LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Kone

Anu Viitala

RUUVILIITOSTEN LUJUUSTARKASTELU VOIMANSIIRTOLINJOISSA

Työn tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Aki Tiilikainen

Työn ohjaajat: Professori Timo Björk
DI Aki Tiilikainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan osasto

Anu Viitala

Ruuviliitosten lujuustarkastelu voimansiirtolinjoissa

Diplomityö

2014

71 sivua, 41 kuvaa, 15 taulukkoa, 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Aki Tiilikainen

Hakusanat: Ruuviliitos, osittaiskierteinen, täyskierteinen, lujuus, voimansiirtolinja
Keywords: Screw connection, partial thread, full thread, strength, transmission line

Voimansiirtolinjojen ristikkopylväiden rakentamisessa on tyypillisesti käytetty osittaiskierteisiä ruuveja, mutta työmaatyöskentelyä helpottaisi siirtyminen täyskierteisten ruuvien käyttöön. Tämä mm. vähentäisi käytettävien ruuvinimikkeiden määrää. Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää laskemalla ja Ftower -laskentaohjelmaa käyttämällä, onko siirtyminen täyskierteisten ruuvien käyttöön mahdollista. Tarkastelua suoritetaan lisäksi myös FEM -analyysilla. Lisäksi tarkastellaan myös muita voimansiirtolinjojen ruuviliitoksiin liittyviä ongelmia, ja pyritään löytämään näihin ratkaisuehdotuksia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
The Department of Mechanical Engineering

Anu Viitala

Examination of strength of screw connections in transmission lines

Master's Thesis

2014

71 pages, 41 figures, 15 tables, 3 appendices

Examiners: Professor Timo Björk
MSc Aki Tiilikainen

Keywords: Screw connection, partial thread, full thread, strength, transmission line

In the structures of lattice towers of transmission lines there is typically used partial thread screws. It would make the construction work easier, if partial thread screws would be replaced by full thread screws. This would for example decrease the number of different screws. The purpose of this Master's thesis is to find out by calculating and with Ftower- and FEM-analyses if it is possible to use full thread screws. In addition there is also viewed other screw joints related problems in transmission lines.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Eltel Networks Oy:tä mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta. Kiitokset myös Aki Tiilikaiselle ja Timo Björkille työn tarkastamisesta ja ohjaamisesta sekä antamistanne neuvoista ja ohjeista. Lisäksi erityiskiitokset FEM-mallinnuksessa auttaneille kavereille, ilman teitä työ ei olisi varmaan valmistunut tämän vuoden puolella.

Haluan kiittää myös avopuolisoani Kari Pulkkista sekä perhettäni tuesta diplomityön ja koko opiskelujen aikana. Ja kiitos kaikille opiskelukavereille hauskoista hetkistä, näistä vuosista on jäänyt paljon hyviä muistoja.

Anu Viitala
Lappeenrannassa 2.12.2014

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO 7
1 JOHDANTO 10
1.1 Työn tausta 10
1.2 Työn tavoite ja rajaus 11
2 RUUVILIITOKSET 12
2.1 Käytettävät standardit 21
2.2 Osittaiskierteiset kuusioruuvit 23
2.3 Täyskierteiset kuusioruuvit 26
3 RUUVILIITOSTEN LUJUUSLASKENTA 27
3.2 Täyskierteisen ruuvin lujuuslaskenta 30
4 VOIMANSIIRTOLINJOJEN KUORMITUKSET 31
5 LASKENTA FTOWER -OHJELMALLA 34
5.1 Osittaiskierteinen ruuvi 39
5.2 Täyskierteinen ruuvi 41
6 LASKENTA FEMAP NX NASTRAN -OHJELMALLA 43
6.1 Osittaiskierteisen ruuvin tarkastelu FEM –analyysilla 45
6.2 Täyskierteisen ruuvin tarkastelu FEM-analyysilla 47
6.3 Lineaarinen materiaalimalli ja staattinen analyysi 48
7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU 54
7.1 Laskennan tulosten tarkastelu 54
7.2 FTower –analyysien tulokset 55
7.3 FEM-analyysien tulokset 58
7.4 Tulosten vertailu 63

8 MUUT RUUVILIITOKSIIN LIITTYVÄT ONGELMAT 65

9 JOHTOPÄÄTÖKSET 67

10 YHTEENVETO JA JATKOEHDOTUKSET.....68

LIITTEET

LIITE I: Mathcad-laskenta

LIITE II: FEM-analyysien tulokset kulmateräsprofiilien myötörajalla

LIITE III:FEM-analyysien tulokset kuormitussarjalla

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	ruuvin poikkipinta-ala [mm^2]
A	satunnainen kuormitus [N]
a	tukipinnan ja ensimmäisen täysin muotoutuneen kierteen välinen etäisyys täyskierteisillä ruuveilla [mm]
A_s	ruuvin vetopoikkipinta-ala [mm^2]
b	kierteen pituus [mm]
b_1	ristikkopylvään kentän leveys [mm]
b_2	ristikkopylvään kentän leveys [mm]
c	ruuvin olakkeen korkeus [mm]
D	sisäkierteen nimellisulkohalkaisija [mm]
d	ruuvin nimellishalkaisija [mm]
d	ulkokierteen nimellisulkohalkaisija [mm]
d_a	tukipinnan sisähalkaisija [mm]
d_s	ruuvin varren kierteettömän osan halkaisija [mm]
d_w	tukipinnan ulkohalkaisija [mm]
d_o	reiän halkaisija [mm]
D_1	sisäkierteen nimellissisähalkaisija [mm]
d_1	ulkokierteen nimellissisähalkaisija [mm]
D_2	sisäkierteen nimelliskylkihalkaisija [mm]
d_2	ulkokierteen nimelliskylkihalkaisija [mm]
E	materiaalin kimmokerroin [MPa]
e	särmäväli [mm]
e_1	etäisyys reiän keskeltä kulmatangon lähimpään päähän [mm]
e_2	reunaetäisyys reiän keskeltä kulmatangon lähimpään reunaan [mm]
e_3	pidennetyn reiän akselin ja päädyn välinen etäisyys [mm]
e_4	pidennetyn reiän pyöristyksen keskiön ja päädyn välinen etäisyys [mm]
F	kuormitus [N]
$F_{v,Rd}$	ruuvin leikkauskestävyys [N]

$F_{B,Rd}$ ruuvin reunapuristuskestävyys [N]

$F_{t,Rd}$ ruuvin vetokestävyys [N]

f_{ub} ruuvin vetomurtolujuus [MPa]

f_{yb} ruuvin myötöraja [MPa]

f_u liitettävän materiaalin vetomurtolujuus [MPa]

f_y liitettävän materiaalin myötölujuus [MPa]

G muuttuva kuormitus [N]

H peruskolmion korkeus [mm]

h ristikkopylvään kentän korkeus [mm]

k ruuvin kannan korkeus [mm]

k_w ruuvin kannan tehollinen korkeus [mm]

l ruuvin nimellispituus [mm]

l_g tukipinnan ja ensimmäisen täysin muotoutuneen kierteen välinen etäisyys osittaiskierteisillä ruuveilla

l_s ruuvin varren kierteettömän osan pituus [mm]

P ruuvin kierteen nousu [mm]

P_1 reikäväli kuorman suunnassa [mm]

$P_{1,0}$ kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys uloimmassa kiinnitinrivissä siirrettävän voiman suunnassa [mm]

$P_{1,i}$ kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys sisemmässä kiinnitinrivissä siirrettävän voiman suunnassa [mm]

P_2 keskiöväli [mm]

Q pysyvä kuormitus

r kannan tyven pyöristyssäde [mm]

s avainväli [mm]

t liitettävän levyn paksuus [mm]

u ruuvin kierteen pään vaillinaisen osan pituus [mm]

α reunapuristuskestävyyden laskennassa käytettävä kerroin

β kuusiokannan viistekulma [°]

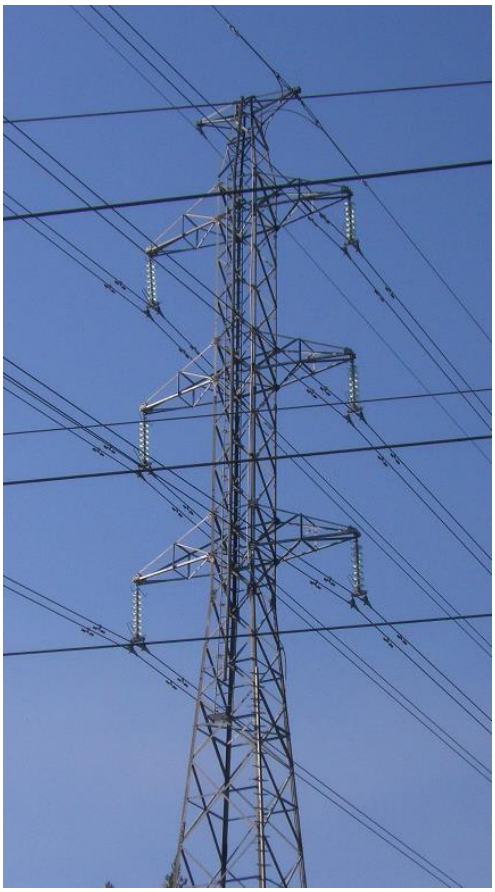
γ_{Mb} ruuviliitosten kestävyyden osavarmuusluku

γ_{M2} materiaalin osavarmuusluku

ν	poissonin vakio
FEM	finite element method, elementtimenetelmä

1 JOHDANTO

Voimansiirtoverkot ja -linjat ovat yhteiskunnalle tärkeitä rakenteita, ja teknologian kehittyessä edelleen ne muodostuvat entistä tärkeämmiksi. Tästä syystä voimansiirtolinjojen rakenteiden kehittämiseen on edelleen syytä panostaa, jotta saadaan tulevaisuudessa aikaan luotettavampia ja turvallisempia ratkaisuja. Esimerkki voimansiirtolinjan ristikkopylväästä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Voimansiirtolinjan ristikkopylväs.

1.1 Työn tausta

Tämä diplomityö tehdään Eltel Networks Oy:lle, ja työhön liittyy myös Fingrid Oyj. Tässä diplomityössä tarkastellaan voimansiirtolinjojen ristikkopylväiden ruuviliitoksia. Tällä hetkellä

käytetään yleisesti osittaiskierteisiä ruuveja, mutta työmaatyöskentelyä helpottaisi merkittävästi siirtyminen täyskierteisiin ruuveihin. Lisäksi tulevaisuudessa osittaiskierteisten ruuvien valmistus joissakin pituusluokissa loppuu, jolloin tilalle tarvitaan sopiva vaihtoehto. Täyskierteisiin ruuveihin siirtyminen vähentäisi erilaisten ruuvien määrää, ja olisi helpompaa erottaa toisistaan eripituiset ruuvit pituusvälin kasvaessa. Voimansiirtolinjoissa käytettävät ruuvit ovat kuumasinkittyjä ja lujuusluokaltaan 8.8. Yhteen teräksiseen ristikkopylvääseen käytetään noin 1 500 ruuvia. Ruuvien lisäksi liitokseen kuuluvia osia ovat kulmateräsprofiilit ja levyt.

Muita voimansiirtolinjojen ruuviliitoksiin liittyviä ongelmia ovat olleet muun muassa tiedonkulun katkeaminen, kiire, väsymys, osaamispuutteet ja väärin hyllytetyt ruuvit. Työmenetelmien ja suunnitelmien ongelmia ovat aiheuttaneet muutokset suunnitelmissa, laskentavirheet ja väärin syötetyt lähtötiedot. Työmaalla ongelmia aiheuttavat hävikki, huonolaatuiset ruuvit ja ruuvien joutuminen väärään paikkaan, sekä se, että käytetään esimerkiksi pitempiä ruuveja lyhyiden paikalle, jolloin pitemmät ruuvit loppuvat kesken. Kehitettäviä kohteita ovat myös materiaalien laadunvalvonta, ruuvien pakkaustapa sekä mahdollinen varmuusvarasto työmaalle.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Tämän diplomityön tavoitteena on saada aikaan ratkaisu voimansiirtolinjoissa käytettäviin ruuviliitoksiin liittyviin ongelmiin, erityisesti siihen, voidaanko siirtyä käyttämään täyskierteisiä ruuveja. Diplomityössä tehdään selvitys erilaisista standardeista koskien ruuviliitoksia ja voimansiirtolinjojen rakenteita yleisesti. Lisäksi tehdään vertailulaskelmia osittais- ja täyskierteisistä ruuveista ja vertaillaan myös kahta erityyppistä pylvästä Ftower–laskentaohjelmalla. Tarkasteltavat pylvästyypit ovat suoran paikan pylväs ja kiristyspylväs. Ruuviliitosten tarkastelua tehdään myös Femap NX Nastran –ohjelmalla, jossa liitoksia tarkastellaan 3D-elementtimalleina.

2 RUUVILIITOKSET

Ruuvi, aluslevy ja mutteri muodostavat yhdessä liitettävien osien kanssa ruuviliitoksen, johon voi kuulua yksi tai useampi ruuvi. Liitokselle voidaan asettaa laatuvaatimuksia muun muassa lujuusluokan, mitan, mittatarkkuuden ja muodon mukaan. Ruuveissa käytettävä lujuusluokkamerkintä kertoo murtolujuuden, esimerkiksi merkinnästä 8.8 selviää ruuvin murtolujuuden olevan 800 MPa, ja myötölujuuden olevan vähintään 80 % murtolujuudesta, eli 640 MPa. Liitoksessa käytettävän ruuvin ja mutterin tulee olla samaa lujuusluokkaa. (Lepola & Makkonen 2006, s. 340.) Mikäli liitokseen kuuluvat osat on pinnoitettu, niillä tulee olla sama pinnoite. Viimeistelyn ja pinnoituksen on oltava pinnoitusstandardien mukaisia. (SFS-EN 15048-1, s. 10–12.) Kuumasinkityksellä aikaansaatava sinkkipinnoite on paksuudeltaan aina yli 40 µm, mikä on otettava ruuvikierteiden valmistuksessa (SFS-EN ISO 10684+AC, s. 14). Sinkkipinnoitteen paikallisen kerrospaksuuden vähimmäisraja on 40 µm, ja keskimääräisen kerrospaksuuden on oltava vähintään 50 µm (SFS-EN ISO 10684+AC, s. 19). Taulukossa 1 on esitetty ruuvien myötörajan f_{yb} ja vetomurtolujuuden f_{ub} nimellisarvot. Taulukkoon on rajattu lujuusluokat 8.8 ja 10.9.

Taulukko 1. Ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (SFS 1993-1-8, s. 21).

Ruuvin lujuusluokka	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm^2)	640	900
f_{ub} (N/mm^2)	800	1000

Tavallisella ruuviliitoksella siirretään liitettävien osien kanssa samassa tasossa olevia voimia, jotka vaikuttavat kohtisuoraan ruuvin vartta vastaan. Voimat siirtyvät liitoksessa ruuvin varressa vaikuttavan leikkausjännityksen, sekä liitettävien osien ja ruuvin varren välillä vaikuttavan reunapuristuksen välityksellä. Ruuveihin voi syntyä myös vetorasituksia ruuvin varren suuntaisesti, esimerkiksi vedettyjen sauvojen liitoksissa tai taivutuksen rasittamissa päätylevyliitoksissa vetopuolella. Päätylevyn taipuminen aiheuttaa vipuvaikutuksen, josta tulee lisärasituksia ruuveille. Taulukossa 2 esitetään kaavat, jolla vipuvoimien muodostumista

voidaan tutkia. Ohjeena annetaan, että vipuvaikutus syntyy aina palkki-pilariliitoksissa, mutta ei perustusruuviliitoksissa. (Kinnunen et al. 2010, s. 92–94.)

Taulukko 2. Laipan T-osan kestävyyden mitoitusarvo $F_{T,Rd}$ (SFS-EN 1993-1-8, s. 74).

	Vipuvoimia voi syntyä, jos $L_b \leq L_b^*$		Vipuvoimia ei synny
Murtumismalli 1	Menetelmä 1	Menetelmä 2 (vaihtoehtoinen menetelmä)	$F_{T,1\text{-}2,Rd} = \dfrac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$
Taustalevyjä ei käytetä	$F_{T,1,Rd} = \dfrac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \dfrac{(8n-2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn-e_w(m+n)}$	
Käytetään taustalevyjä	$F_{T,1,Rd} = \dfrac{4M_{pl,1,Rd}+2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \dfrac{(8n-2e_w)M_{pl,1,Rd}+4nM_{bp,Rd}}{2mn-e_w(m+n)}$	
Murtumismalli 2	$F_{T,2,Rd} = \dfrac{2M_{pl,2,Rd}+n\Sigma F_{t,Rd}}{m+n}$		
Murtumismalli 3	$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd}$		

Murtumismalli 1: Täyden mekanismin syntyminen laipassa
Murtumismalli 2: Ruuvin murtuminen, kun laippa samalla myötää
Murtumismalli 3: Ruuvin murtuminen

L_b on - ruuvin venymäpituus, jonka arvoksi valitaan liitospaksuus (liitettävien materiaalien ja aluslaattojen yhteenlaskettu paksuus) lisättynä arvolla, joka on puolet ruuvin kannan ja mutterin yhteenlasketusta paksuudesta tai;
- perustusruuvin tapauksessa perustusruuvin venymäpituus, jonka arvoksi valitaan kahdeksan kertaa ruuvin nimellishalkaisija + jälkivalun paksuus + pohjalevyn paksuus + aluslaatan paksuus + puolet mutterin korkeudesta.

$L_b^* = \dfrac{8{,}8m^3A_s}{\Sigma\ell_{eff,1}t_f^3}$

$F_{T,Rd}$ on laipan T-osan vetokestävyyden mitoitusarvo
Q on vipuvoima

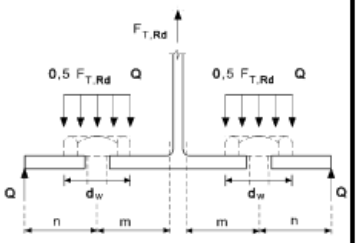
$M_{pl,1,Rd} = 0{,}25\Sigma\ell_{eff,1}t_f^2 f_y/\gamma_{M0}$

$M_{pl,2,Rd} = 0{,}25\Sigma\ell_{eff,2}t_f^2 f_y/\gamma_{M0}$

$M_{bp,Rd} = 0{,}25\Sigma\ell_{eff,1}t_{bp}^2 f_{y,bp}/\gamma_{M0}$

$n = e_{min}$ mutta $n \leq 1{,}25m$

$F_{t,Rd}$ on ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvo, ks. taulukko 3.4;
$\sum F_{t,Rd}$ on T-osan kaikkien ruuvien vetokestävyyksien mitoitusarvojen $F_{t,Rd}$ summa;
$\sum\ell_{eff,1}$ on $\sum\ell_{eff}$:n arvo murtumismallissa 1;
$\sum\ell_{eff,2}$ on $\sum\ell_{eff}$:n arvo murtumismallissa 2;
e_{min} , m ja t_f ovat kuvan 6.2 mukaisia suureita;
$f_{y,bp}$ on taustalevyjen myötöraja;
t_{bp} on taustalevyjen paksuus;
$e_w = d_w/4$;
d_w on aluslaatan halkaisia, tai ruuvin kannan tai mutterin avainväli tarkasteltavasta tapauksesta riippuen.



