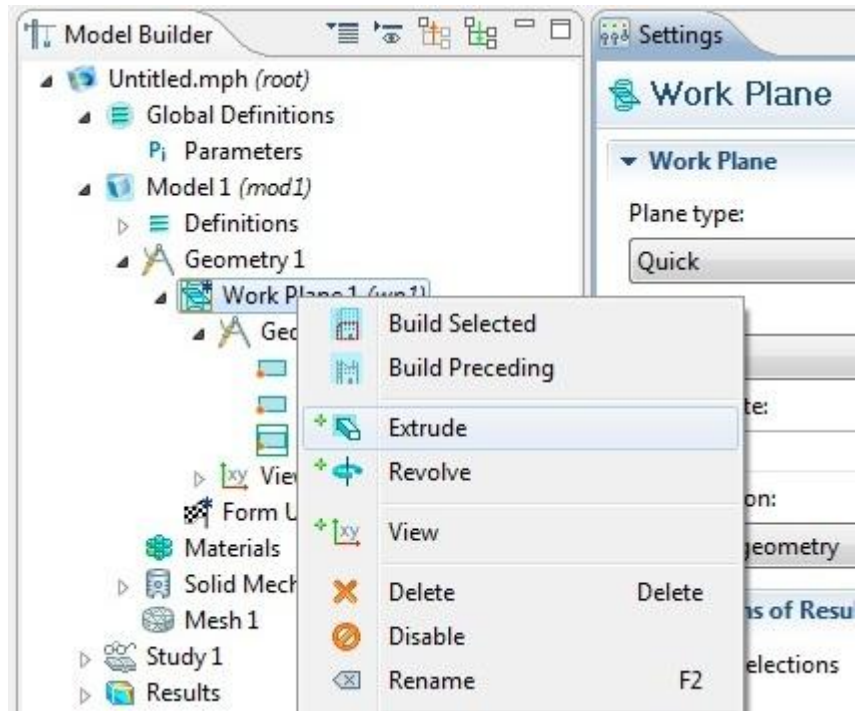


KUVA 11. Ensimmäisen tuen lisääminen.



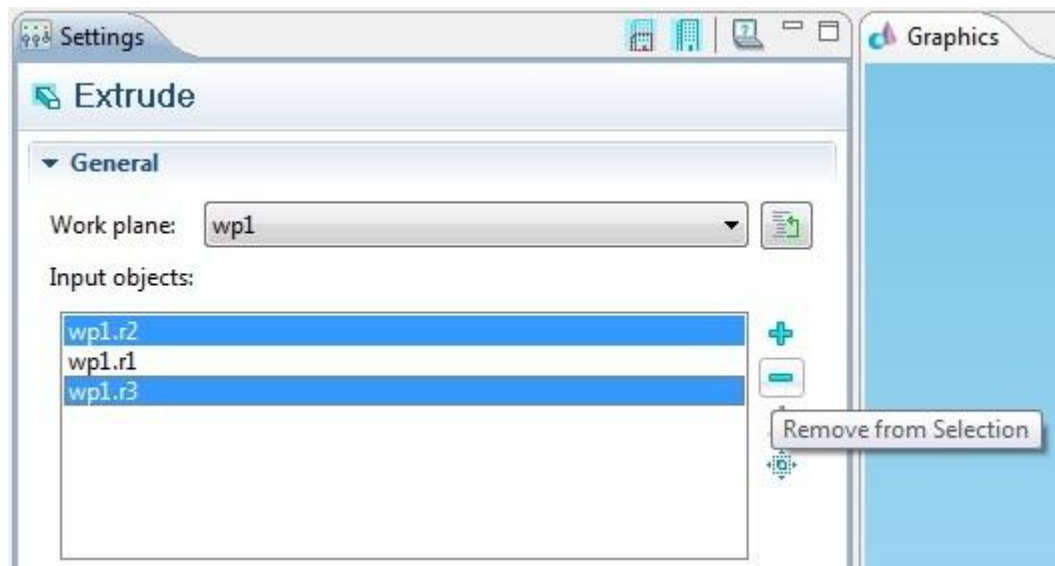
KUVA 12. Toisen tuen lisääminen.

Kun siluetti on piirretty, voidaan koko työtaso tai osia siitä pursottaa kolmanteen ulottuvuuteen valitsemalla "Extrude" (kuva 13).



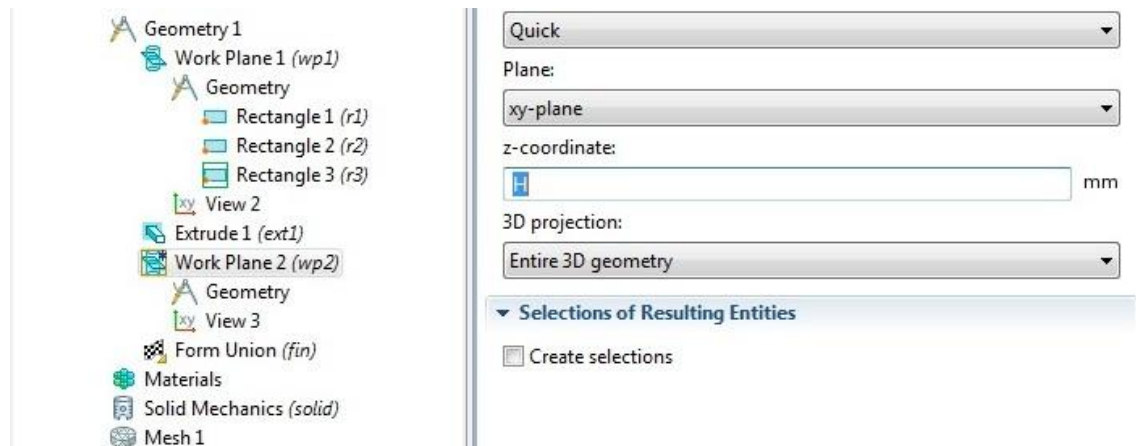
KUVA 13. Pursotustyökalun sijainti.

Koska tukien kestävyyttä ei tutkita, ne eivät ole mallissa kolmiulotteisia kappaleita vaan kaksiulotteisia tukipintoja. Poistetaan tuet pursotuksesta ja pursotetaan vain palkki (kuva 14).



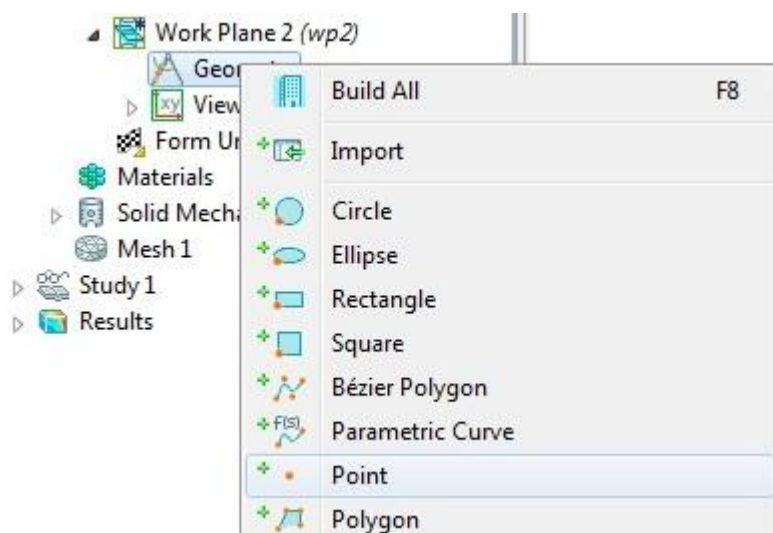
KUVA 14. Tukien poistaminen pursotuksesta.

Työtasoja pitää tehdä riittävä määrä, jotta kolmiulotteisen rakenteen mallinnus on mahdollista. Erisuuntaiset osat vaativat oman työtasonsa. Samoin samansuuntaiset osat, jos ne perustuvat eri korkotasolle. Tehdään toinen työtaso palkin yläpinnan tasolle pistekuormaa varten (kuva 15).



KUVA 15. Toisen työtason lisääminen palkin yläpinnan tasolle.

Lisätään toiselle työtasolle piste pistekuormaa varten (kuva 16). Pisteen koordinaateissa voidaan jälleen viitata parametreihin jos halutaan että piste pysyy suhteessa palkin kokoon samalla paikalla vaikka mittoja muutettaisiin (kuva 17).

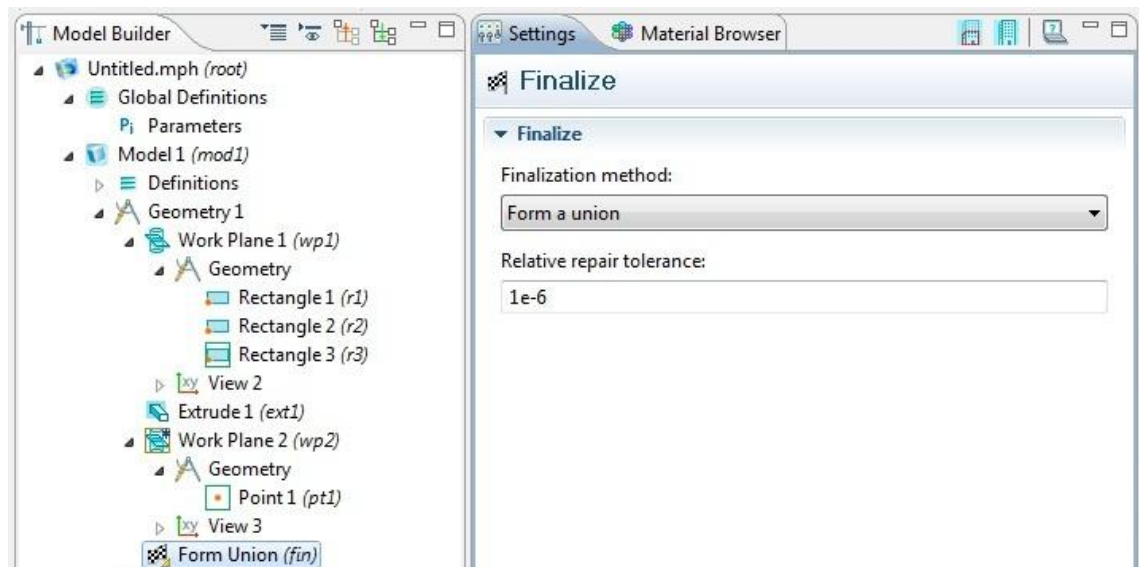


KUVA 16. Pisteen lisääminen.



KUVA 17. Pisteen koordinaatit.

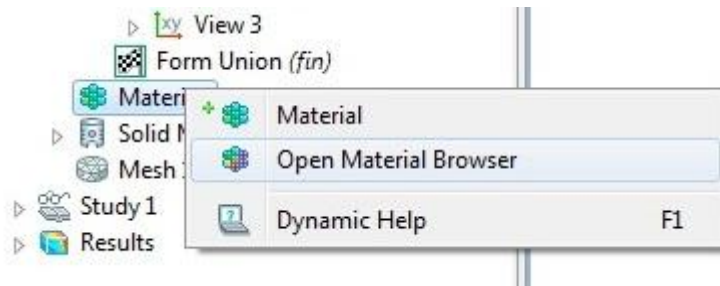
Jos geometriaa muutetaan jälkeinpäin, on aina syytä käydä painamassa "Finalize"-välilehden "Build"-ikonkia. Tällöin ohjelma käy geometrian läpi ja tehdyt muutokset viimeistään astuvat voimaan (kuva 18).



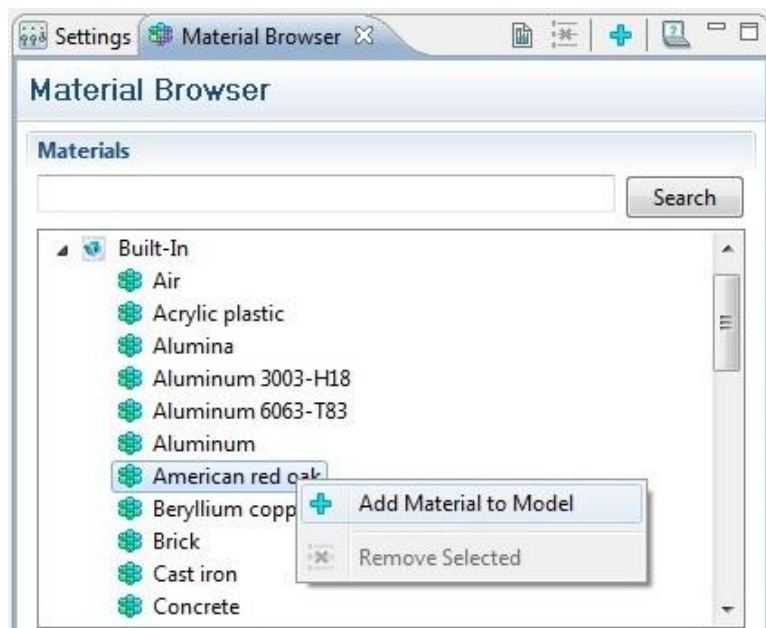
KUVA 18. Geometrian viimeistely.

3.3 Materiaalit ja voimat

Materiaalikirjasto pitää oletuksena sisällään muutamia perusmateriaaleja. Painetaan hiiren oikealla painikkeella "Materials" ja valitaan "Open material browser" (kuva 19). Valitaan luettelosta haluttu materiaali, painetaan sitä hiiren oikealla painikkeella ja valitaan "Add material to model" (kuva 20). Ensimmäinen materiaali lisätään automaattisesti kaikkiin kappaleisiin joilla ei vielä ole materiaalimäärittystä.



KUVA 19. Materiaaliluettelon avaaminen.



KUVA 20. Materiaalin valinta.

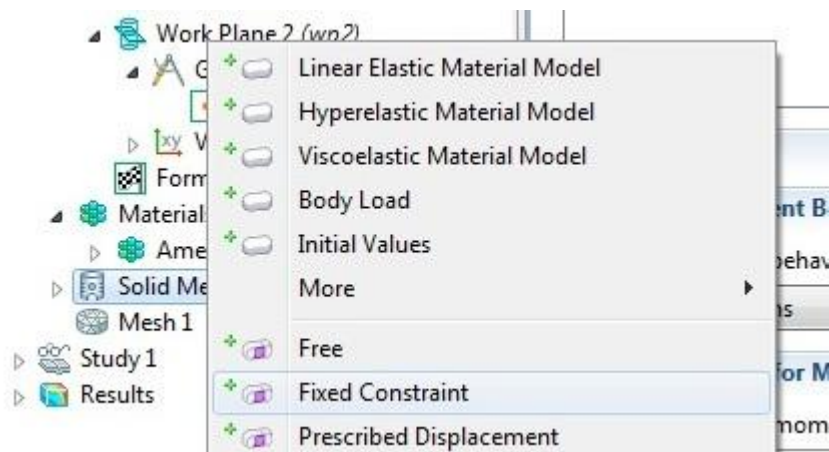
Jos haluttua materiaalia ei löydy, kannattaa luettelosta valita materiaali joka on ominaisuuksiltaan kaikista lähimpänä haluttua materiaalia. Materiaalin ominaisuuksia voidaan haluttaessa muuttaa Suomen standardeihin sopiviksi (kuva 21).