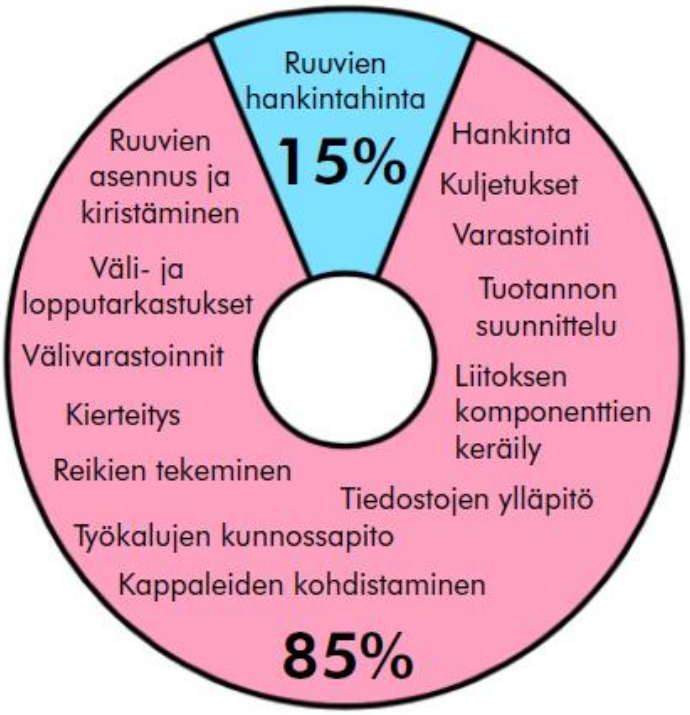
Ruuviliitosten kestävyyden osavarmuusluku γ_{Mb} on 1,25. Samaa osavarmuuslukua käytetään tarkasteltaessa ruuvien leikkaus-, reunapuristus- ja vetokestävyyttä. Kaikilla liitoksilla mitoituskestävyyden on taattava rakenteen toimivuuden säilyminen. (SFS 50341-1, s. 228.)

Liitettävien kappaleiden ainevahvuus määrää käytettävien ruuvien pituuden. Tämän lisäksi on otettava huomioon myös aluslaattojen, mutterin ja ruuvin vapaan kierreosuuden pituus. Liitoksessa voiman tulee osua ruuvin suoraan varteen ja kierteen pään tulee jäädä pinnan tasalle tai hieman sen alapuolelle. (Lepola & Makkonen 2006, s. 341.) Ruuvin pituuden valintaan vaikuttavat ehdot liittyvät mutterin ulkopuolelle ulottuvaan kierteeseen ja kierteen pituuteen kiristämisen jälkeen. Ruuvin varren on ulotuttava mutterin pinnan ulkopuolelle vähintään yhden täyden kierteen pituuden verran, mitattuna mutterin ulkopinnasta esijännitetyn ja esijännittämättömän ruuvikokoonpanon ruuvin päähän. Esijännittämättömillä ruuveilla mutterin kantopinnan ja varren kierteettömän osan väliin on jäätävä kierteen päätteen lisäksi vähintään yksi täysi kierre, ja esijännittämättömien ruuvien kiristämisessä kiinnitettävät kokoonpanot on liitettävä tiiviisti yhteen. Jokainen ruuvikokoonpano on saatettava vähintään tiukkaan kiristykseen, kuitenkin lyhyillä ruuveilla ja koon M12 ruuveilla on varottava ylikiristämistä. (SFS-EN 1090-2, s. 55–56.)

Mutterin on kierryttävä vapaasti siihen kuuluvan ruuvin kanssa, minkä tarkastaminen voidaan suorittaa käsin. Muttereiden merkinnän on oltava näkyvissä myös asennuksen jälkeen. Esijännittämättömien ruuvien kanssa ei tavallisesti tarvita aluslaattoja, jos ruuvit asennetaan tavallisiin pyöreisiin reikiin. Jos aluslaattoja edellytetään käytettäväksi, ohjeistuksessa tulee olla maininta siitä, asetetaanko aluslaatta vain kierrettävän osan, joko mutterin tai ruuvin kannan, vai molempien alle. Jos kyseessä on yksileikkeinen päällekkäisjatkos yhdellä ruuvirivillä, aluslaattojen on oltava sekä ruuvin kannan että mutterin alla. (SFS-EN 1090-2, s. 55.) Nykyisin pylväissä aluslaattaa käytetään yleensä aina mutterin alla. Kuvassa 2 on esitetty yksityiskohta erään voimansiirtopylvään ruuviliitoksesta.

Kuva 2. Ruuviliitos.

Ruuviliitoksen suunnittelussa on kuormituksen lisäksi otettava huomioon monia muitakin osa-alueita, muun muassa käyttöolosuhteet, käyttöikä, asentaminen ja huolto, ympäristövaikutukset ja ruuvitalous. Käyttöolosuhteet, kuten kosteus, lämpövaihtelut ja UV-säteily vaikuttavat ruuvin pinnoituksen ja raaka-aineen valintaan. Asentamisessa ja huollossa voidaan ruuvien mitoilla, tyypillä, kiristyksellä ja vääntiöllä vaikuttaa tilan ja voiman tarpeeseen sekä laadun varmistamiseen. Ympäristövaikutukset otetaan huomioon liitosten purettavuudessa ja uusiokäytössä, jotka vaikuttavat raaka-aineen valintaan ja pinnoitteiden käyttöön. Ruuvitaloudessa on otettava huomioon liitoksen kokonaiskustannus ja ruuvituotteiden kustannus, joihin kuuluvat logistiikka, normitus, asennustyö ja yhteistyötoimittajat. Ruuviliitosten kustannuksista ruuvien hankintahinnan osuus on vain 15 %, kustannusten muodostuminen on esitetty kuvassa 3. Muita ruuviliitoksen suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä ovat myös turvatekijät, korvattavuus ja maadoitus. (Suunnitteluopas, 2008.)



Kuva 3. Ruuviliitoksen kokonaiskustannukset (Suunnitteluopas, 2008).

Ruuvien hankintahintaan voidaan vaikuttaa tehokkaalla ostotoiminnalla, hajauttamalla ostoja halvimmille ja tinkimällä laadusta. Muihin kustannuksiin voidaan vaikuttaa kehittämällä logistiikkaa, normitusta ja asennustyötä, käyttämällä monitoimiruuveja, ja tekemällä yhteistyötä ruuvitoimittajan kanssa. Kokonaiskustannuksissa täytyy kuitenkin aina muistaa kokonaisuus, kustannusten alentaminen yhdessä paikassa voi nostaa kustannuksia ja aiheuttaa ongelmia toisessa paikassa. (Suunnitteluopas, 2008.)

Kulmatankosauvojen ruuviliitoksien mitoituksessa käytetään taulukon 3 mukaisia kaavoja leikkauskestävyyden, reunapuristuskestävyyden ja vetokestävyyden varmistamiseksi (SFS EN 50341-1, s. 422–424).

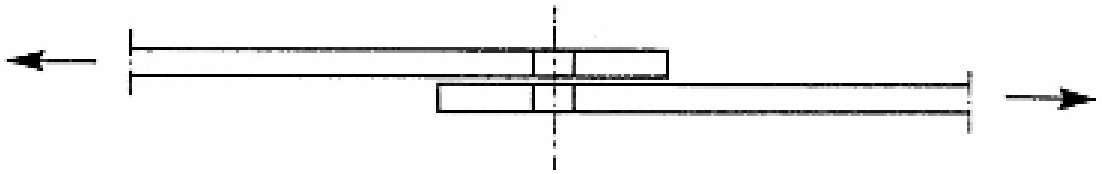
Taulukko 3. Yksittäisten kiinnikkeiden mitoitus leikkauksella ja/tai vedolla (SFS 50341-1, s. 424).

Leikkauskestävyys leikkaustasoa kohden Leikkaustason sijaitessa ruuvin kierteettömällä osalla: $F_{v,Rd} = 0{,}6\, f_{ub}\, A / \gamma_{M2}$ Leikkaustason sijaitessa ruuvin kierteellisellä osalla: $F_{v,Rd} = 0{,}6\, f_{ub}\, A_S / \gamma_{M2}$ luokissa 4.6 – 5.6 – 6.6 – 8.8 $F_{v,Rd} = 0{,}5\, f_{ub}\, A_S / \gamma_{M2}$ luokissa 4.8 – 5.8 – 6.8 – 10.9
Reunapuristuskestävyys ruuvia kohden $F_{b,Rd} = \alpha\, f_u\, d\, t / \gamma_{M2}$ missä α on pienin arvo seuraavista: η_1 3; η_2 1,20 (e_1/d_0) η_3 1,85 $(e_1/d_0 - 0{,}5)$ η_4 0,96 $(P_1/d_0 - 0{,}5)$ η_5 2,3 $(e_2/d_0 - 0{,}5)$ ja η_i ovat pienennyskertoimia. Oletusarvo kullakin kertoimella η_i on 1, mutta pienempiä (konservatiivisempia) arvoja voidaan esittää NNA:ssa. Kertoimen α arvo on silti voimassa, kun ruuvit sijaitsevat kahdessa tai useammassa rivissä ja P_1, e_1 ja e_2 määritellään seuraavasti: P_1 on kahden peräkkäisen samassa rivissä olevan reiän pienin keskiöväli e_1 on etäisyys sauvan päähän sitä lähinnä olevasta ruuvista (reiän keskeltä) e_2 on etäisyys sauvan reunaan sitä lähinnä olevasta ruuvista (reiän keskeltä). Kiinnikeryhmän kestävyyden mitoitusarvona voidaan käyttää yksittäisten kiinnikkeiden reunapuristuskestävyyksien $F_{b,Rd}$ mitoitusarvojen summaa edellyttäen, että kunkin yksittäisen kiinnikkeen leikkauskestävyyden mitoitusarvo $F_{v,Rd}$ on vähintään yhtä suuri kuin reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo $F_{b,Rd}$. Muussa tapauksessa kiinnikeryhmän kestävyyden mitoitusarvona tulisi käyttää ryhmän yksittäisten kiinnikkeiden kestävyyden pienintä mitoitusarvoa kerrottuna kiinnikkeiden lukumäärällä.
Vetokestävyys ruuvia kohden $F_{t,Rd} = 0{,}9\, f_{ub}\, A_S / \gamma_{M2}$
f_u on vetomurtolujuus (sauvamateriaalille) f_{ub} on vetomurtolujuus ruuville A on ruuvin poikkileikkauksen kokonaispinta-ala A_S on ruuvin vetopoikkipinta-ala d on ruuvin halkaisija t, d_0, e_1, e_2, P_1 on määritelty kuvassa J.6 γ_{M2} on määritelty kohdassa 7.3.6.1.

Standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan kuvan 4 mukaisille yksileikkeisille päällekkäisliitoksille, joissa on yksi ruuvirivi, reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ rajoitetaan seuraavasti (SFS-EN 1993-1-8, s. 26):

$$F_{b,Rd} = \frac{1{,}5 * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \tag{1}$$

Kaavassa 1 f_u tarkoittaa liitettävän materiaalin murtolujuutta, d ruuvin nimellishalkaisijaa, t liitettävän materiaalin paksuutta ja γ_{M2} varmuuskerrointa.



Kuva 4. Yksirivinen ja yksileikkeinen päällekkäisliitos.

Ruuveille, joita ei ole tarkoitettu soviteliitoksiksi, nimellisvälysten tulee olla taulukon 4 mukaisia. Nimellisvälys pyöreille rei'ille määritellään reiän nimellishalkaisijan ja ruuvin nimellishalkaisija erona. (SFS-EN 1090-2, s. 36.)

Taulukko 4. Nimellisvälykset ruuveille (SFS-EN 1090-2, s. 36).

Ruuvin tai niveltapin nimellishalkaisija (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27 ja yli
Normaalit pyöreät reiät[a]	1[b, c]		2					3
Ylisuuret pyöreät reiät	3		4				6	8
Lyhyet pidennetyt reiät (pituudelle)[d]	4		6				8	10
Pitkät pidennetyt reiät (pituudelle)[d]	1,5 *d*							

Torneille, mastoille ja vastaaville rakenteille normaalien pyöreiden reikien nimellisvälystä pienennetään 0,5 mm, jollei sitä erikseen estetä. 1 mm:n nimellisvälystä voidaan pinnoitetuille rakenteille suurentaa pinnoitteen paksuuden verran. Ruuveille, joiden nimellishalkaisija on 12 tai 14 mm voidaan käyttää myös 2 mm välystä, mikäli noudatetaan standardin EN 1993-1-8 mukaisia ehtoja. Ruuvien nimellisvälyksen on oltava leveyssuunnassa sama pidennetyillä ja pyöreillä rei'illä. (SFS-EN 1090-2, s. 36.) Ruuvien pienimmät ja suurimmat keskiövälit, sekä reuna- ja päätyetäisyydet on esitetty taulukossa 5 (SFS-EN 1993-1-8, s. 23).

Taulukko 5. Pienimmät ja suurimmat keskiövälit sekä reuna- ja päätyetäisyydet (SFS-EN 1993-1-8, s. 24).

Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli, ks. kuva 3.1	Minimiarvo	Maksimiarvo[1) 2) 3)]		
		EN 10025 mukaisista teräksistä (paitsi EN 10025-5:n mukaiset teräkset) tehdyt rakenteet		EN 10025-5 mukaisista teräksistä tehdyt rakenteet
		Säälle tai muille korroosiorasituksille altis rakenne	Rakenne, joka ei ole altis säälle tai muille korroosiorasituksille	Suojaamaton rakenne
Päätyetäisyys e_1	$1{,}2d_0$	$4t + 40$ mm		Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm
Reunaetäisyys e_2	$1{,}2d_0$	$4t + 40$ mm		Suurempi arvoista $8t$ or 125 mm
Etäisyys e_3 Pidennetyissä rei`issä	$1{,}5d_0$ [4)]			
Etäisyys e_4 Pidennetyissä rei`issä	$1{,}5d_0$ [4)]			
Keskiöväli p_1	$2{,}2d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{min}$ ja 175 mm
Keskiöväli $p_{1,0}$		Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm		
Keskiöväli $p_{1,1}$		Pienempi arvoista $28t$ ja 400 mm		
Keskiöväli p_2 [5)]	$2{,}4d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{min}$ ja 175 mm

1) Keskiöväleillä, pääty- ja reunaetäisyyksillä ei ole ylärajaa paitsi seuraavissa tapauksissa:

- puristetuissa rakenneosissa paikallisen lommahduksen ja korroosion välttämiseksi korroosiorasituksen alaisena ja;
- korroosiorasitukselle alttiit vedetyt rakenneosat korroosion välttämiseksi.

2) Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallinen lommahdus lasketaan standardin EN 1993-1-1 mukaan olettamalla levy pilariksi ja käyttämällä nurjahduspituutena arvoa $0{,}6p_1$. Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallista lommahdusta ei tarvitse tarkistaa, jos p_1/t on pienempi kuin 9ε. Reunaetäisyys saa olla enintään ulokkeelliselle puristetulle taso-osalle esitetyn arvon suuruinen paikallisen lommahduksen estämiseksi, ks. standardi EN 1993-1-1. Tämä vaatimus ei koske päätyetäisyyttä.

3) t on uloimman liitettävän osan pienempi paksuus.

4) Pidennettyjen reikien raja-arvot esitetään kohdan 1.2.7 mukaisessa viitestandardiryhmässä 7.

5) Limitetyille kiinnitinriveille voidaan käyttää minimiarvoa $p_2 = 1{,}2d_0$, jos kahden limityksessä olevan kiinnittimen välinen minimietäisyys $L \geq 2{,}4d_0$, ks. kuva 3.1b).

2.1 Käytettävät standardit

Tässä esitellään työhön liittyvät standardit, joihin kuuluvat yleisesti voimansiirtolinjoja, niiden materiaaleja ja niissä käytettäviä ruuveja käsittelevät standardit.

Standardin SFS-EN 50341 ensimmäinen osa, eli perusosa, käsittelee vaihtosähköilmajohtoja yli 1 kV jännitteillä ja alle 100 Hz nimellistaajuuksilla. Tähän standardiin sisältyvät yleiset vaatimukset ja yhteiset määrittelyt. Näillä varmistetaan, että johto soveltuu tarkoitukseensa henkilöturvallisuuden, kunnossapidon, käytön ja ympäristötekijöiden perusteella. Standardissa määritellään yleiset vaatimukset, joita noudatetaan uusien ilmajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa. (SFS-EN 50341-1, s. 32.)

Standardin toisessa osassa on luetteloitu kaikki kansalliset velvoittavat määrittelyt, jotka käsitellään tarkemmin standardin kolmannessa osassa. Suomen kansallinen velvoittava määrittely eli NNA on numero SFS-EN 50341-3-7. Kansallisiin käytäntöihin sisältyy yleisesti A-poikkeuksia, kansallisia erityisolosuhteita ja täydentäviä määräyksiä. A-poikkeuksia ovat standardista eroavat kansalliset lait ja säädökset, joita ei pystytä muuttamaan standardia valmistellessa. Kansallisia erityisolosuhteita ovat käytännöt tai ominaisuudet, joita ei voida muuttaa pitkälläkään aikavälillä, kuten esimerkiksi ilmastolliset olosuhteet ja maaperän resistiivisyys. Täydentävät määräykset ovat kansallisia käytäntöjä, jotka eivät sisälly kumpaankaan edellä mainittuun, ja ne tulisi vaiheittain yhdenmukaistaa standardin perusosan kanssa. (SFS-EN 50341-1, s. 30.)

Voimajohtopylväissä käytettävän rakenneteräksen on oltava vaatimuksiltaan ja ominaisuuksiltaan standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaista. Tämä standardi on Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Ruuvien, muttereiden ja aluslaattojen vaatimuksien ja ominaisuuksien on oltava standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisia. (SFS-EN 50341-1, s. 214.) Ruuvien mitoituskestävyys leikkaukselle, vedolle tai reunapuristukselle määritetään joko standardin SFS-EN 1993-1-8:2005 kohdan 3 mukaisesti, tai standardin SFS-EN 50341-1 liitteen J.5 mukaisesti (SFS-EN 50341-1, s. 228). Liitteessä J.5 olevat mitoitusohjeet on esitetty aikaisemmin taulukossa 2.

SFS-EN 1090-1 käsittelee teräs- ja alumiinirakenteiden toteutusta, ja SFS-EN 1090-2 sisältää teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset, joilla varmistetaan riittävä mekaaninen kestävyys ja stabiilius, käytettävyys ja ominaisuuksien säilyvyys. SFS-EN 1993-1-3 on Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-3: yleiset säännöt ja lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille.

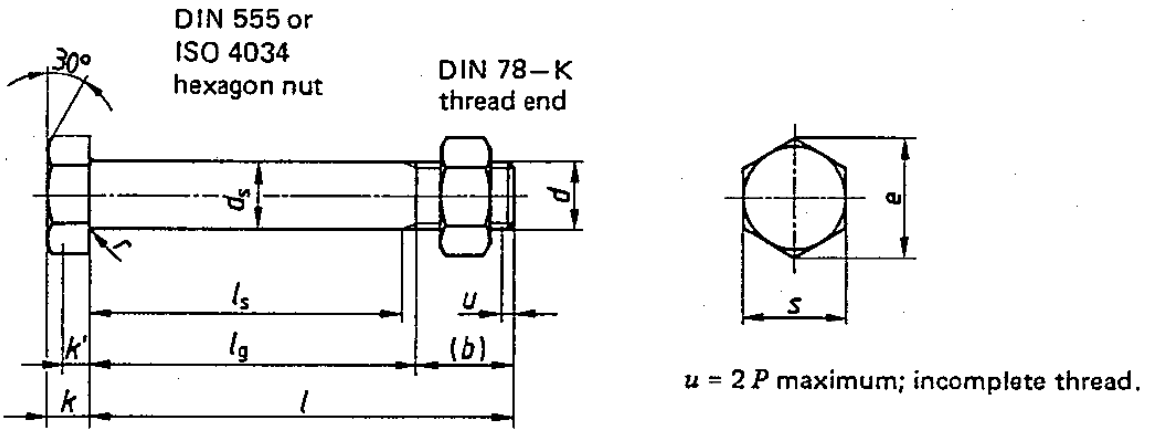
Ruuviliitosten toimivuuden varmistamisessa noudatetaan myös standardia SFS-EN 15048-1, joka käsittelee esijännittämättömien kantavien rakenteiden ruuviliitoksia ja niiden yleisiä vaatimuksia. Nämä vaatimukset varmistavat ruuvi-mutteri-aluslaatta –kokoonpanojen soveltuvan esijännittämättömiin kantavien rakenteiden ruuviliitoksiin. Tämän standardin mukaisia ruuviliitosten komponentteja on pystyttävä leikkaus- ja/tai vetokuormittamaan. Esijännittämättömien kantavien rakenteiden ruuviliitosten mitoitus- ja toteutussäännöt on määritelty esimerkiksi standardeissa EN 1993-1-8 ja EN 1090-2 luvussa 8.2. (SFS-EN 15048-1, s.6.)

Standardissa DIN 7990 käsitellään lyhyitä osittaiskierteisiä kuusioruuveja, tälle standardille ei löydy ISO- tai SFS- vastaavuutta. Standardi DIN 931 käsittelee myös osittaiskierteisiä kuusioruuveja, ja tälle löytyy SFS-standardivastaavuus, SFS-EN ISO 4014. Standardi DIN 933 käsittelee täyskierteisiä kuusioruuveja, ja myös tälle löytyy SFS-vastaavuus, SFS-EN ISO 4017. Standardit 4014 ja 4017 käsittelevät tarkkuusluokkia A ja B, standardi 4015 tarkkuusluokkaa B (keskivarsi) ja standardit 4016 ja 4018 tarkkuusluokkaa C. SFS-EN 4014 ja 4017 ovat standardin EN 1993-1-8 viitestandardeja ja kuuluvat standardin EN 15048-1 CE-merkinnän piiriin. (Teräsrakenneyhdistys, 2014.)

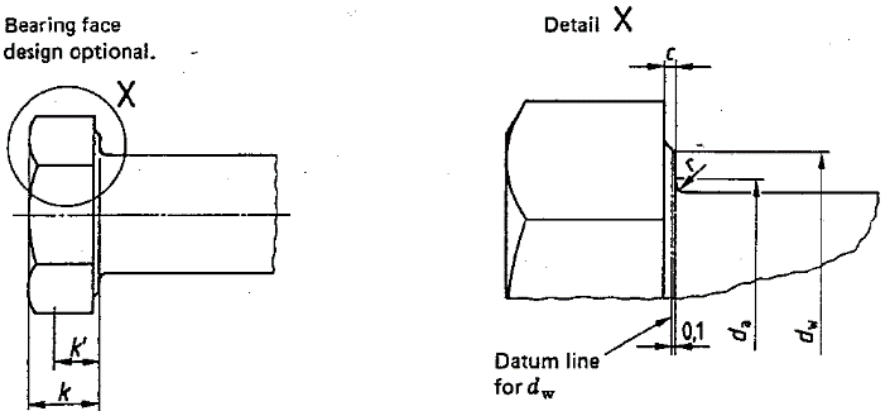
Standardissa SFS-EN 15048-1 luvussa 5 käsitellään testaamista vaatimustenmukaisuuden määrittämiseksi ja luvussa 6 vaatimusten mukaisuuden arviointia. Tehtaan sisäisestä laadunvalvonnasta yleistä tietoa käsitellään standardin SFS-EN 1090-1 + A1 luvussa 6.3. Standardin SFS-EN 1090-2 + A1 luvussa 9 ohjeistetaan asentamista ja työmaatyöskentelyä.

2.2 Osittaiskierteiset kuusioruuvit

Osittaiskierteisille ruuveille käytetään kahta eri standardia. Standardin DIN 7990 mukaiset lyhyiden osittaiskierteisten kuusioruuvien mitat näkyvät kuvissa 5 ja 6. Taulukossa 6 on esitetty eri kierrekokojen mitat. (DIN 7990, s. 1.)



Kuva 5. Ruuvin mitat DIN 7990 mukaan (DIN 7990, s.1).



Kuva 6. Yksityiskohta kuvasta 5 (DIN 7990, s. 1).

Taulukko 6. Kierrekokojen mitat standardin DIN 7990 mukaan (DIN 7990, s. 2).

Thread size (d)			M 12		M 16		M 20		M 22		M 24		M 27		M 30	
P [1]			1,75		2		2,5		2,5		3		3		3,5	
b (auxiliary dimension)			17,75		21		23,5		25,5		26,		29		30,5	
c	max.		0,6		0,8		0,8		0,8		0,8		0,8		0,8	
d_a	max.		14,7		18,7		24,4		26,4		28,4		32,4		35,4	
d_s	Nominal size		12		16		20		22		24		27		30	
	min.		11,3		15,3		19,16		21,16		23,16		26,16		29,16	
	max.		12,7		16,7		20,84		22,84		24,84		27,84		27,84	
d_w	min.		16,4	17,2	22		27,7		31,4	29,5	33,2		38		42,7	
e	min.		19,85	20,88	26,17		32,95		37,29	35,03	39,55		45,20		50,85	
k	Nominal size		8		10		13		14		15		17		19	
	min.		7,55		9,25		12,1		13,1		14,1		16,1		17,95	
	max.		8,45		10,75		13,9		14,9		15,9		17,9		20,05	
k'	min.		5,28		6,47		8,47		9,17		9,87		11,27		12,56	
r	min.		0,6		0,6		0,8		0,8		0,8		1		1	
s	max. = nominal size		18[2])	19	24		30		34[2])	32	36		41		46	
	min.		17,57	18,48	23,16		29,16		33	31	35		40		45	
l			Lengths l_s*) and l_g**)													
Nominal size	min.	max.	l_s min.	l_g max.	l_s min.	l_g max.	l_s min.	l_g max.	l_s min.	l_g max.	l_s min.	l_g max.	l_s min.	l_g max.	l_s min.	l_g max.
30	28,95	31,05	7	12,25												
35	33,75	36,25	12	17,25	8	14										
40	38,75	41,25	17	22,25	13	19	9	16,5	7	14,5						
45	43,75	46,25	22	27,25	18	24	14	21,5	12	19,5	10	19				
50	48,75	51,25	27	32,25	23	29	19	26,5	17	24,5	15	24				
55	53,5	56,5	32	37,25	28	34	24	31,5	22	29,5	20	29				
60	58,5	61,5	37	42,25	33	39	29	36,5	27	34,5	25	34	22	31		
65	63,5	66,5	42	47,25	38	44	34	41,5	32	39,5	30	39	27	36		
70	68,5	71,5	47	52,25	43	49	39	46,5	37	44,5	35	44	32	41		
75	73,5	76,5	52	57,25	48	54	44	51,5	42	49,5	40	49	37	46		
80	78,5	81,5	57	62,25	53	59	49	56,5	47	54,5	45	54	42	51	39	49,5
85	83,25	86,75	62	67,25	58	64	54	61,5	52	59,5	50	59	47	56	44	54,5
90	88,25	91,75	67	72,25	63	69	59	66,5	57	64,5	55	64	52	61	49	59,5
95	93,25	96,75	72	77,25	68	74	64	71,5	62	69,5	60	69	57	66	54	64,5
100	98,25	101,75	77	82,25	73	79	69	76,5	67	74,5	65	74	62	71	59	69,5
105	103,25	106,75	82	87,25	78	84	74	81,5	72	79,5	70	79	67	76	64	74,5
110	108,25	111,75	87	92,25	83	89	79	86,5	77	84,5	75	84	72	81	69	79,5
115	113,25	116,75	92	97,25	88	94	84	91,5	82	89,5	80	89	77	86	74	84,5
120	118,25	121,75	97	102,25	93	99	89	96,5	87	94,5	85	94	82	91	79	89,5
125	123	127			98	104	94	101,5	92	99,5	90	99	87	96	84	94,5
130	128	132			103	109	99	106,5	97	104,5	95	104	92	101	89	99,5
135	133	137			108	114	104	111,5	102	109,5	100	109	97	106	94	104,5
140	138	142			113	119	109	116,5	107	114,5	105	114	102	111	99	109,5
145	143	147			118	124	114	121,5	112	119,5	110	119	107	116	104	114,5
150	148	152			123	129	119	126,5	117	124,5	115	124	112	121	109	119,5
155	151	159					124	131,5	122	129,5	120	129	117	126	114	124,5
160	156	164					129	136,5	127	134,5	125	134	122	131	119	129,5
165	161	169					134	141,5	132	139,5	130	139	127	136	124	134,5
170	166	174					139	146,5	137	144,5	135	144	132	141	129	139,5
175	171	179					144	151,5	142	149,5	140	149	137	146	134	144,5
180	176	184							147	154,5	145	154	142	151	139	149,5
185	180,4	189,6							152	159,5	150	159	147	156	144	154,5
190	185,4	194,6							157	164,5	155	164	152	161	149	159,5
195	190,4	199,6							162	169,5	160	169	157	166	154	164,5
200	195,4	204,6							167	174,5	165	174	163	172	159	169,5

Commercial sizes of hexagon bolts are those for which lengths l_s and l_g have been specified.

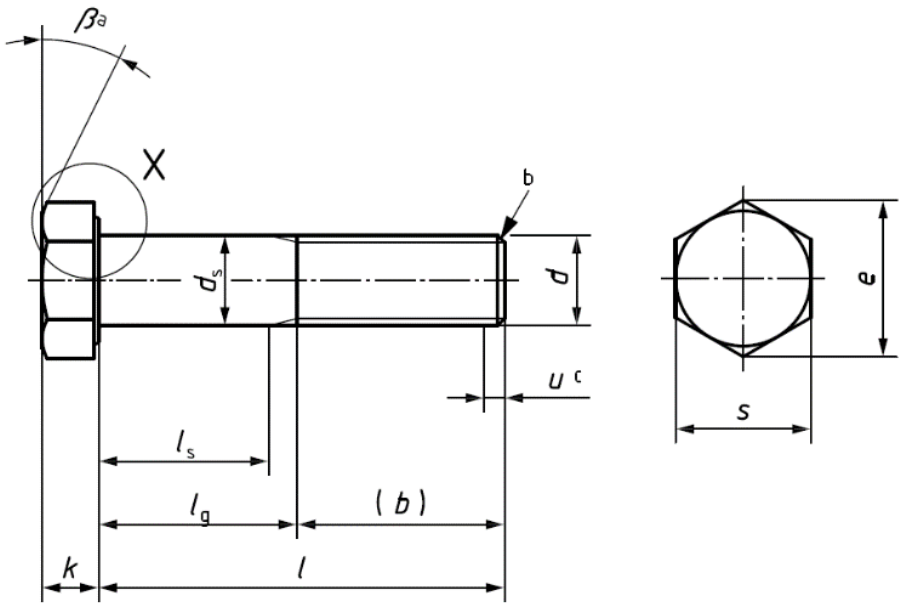
*) $l_{s\,min} = l_{g\,max} - 3\,P$.

**) $l_{g\,max} = l_{nominal\,size} - b$.

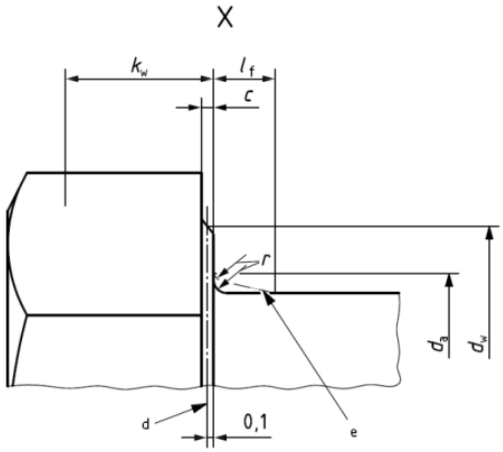
1) P = pitch of thread.

2) Where bolts with nuts are ordered, the nuts to be supplied shall comply with ISO 4034 (see foreword on page 1).

Kuvissa 7 ja 8 näkyvät osittaiskierteisten kuusioruuvien käytettävät mitat standardin SFS-EN ISO 4014:n mukaan. Standardissa SFS-EN ISO 225 on määritetty käytetyt symbolit ja mittojen määrittely. Kulman β suuruus on välillä 15°-30°. Pisteen b on oltava pyöristetty. Kohdassa d on merkitty vertailutaso mitalle d_w, ja kohdassa e suurin sallittu pyöristys pultin pään alapuolella. (SFS-EN ISO 4014, s. 14.)



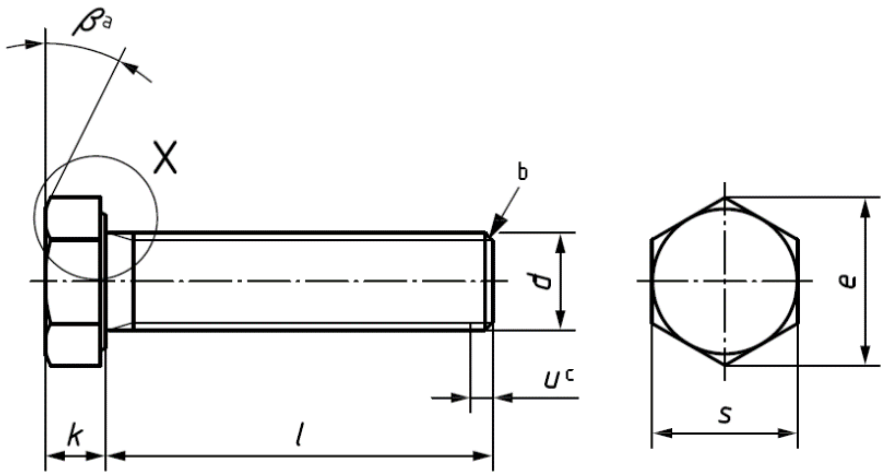
Kuva 7. Osittaiskierteisen kuusioruuvin mitat (SFS-EN ISO 4014, s. 14).



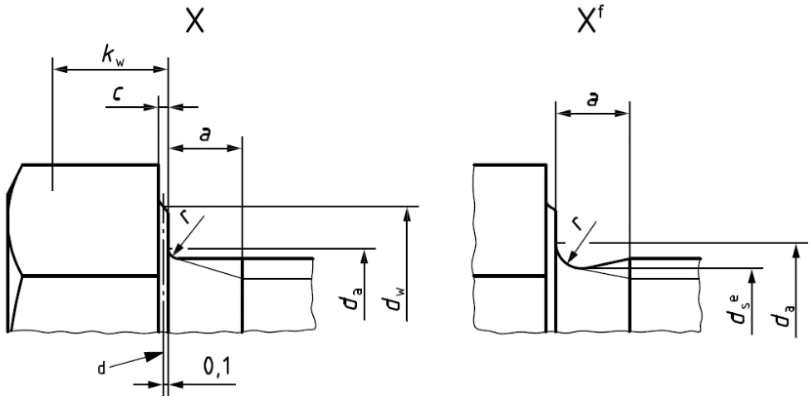
Kuva 8. Yksityiskohta X kuvasta 7 (SFS-EN ISO 4014, s. 14).

2.3 Täyskierteiset kuusioruuvit

Kuvissa 9 ja 10 näkyvät täyskierteisten kuusioruuvien käytettävät mitat. Standardissa SFS-EN ISO 225 on määritetty käytetyt symbolit ja mittojen määrittely. Kulman β suuruus on välillä 15°-30°. Pisteen b on oltava pyöristetty. Kohdassa u^c merkitty puutteellisen kierteen osuus u on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin 2*P. Kohdassa d on merkitty vertailutaso mitalle d_w. Mitta d_s on suunnilleen kylkihalkaisija. Yksityiskohdassa X^f näkyy hyväksytty muoto. (SFS-EN ISO 4017, s. 14.)



Kuva 9. Täyskierteisen kuusioruuvin mitat (SFS-EN ISO 4017, s. 14).



Kuva 10. Yksityiskohta X kuvasta 9 (SFS-EN ISO 4017, s. 14).

3 RUUVILIITOSTEN LUJUUSLASKENTA

Ruuvien kestävyyden mitoitusarvojen laskenta kulmatangoissa on esitetty aikaisemmin taulukossa 2. Tässä luvussa lasketaan leikkauskestävyys, reunapuristuskestävyys ja vetokestävyys osittaiskierteiselle ja täyskierteiselle ruuville taulukossa 2 esitettyjen kaavojen mukaisesti. Laskennan tulokset esitetään luvussa 7, ja tarkemmat laskut löytyvät liitteestä I. Kaavat on esitetty numeroituina tämän kappaleen alla. Yksileikkeisen liitoksen leikkauskestävyys lasketaan seuraavasti:

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6 * f_{ub} * A}{\gamma_{Mb}} \tag{2}$$

Yhtälössä 2 f_{ub} on materiaalin murtolujuus, A on ruuvin poikkipinta-ala ja γ_{Mb} on liitoksen osavarmuuskerroin.

Reunapuristuskestävyys lasketaan seuraavasti:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \tag{3}$$

Yhtälössä 3 f_u on materiaalin murtolujuus, d on ruuvin halkaisija, t on liitettävän materiaalin paksuus, γ_{M2} on materiaalin osavarmuuskerroin ja α on kerroin, josta yhtälössä käytetään pienintä seuraavilla yhtälöillä saatua arvoa:

$$\alpha = 1{,}20 * (\frac{e_1}{d_o}) \tag{4}$$

$$\alpha = 1{,}85 * (\frac{e_1}{d_o} - 0{,}5) \tag{5}$$

$$\alpha = 0{,}96 * (\frac{P_1}{d_o} - 0{,}5) \tag{6}$$

$$\alpha = 2{,}3 * (\frac{e_2}{d_o} - 0{,}5) \tag{7}$$

Yhtälössä 4 e_1 on etäisyys reiän keskeltä kulmatangon lähimpään päähän, ja d_0 on reiän halkaisija. Yhtälössä 5 on samat muuttujat kuin yhtälössä 4. Yhtälössä 6 P_1 on reikäväli kuormituksen suunnassa, ja yhtälössä 7 e_2 on reunaetäisyys reiän keskeltä kulmatangon lähimpään reunaan.

Vetokestävyys lasketaan seuraavasti:

$$F_{t,Rd} = \frac{0{,}9 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{Mb}} \tag{8}$$

Yhtälössä 8 A_s on ruuvin jännityspoikkipinta-ala, eli pinta-ala kierteen kapeimmalta kohdalta. Muut muuttujat on mainittu jo aikaisemmin. Laskennassa käytettävät nimelliset halkaisijat sekä jännitysalat erikokoisille ruuveille löytyvät taulukosta 7.

Taulukko 7. Halkaisijat ja jännitysalat (SFS-EN ISO 898-1).

Thread[a] d	Nominal stress area $A_{s,nom}$[b] mm^2	Property class								
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9/12.9
		Minimum ultimate tensile load, $F_{m,min}$ ($A_{s,nom} \times R_{m,min}$), N								
M8	36,6	14 600[c]	15 400	18 300[c]	19 000	22 000	29 200[c]	32 900	38 100[c]	44 600
M10	58	23 200[c]	24 400	29 000[c]	30 200	34 800	46 400[c]	52 200	60 300[c]	70 800
M12	84,3	33 700	35 400	42 200	43 800	50 600	67 400[d]	75 900	87 700	103 000
M14	115	46 000	48 300	57 500	59 800	69 000	92 000[d]	104 000	120 000	140 000
M16	157	62 800	65 900	78 500	81 600	94 000	125 000[d]	141 000	163 000	192 000
M18	192	76 800	80 600	96 000	99 800	115 000	159 000	—	200 000	234 000
M20	245	98 000	103 000	122 000	127 000	147 000	203 000	—	255 000	299 000
M22	303	121 000	127 000	152 000	158 000	182 000	252 000	—	315 000	370 000
M24	353	141 000	148 000	176 000	184 000	212 000	293 000	—	367 000	431 000

[a] Where no thread pitch is indicated in a thread designation, coarse pitch is specified.

[b] To calculate $A_{s,nom}$, see 9.1.6.1.