Material Contents				
Property	Name	Value	Unit	
✓ Density	rho	550[kg/m ³]	kg/...	
✓ Young's modulus	E	6.5e9[Pa]	Pa	
✓ Poisson's ratio	nu	0.3	1	
Relative permeability	mur	1	1	
Electrical conductivity	sigma	2.857e-18[S...]	S/m	
Coefficient of thermal ex...	alpha	4.9e-6[1/K]	1/K	
Relative permittivity	epsil...	2	1	

KUVA 21. Materiaalin ominaisuuksien muuttaminen.

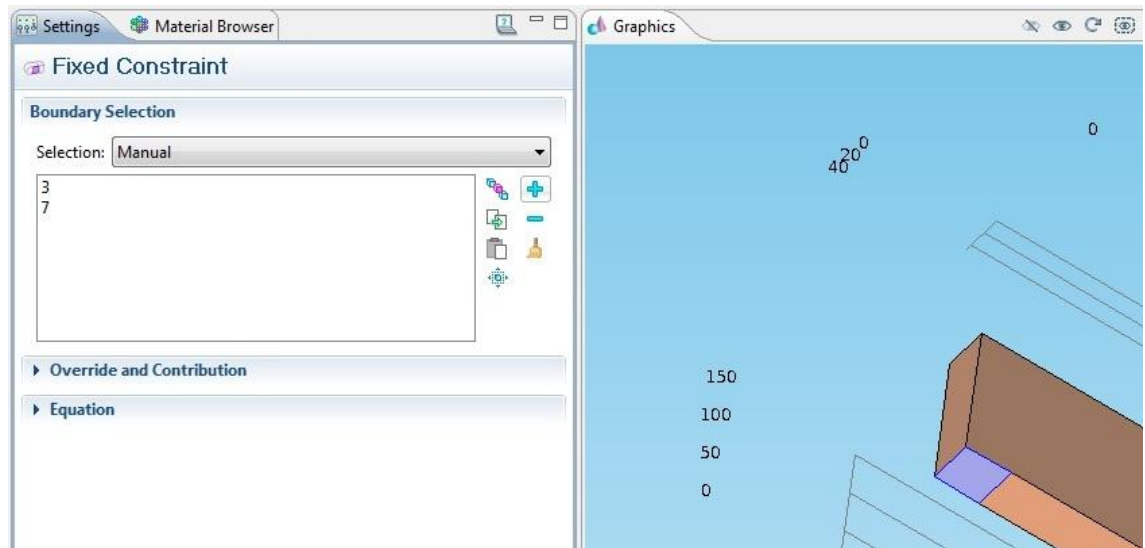
Valitsemalla materiaali rakennuspuusta nähdään luettelo kaikista kappaleista, joita kyseinen materiaali koskee. Luetteloon voi lisätä ja luettelosta voi poistaa kappaleita yksittäin.

Kun materiaalit on valittu, voidaan rakenteeseen lisätä ulkoiset voimat. Otsikon "Solid mechanics" alla on alaotsikoita, jotka kertovat rakenteeseen tehdyistä perusoletuksista. Jotta voimia voidaan lisätä, painetaan "Solid mechanics" otsikkoa oikealla hiiren painikkeella niin saadaan luettelo voimista. Voimia voi lisätä pinnoille, reunoille, pisteisiin ja myös koko kappaleeseen. Kuormiin perustuvaan ongelmaan ei löydy ratkaisua jos rakennetta ei tueta. "Fixed constraint" on jäykkä tuki joka ei salli liikettä mikään akselin suhteen (kuva 22).

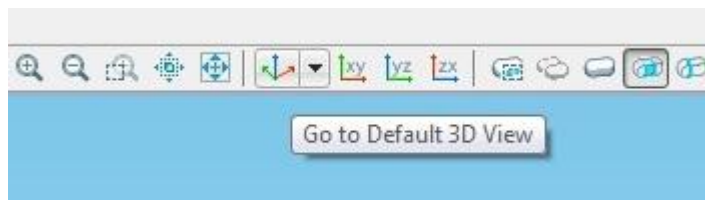


KUVA 22. Jäykän tuen lisääminen.

Lisätään jäykkä tuki koskemaan piirrettyjä tukipintoja (kuva 23). Kappaletta voi joutua pyörittämään, jotta tukipinnat saadaan näkyviin. Takaisin oletusnäkömään voi palata yläpalkin ikoneista (kuva 24).

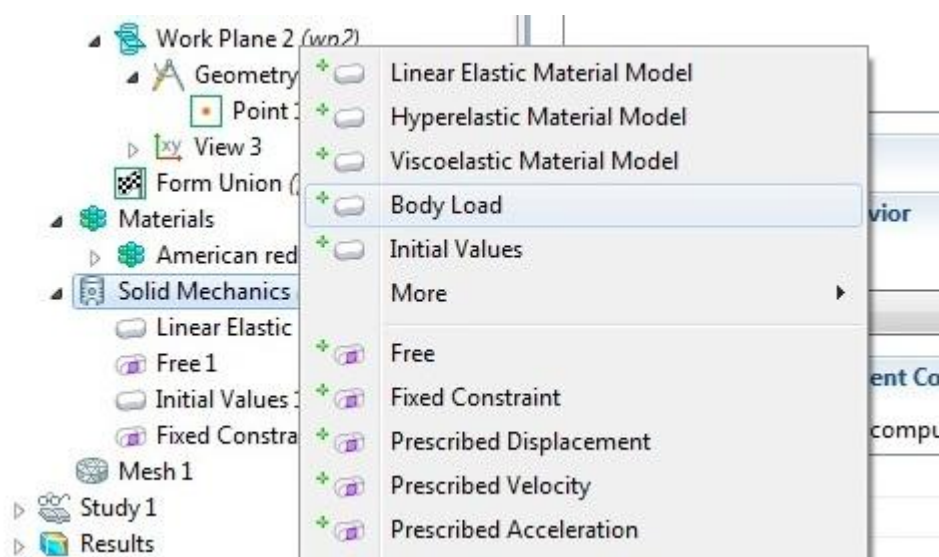


KUVA 23. Tukipintojen lisääminen.

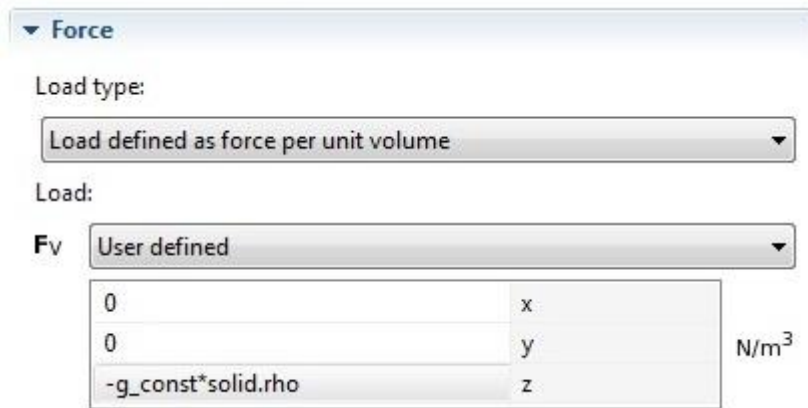


KUVA 24. Paluu oletusnäkömään.

Lisätään kappaleeseen omapaino ja asetetaan sen arvoksi gravitaatiovakio kertaa materiaalin tiheys (kuvat 25 ja 26).

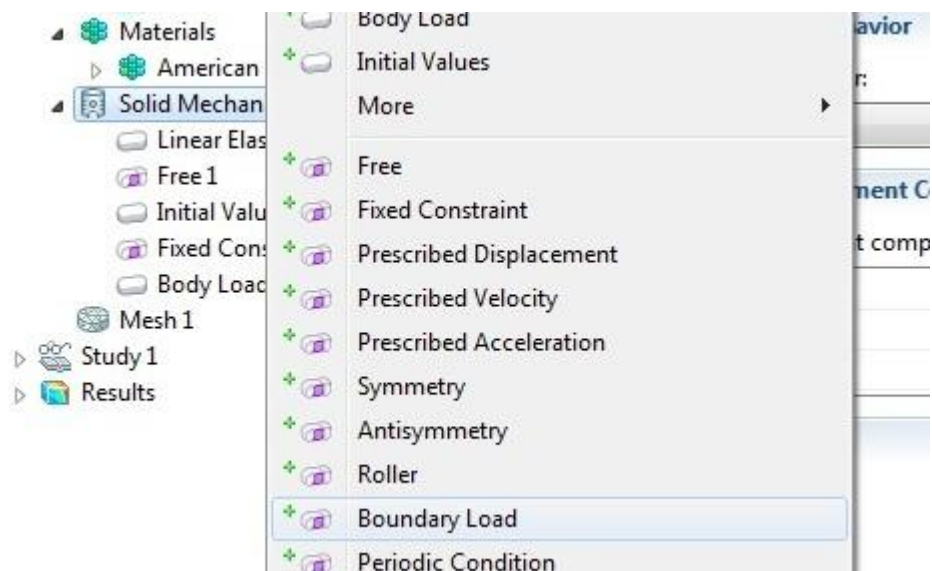


KUVA 25. Omapainon lisääminen.

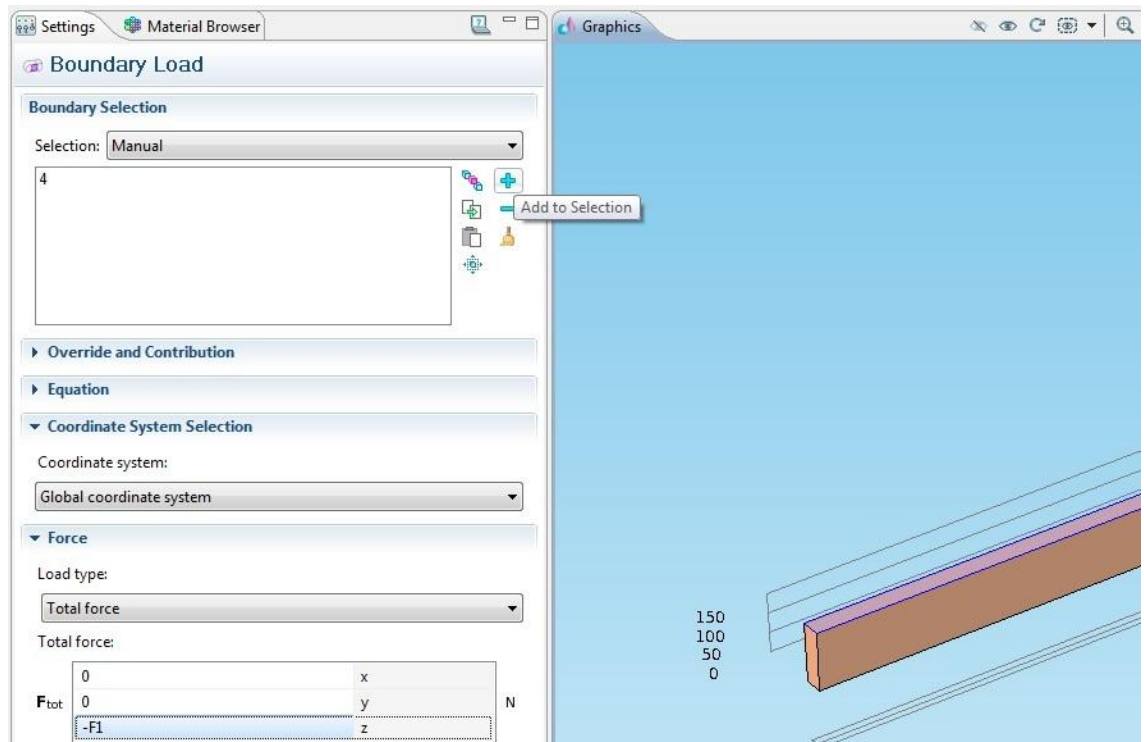


KUVA 26. Omapainon arvon määrittäminen.

Lisätään kappaleeseen tasainen kuorma ja osoitetaan se koskemaan kappaleen yläpintaa (kuvat 27 ja 28).

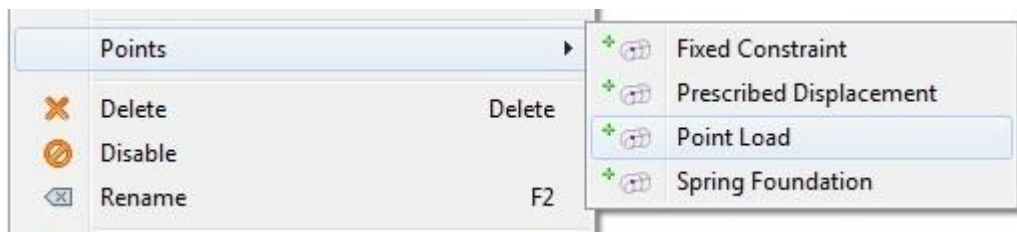


KUVA 27. Tasaisen kuorman lisääminen.

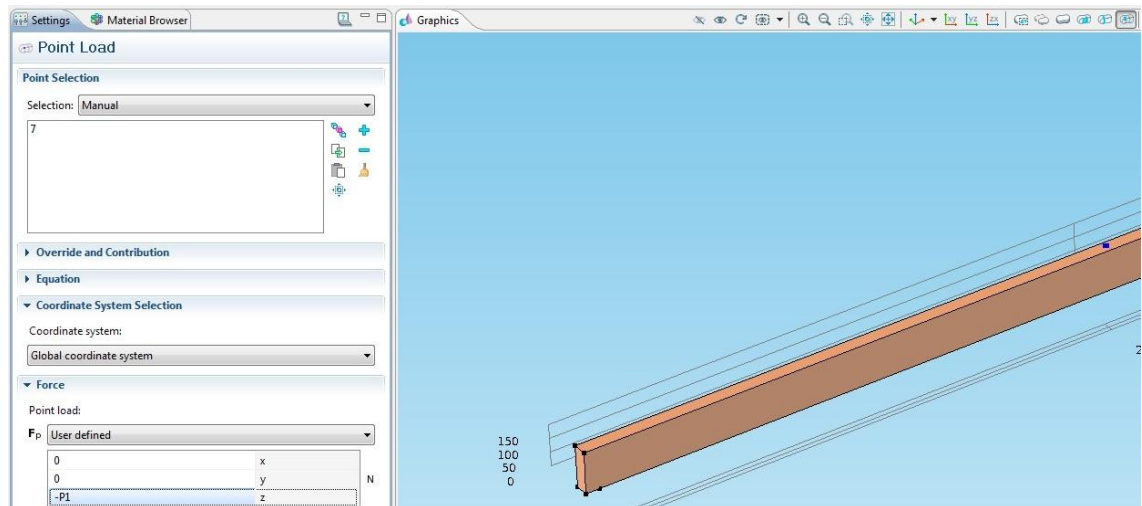


KUVA 28. Tasaisen kuorman osoittaminen palkin yläpintaan.

Lisätään vielä pistekuorma ja osoitetaan se toiselle työtasolle piirrettyyn pisteeseen palkin yläpinnalle (kuvat 29 ja 30).



KUVA 29. Pistekuorman lisääminen.



KUVA 30. Pistekuorman osoittaminen haluttuun pisteeseen.

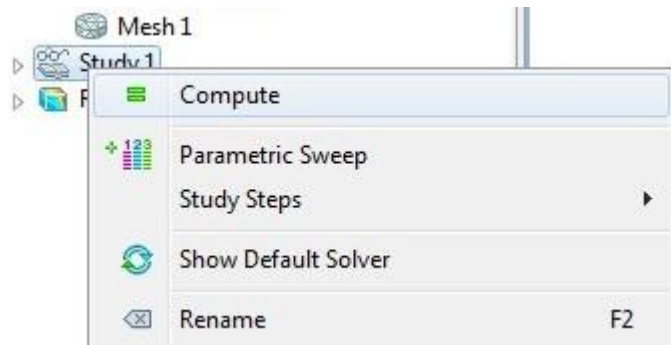
3.4 Laskenta ja tulokset

Ennen laskentaa malliin lisätään mallinnusverkko jonka tiheys määrittää laskennan tarkkuuden suhteessa kappaleen kokoon (kuva 31). Isoille ja yksinkertaisille osille riittää karkea verkko kun taas pienille ja yksityiskohtaisille osille tulee laittaa tiheämpi verkko. Verkon suuruudella on suuri merkitys laskutoimituksen pituuteen. Aluksi onkin syytä käyttää karkeampaa verkkoa, ja kun mallin toiminnasta on päästy varmuuteen, voidaan verkkoa tarvittaessa tihentää.



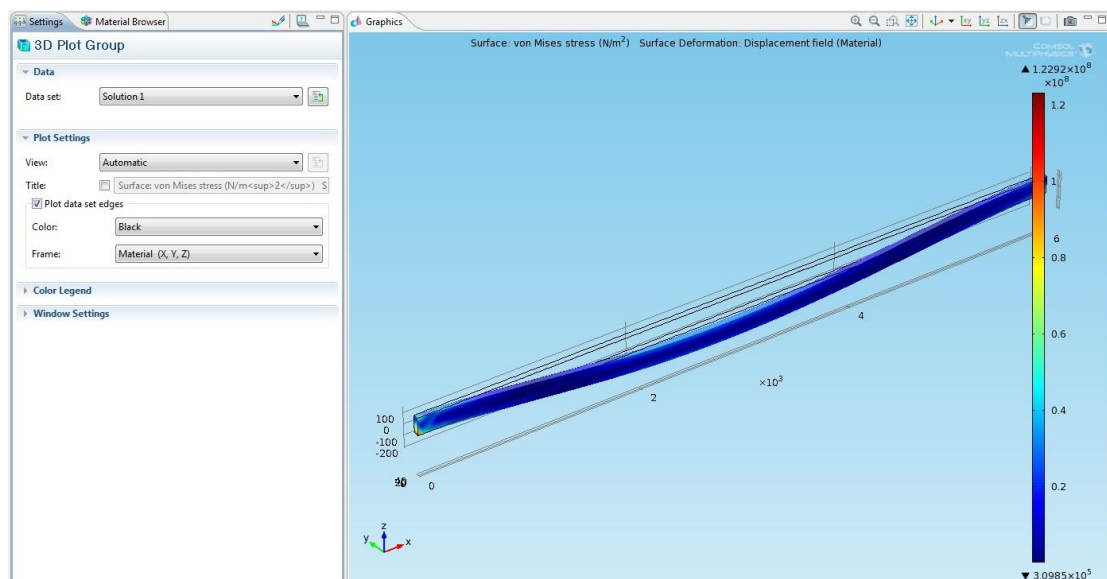
KUVA 31. Mallinnusverkon asetukset.

Kun malli on valmis, voidaan ongelma ratkaista. Oletuslaskut suoritetaan painamalla hiiren oikealla painikkeella "Study" ja valitsemalla "Compute" (kuva 32). Ohjelma suorittaa laskuiteraatioita kunnes tulos on asetetun virhemarginaalin sisällä. Iteraatioiden määrän voi rajoittaa ja virhemarginaalia voi muuttaa oletuksesta, mutta tällöin lopputuloksen tarkkuus voi vaarantua.



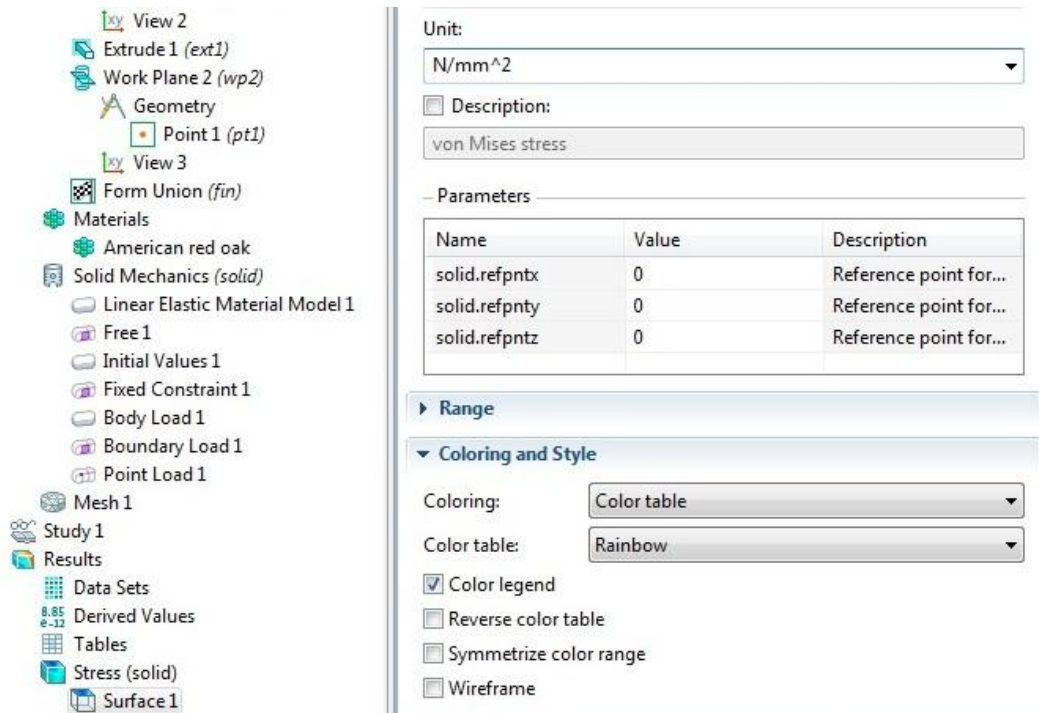
KUVA 32. Laskutoimituksen käynnistys.

Oletuksena kiinteän aineen mekaniikassa lasketaan von Mises -rasitustesti (kuva 33). Lisää tuloksia saa esille painamalla hiiren oikealla painikkeella "Results" ja valitsemalla tutkitaanko pintaa vai koko kappaletta. Ohjelma luo alaotsikon uudelle tulosryhmälle. Varsinaisen suoritettavan laskun voi valita valitsemalla uuden tulosryhmän ja painamalla kahden kolmion muodostamaa ikonia keskinäkymässä.



KUVA 33. Von Mises -rasitustesti.

Esitetyt yksiköt on syytä muuttaa sopivampaan tarkkuuteen (kuva 34). Tuloksista nähdään että lyhyet tuet aiheuttavat suuria rasituksia palkin päihin. Muutetaan parametreista tukia pisemmiksi, viimeistellään malli ja lasketaan se uudelleen (kuva 35). Muutoksen jälkeen kuormitukset jakaantuvat paremmin koko palkkiin ja rasitusarvot jäävät pienemmiksi.



Unit: N/mm²

Description: von Mises stress

Name	Value	Description
solid.refpntx	0	Reference point for...
solid.refpnty	0	Reference point for...
solid.refpntz	0	Reference point for...

Coloring: Color table

Color table: Rainbow

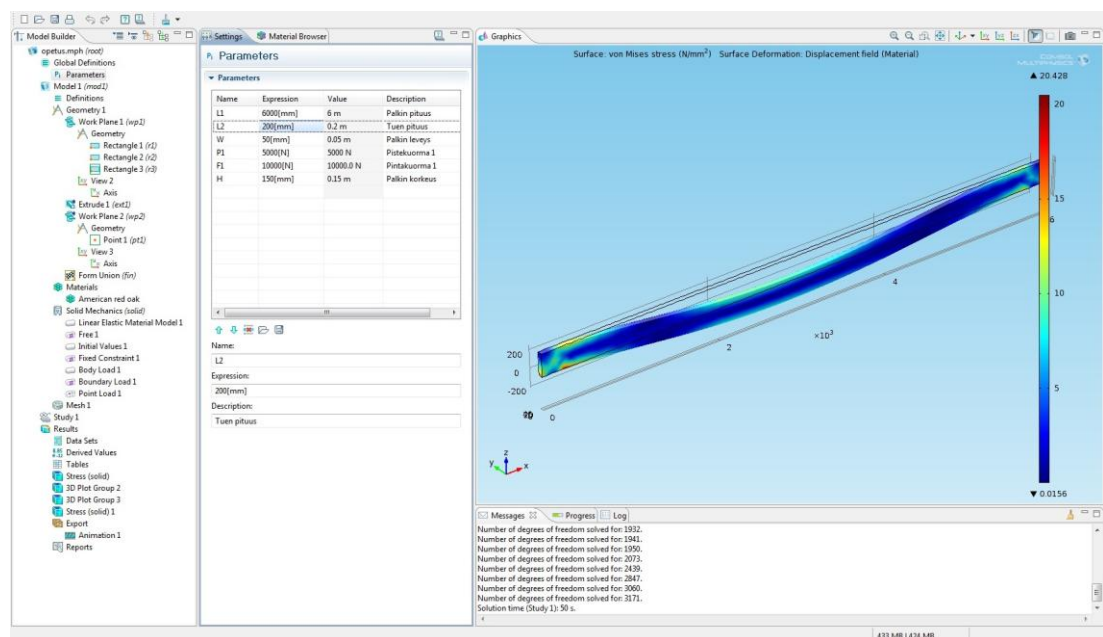
Color legend

Reverse color table

Symmetrize color range

Wireframe

KUVA 34. Yksikön muuttaminen.



Name	Expression	Value	Description
L1	6000[mm]	6 m	Palkin pituus
L2	2000[mm]	0.2 m	Tuen pituus
W	50[mm]	0.05 m	Palkin leveys
P1	5000[N]	5000 N	Pistakuorma 1
F1	10000[N]	10000.0 N	Pintakuorma 1
H	1500[mm]	0.15 m	Palkin korkeus

Surface: von Mises stress (N/mm²) Surface Deformation: Displacement field (Material)

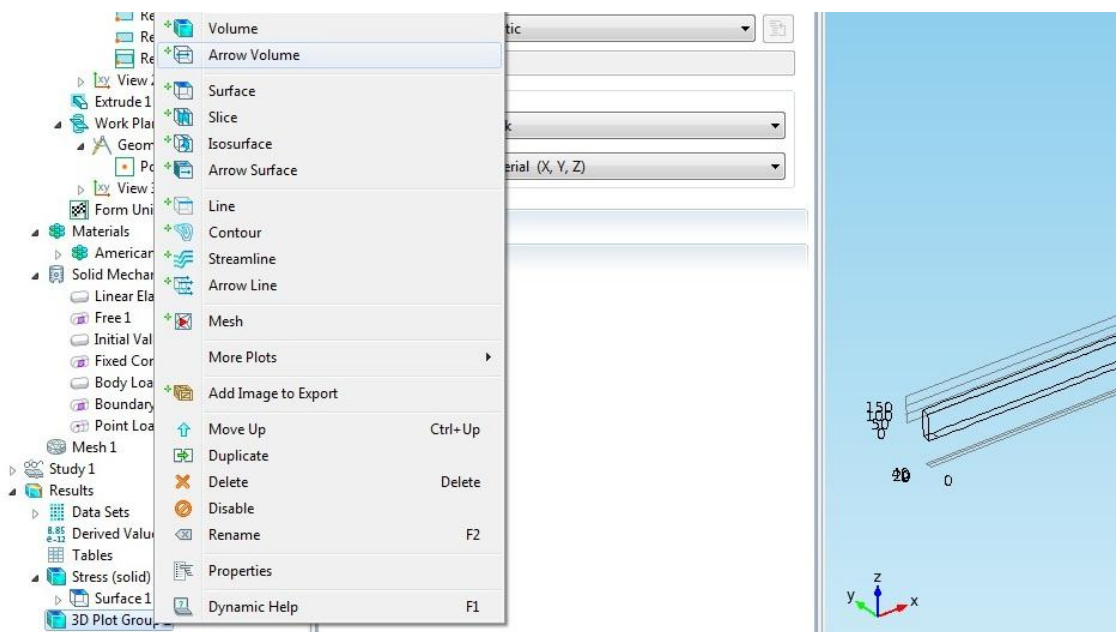
Number of degrees of freedom solved for: 1932.
 Number of degrees of freedom solved for: 1941.
 Number of degrees of freedom solved for: 1950.
 Number of degrees of freedom solved for: 2075.
 Number of degrees of freedom solved for: 2439.
 Number of degrees of freedom solved for: 2847.
 Number of degrees of freedom solved for: 3060.
 Number of degrees of freedom solved for: 3171.
 Solution time (Study 1): 50 s.

KUVA 35. Parametrien muuttaminen.

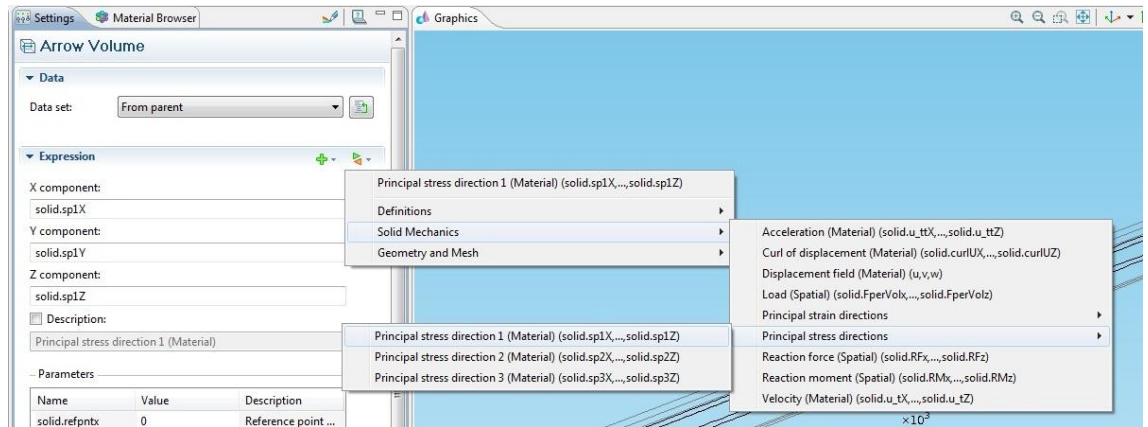
Tehdään uusi tulosten piirtoryhmä ja lisätään siihen voimien tarkastelu nuolien avulla (kuvat 36 ja 37). Tulosryhmälle määritellään lisäksi minkä suuntaisia voimia nuolien avulla halutaan tarkastella (kuva 38). Koska kyse on kolmiulotteisista kappaleista ja laskenta on erittäin tarkkaa, voi kappaleeseen syntyä mitättömän pieniä suunnaltaan ennalta-arvaamattomia voimia, jotka kuitenkin tulostuvat nuolitarkasteluun näkyvästi (kuva 39).