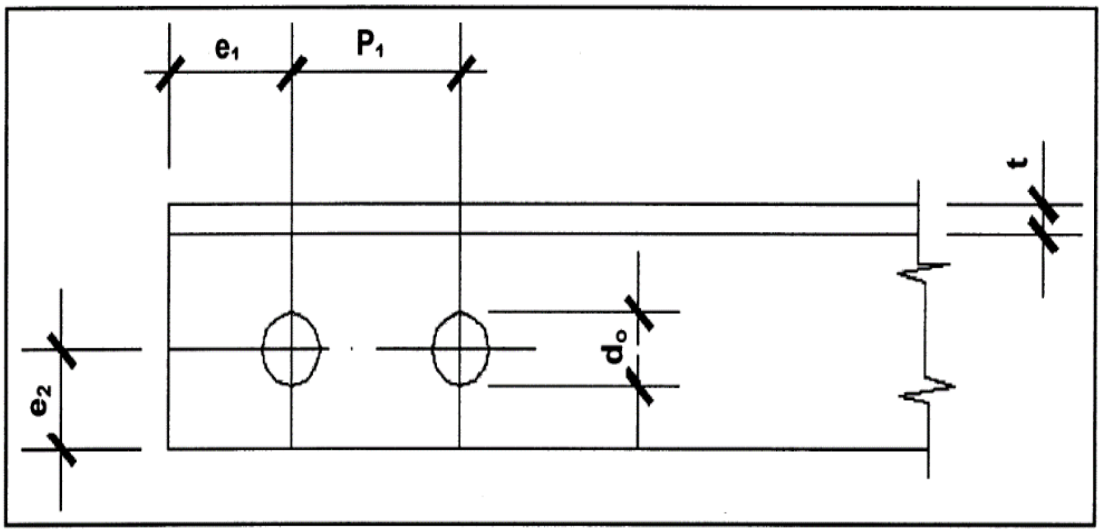
[c] For fasteners with thread tolerance 6az in accordance with ISO 965-4 subject to hot dip galvanizing, reduced values in accordance with ISO 10684:2004, Annex A, apply.

[d] For structural bolting 70 000 N (for M12), 95 500 N (for M14) and 130 000 N (for M16).

3.1 Osittaiskierteisen ruuvin lujuuslaskenta

Osittaiskierteiselle ruuville suoritetaan leikkauskestävyyden laskut käyttämällä suoraan kaavaa 2, eli leikkaustason sijaitessa ruuvin kierteettömällä osalla. Laskenta tehdään muutamalle eri ruuvikoolle, jotka ovat M12, M16, M20 ja M24. Laskennassa käytetään apuna Mathcad-ohjelmaa.

Reunapuristuskestävyyden laskenta suoritetaan käyttämällä kaavaa 3. Kaavoilla 4- 7 lasketaan α, ja pienintä saatua arvoa käytetään laskennassa. Kaavoissa α:n laskentaan tarvitaan kertoimia e_1, e_2 ja P_1. Nämä tarkoittavat etäisyyttä reiän keskeltä kulmatangon lähimpään päähän, reunaetäisyyttä reiän keskeltä kulmatangon lähimpään reunaan ja reikäväliä kuorman suunnassa. Kuvassa 11 on esitetty ruuvien sijainti yhdestä laipasta kiinnitetyssä kulmatangossa standardin SFS-EN ISO 50341-1 mukaisesti, ja kuvassa näkyvät myös symbolit e_1, e_2 ja P_1. Reunapuristuskestävyys lasketaan myös standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisesti kaavalla 1.



Kuva 11. Ruuvien sijainti yhdestä laipasta kiinnitetyssä kulmatangossa (SFS-EN ISO 50341-1, s. 422).

3.2 Täyskierteisen ruuvin lujuuslaskenta

Laskennassa käytetään samoja ruuvikokoja kuin osittaiskierteisten ruuvien laskuissa. Täyskierteiselle ruuville käytetään leikkaustason laskennassa muuten samaa kaavaa 1 kuin osittaiskierteisellä, mutta ruuvin poikkipinta-alan A sijaan käytetään vetopoikkipinta-alaa A_s, eli leikkaustason sijaitessa ruuvin kierteellisellä osalla. Reunapuristuskestävyyttä ei lasketa erikseen täyskierteiselle ruuville, koska kaavassa 2 käytettävä nimellishalkaisija d on sama molemmissa. Vetokestävyyden laskennassa käytetään vetopoikkipinta-alaa A_s.

4 VOIMANSIIRTOLINJOJEN KUORMITUKSET

Tässä kappaleessa esitellään voimansiirtolinjoihin kohdistuvia kuormituksia, jotka otetaan voimansiirtolinjojen suunnitelussa huomioon. Näitä kuormituksia käytetään myös mallinnusohjelma Ftowerissa, joka esitellään tarkemmin luvussa 5.

Kuormitus *F* on joko välitön tai välillinen kuormitus. Välitön kuormitus vaikuttaa pylväisiin, perustuksiin ja johtimiin, välillinen kuormitus on esimerkiksi pakotettu tai estetty muodonmuutos, joka voi aiheutua lämpötilaeroista, pohjaveden korkeuden muutoksista tai epätasaisesta painumasta. (SFS-EN 50341-1, s. 84.)

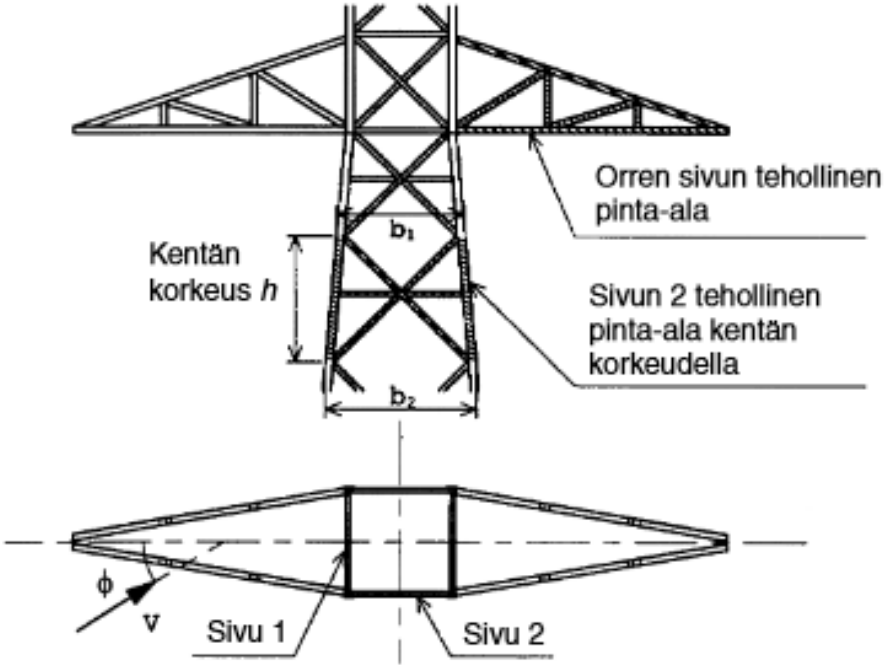
Kuormitukset voidaan luokitella myös ajan mukana muuttuvina sekä niiden luonteen ja/tai rakenteen vasteen perusteella. Ajan mukana tapahtuvaan kuormitusten muuttumiseen luokitellaan pysyvä kuormitus *G*, muuttuvat kuormitukset *Q* ja satunnaiset kuormitukset *A*. Kuormitusten luonteen ja/tai vasteen perusteella luokiteltavia ovat staattiset ja dynaamiset kuormitukset. (SFS-EN 50341-1, s. 84.)

Pysyvää kuormitusta on esimerkiksi pylväiden omapaino, johon otetaan huomioon myös perustukset, varusteet ja kiinteät laitteet. Myös johtimien omapaino ja johdinvoiman aiheuttamat vaikutukset (referenssilämpötilassa) sekä pylväiden epätasaisen painuman aiheuttamat vaikutukset tulkitaan pysyviksi kuormituksiksi. Muuttuvia kuormituksia ovat esimerkiksi tuulikuormat, jääkuormat tai muut hyötykuormat. Tuuli- ja jääkuormia sekä lämpötilan aiheuttamia muutoksia voidaan määritellä tilastollisin menetelmin, koska ne ovat ilmastollisia tiloja. Niitä voidaan tarkastella myös deterministisin perustein, kuten hyötykuormia, jotka aiheutuvat esimerkiksi johtimen kiristyksestä tai kiipeämisestä rakenteisiin. Satunnaisia kuormituksia ovat mm. johtimen katkeamisesta aiheutuvat kuormat ja lumivyöryt. (SFS-EN 50341-1, s. 84.)

Dynaamiset kuormitukset aiheuttavat merkittäviä kiihtyvyyksia komponenteissa tai osissa verrattuna staattisiin kuormituksiin, joiden aiheuttamat kiihtyvyydet eivät ole merkittäviä.

Yleensä kvasi-staattisten kuormitusten, kuten tuulikuormien, ekvivalenttia staattista vaikutusta voidaan käyttää ilmajohtojen pylväiden ja perustusten suunnitelussa. (SFS-EN 50341-1, s. 84.)

Johtimiin ja eristimiin siirtyvät voimat aiheuttavat ristikkopylväiden tuulikuormia, sekä suoraan pylvääseen itseensä kohdistuvat tuulenpaineet. Ristikkopylväälle, jonka poikkileikkaus on suorakulmion muotoinen, voimat on laskettava valituilla korkeusväleillä oleville runko-osille eli kentille. Kentän korkeus on yleensä kahden peräkkäisen diagonaalien paarteissa olevan kiinnityspisteen välinen etäisyys, mikä näkyy kuvassa 12. (SFS-EN 50341-1, s. 118.)



Kuva 12. Kentän korkeus ristikkopylväässä (SFS-EN 50341-1, s. 122)

Eri tyyppisille pylväille kuormat on valittava oikein ottamalla huomioon määritellyt kapasiteetit ja aiottu tarkoitus. Yleensä erotetaan toisistaan kannatuspylväät ja kiristyspylväät. (SFS-EN 50341-1, s. 102.)

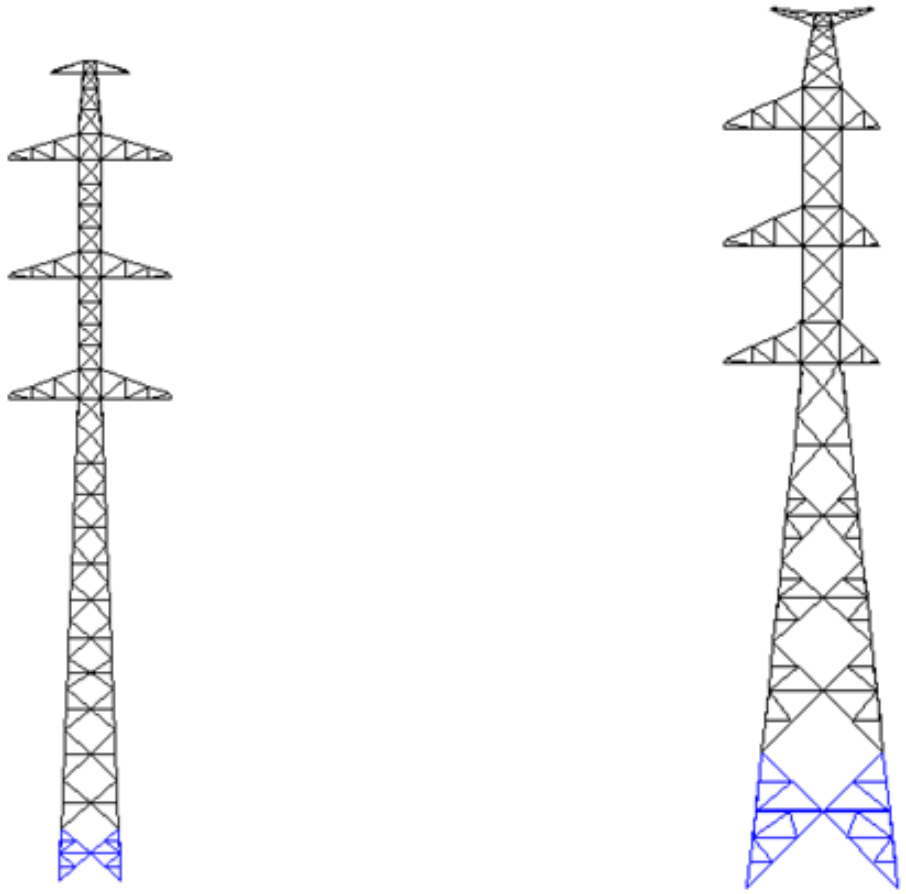
Pylväät luokitellaan niiden tarkoituksen ja niille sopivien kuormitustapausten mukaan. Asianomaisten kuormitusten mukaan kuorma voidaan jaotella kolmeen ryhmään; pylväiden runkoihin, orsiin ja ukkosulokkeisiin, normaaleihin kuormitustapauksiin (rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset kuormitustapaukset) sekä vääntökuormiin. (SFS-EN 50341-1, s. 144.)

5 LASKENTA FTOWER -OHJELMALLA

Ruuvien lujuuksia tarkastellaan myös Ftower 2012 Edition –ohjelmalla. Wintrans –ohjelma Ftoweria käytetään staattisiin analyyseihin ja erityyppisten itsekantavien ristikkopylväiden suunnitteluun voimasiirtolinja- ja telekommunikaatiotarkoituksiin. Ristikkopylväät voivat olla T- tai Y-pylväitä, ja niihin voi kuulua useita poikkiorsia. Pylvään poikkileikkaus voi olla neliö tai suorakulmio. (Riisiö, 2013)

Ftower -ohjelmassa verrataan kahdelle eri pylvästyypille osittaiskierteisten ja täyskierteisten ruuvien eroja. Pylvästyypit ovat suoran linjan vapaasti seisova pylväs ja kiristäjäpylväs, ja molemmat ovat T-pylväitä. Molemmat pylvästyypit esitetään kuvassa 13. Kuvassa vasemmalla puolella on suoran linjan vapaasti seisova pylväs, jonka tarkempi malli on 1T. Tämä on Fingridin standardipylväs FG-110-3-050. Kuvassa oikealla puolella oleva kiristyspylväs, tarkemmalta malliltaan 4T, on myös Fingridin standardipylväs FG 110-3-056.

Pylväiden rakenne jaetaan kenttiin. 1T-pylvään mallissa on yhteensä 28 kenttää, ja 4T-pylvään mallissa on 17 kenttää. Kuvassa molemmille pylvästyypeille on merkitty sinisellä kenttä numero 1. Molempien pylväiden korkeus ensimmäiseen poikkiorteen asti on 20 metriä, ja kummankin poikkileikkaus on neliö. 1T-pylväälle poikkileikkauksen sivun pituus pylvään tyvessä on 2,57 metriä ja ensimmäisen poikkiorren kohdalla 1 metri. 4T-pylväälle sivun pituus pylvään tyvessä on 5,86 metriä, ja ensimmäisen poikkiorren kohdalla 1,6 metriä.



Kuva 13. 1T- ja 4T-pylväät.

Aluksi molemmille pylvästyypeille analysoidaan nykytilanne osittaiskierteisillä ruuveilla vertailukohdan saamiseksi. Tämän jälkeen muutetaan ruuvien parametrit vastaamaan täyskierteisiä ruuveja, ja mahdollisesti muutetaan myös muita osia, jos ruuvityyppien muutos sitä vaatii. Alustavasti pidetään mahdollisena, että ruuvien koko voi kasvaa, ja tämän seurauksena myös kulmarautojen kokoa joudutaan muuttamaan, mikä taas saattaa vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi tuulikuormien osuuteen. Lisäksi rakenteen paino saattaa kasvaa. Tarvittaessa tarkastellaan myös materiaalien lujuutta. Mikäli joudutaan muuttamaan esimerkiksi ruuvien ja/tai kulmarautojen kokoa, pystyttäisiinkö lujemmilla materiaaleilla käyttämään samoja kokoja kuin osittaiskierteisillä ruuveilla. Tällä hetkellä kulmarautojen materiaali on rakenneterästä S355, ja ruuvien lujuusluokka on 8.8. Käytettävien standardien perusteella suurin

mahdollinen lujuusluokka olisi S960 (SFS-EN 1090-2, s. 7). Fingridin ohjeiden mukaan materiaalin suurin mahdollinen myötölujuus ei saa olla yli 490 N/mm^2. Jos ruuvien lujuusluokkaa jouduttaisiin nostamaan luokkaan 10.9, ruuvien valmistusprosessissa pitäisi erityisesti pinnoitusprosessin aikana ottaa huomioon vetyhaurastumisen vaara (SFS-EN 15048-1, s. 12). Lujuusluokan 10.9 ruuveille ei saa tehdä korkealämpötilasinkitystä mikrohalkeamien välttämiseksi (SFS-EN ISO 10684+AC, s. 12), joten jouduttaisiin mahdollisesti käyttämään vaihtoehtoisia pinnoitusprosesseja. Normaalisti sinkkisulan lämpötila sinkityksessä on 455–480 °C, ja kuumasinkityksessä 530–560 °C. Sinkitystä ei saa tehdä sinkkisulan lämpötilan ollessa välillä 480–530 °C. (SFS-EN ISO 10684+AC, s. 12.)

Ohjelmassa käytettäviä tietoja ovat mm. materiaali, ruuvit, käytettävien kulmarautojen profiilit, pylväs, redundantit, kehykset, orret, kuormat ja voimat. Määritettäviä materiaaliparametreja ovat kimmomoduuli *Emod*, tiheys *Dens*, myötölujuus *fy*, murtolujuus *fu* ja vähennyskerroin *Rnet*. Vähennyskerrointa käytetään ruuviliitosten nettopinta-alan sallitun jännityksen laskentaan. Määritettävien materiaaliparametrien perusteella lasketaan ruuviliitosten sallittu murtolujuus *Tnet*, mikä on murtolujuus kerrottuna vähennyskertoimella. Sallittu jännitys *Sall* kokonaispoikkipinta-alalle lasketaan myötölujuus jaettuna varmuuskertoimella. Paino muodostuu rakenteen kokonaismassasta, mukaan lukien ruuvit. Laskennassa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty kuvassa 14.

Material properties

Nr	Material name	Emod	Dens	Fy	Fu	Rnet	Ctemp	Tnet	Sall	Weight
										4899
1	Rst37-2	210000	7,85	355	510	0,90	0,000012	367	323	4899

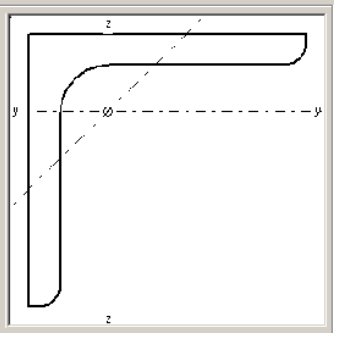
Kuva 14. Ftowerin materiaaliparametrit.

Kulmarautojen käytettävä profiilit ja niiden mitat näkyvät kuvassa 15. Taulukkoon on merkitty profiilityyppi *Ty*, joka on tässä tapauksessa 4, eli 90 ° kulmassa oleva L-teräs. *M* on materiaalinumero, *B1* laipan leveys, *B2* vapaan laipan leveys epäsymmetrisessä L-teräksessä, *T* laipan paksuus ja *R* sisäsäde. *A* on poikkileikkauksen kokonaispinta-ala, *i-n*, *i-z* ja *i-y* ovat

jäyhyyssäteitä akselien *n-n*, *z-z* ja *y-y* suhteen, ja *e-z* ja *e-y* ovat maksimireunaetäisyydet akselien *z-z* ja *y-y* suhteen. *Ltot* on mallin kokonaispituus, ja *Wtot* kokonaispaino.