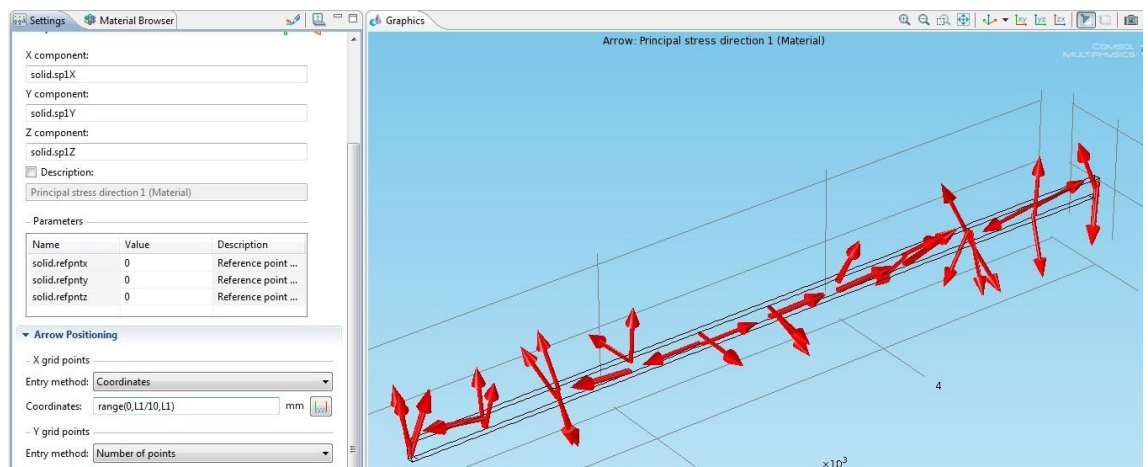
KUVA 36. Tulosten piirtoryhmän lisääminen.



KUVA 37. Sisäisten voimien tarkastelu nuolien avulla.

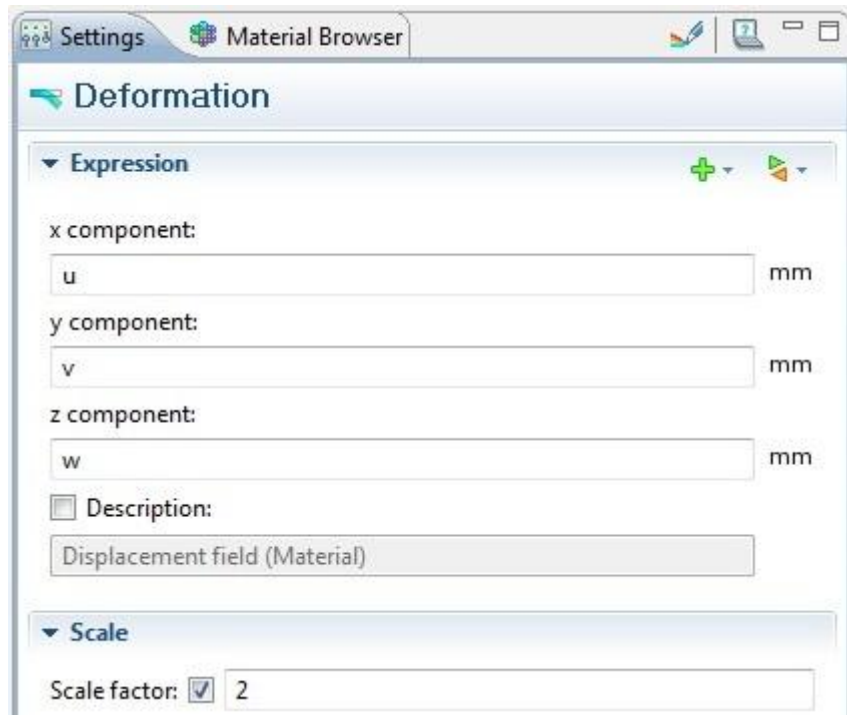


KUVA 38. Tarkasteltavien voimien suunnan valitseminen.



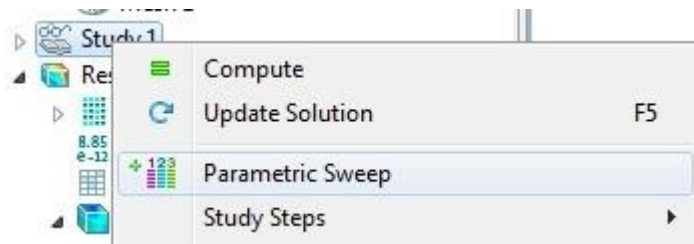
KUVA 39. Sisäiset voimat nuolien avulla esitettynä.

Graafisessa ikkunassa esitetyt muodonmuutokset ovat automaattisesti liioiteltuja, jotta ne olisivat käyttäjälle helpommin havaittavissa. Muodonmuutoksien mittasuhteita voidaan muuttaa "Deformation"-välilehden alta (kuva 40).

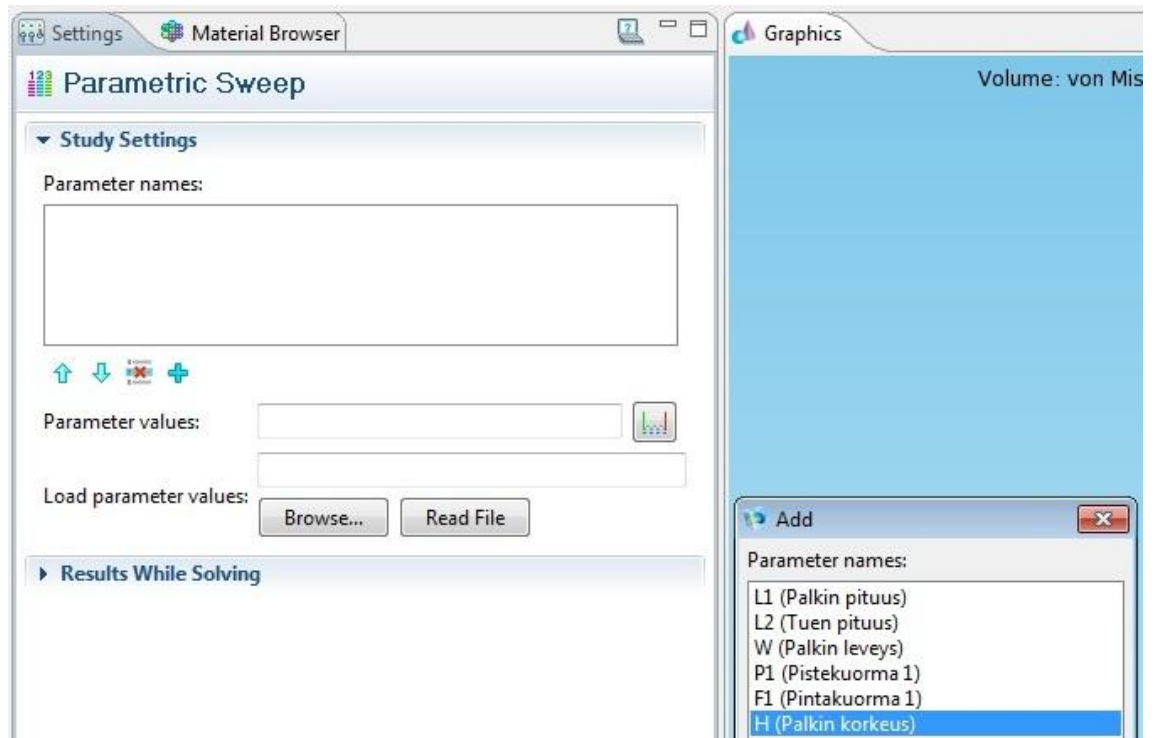


KUVA 40. Muodonmuutoksien asetukset.

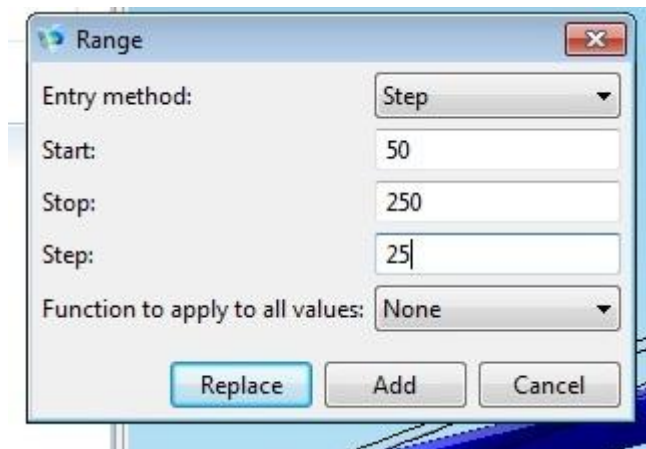
Parametrejä hyväksikäyttäen voidaan luoda myös parametripyyhkäisy, jossa lasketaan annettujen rajojen sisällä kaikki rasiutukset. Parametripyyhkäisy lisätään painamalla oikealla hiiren painikkeella "Stationary" ja valitsemalla "Parametric Sweep" (kuva 41). Ensin valitaan muutettavat parametrit ja sitten parametreille annetaan alku- ja loppuarvot sekä porrastus jolla arvot käydään läpi (kuvat 42 ja 43). Parametripyyhkäisyyn annetut arvot syrjäyttävät parametrituetteloon annetun arvon.



KUVA 41. Parametripyyhkäisyn lisääminen.

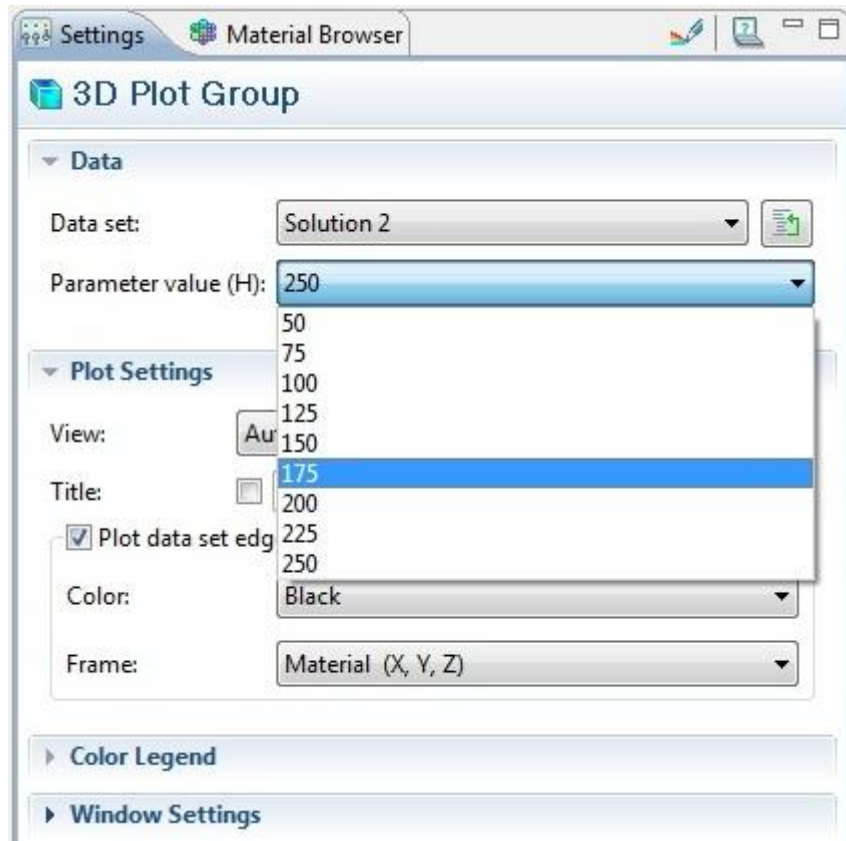


KUVA 42. Parametrin lisääminen pyyhkäisyyn.



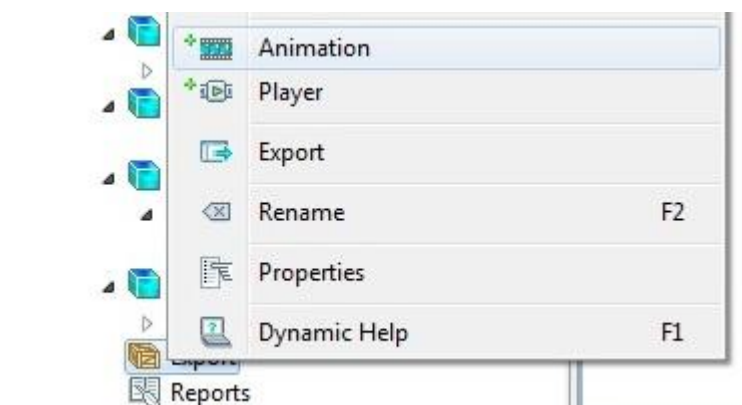
KUVA 43. Pyyhkäisyn asetusten määrittäminen.

Kun parametripyyhkäisy on suoritettu, voidaan jokaista askelta tarkastella erikseen laskematta koko mallia aina uudelleen (kuva 44).

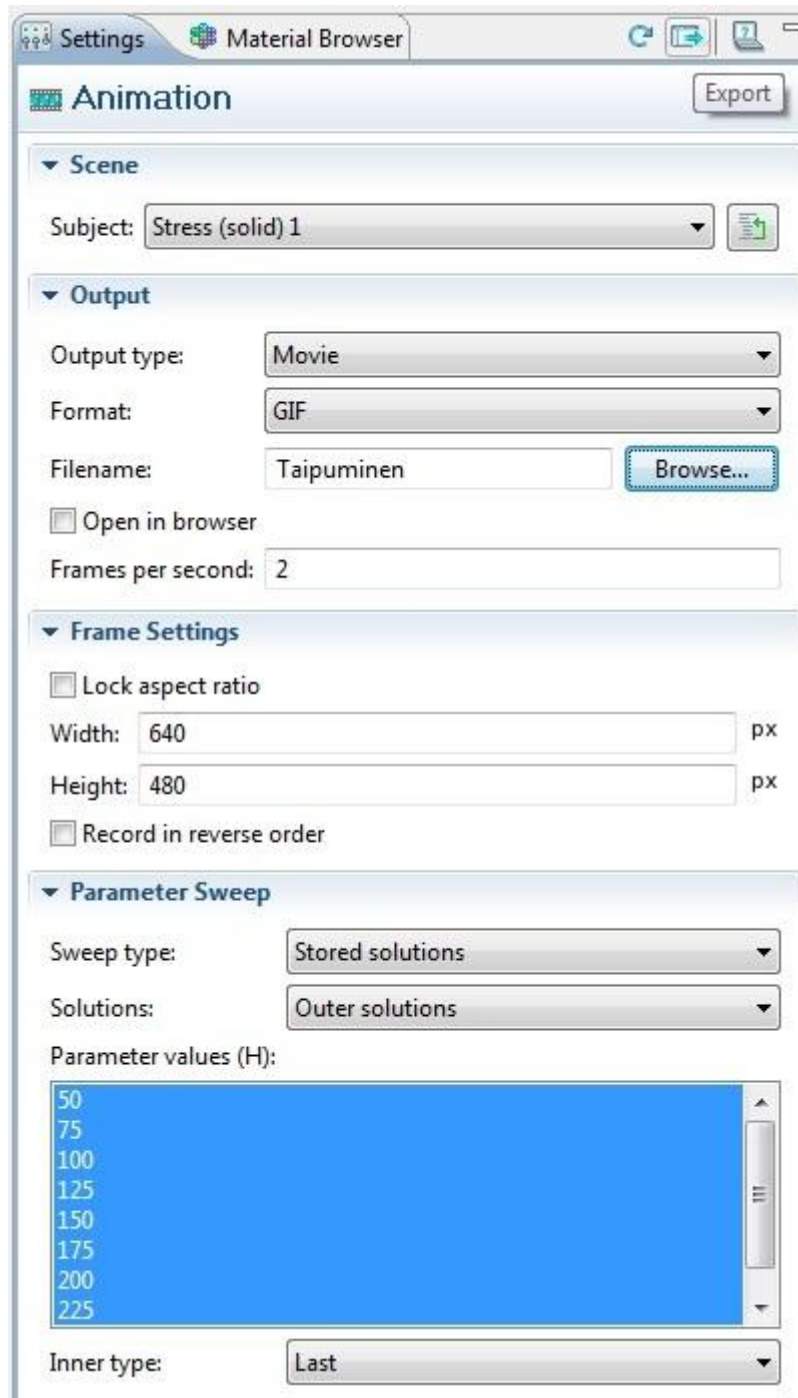


KUVA 44. Yksittäisten askelten tarkastelu.

Tuloksien tuominen ulos ohjelmasta tapahtuu "Export"-välilehden alta. Saman välilehden alta parametripyyhkäisystä voidaan luoda myös animaatio (kuva 45). Valitaan asetuksista ulkoiset ratkaisut ja nimetään animaatio sekä valitaan tiedostomuoto (kuva 46).



KUVA 45. Animaation lisääminen.

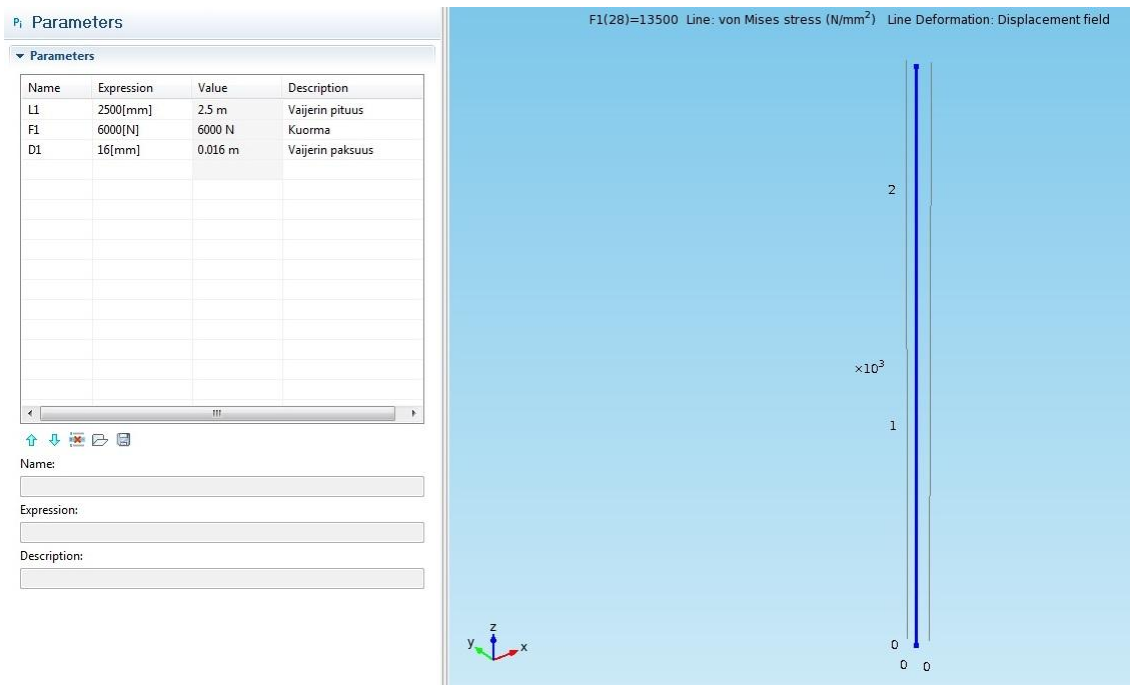


KUVA 46. Animaation asetukset.

4 ESIMERKIT

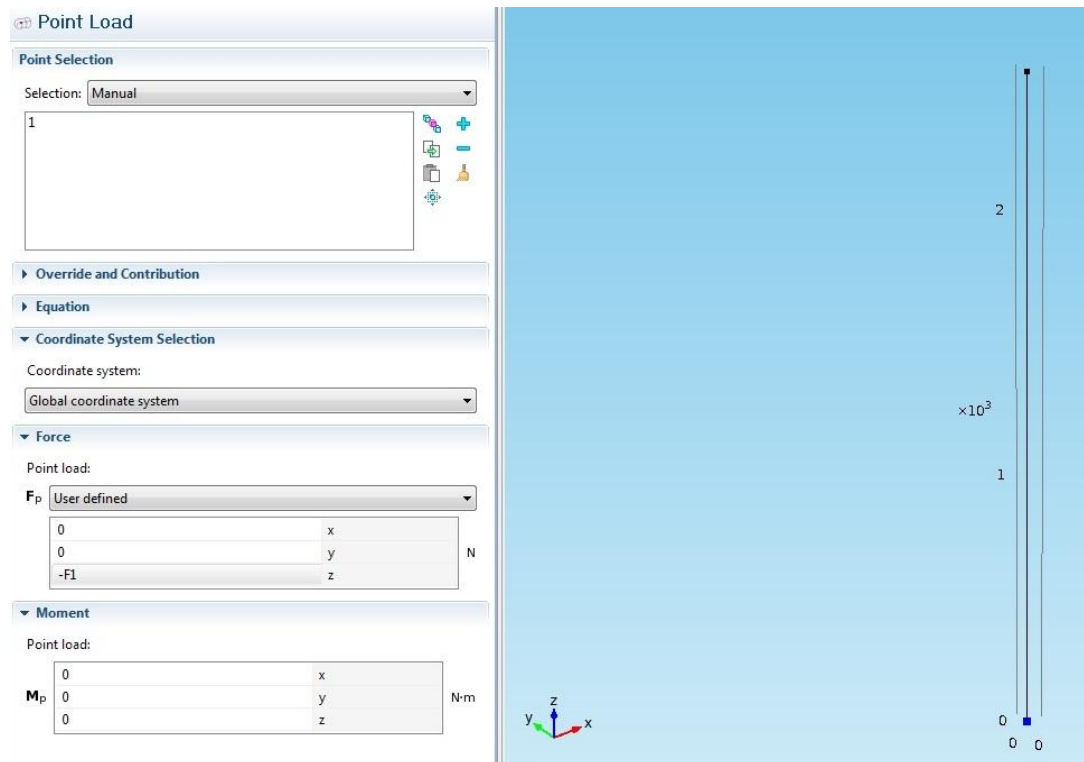
4.1 Normaalivoima

Normaalivoiman mallinnuksen esimerkkinä käytetään teräsvaijeria joka kannattelee yhtä parvekkeen kulmaa. Vaijeri on 2,5 metriä pitkä ja halkaisijaltaan 16 millimetriä (kuva 47). Parveke on sivumitoiltaan 3 metriä kertaa 4 metriä. Parvekkeen yhden kulman kuormitukseksi lasketaan pysyvän ja muuttuvan kuorman yhteisvaikutuksesta enintään 13,5 *kN*. Teräsvaijerille suoritetaan parametripyyhkäisy jossa kuormaa kasvatetaan 500 Newtonin askelin nolasta 13 500 Newtoniin.



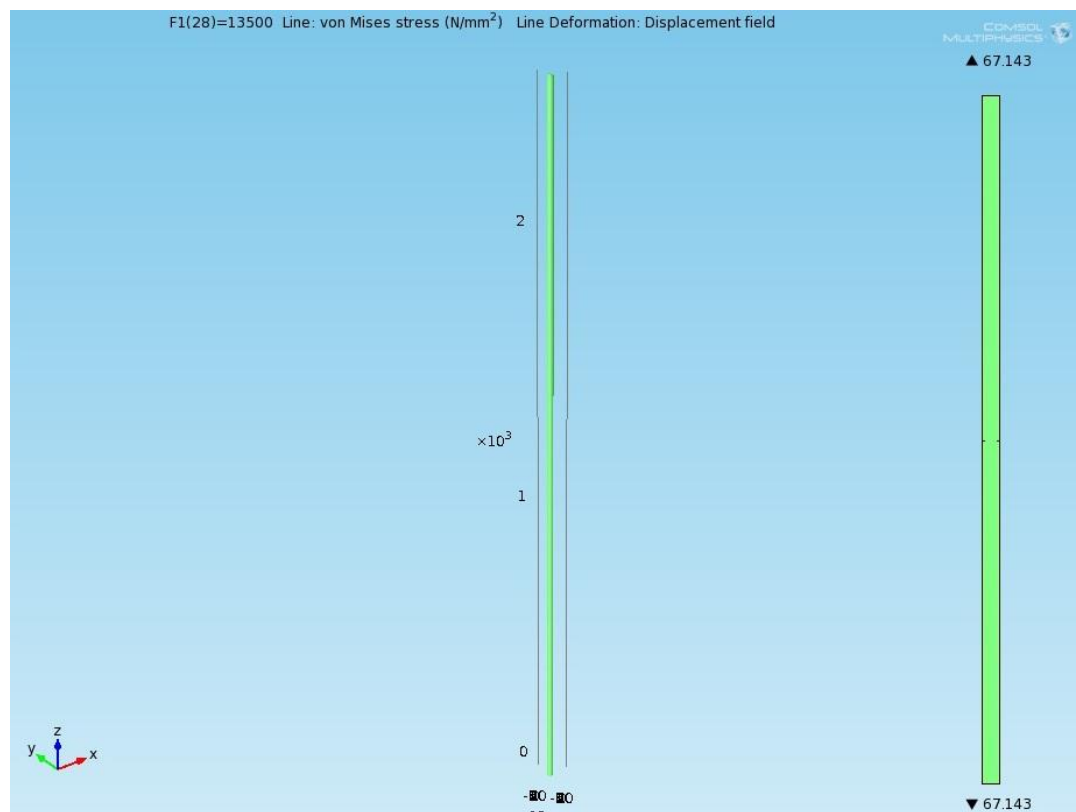
KUVA 47. Vaijerin mitat.

Vaijeri kiinnitetään yläpäästään ja alapäähän lisätään pistekuorma (kuva 48).



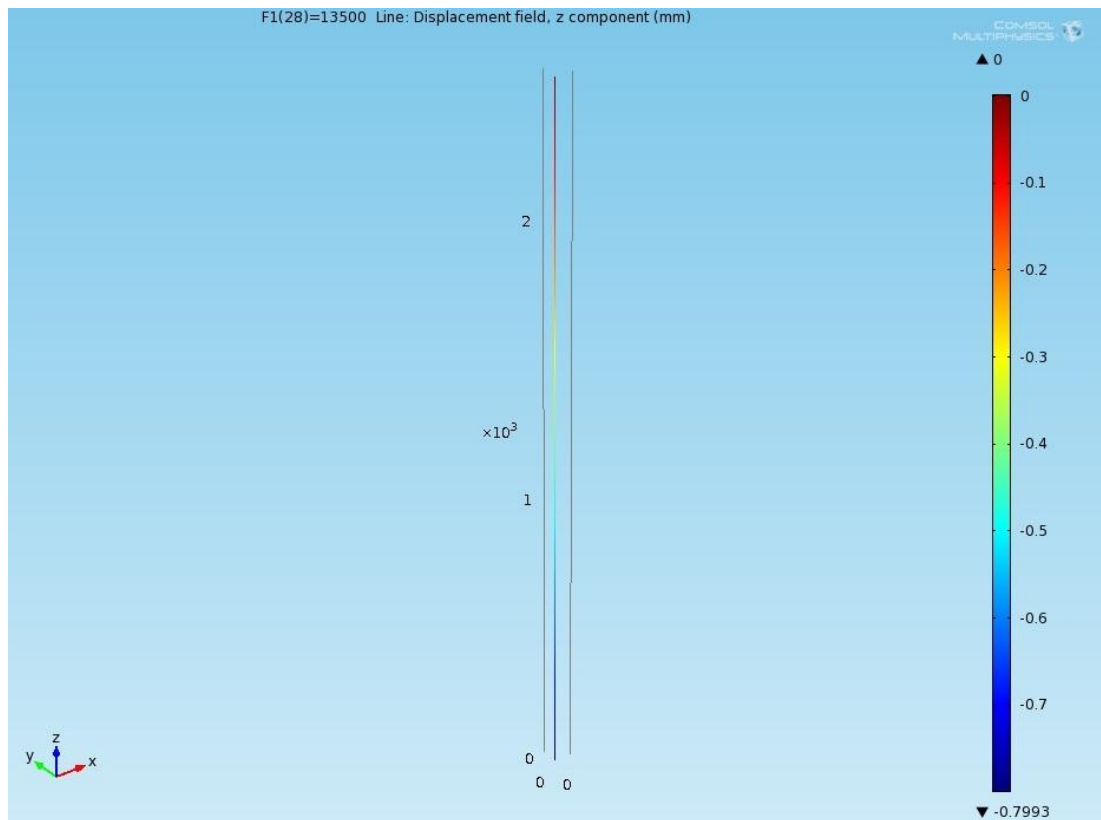
KUVA 48. Pistekuorman lisäys.

Laskusuorituksen jälkeen enimmäisrasitukseksi saatiin 67 N/mm^2 (kuva 49).



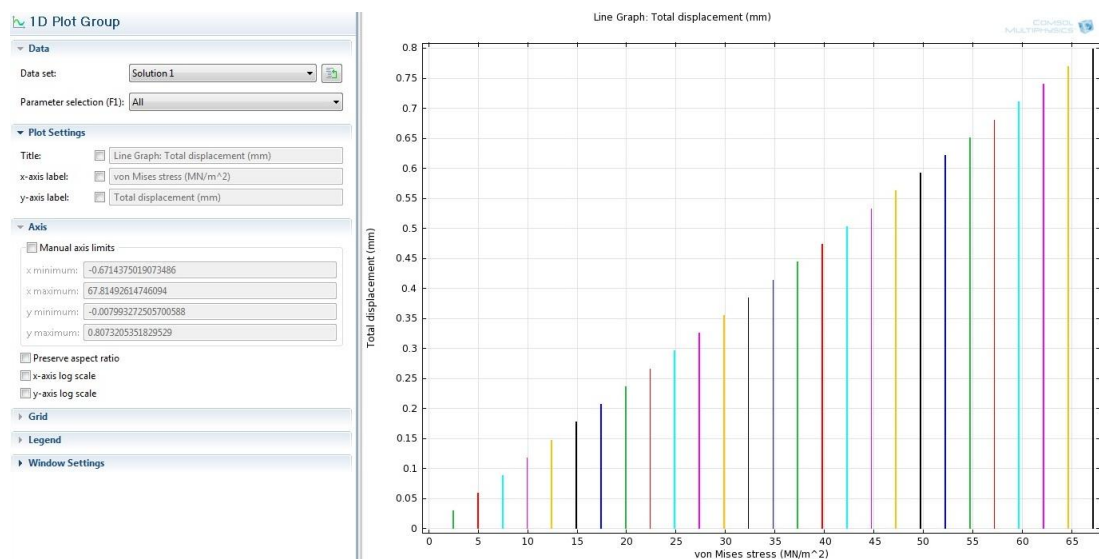
KUVA 49. Vaijerin rasitus enimmäiskuormalla.

Koska rasiutusta on vain yhteen suuntaan, venymä on sama kuin kuormituksen aiheuttama vaijerin alapään siirtymä Z-akselin suunnassa (kuva 50).



KUVA 50. Vaijerin venymä.