Profile dimensions

Nr	Profile name	Ty	M	B1	B2	T	R	Gap	A	i-n	i-z	i-y	e-z	e-y	Ltot	Wtot
1	L35x4 DIN	4	1	35	0	4,0	6,0		268	6,7	10,4	10,4	25,0	25,0	95,9	198
2	L40x4 DIN	4	1	40	0	4,0	6,0		308	7,8	12,1	12,1	28,8	28,8	171,7	407
3	L50x5 DIN	4	1	50	0	5,0	7,0		480	9,7	15,1	15,1	36,0	36,0	514,9	1904
4	L60x6 DIN	4	1	60	0	6,0	8,0		691	11,7	18,2	18,2	43,1	43,1	12,8	68
5	L70x7 DIN	4	1	70	0	7,0	9,0		940	13,6	21,2	21,2	50,3	50,3		
6	L80x8 DIN	4	1	80	0	8,0	10,0		1227	15,6	24,3	24,3	57,4	57,4		
7	L90x9 DIN	4	1	90	0	9,0	11,0		1552	17,6	27,3	27,3	64,6	64,6	55,0	657
8	L100x10 DIN	4	1	100	0	10,0	12,0		1915	19,5	30,4	30,4	71,8	71,8		
9	L110x10 DIN	4	1	110	0	10,0	12,0		2115	21,6	33,6	33,6	79,3	79,3		
10	L120x11 DIN	4	1	120	0	11,0	13,0		2537	23,5	36,6	36,6	86,4	86,4	47,5	928
11	L130x12 DIN	4	1	130	0	12,0	14,0		2997	25,5	39,7	39,7	93,6	93,6	31,2	721



Kuva 15. Profiilitaulukko.

Kuvassa 16 on esitetty analyysissa huomioon otettavat erilliset kuormitustapaukset. Tuulikuormissa suuntana käytetään goonia, jonka lyhenne on gon. Gooni eli graadi on ns. uusaste, suoran kulman sadasosa, jota käytetään mm. maanmittaustekniikassa (Häkkinen, 2006). Goonit voidaan muuttaa asteiksi (desimaalimuotoon) kertomalla suhdeluvulla 0,9 (Tukia, 1997). Esimerkiksi 50 gon on 45 °.

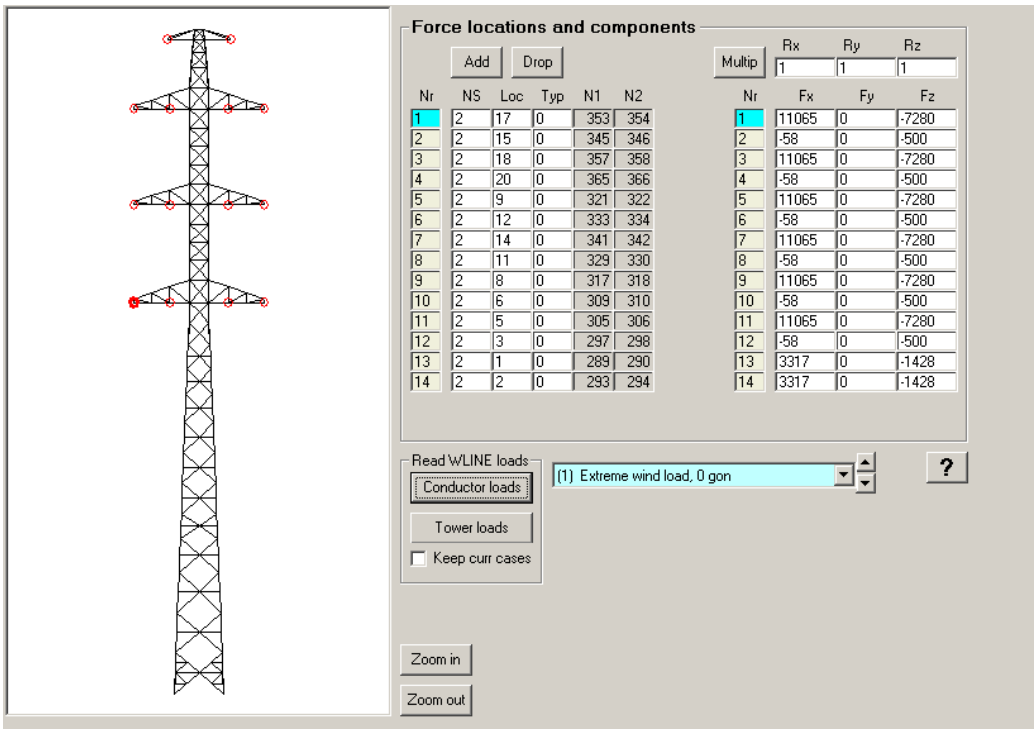
Load cases

Add Drop

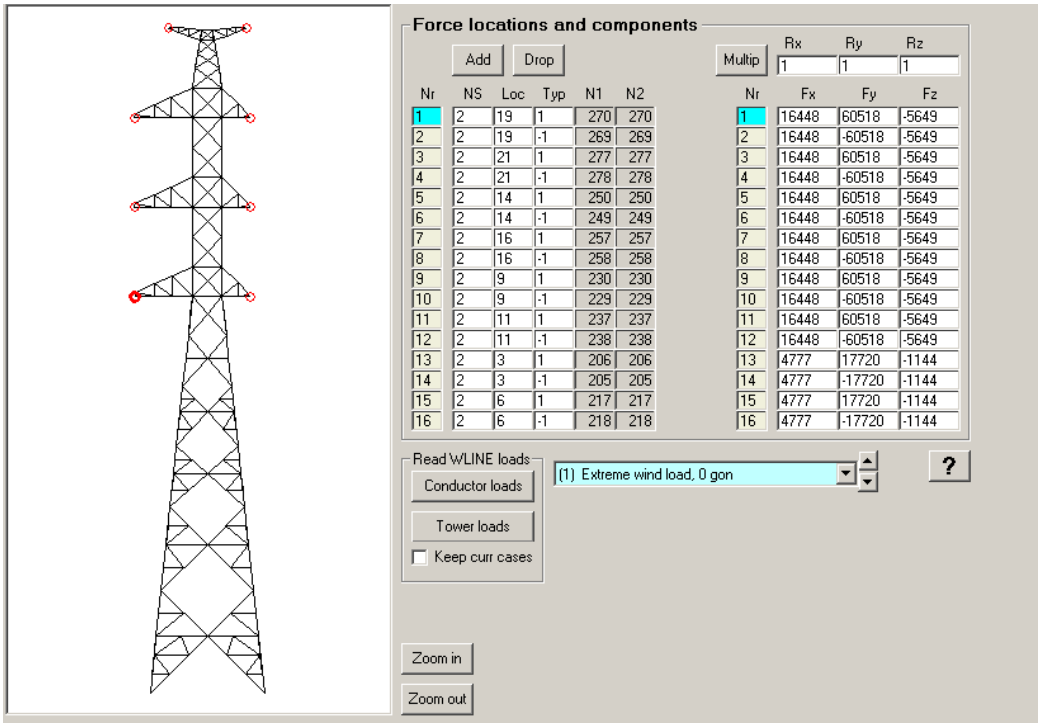
Nr	Load case name	Nw	Wdir	Load factors Gwin	Gice	Gstr	Gant	Gcon	Gfor	Reduction factors Rw	Rwa	Ri	Rigc	Grav	Temperatures Tmp	Tg	Typ	Rwx	Nwx	Ana
1	Huipputuulikuorma, 0 gon	1	0	1,4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	-20	0	3	1,00	0	☑
2	Huipputuulikuorma, 22 gon	1	22	1,4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	-20	0	2	1,00	0	☑
3	Huipputuulikuorma, 50 gon	1	50	1,4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	-20	0	2	1,00	0	☑
4	Huippujääkuorma	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,00	0	☑
5	Huippujää + tuuli, 0 gon	1	0	1	0	1	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	5	1,00	0	☑
6	Huippujää + tuuli, 22 gon	1	22	1	0	1	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	5	1,00	0	☑
7	Huippujää + tuuli, 50 gon	1	50	1	0	1	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	5	1,00	0	☑
8	Kova tuuli + jää, 0 gon	1	0	1,4	0	1	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	6	1,00	0	☑
9	Kova tuuli + jää, 22 gon	1	22	1,4	0	1	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	6	1,00	0	☑
10	Kova tuuli + jää, 50 gon	1	50	1,4	0	1	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	6	1,00	0	☑
11	Pakkanen	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-55	0	8	1,00	0	☑
12	Asennus	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-20	0	9	1,00	0	☑
13	Asennus + pystykuorma	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-20	0	10	1,00	0	☑
14	Varmuuskuormitus	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	1,00	0	☑

Kuva 16. Analysoitavat kuormitustapaukset Ftowerissa.

Kuvassa 17 on esitetty voimien sijainnit ja komponentit 1T-pylväälle ja kuvassa 18 4T-pylväälle. Molemmissa kuvissa esitetään kuormitustapaus 1 huipputuuli 0 goonia.

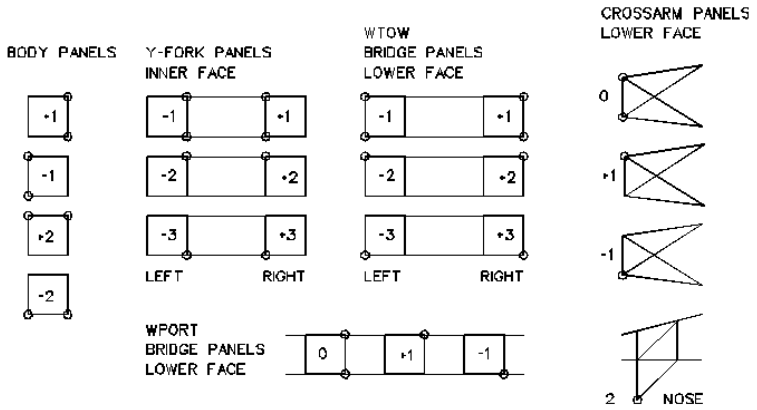


Kuva 17. Voimien sijainnit ja komponentit 1T-pylväälle.



Kuva 18. Voimien sijainnit ja komponentit 4T-pylväälle.

Määritettävät parametrit jokaiselle sijainnille ovat sijaintityyppi *NS*, joka tässä tapauksessa on 2, eli poikkiorsi, *Loc*, eli sijaintikohde, joka voi olla solmu, kenttä tai poikkiorren elementin numero. *Typ* on sijainnin koodi, mikäli *NS* on suurempi kuin 0. Tarkemmat sijainnit käyvät ilmi kuvasta 19. 0 tarkoittaa elementin ulompaa päätyä.



Kuva 19. Sijaintiparametri *Typ* erilaisille alirakenteille.

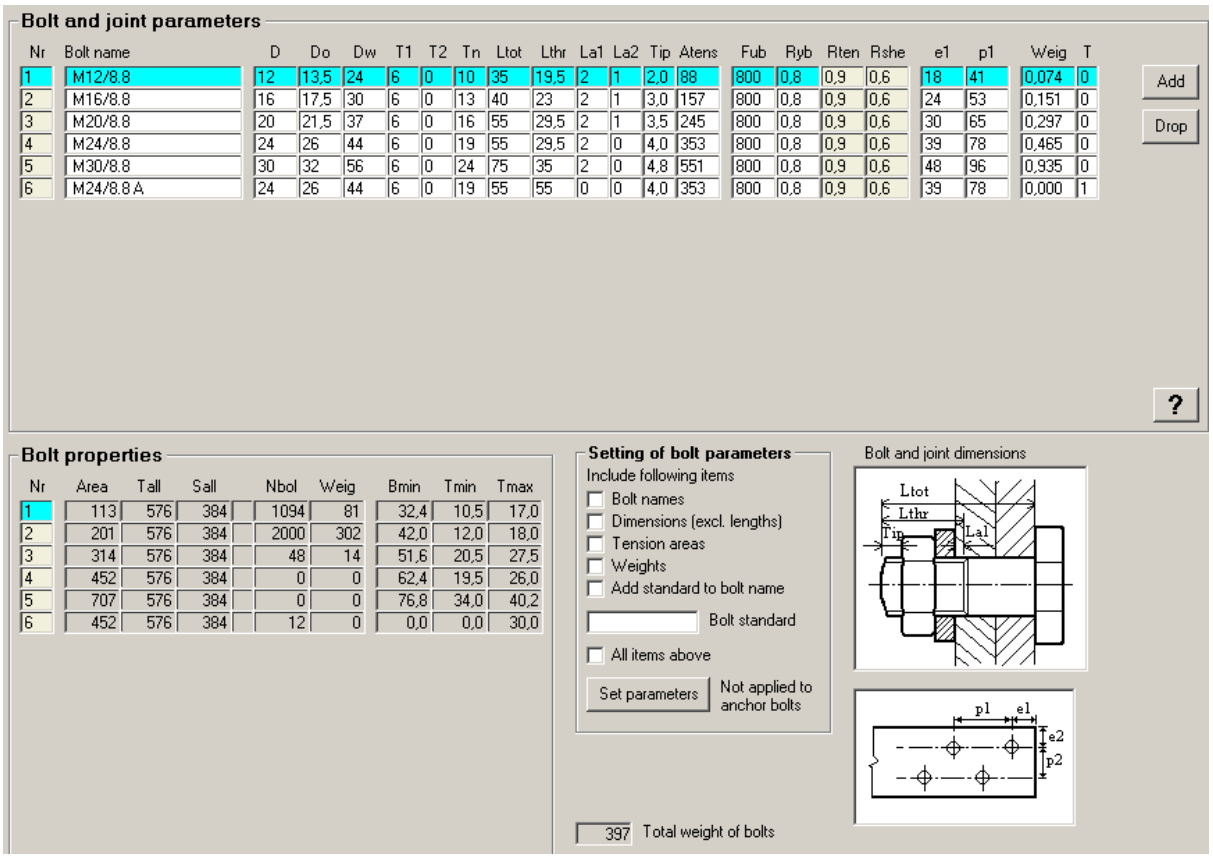
5.1 Osittaiskierteinen ruuvi

Lasketaan Ftowerilla tulokset osittaiskierteisille ruuveille. Nykyisin voimansiirtolinjojen pylväissä käytetään standardin DIN 7990 mukaisia osittaiskierteisiä ruuveja. Tämä kappale on lähinnä nykytilan analysointia vertailukohdaksi täyskierteisten ruuvien tarkasteluun.

Kuvassa 20 on esitetty ruuvien laskennassa käytettävät parametrit. Kuvassa 21 käytettävät lyhenteet ja symbolit on esitetty niiden määrän vuoksi taulukossa 8.

Taulukko 8. Kuvan 21 lyhenteiden ja symboleiden merkitykset.

Lyhenne/symboli	Merkitys
D	sisäkierteen nimellisulkohalkaisija
D_0	reiän halkaisija
D_w	aluslevyn halkaisija
T1/T1	aluslevyn paksuus
Tn	mutterin paksuus
Ltot	kokonaispituus
Lthr	kierreosuuden pituus
La1	sallittu kierteen ylitys nivelelle
La2	minimi kierteen ylitys aluslevylle
Tip	minimi kärjen pituus
Atens	kierreosuuden tehollinen poikkipinta-ala jännitykselle
Fub	murtolujuus
Ryb	kerroin myötöjännitykselle
Rten	kerroin sallitun jännityksen laskentaan
Rshe	kerroin sallitun leikkautumisen laskentaan
e1	pituus kulmaraudan päähän
p1	ruuvien välinen etäisyys



Bolt and joint parameters

Nr	Bolt name	D	Do	Dw	T1	T2	Tn	Ltot	Lthr	La1	La2	Tip	Atens	Fub	Ryb	Rten	Rshe	e1	p1	Weig	T
1	M12/8.8	12	13,5	24	6	0	10	35	19,5	2	1	2,0	88	800	0,8	0,9	0,6	18	41	0,074	0
2	M16/8.8	16	17,5	30	6	0	13	40	23	2	1	3,0	157	800	0,8	0,9	0,6	24	53	0,151	0
3	M20/8.8	20	21,5	37	6	0	16	55	29,5	2	1	3,5	245	800	0,8	0,9	0,6	30	65	0,297	0
4	M24/8.8	24	26	44	6	0	19	55	29,5	2	0	4,0	353	800	0,8	0,9	0,6	39	78	0,465	0
5	M30/8.8	30	32	56	6	0	24	75	35	2	0	4,8	551	800	0,8	0,9	0,6	48	96	0,935	0
6	M24/8.8 A	24	26	44	6	0	19	55	55	0	0	4,0	353	800	0,8	0,9	0,6	39	78	0,000	1

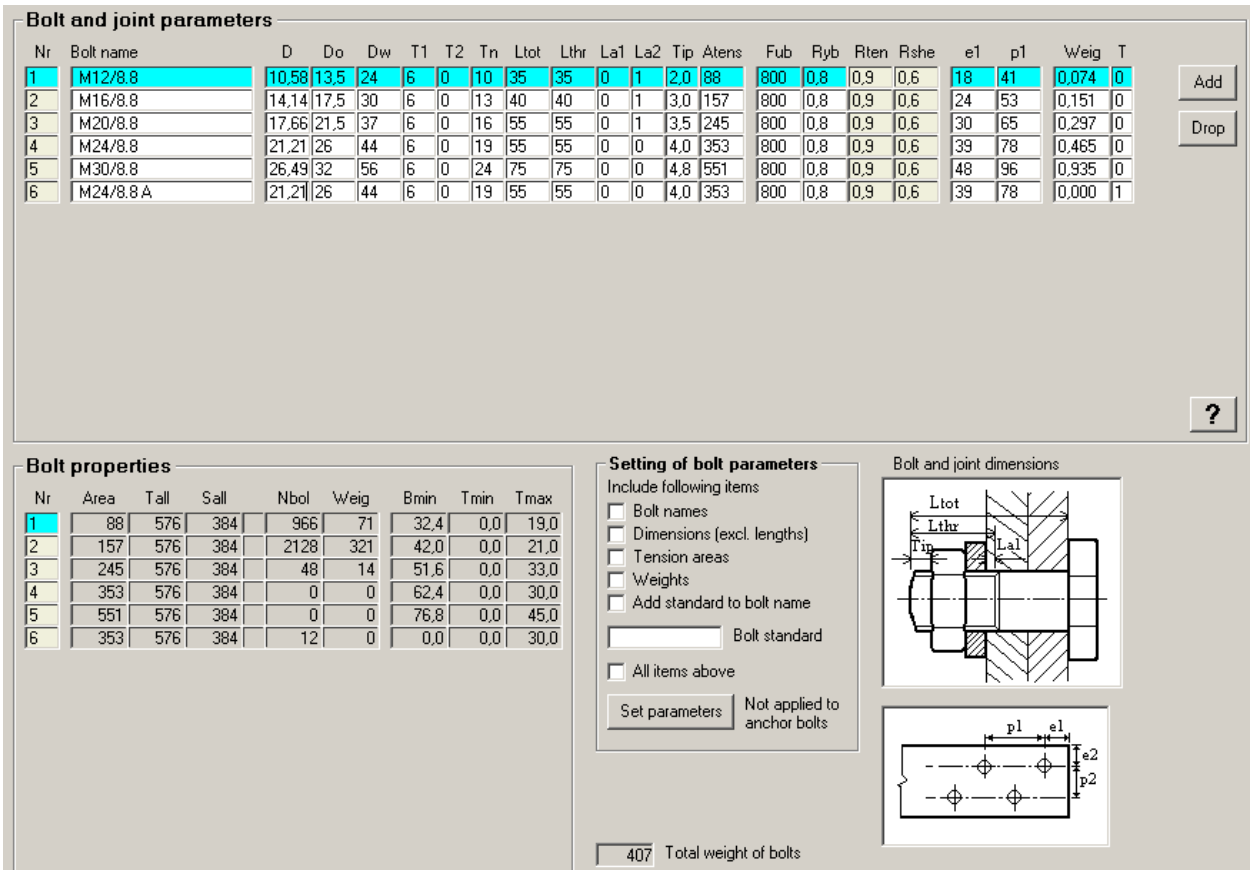
Bolt properties

Nr	Area	Tall	Sall	Nbol	Weig	Bmin	Tmin	Tmax
1	113	576	384	1094	81	32,4	10,5	17,0
2	201	576	384	2000	302	42,0	12,0	18,0
3	314	576	384	48	14	51,6	20,5	27,5
4	452	576	384	0	0	62,4	19,5	26,0
5	707	576	384	0	0	76,8	34,0	40,2
6	452	576	384	12	0	0,0	0,0	30,0

Kuva 20. Ruuviparametrit.

5.2 Täyskierteinen ruuvi

Lasketaan tulokset edellä mainituille kahdelle pylvästyypille käyttäen standardin SFS-EN ISO 4017 (vastaava standardi DIN 933) mukaisia täyskierteisiä ruuveja. Muuttuvia parametreja osittaiskierteisiin ruuveihin verrattuna ovat kierteen pituus ja pinta-ala *Area*. Koska täyskierteisissä ruuveissa ei ole kierteetönä osuutta, tämä laskettiin muuttamalla halkaisijaksi *D* kierteellisen osan halkaisija, jolloin pinta-alaksi tulee sama kuin jännityspinta-alaksi *Atens*. Mahdollisesti muutettavia mittoja ovat myös reuna- ja päätyetäisyys. Tässä kappaleessa esitellään taulukoiden ja kuvien avulla mallinnuksessa käytetyt ruuvit ym. komponentit. Kuvassa 21 näkyvät käytetyt ruuviparametrit täyskierteisille ruuveille.



Bolt and joint parameters

Nr	Bolt name	D	Do	Dw	T1	T2	Tn	Ltot	Lthr	La1	La2	Tip	Atens	Fub	Ryb	Rten	Rshe	e1	p1	Weig	T
1	M12/8.8	10,58	13,5	24	6	0	10	35	35	0	1	2,0	88	800	0,8	0,9	0,6	18	41	0,074	0
2	M16/8.8	14,14	17,5	30	6	0	13	40	40	0	1	3,0	157	800	0,8	0,9	0,6	24	53	0,151	0
3	M20/8.8	17,66	21,5	37	6	0	16	55	55	0	1	3,5	245	800	0,8	0,9	0,6	30	65	0,297	0
4	M24/8.8	21,21	26	44	6	0	19	55	55	0	0	4,0	353	800	0,8	0,9	0,6	39	78	0,465	0
5	M30/8.8	26,49	32	56	6	0	24	75	75	0	0	4,8	551	800	0,8	0,9	0,6	48	96	0,935	0
6	M24/8.8 A	21,21	26	44	6	0	19	55	55	0	0	4,0	353	800	0,8	0,9	0,6	39	78	0,000	1

Add
Drop
?

Bolt properties

Nr	Area	Tall	Sall	Nbol	Weig	Bmin	Tmin	Tmax
1	88	576	384	966	71	32,4	0,0	19,0
2	157	576	384	2128	321	42,0	0,0	21,0
3	245	576	384	48	14	51,6	0,0	33,0
4	353	576	384	0	0	62,4	0,0	30,0
5	551	576	384	0	0	76,8	0,0	45,0
6	353	576	384	12	0	0,0	0,0	30,0

Setting of bolt parameters

Include following items

- Bolt names
- Dimensions (excl. lengths)
- Tension areas
- Weights
- Add standard to bolt name

Bolt standard

- All items above

Set parameters

Not applied to anchor bolts

407 Total weight of bolts

Bolt and joint dimensions

Kuva 21. Ruuviparametrit täyskierteisille ruuveille.

6 LASKENTA FEMAP NX NASTRAN -OHJELMALLA

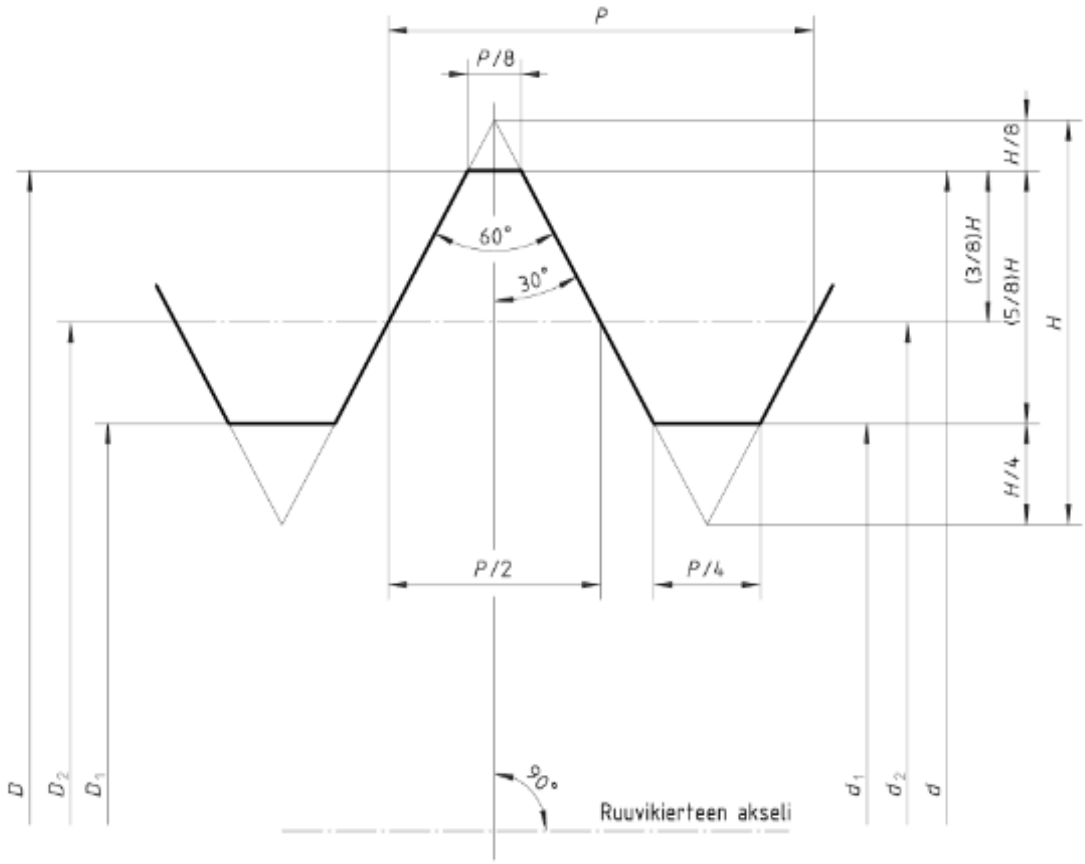
Suoritetaan lisätarkastelua myös Femap NX Nastran –ohjelmalla. 3D-mallien mallinnus suoritetaan SolidWorks-ohjelmalla, josta mallit voidaan siirtää suoraan Femap NX Nastran –ohjelmaan. Tarkastellaan erityisesti eroja osittaiskierteisten ja täyskierteisten ruuvien välillä.

Ohjelma perustuu elementtimenetelmään (FEM, finite element method), eli FE-menetelmään. Menetelmällä voidaan asettaa tutkittaviin rakenteisiin erilaisia reunaehtoja ja kuormituksia. Rakenne jaetaan osiin, materiaaliominaisuuksiltaan vastaaviin elementteihin, jotka yhdistetään solmuilla. Ohjelma ratkaisee algebrallisten yhtälöiden avulla solmujen siirtymät, joista lasketaan rakenteeseen kohdistuvat jännitykset ja venymät. Tulosten luotettavuus pohjautuu mallin oikeellisuuteen, johon vaikuttavia asioita ovat mm. elementtiverkon tiheys, tilanteeseen soveltuva elementtityyppi, sekä asetetut reunaehdot ja kuormitukset. (Cook 1995, s. 1-5.) Ohjelmassa voidaan mallintaa tasomalleja ja 3D-malleja. Liitosten realistinen mallinnus on haastavaa, ja mahdollisia ongelmia ovat liukuminen, välin sulkeutuminen, ja osittainen kontaktin häviäminen. (Cook 1995, s. 118.)

Ruuvien kierteiden mallinnus tehdään standardin SFS-ISO 68-1 mukaisesti, joka määrittelee yleiskäyttöisen metrisen ruuvikierteen perusprofiilin. Perusprofiili on aksiaalitasossa mitoin ja kulmin määritetty ruuvikierteen teoreettinen profiili (SFS-ISO 68-1, s. 4). Perusprofiili esitetään kuvassa 22 leveällä viivalla. Kuvassa 22 käytetyt symbolit selitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Kuvan 22 symboleiden merkitykset.

Symboli	Merkitys
D	sisäkierteen nimellisulkohalkaisija
d	ulkokierteen nimellisulkohalkaisija
D2	sisäkierteen nimelliskylkihalkaisija
d2	ulkokierteen nimelliskylkihalkaisija
D1	sisäkierteen nimellissisähalkaisija
d1	ulkokierteen nimellissisähalkaisija
H	peruskolmion korkeus
P	nousu



Kuva 22. Ruuvikierteen perusprofiili (SFS-ISO 68-1, s. 6).

Kontaktimallinnus Femap NX Nastranilla voidaan jakaa kolmeen luokkaan, lineaariseen kontaktiin, epälineaariseen kontaktiin ja yleiseen 3D-kontaktiin. Tarkimmat tulokset

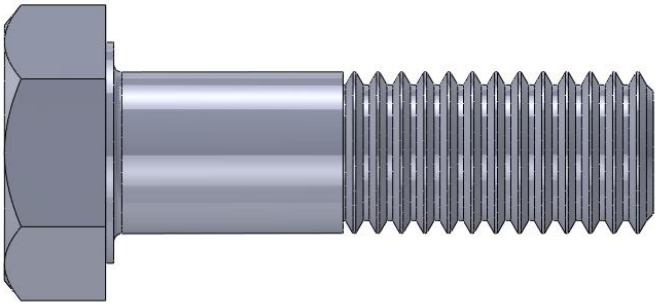
saavutetaan käyttämällä yhteensopivia verkotuksia. Monissa tilanteissa yhteneväinen verkotus on joko tarpeetonta, vaikeaa tai mahdotonta tietokoneen resurssirajoitusten vuoksi. (Read, 2014)

Tärkeimmät osatekijät kontaktien mallinnuksessa ovat alueet, liitännät ja kontaktiominaisuudet. Alue määrittää yhden tai useamman geometrisen pinnan, joka voi olla kontaktissa muihin alueisiin. Liitäntä yhdistää sellaiset alueparit, jotka voivat vaikuttaa toisiinsa. Liitäntäominaisuudet määrittävät kontaktin rajapinnan fyysiset ominaisuudet, esimerkiksi kitkakertoimen. Muut ominaisuudet säätelevät rajapintojen matemaattista käyttäytymistä avoimessa ja suljetussa tilassa, ja useimmissa kontaktiongelmissa ne voivat pysyä oletusarvoina. (Read,2014)

Helpoin tapa mallintaa kontaktia solid-kokoonpanossa on automaattinen yhdistäminen. Tällä menetelmällä valitaan kaikki kappaleet, jotka saattavat vaikuttaa toisiinsa. Femap NX Nastran luo automaattisesti alueet, liitännät ja kontaktiominaisuudet (Read, 2014).

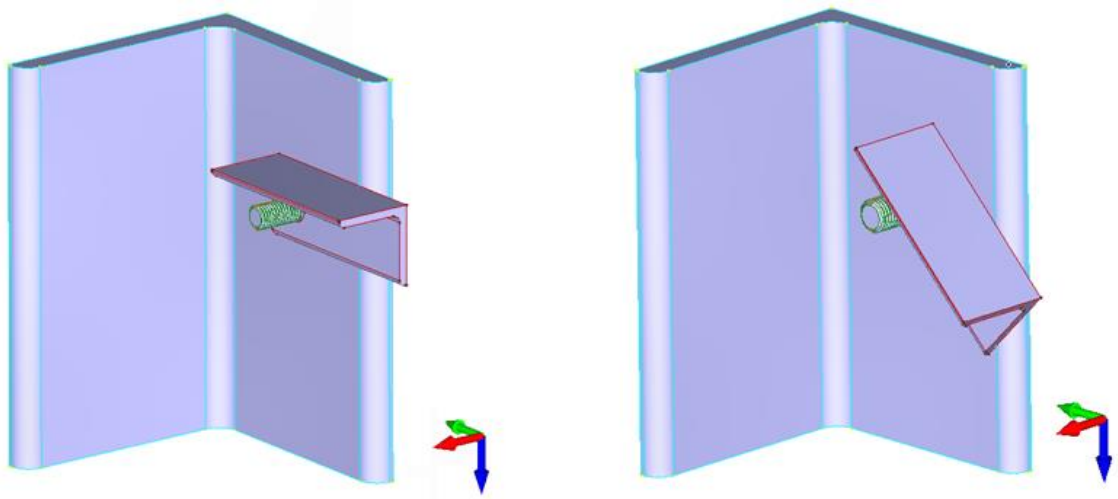
6.1 Osittaiskierteisen ruuvin tarkastelu FEM –analyysilla

Ruuvien 3D-mallit tehtiin SolidWorks –ohjelmalla, jossa tarkempi mallinnus onnistui helpommin. Valittiin tarkasteltaviksi ruuveiksi koot M12 ja M16. Kuvassa 23 on osittaiskierteinen M12-ruuvi. Ruuvikoolle M16 mallinnettiin myös vastaavanlainen geometria.



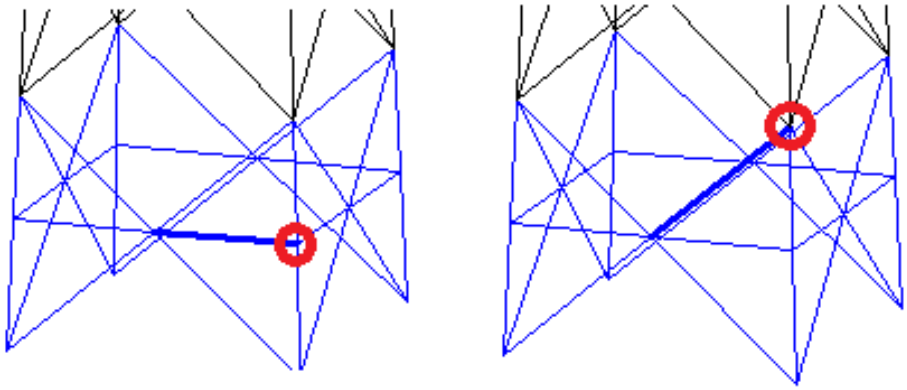
Kuva 23. DIN 7990, M12-ruuvin 3D-malli.

Ftower-ohjelman malleista etsittiin liitokset, joissa käytetään M12 – Ja M16 –kokoisia ruuveja, ja pyrittiin mallintamaan niitä vastaavat mallit SolidWorks –ohjelmalla. Valmiiden mallien geometria siirrettiin Femap NX Nastran –ohjelmaan. Kuvassa 24 esitetään kummallekin ruuvikoolle mallinnetut liitokset, vasemmalla puolella on M12-ruuville ja oikealla puolella M16-ruuville mallinnettu liitos.



Kuva 24. Mallinnetut liitokset M12- ja M16-ruuveille.

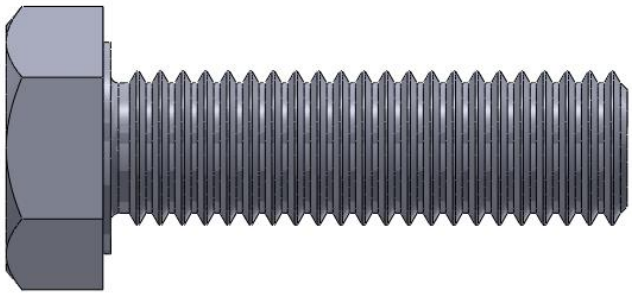
Kuvaan 25 on merkitty Ftower-mallien liitoskohdat, joita on käytetty FEM-mallien pohjana. Vasemmalla on liitos, jossa on käytetty M12-ruuvia, ja oikealla puolella liitos, jossa on käytetty M16-ruuvia.



Kuva 25. Liitoskohdat, joissa on käytetty M12- ja M16-ruuveja.

6.2 Täyskierteisen ruuvin tarkastelu FEM-analyysilla

Ruuvien täyskierteiset 3D-mallit mallinnettiin SolidWorks –ohjelmalla. Mallit tehtiin samankokoisille ruuveille kuin osittaiskierteisetkin mallit, eli M12 ja M16. Kuvassa 26 on M12-ruuvi. Ruuvikoolle M16 mallinnettiin vastaava geometria.

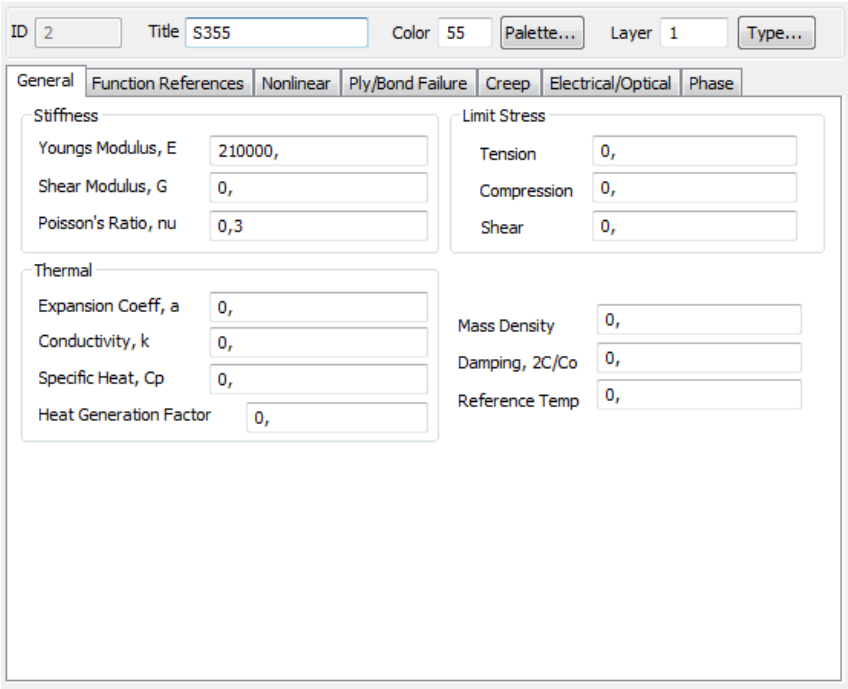


Kuva 26. SFS-ISO 4017, M12-ruuvin 3D-malli.

Ruuviliitoksista tehtävät 3D-mallit on esitetty aikaisemmin osittaiskierteisten ruuvien kohdalla. Täyskierteisille ruuveille mallinnetut liitokset ovat täysin samanlaiset. Liitettävistä kulmateräksistä suurempi on profiili L130x12, ja pienempi on M12-ruuville profiili L40x4 ja M16-ruuville L50x5.

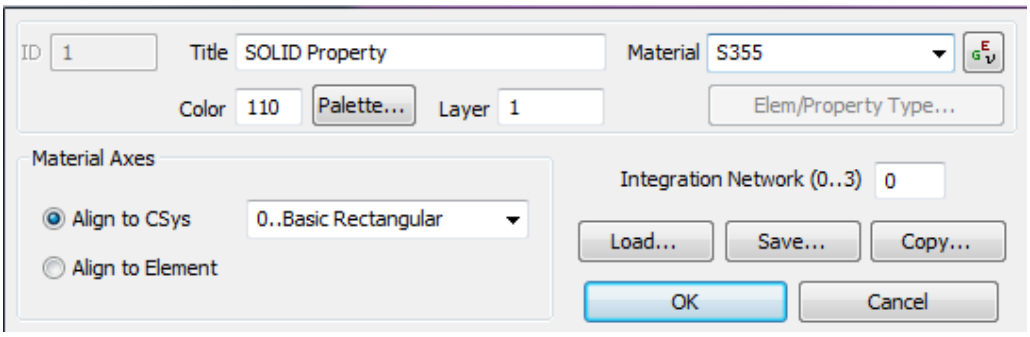
6.3 Lineaarinen materiaalimalli ja staattinen analyysi

Aluksi liitoksille tehtiin FEMAP NX Nastran –ohjelmalla yksinkertaisempi lineaarinen materiaalimalli, joka on esitetty kuvassa. 27. Materiaalin kimmomoduuliksi E on asetettu 210 000 MPa, ja Poissonin vakioksi ν 0,3. Sekä kulmateräsprofiileille että ruuville käytettiin samaa materiaalimallia. Tässä kappaleessa esitetyt kuvat ovat osittaiskierteisen M12-ruuvin mallinnuksesta. Muille malleille mallinnus on tehty samalla tavalla.