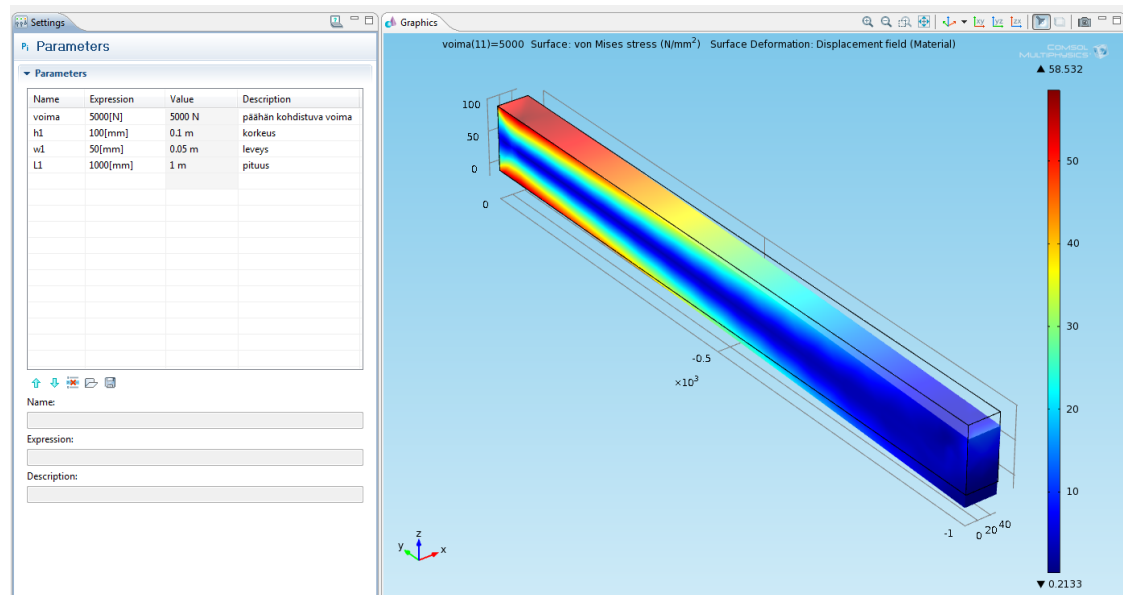
Venymä voidaan esittää myös taulukossa kaikkien parametripyyhkäisyssä laskettujen tulosten suhteen (kuva 51).



KUVA 51. Vaijerin venymät kaikille tuloksille.

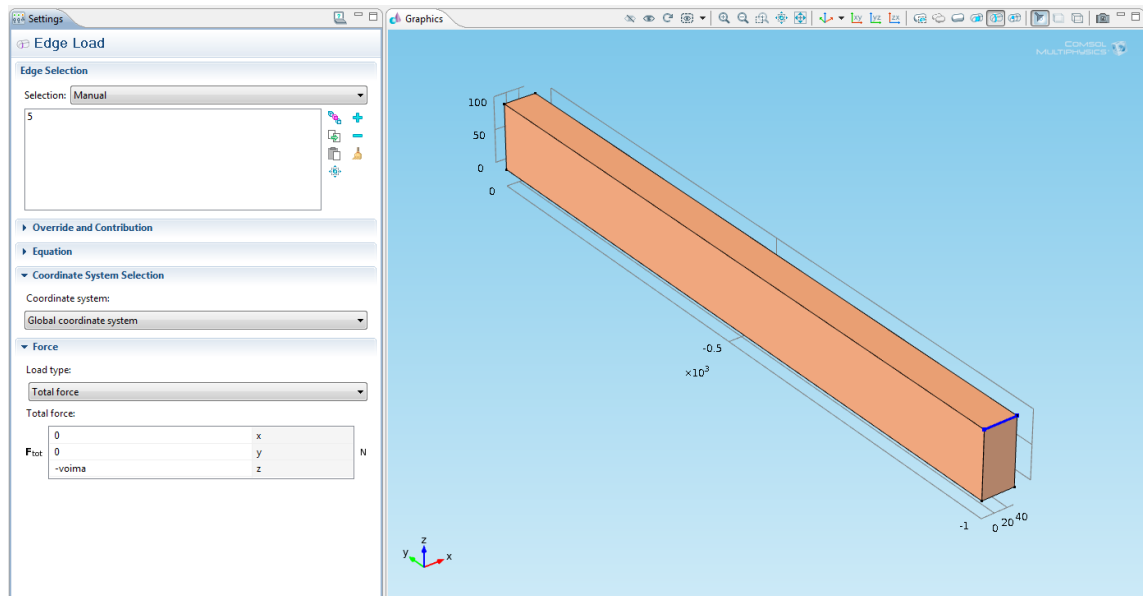
4.2 Taivutus

Taivutuksen esimerkkinä käytetään puista ulokepalkkia, jonka mitat ovat 50 mm kertaa 100 mm ja se on metrin pituinen (kuva 52). Palkin päähän vaikuttaa 5000 Newtonin alaspäinsuuntautuva voima.

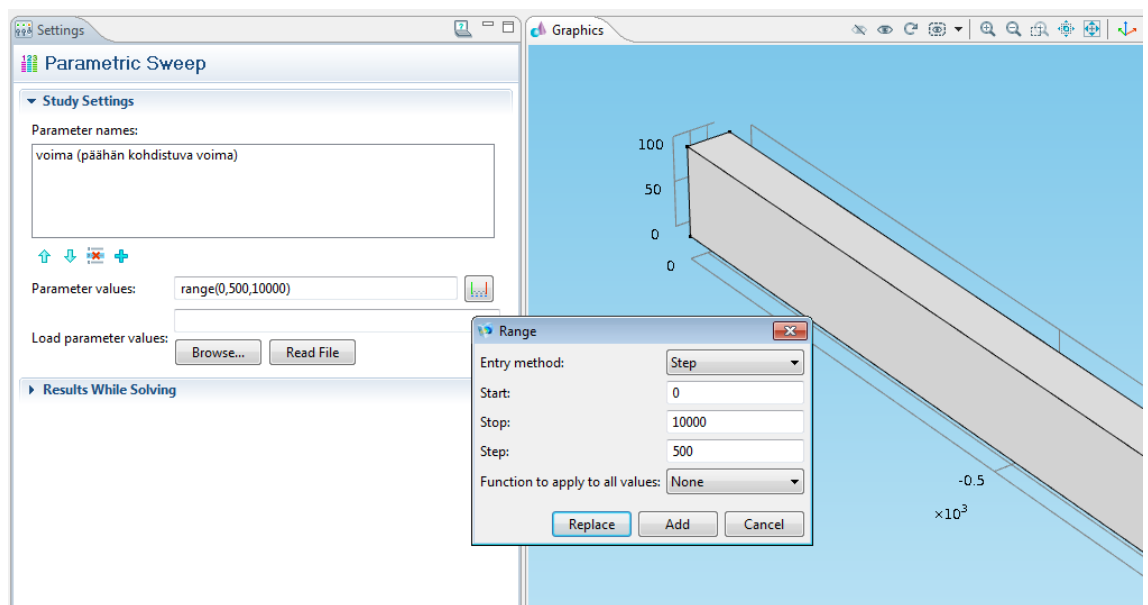


KUVA 52. Ulokepalkin parametrit ja rasitukset.

Voima kohdistuu palkin vapaan pään yläreunaan ja on suunnaltaan suoraan ylhäältä alas (kuva 53). Parametripyyhkäisyssä kuormitusta nostettiin nolasta 10 000 Newtoniin 500 Newtonin askelin (kuva 54). Parametripyyhkäisystä tehtiin myös GIF-animaatio, joka liitettiin opinnäytetyöhön.

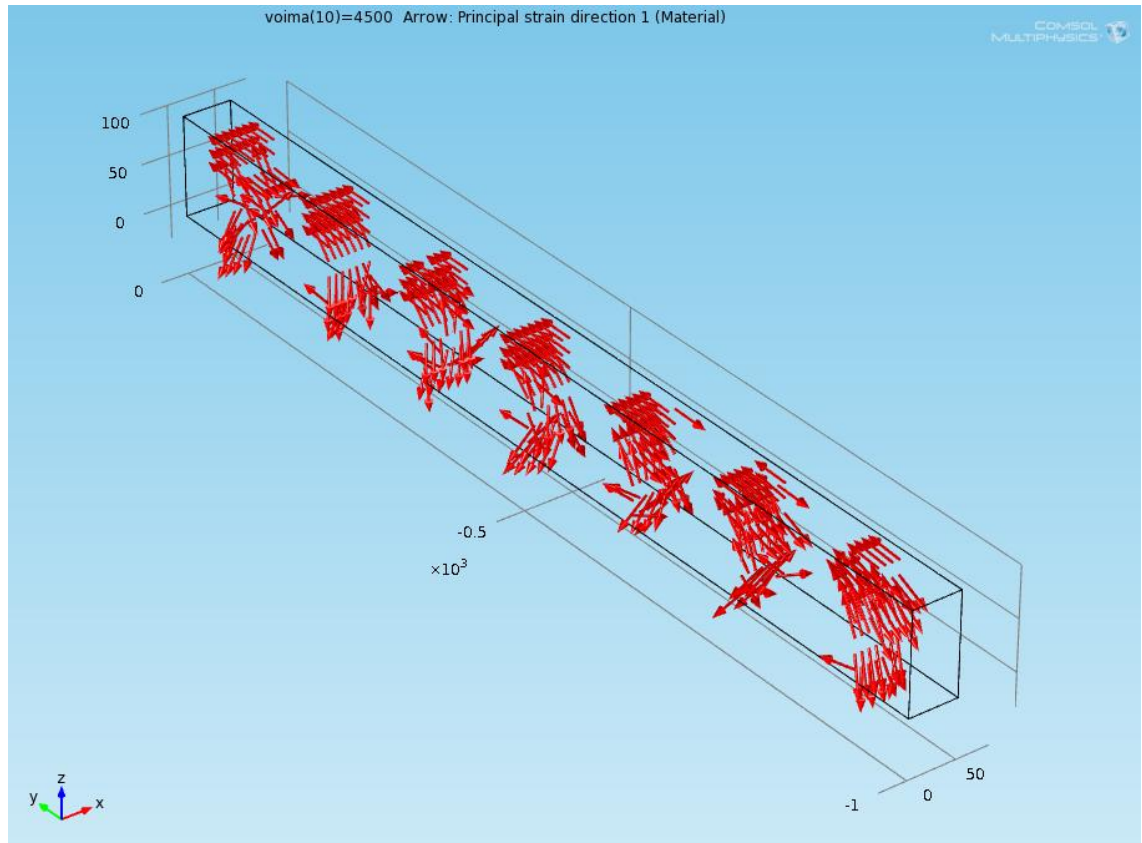


KUVA 53. Ulokepalkin momentti.



KUVA 54. Momentti parametripyyhkäisssä.

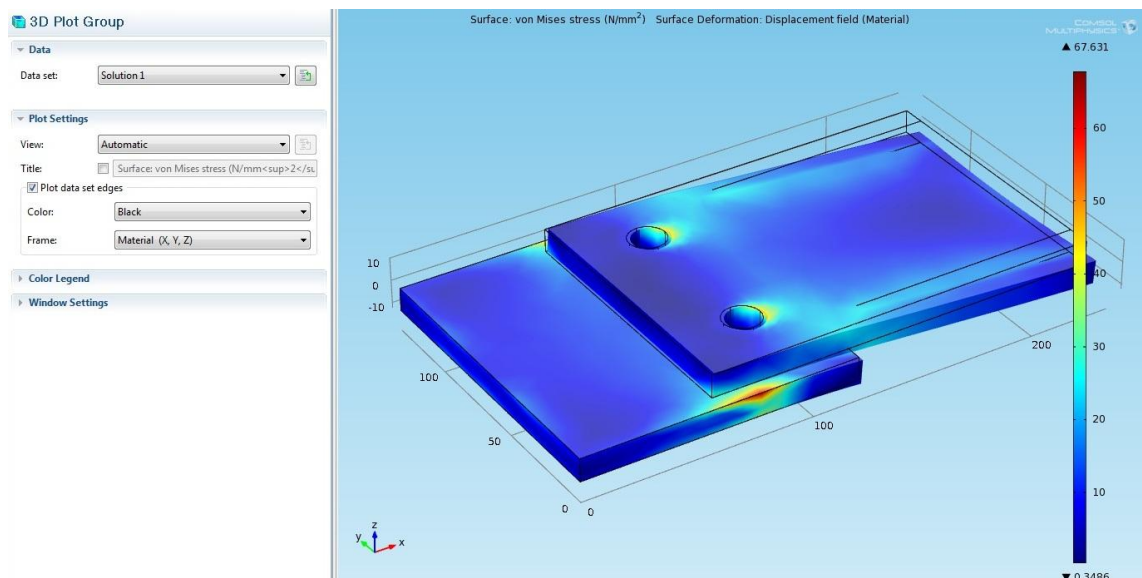
Palkin sisäiset rasitukset voidaan esittää nuolien avulla (kuva 55).



KUVA 55. Sisäiset rasitukset.

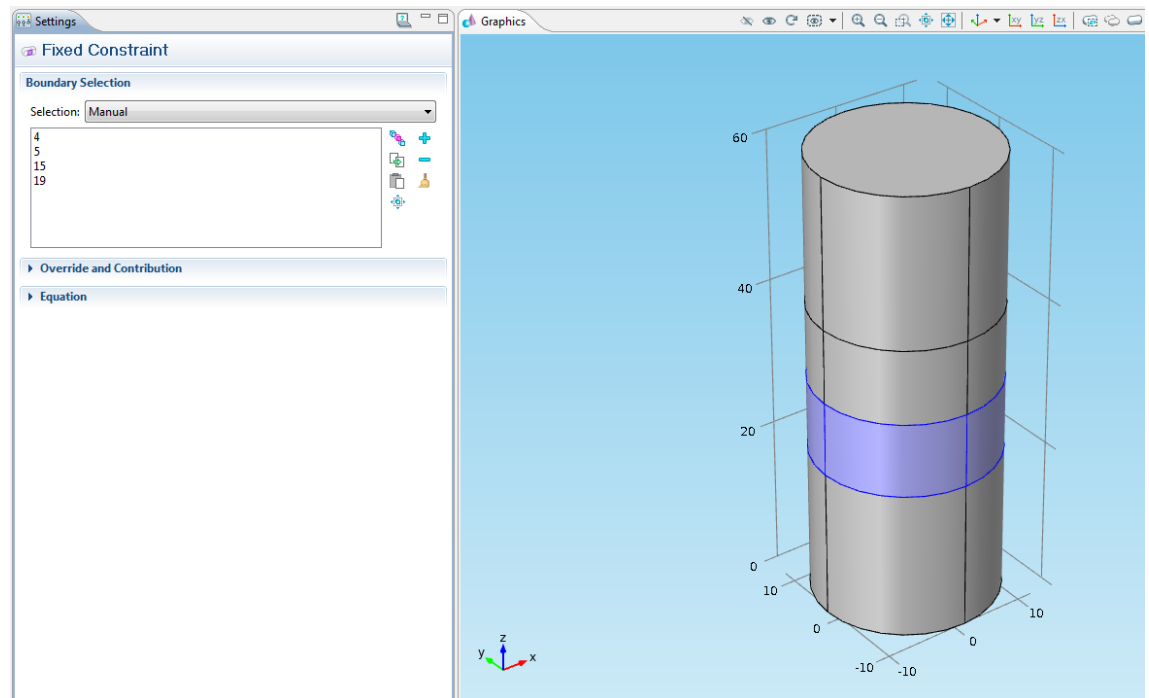
4.3 Leikkaus

Esimerkkinä leikkausvoimasta käytetään teräslitosta, joka on mallinnettu erikseen (kuva 56).