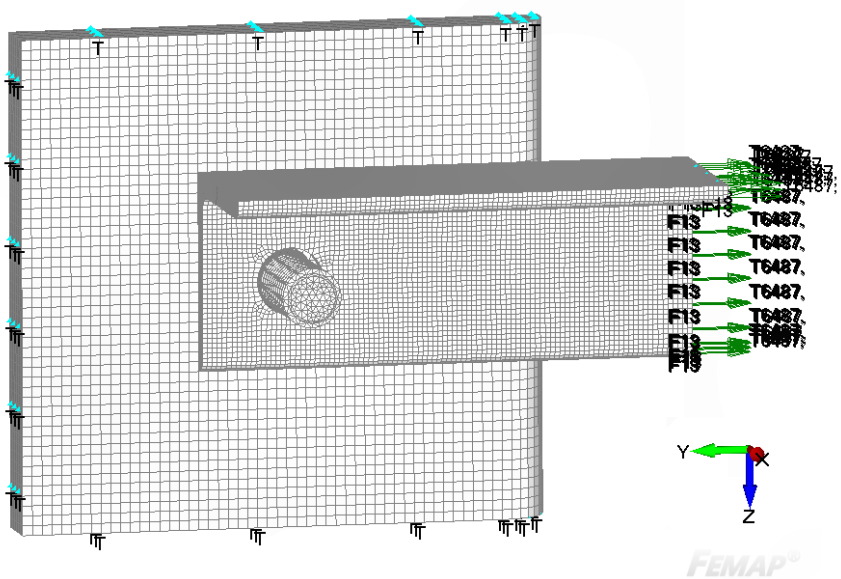
Kuva 27. Lineaarinen materiaalimalli.

Verkotuksen luomisen yhteydessä mallin elementeille määritettiin käytettävät ominaisuudet, eli elementin tyyppi ja materiaali. Elementtityyppi on solid-elementti, ja käytettävä materiaali kuvassa 28 esitetty S355. Nämä on esitetty kuvassa 30.



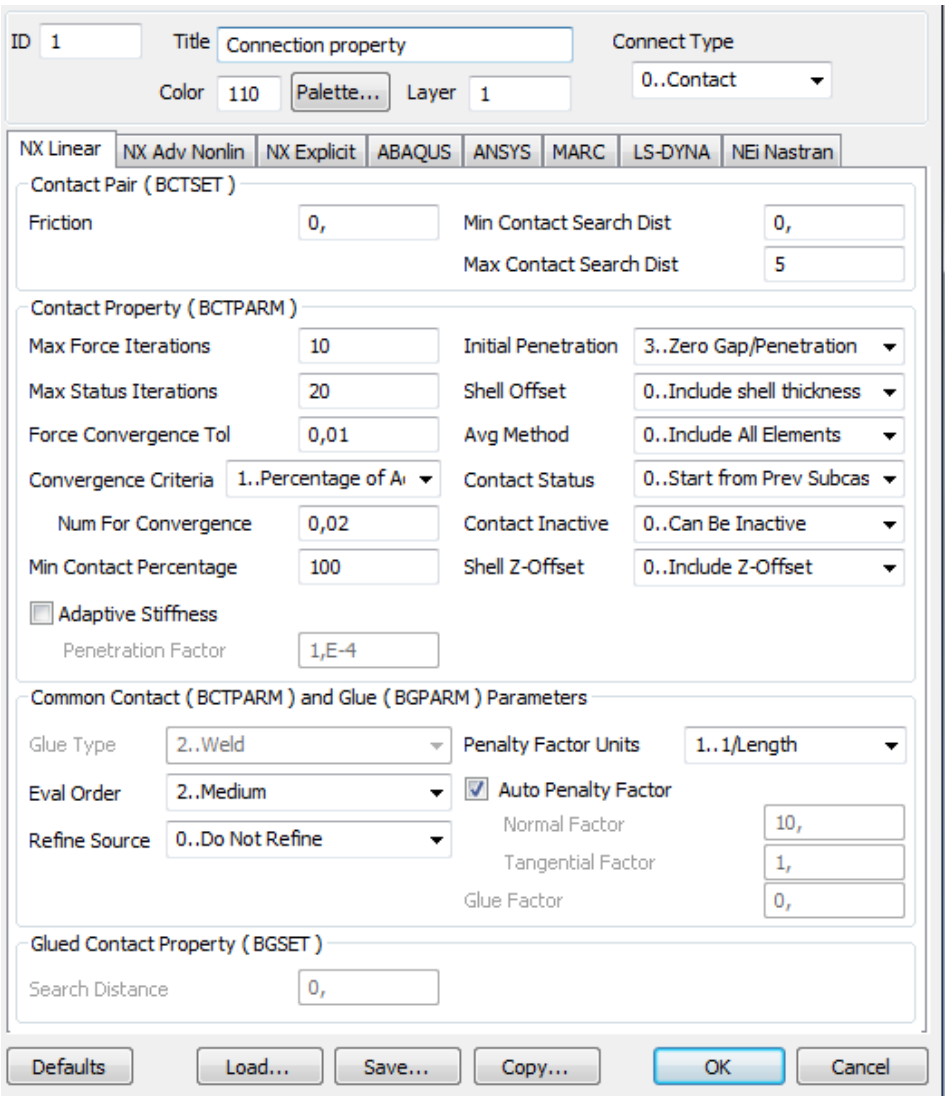
Kuva 28. Elementin ominaisuudet.

Verkotuksella malliin muodostettiin yhteensä 92225 solmua, ja 68212 elementtiä. Kulmateräsprofiilien verkotus pystyttiin tekemään neliönmuotoisilla elementeillä, joiden laskenta onnistuu tarkemmin, mutta ruuvin verkotuksessa jouduttiin geometrian vuoksi käyttämään kolmionmuotoisia elementtejä. Suuremmasta kulmateräsprofiilista poistettiin osa elementtien määrän vähentämiseksi. Asetetut voimat ja reunaehdot on esitetty kuvassa 29, jossa näkyy myös malliin muodostettu verkotus. Voima asetettiin pienemmän kulmateräksen päädyn pinnalle. Voiman suuruus M12-ruuvin liitoksessa on 6487 N, ja M16-ruuvin liitoksessa 7259 N. Isomman kulmateräksen liikkeet estettiin kaikkiin suuntiin, ja pienemmän kulmateräksen liikkeet estettiin x- ja z-akseleiden suunnissa.



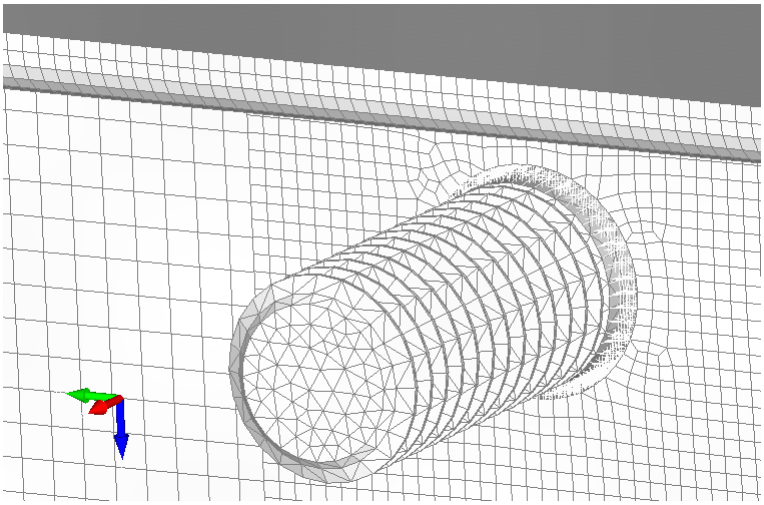
Kuva 29. Asetetut voimat ja reunaehdot.

Kontaktien mallinnuksessa automaattinen yhdistäminen ei toiminut, joten kaikki kontaktipinnat luotiin erikseen. Kulmaterästen välille kontaktin mallintaminen onnistui suoraan valitsemalla toisiinsa kosketuksissa olevat pinnat, ja luomalla niiden välille liitosominaisuudet, jotka on esitetty kuvassa 30. Liitoksen tyyppinä käytettiin kontaktia, mikä tarkoittaa sitä, että osien ei tarvitse olla kiinni toisissaan, vaan niiden välillä voi olla etäisyys. Suurimmaksi haettavaksi etäisyydeksi kontaktissa olevien pintojen välillä määritettiin 5 mm.



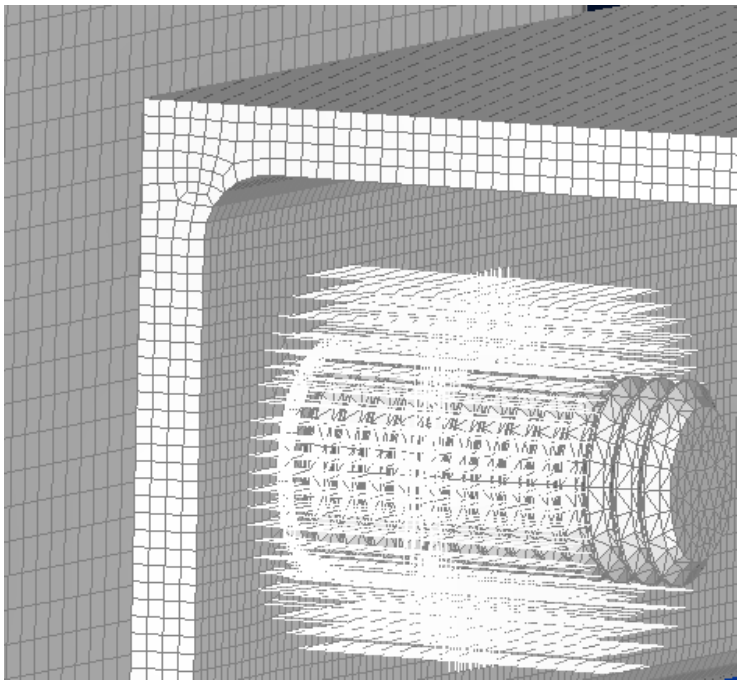
Kuva 30. Kontaktiominaisuudet.

Ruuvin ja kulmaterästen välille kontaktipintojen luominen ei onnistunut samalla tavalla, joten niiden välille mallinnettiin gap-elementit, jotka näkyvät kuvassa 31. Gap-elementeille asetettiin alustavaksi väliksi 0,5 mm, ja puristusjäykkyys asetettiin hyvin suureksi.



Kuva 31. Gap-elementit ruuvin ja kulmateräsprofiilien välillä.

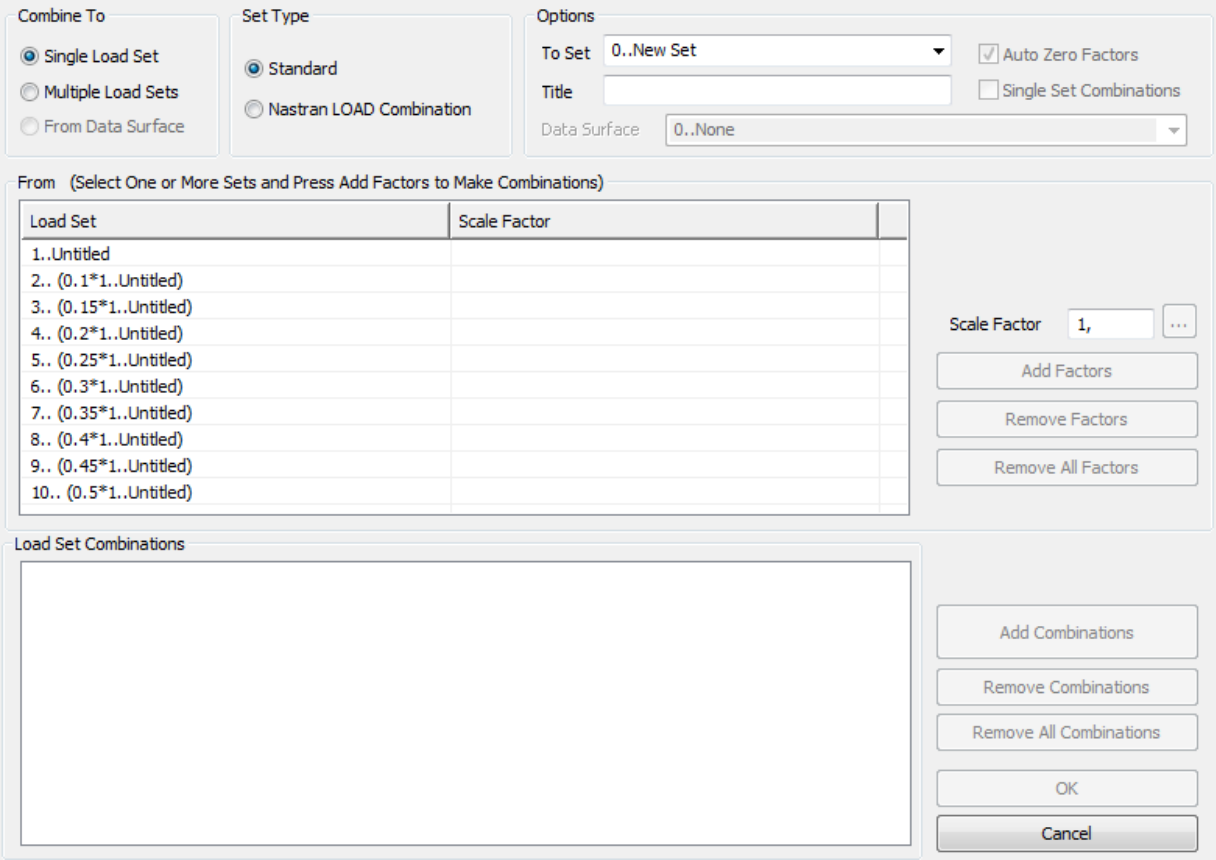
Myös mutterin mallinnus korvattiin estämällä ruuvin liike gap-elementtien avulla, ja tämä on esitetty kuvassa 32. Näiden elementtien alustavaksi väliksi asetettiin 0 mm, ja puristusjäykkyys asetettiin hyvin suureksi. Gap-elementtien päiden solmujen liikkeet ja kiertymät estettiin kaikkiin suuntiin.



Kuva 32. Gap-elementit, jotka korvaavat mutterin.

Analyysityyppinä käytettiin yksinkertaista staattista analyysia. Analyysi tehtiin muuten ohjelman oletusasetuksilla, mutta lisäksi asetettiin ehto, että gap-elementit ovat kontakteja. Analyysin tulokset on esitetty luvussa 7.

Lopuksi tehtiin vielä lisätarkastelua ruuvin materiaalin myötäämisestä. Koska edellä esitetyissä mallinnuksissa käytettiin lineaarista materiaalimallia, ei voitu suoraan hakea malleista myödön aikaansaavaa kuormaa, joten kokeiltiin tehdä analyysi useilla eri kuormilla, ja verrata eroavaisuuksia osittais- ja täyskierteisten mallien välillä. Tarkasteltiin sitä, millaisella kuormalla ruuvissa alkaa näkyä myötäämistä. Alkuperäisestä kuormituksesta tehtiin yhdistetty kuormitussarja, jossa alkuperäinen voima skaalattiin eri kertoimilla. Tämä kuormitussarja on esitetty kuvassa 33. Analyysi suoritettiin samalla tavalla kuin aikaisemmissa mallinnuksissa.



Kuva 33. Kuormitussarja.

M16-ruuville käytettiin suurempia skaalauskertoimia, sillä täydellä alkuperäiselläkin voimalla osittaiskierteiselle ruuville tuli hyvin vähäistä myötöä. Skaalauskertoimet ovat 0,05 välein, välillä 0,9-0,5. Täyskierteiselle M16-ruuville käytettiin samoja skaalauskertoimia kuin M12-ruuville.

7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä kappaleessa käsitellään yhtälöiden mukaisen laskennan, Ftower –analyysien ja FEM-analyysien tuloksia. Lopuksi vertaillaan saatuja tuloksia laskennasta, Ftower-analyyseista ja FEM-analyyseista.

7.1 Laskennan tulosten tarkastelu

Kaikkien analyysien tulokset esitetään taulukossa 10. Leikkauskestävyydet laskettiin erikseen ruuvin kierteettömälle ja kierteelliselle osalle, kierteettömän osan laskennassa käytettiin ruuvin nimellishalkaisijaa, ja kierteellisen osan laskennassa jännityspoikkipinta-alaa. Reunapuristuskestävyys on laskettu nimellishalkaisijalla, mikä on sama sekä osittaiskierteisellä että täyskierteisellä ruuvilla. Vetokestävyys on laskettu jännityspoikkipinta-alalla, mikä myös on sama molemmilla ruuvityypeillä. Reunapuristuskestävyys laskettiin vielä kahden eri standardin mukaan, joista pienempää tulosta käytettiin vertailussa.

Taulukko 10. Laskujen tulokset.

Koko	Fv,Rd (A)	Fv,Rd (As)	Fb,Rd (SFS-EN 50341-1)	Fb,Rd (SFS-EN 1993-1-8)	Ft,Rd	Profiili
M12	44340	32370	30190	29380	48500	L40x4
M16	77210	60290	52620	48960	90430	L50x5
M20	120600	94080	91260	85680	141100	L70x7
M24	173700	135600	160200	146900	203300	L100x10

Suurin kestävyys on vetokestävyys, ja seuraavaksi suurin on leikkauskestävyys osittaiskierteiselle ruuville. Reunapuristuskestävyys oli kriittisin muissa tapauksissa, paitsi ruuvikoolle M24 leikkauskestävyys täyskierteiselle ruuville oli pienempi, 85 % reunapuristuskestävyydestä. Mahdollisesti liitoksessa, jossa ruuvikokoa M24 käytettiin, liitettävien kappaleiden paksuus oli sen verran suuri, että leikkauskestävyys olikin täyskierteisille ruuveille mitoittava tekijä. Tästä tehtiin vielä lisätarkastelua ja tutkittiin, voiko parametreja e_1, e_2, P_1 ja P_2 muuttaa standardin SFS-EN 1993-1-8 sallimien minimi- ja

maksimiarvojen sisällä niin, että tällekin ruuvikoolle saadaan mitoittavaksi tekijäksi reunapuristuskestävyys. Taulukossa 11 on esitetty nämä minimi- ja maksimiarvot, jotka standardi sallii tässä tilanteessa. Laskettaessa minimiarvoilla, saadaan reunapuristuskestävyyden arvoksi $F_{b,Rd}$ =126806,4 N, joka on pienempi kuin leikkauskestävyys, jolloin myös M24-koolle reunapuristuskestävyys olisi mitoittava. Tarkemmat laskut löytyvät liitteestä I.

Taulukko 11. Ruuvikoon M24 parametrien e_1, e_2, P_1 ja P_2 minimi- ja maksimiarvot.