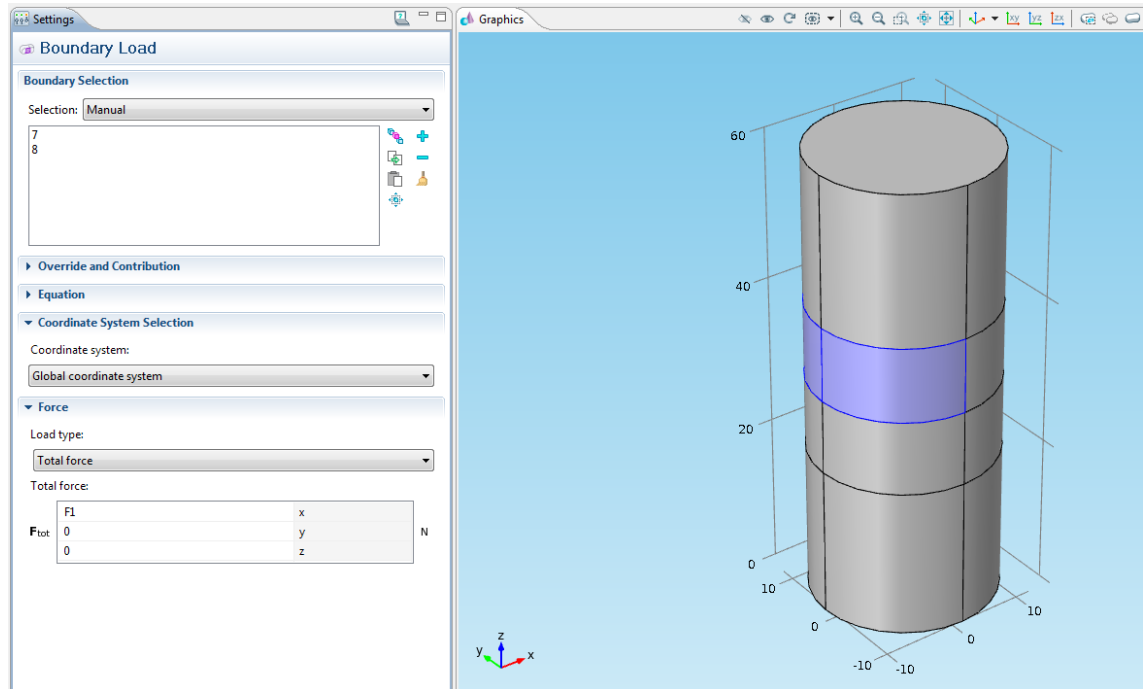


KUVA 56. Liitos johon leikkausvoiman mallinnus perustuu.

Koska tietoa halutaan vain liitoksen pulteista, on toinen niistä mallinnettu erikseen ja siihen on lisätty vaikuttavat voimat. Alempi levy pysyy paikallaan ja ylemmän levyyn vaikuttaa X-akselin suuntaan vetävä voima jota nostetaan parametripyyhkäisyllä nollassa 50 000 Newtoniin yhden pultin osalta (kuvat 57 ja 58). Parametripyyhkäisystä tehtiin myös GIF-animaatio, joka liitettiin opinnäytetyöhön.

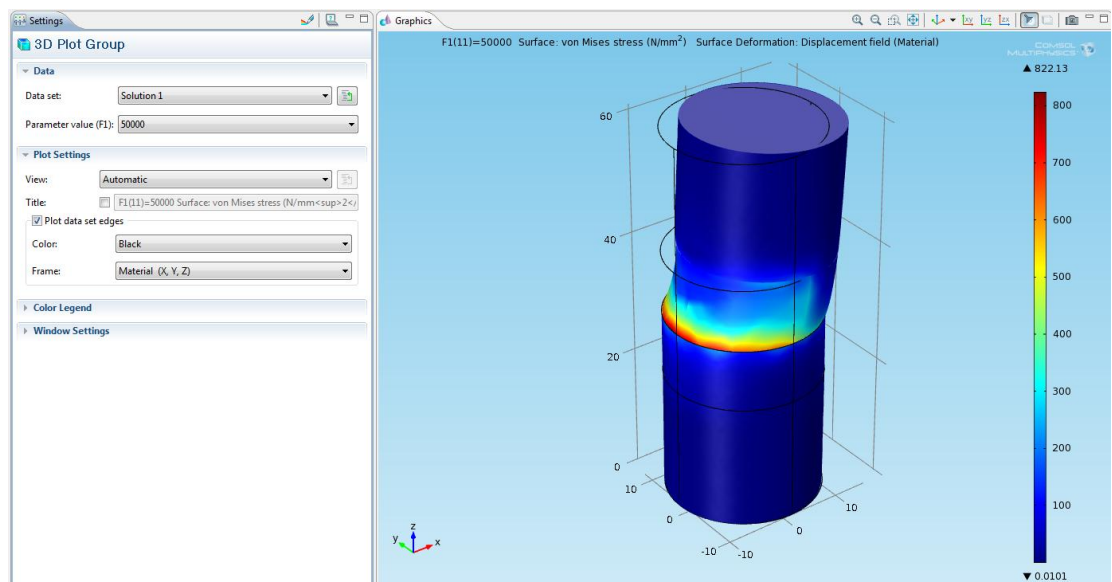


KUVA 57. Pultin alempi puolikas pysyy paikallaan.



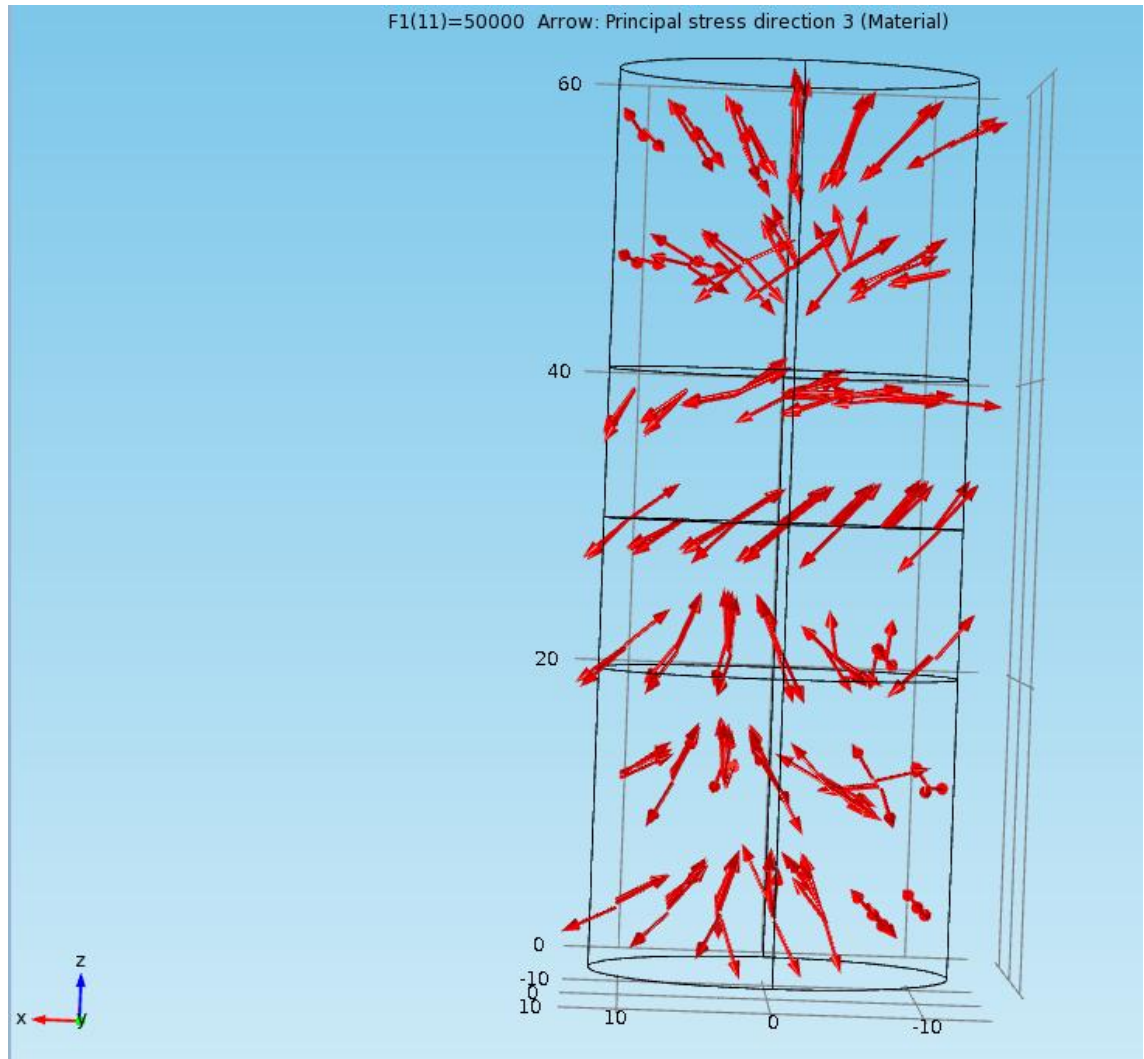
KUVA 58. Pultin ylemmän puolikkaaseen vaikuttava voima.

Rasitustestistä nähdään että pulttiin vaikuttaa rasitus joka on suurimmillaan 822 N/mm^2 kun tarkastellaan parametripyyhkäisyä viimeistä, eli suurinta arvoa (kuva 59).



KUVA 59. Pultin rasitustesti.

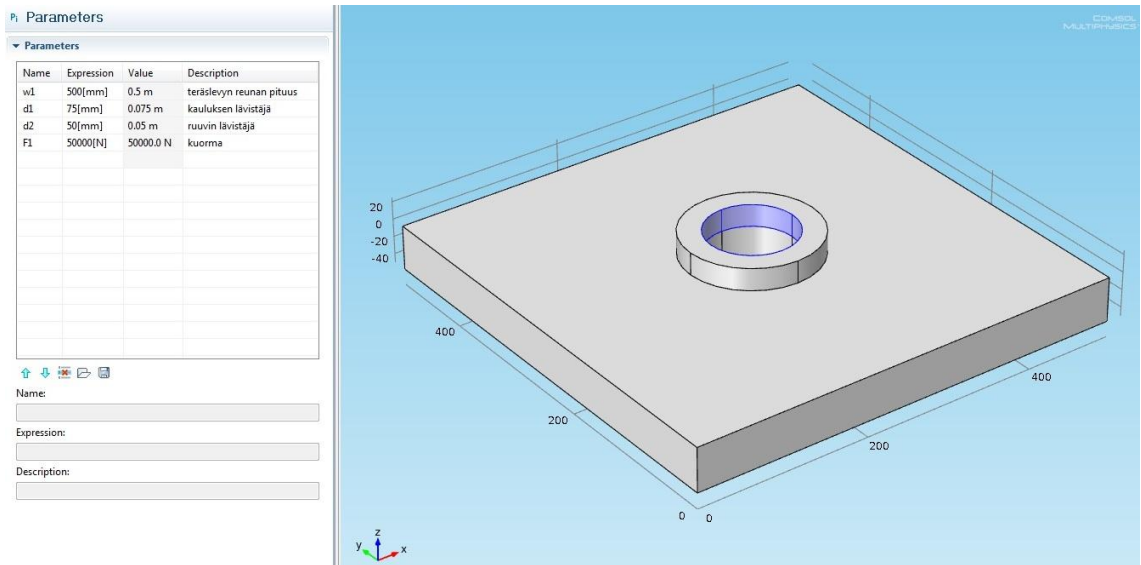
Pultin sisäiset rasitukset voidaan esittää nuolien avulla (kuva 60).



KUVA 60. Pultin sisäiset rasitukset.

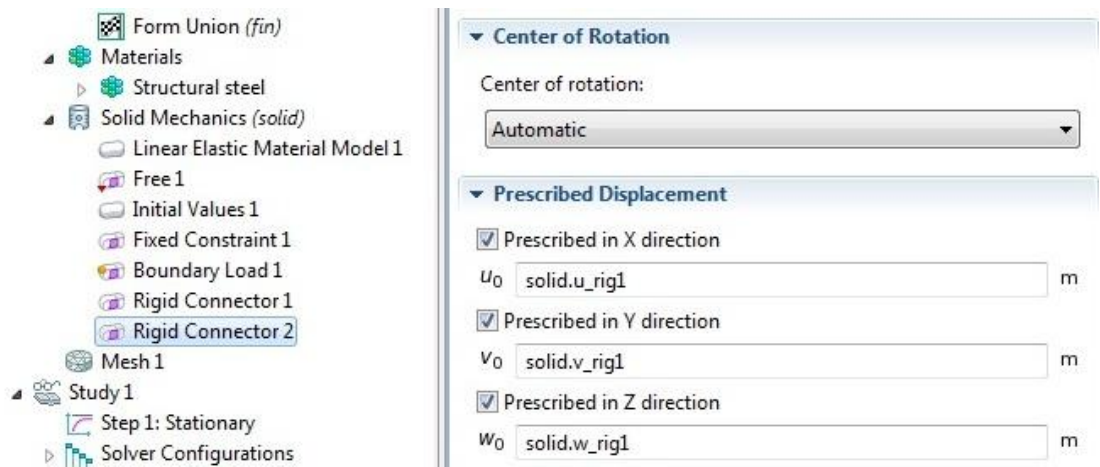
4.4 Lävistys

Esimerkkinä lävistyksestä käytetään teräslevyn läpi menevää pulttia joka on kiinni pontissa, joka puolestaan painaa teräslevyyn. Pulttia ei mallinneta, koska se ei ole laskutulosten kannalta oleellinen osa. Voima mallinnetaan vaikuttamaan suoraan pontin sisäpintaan (kuva 61). Parametripyyhkäisyllä voima nostetaan nollasta 80 000 Newtoniin. Parametripyyhkäisystä tehtiin myös GIF-animaatio, joka liitettiin opinnäytetyöhön.



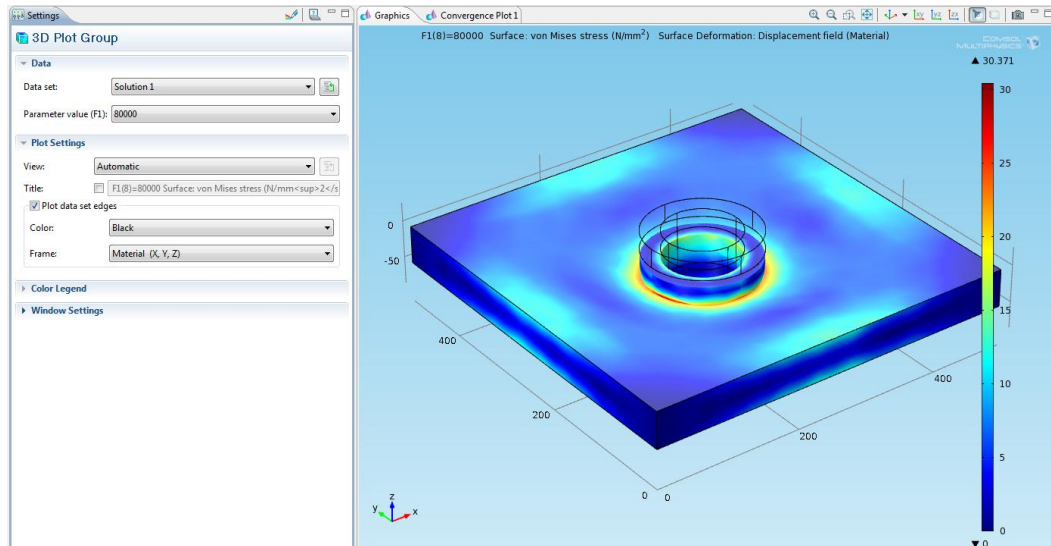
KUVA 61. Vaikuttavan voiman sijainti.

Pulttia simuloidaan sitomalla teräslevyn reiän sisäpinnan muutokset sijainnissa suoraan pontin sisäpinnan muutoksiin (kuva 62).



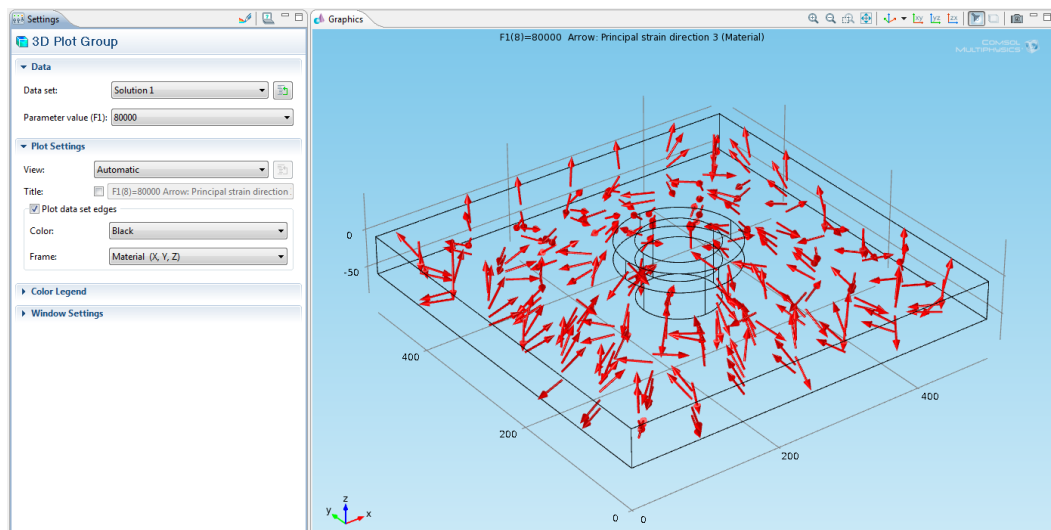
KUVA 62. Sijainnin sitominen toiseen kappaleeseen.

Rasitustestistä nähdään että suurimmat rasitukset muodostuvat välittömästi pontin ulkopuolelle ja ovat suuruudeltaan noin 30 N/mm^2 (kuva 63).



KUVA 63. Lävistyksen rasiustesti.

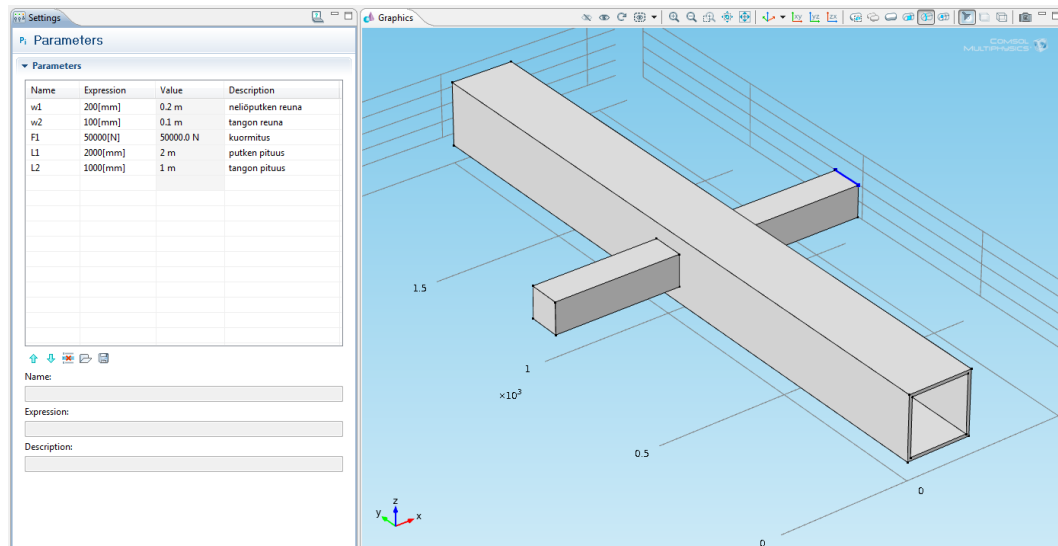
Levyn sisäiset rasiukset voidaan esittää nuolien avulla (kuva 64).



KUVA 64. Levyn sisäiset rasiukset.

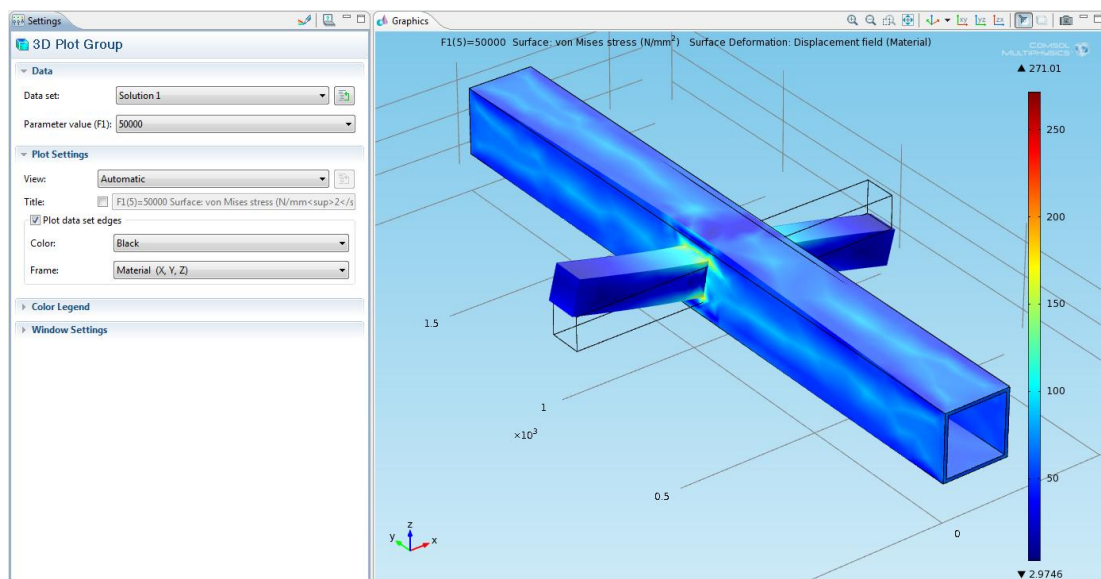
4.5 Vääntö

Esimerkkinä väännöstä käytetään yhden metrin mittaista neliöputkea jonka läpi on asetettu täyttää terästä oleva neliön muotoinen tanko. Tangon molempiin päihin vaikuttaa voima eri suuntiin joita nostetaan parametripyyhkäisyllä nollasta 100 000 Newtoniin (kuva 65). Voimat muodostavat pyöriävän liikkeen ja rasiusta myös putken molempiin päihin. Parametripyyhkäisystä tehtiin myös GIF-animaatio, joka liitettiin opinnäytetyöhön.



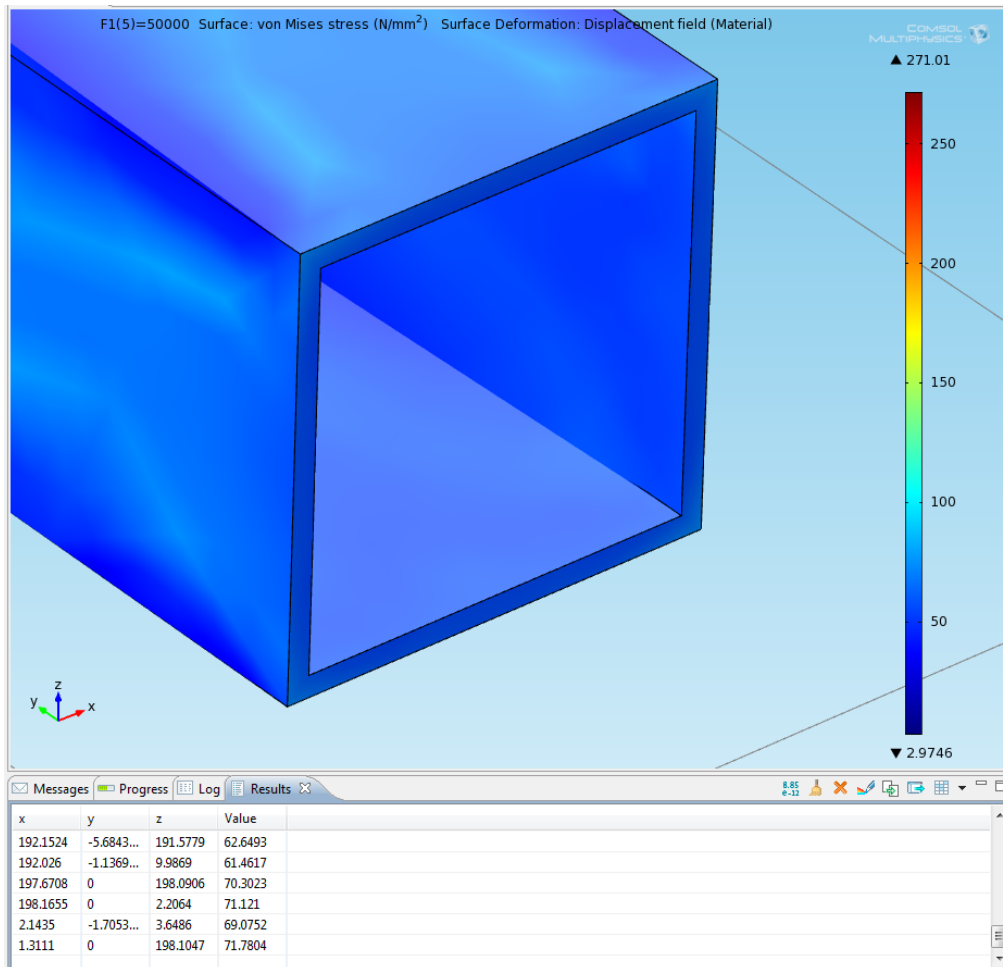
KUVA 65. Väännön parametrit.

Suurimmat voimat muodostuvat tangon ja putken liitoksiin (kuva 66).



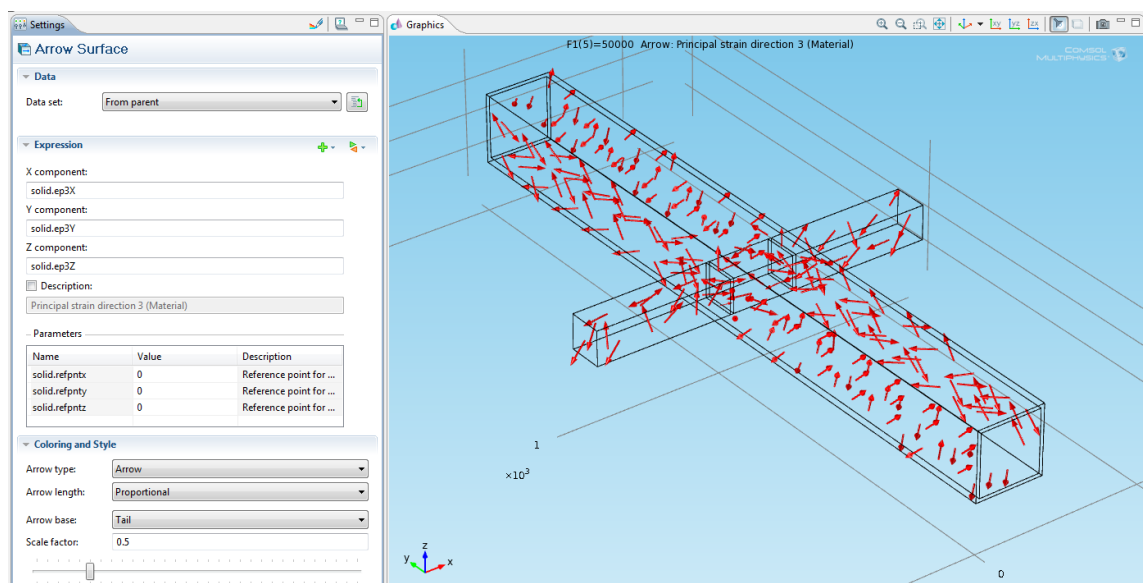
KUVA 66. Väännön rasitustesti.

Painamalla rasitustestissä haluttuja sijainteja graafisella näytöllä voidaan selvittää paikallisia rasituksia. Tulokset tulostuvat kuvan alalaitaan. Tuloksista selviää että vääntö aiheuttaa neliöputken päihin rasituksia jotka ovat voimaltaan noin 70 N/mm^2 kun tarkastellaan parametripyyhkäisyn suurinta arvoa (kuva 67).



KUVA 67. Putken pään paikalliset rasitukset.

Putken pinnan rasituksen suunnat voidaan esittää nuolien avulla (kuva 68).



KUVA 68. Putken pinnan rasitukset.

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli laatia yksinkertainen ohje Comsol Multiphysics -ohjelman käyttöä varten talonrakennustekniikan opiskelijoille ja tuottaa esimerkkejä tavallisimmista talonrakennustekniikan ongelmista. Työssä onnistuttiin hyvin. Ohjeen avulla on helppo aloittaa ohjelman käytön opettelu ja esimerkeissä näytetään tärkeimmät yksityiskohdat perusongelmien ratkaisussa.

Työssä käytetyn ohjelman opettelu oli erittäin haastavaa. Ohjelmaa käytetään monimutkaisten fysiikan ongelmien ratkaisuun ja tehokas käyttö vaatii pitkäaikaista perehtymistä. Haastetta lisäsi se, että ohjelman toimintoihin perehtyminen tehtiin päivän mittaisen peruskurssin jälkeen itseopiskeluna. Ohjelman omat käyttöohjeet on laadittu palvelemaan mahdollisimman laaja-alaisesti joten niitä on vaikea soveltaa talonrakennustekniikkaan.

Lopullinen työ sisältää yksinkertaisen käyttöohjeen Comsol Multiphysics -ohjelmalle esimerkkeineen. Esimerkeissä käytetyt mallit on liitetty mukaan opinnäytetyön sähköiseen versioon.

LÄHTEET

Comsol. 2011. Comsol Multiphysics. User's Guide. Part I.

Comsol. 2011. Comsol Multiphysics. User's Guide. Part II.

Comsol. 2012. Comsol Community. Luettu 17.5.2012.
<http://www.comsol.com/community/>

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2007. RIL 205-1-2007. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Helsinki: Dark Oy.

Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 - oppikirja. Forssa: Forssan Kirjapaino Oy.

LIITTEET

LIITE 1: Opetusmalli.mph

LIITE 2: Normaalivoima.mph

LIITE 3: Taivutus.mph

LIITE 4: Taivutus von mises.gif

LIITE 5: Leikkaus.mph

LIITE 6: Leikkaus von mises.gif

LIITE 7: Lävistys.mph

LIITE 8: Lävistys von mises.gif

LIITE 9: Vääntö.mph

LIITE 10: Vääntö von mises.gif