M24	minimi	maksimi
e1	31,2	80
e2	31,2	80
P1	57,2	140
P2	62,4	140

Ruuvin kierteelliselle osalle lasketut leikkauskestävyydet ovat 73-78 % verrattuna kierteettömälle osalle laskettuihin. Suhteellisesti pienin arvo, 73 % tuli ruuvikoolle M12. Kaikkien muiden arvot ovat 78 % verrattuna kierteettömälle osalle laskettuihin.

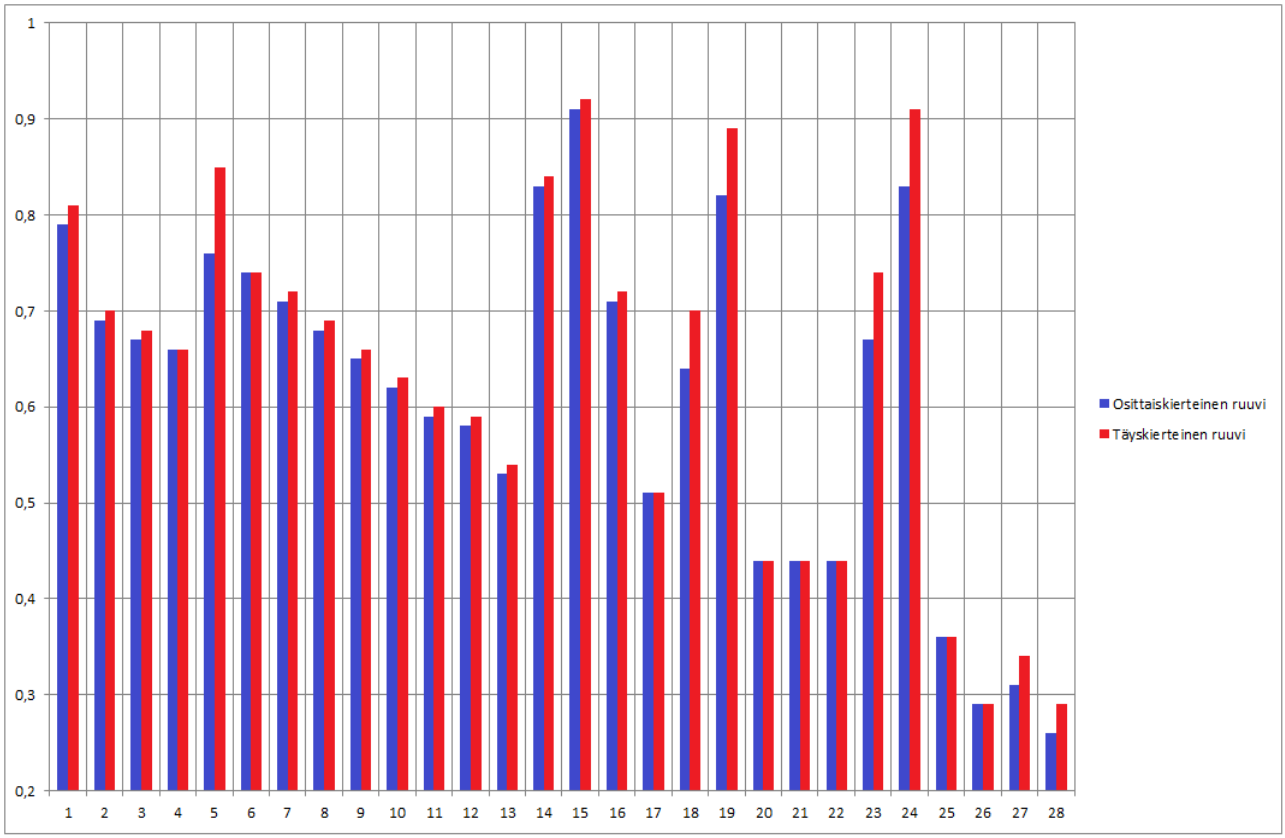
7.2 Ftower –analyysien tulokset

Tarkasteltavana kuormitustapauksena käytettiin kaikkien tapausten yhteenvetoa, josta verrataan rakenteen käytössä olevaa kapasiteettia osittaiskierteisen ja täyskierteisen ruuvin kesken. Tarkastellaan myös, mikä yksittäinen kuormitustapaus saa aikaan suurimman kuormituksen, sekä muodostuuko tässä eroja analyysien välille.

Ensimmäiseksi mallinnus suoritettiin suoran paikan vapaasti seisovalle pylväälle, eli 1T-pylväälle, osittaiskierteisillä ruuveilla. Rakenteen suurin käytössä oleva kapasiteetti oli 91 %. Suurin yksittäinen kuormitustapaus on kova tuuli ja jää, suunnassa 0 goonia.

Seuraavaksi samalle 1T-pylväälle käytettävät ruuvit muutettiin mallissa täyskierteisiksi. Rakenteen suurin käytössä oleva kapasiteetti oli 92 %, eli ero osittaiskierteisiin ruuveihin oli

ainoastaan 1 %. Koska ero oli näin pieni, ja rakenteen sallittu kapasiteetti ei ylittynyt, mallissa ei tarvinnut muuttaa ruuviparametrien lisäksi mitään muuta. Kuvassa 34 on esitetty pylväsdiagrammilla kapasiteettien suuruuden ero. Suurin yksittäinen kuormitustapaus on sama kuin osittaiskierteisillä ruuveilla: kova tuuli ja jää suunnassa 0 goonia. Tämän kuormitustapauksen osalta rakenteen käytössä oleva kapasiteetti on siis 92 %. Lähellä tätä on myös asennus ja pystykuorma, 91 %, mikä on yhtä suuri kuin osittaiskierteisillä ruuveilla suurin käytetty kapasiteetti.



Kuva 34. 1T-pylvään rakenteen kapasiteetin ero osittaiskierteisillä ja täyskierteisillä ruuveilla.

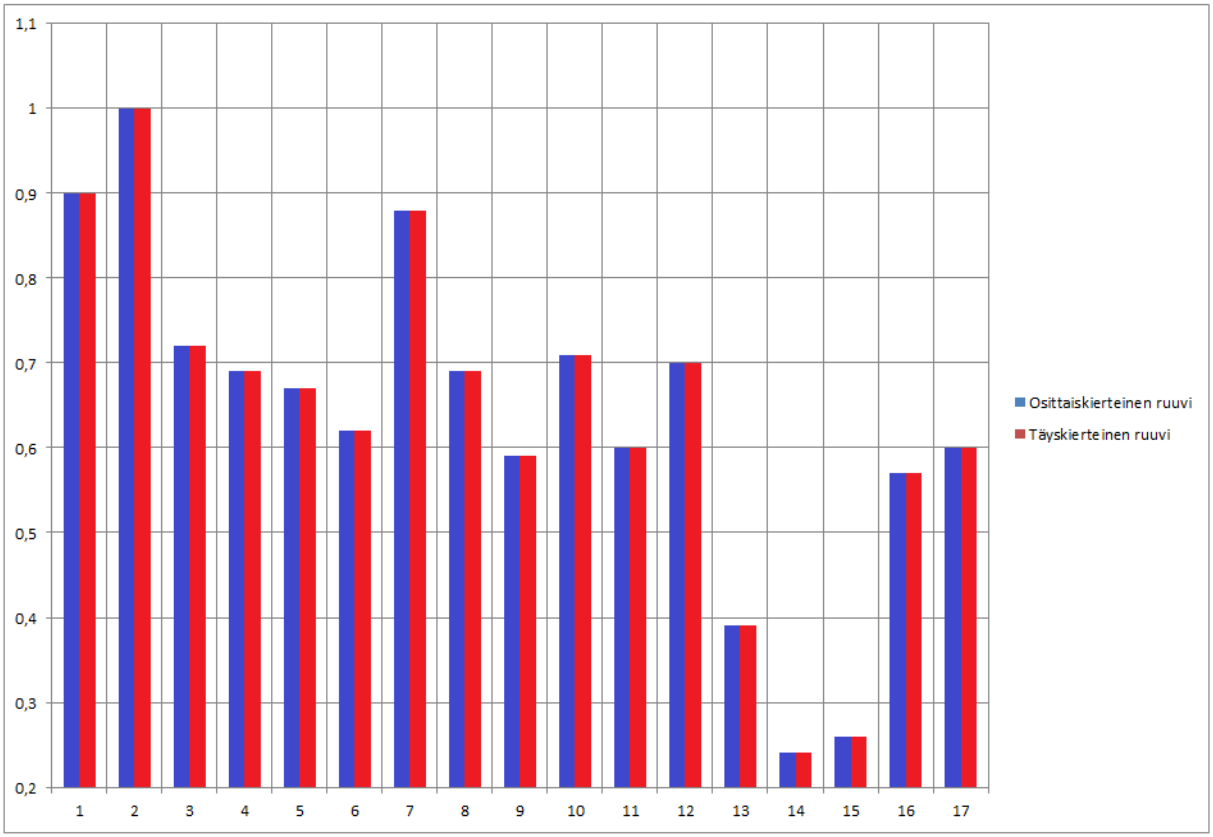
Kuten kuvasta voi huomata, erot ovat suurimmaksi osaksi yhdestä kahteen prosentin luokkaa. Suurin ero tulee viidennen kentän kohdalla, 9 %. Tämä ei kuitenkaan ole rakenteen suurin käytetty kapasiteetti. Tarkemmat kapasiteettien lukuarvot näkyvät taulukossa 12.

Taulukko 12. 1T-pylvään rakenteen kapasiteettien ero osittaiskierteisillä ja täyskierteisillä ruuveilla.

Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Osittaiskiert.	0,79	0,69	0,67	0,66	0,76	0,74	0,71	0,68	0,65	0,62	0,59	0,58	0,53	0,83
Täyskierteinen	0,81	0,7	0,68	0,66	0,85	0,74	0,72	0,69	0,66	0,63	0,6	0,59	0,54	0,84
Nro	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**
Osittaiskiert.	0,91	0,71	0,51	0,64	0,82	0,44	0,44	0,44	0,67	0,83	0,36	0,29	0,31	0,26
Täyskierteinen	0,91	0,72	0,51	0,7	0,89	0,44	0,44	0,44	0,74	0,91	0,36	0,29	0,34	0,29

Mallinnettiin aluksi osittaiskierteisillä ruuveilla myös kiristyspylväs, eli 4T-pylväs. Tässäkin pylvästyypissä tarkasteltiin standardipylväsmallia. Rakenteen suurin käytössä oleva kapasiteetti oli 100 %. Suurin yksittäinen kuormitustapaus oli asennuskuorma.

Seuraavaksi samalle kiristäjäpylväälle käytettävät ruuvit muutettiin mallissa täyskierteisiksi. Tuloksista tuli täsmälleen samat, eli rakenteen suurin käytössä oleva kapasiteetti oli 100 %. Tulokset on esitetty kuvassa 35. Tämän voi selittää se, että mitoittava kestävyys ruuveille on yleensä reunapuristuskestävyys, joten leikkauskestävyyden eroilla ei välttämättä ole merkittävää vaikutusta rakenteen kestävyyteen. Kapasiteettien tarkemmat arvot on esitetty taulukossa 13. Suurin yksittäinen kuormitustapaus oli sama kuin osittaiskierteisillä ruuveilla, eli asennuskuorma.



Kuva 35. 4T-pylvään rakenteen kapasiteetin ero osittaiskierteisillä ja täyskierteisillä ruuveilla.

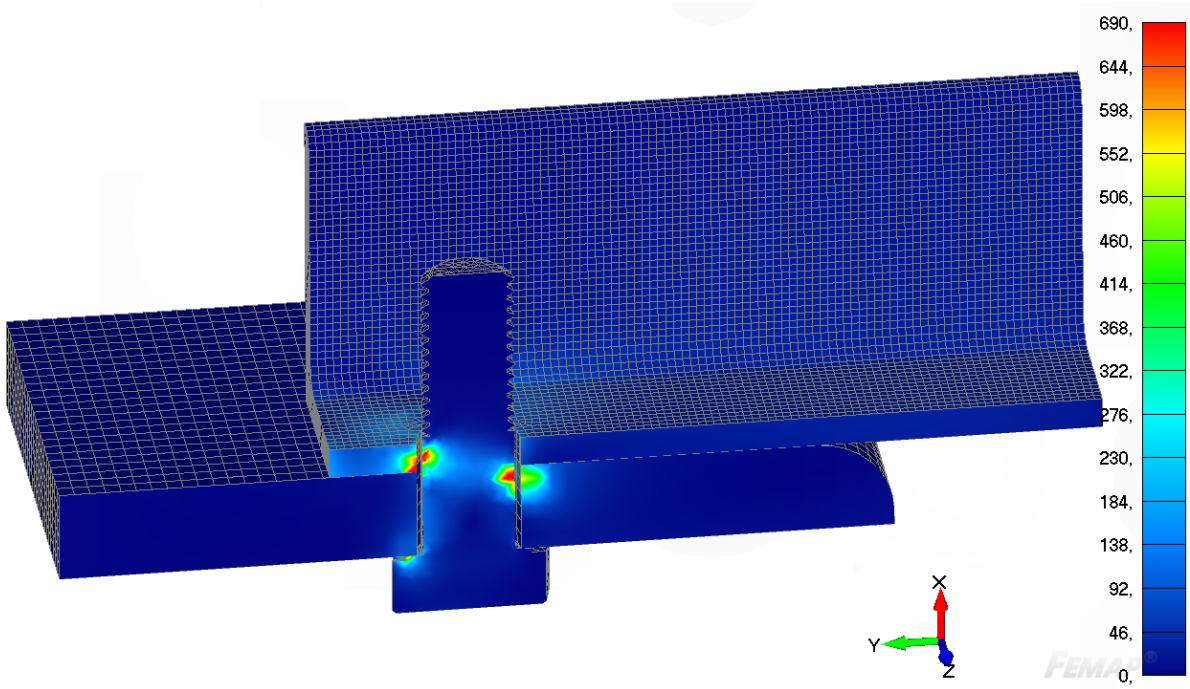
Taulukko 13. 4T-pylvään rakenteen kapasiteettien ero osittaiskierteisillä ja täyskierteisillä ruuveilla.

Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Osittaiskier.	0,9	1	0,72	0,69	0,67	0,62	0,88	0,69	0,59	0,71	0,6	0,71	0,39	0,24	0,26	0,57	0,6
Täyskierteinen	0,9	1	0,72	0,69	0,67	0,62	0,88	0,69	0,59	0,71	0,6	0,71	0,39	0,24	0,26	0,57	0,6

7.3 FEM-analyysien tulokset

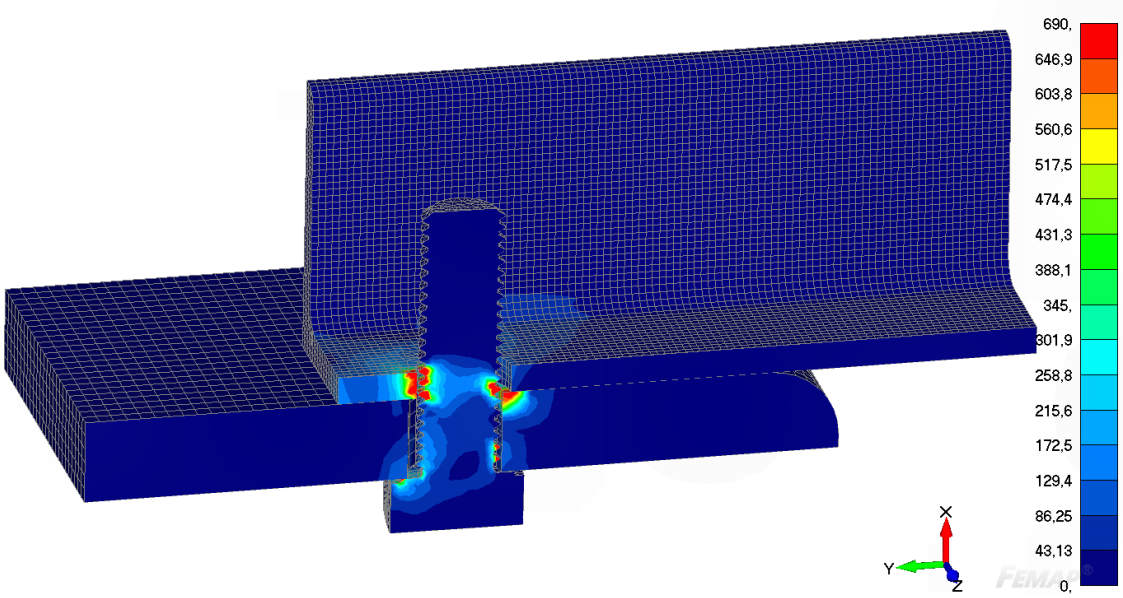
FEM-analyyseista saatiin tulokset ainoastaan lineaarisella materiaalimallilla ja staattisella analyysilla. Epälineaarinen analyysi epälineaarisella materiaalimallilla ei mennyt läpi. Tarkastellaan saatuja tuloksia ruuvin materiaalin myötörajalla. Liitteessä II on esitetty tulokset myös kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla.

Kuvassa 36 on osittaiskierteisen M12-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla. Myötörajan ylittävän jännityksen osuus näkyy punaisella.



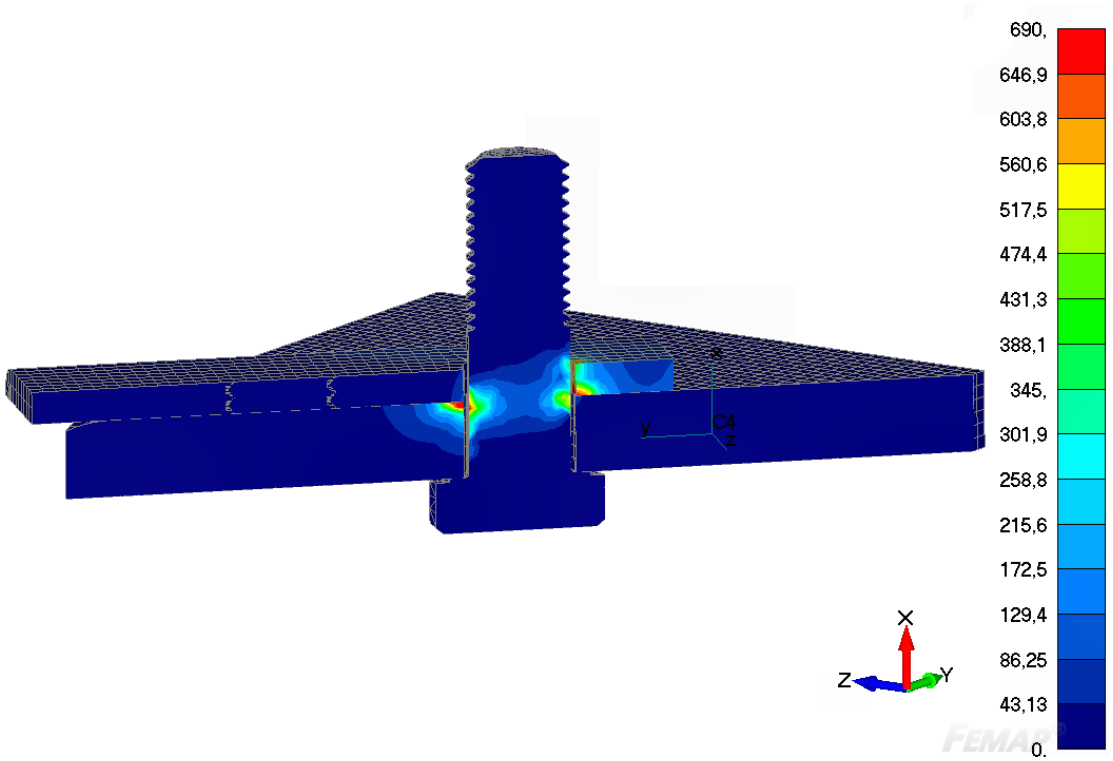
Kuva 36. Osittaiskierteisen M12-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla.

Kuvassa 37 on täyskierteisen M12-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla. Myötörajan ylittävä osuus näkyy punaisella.



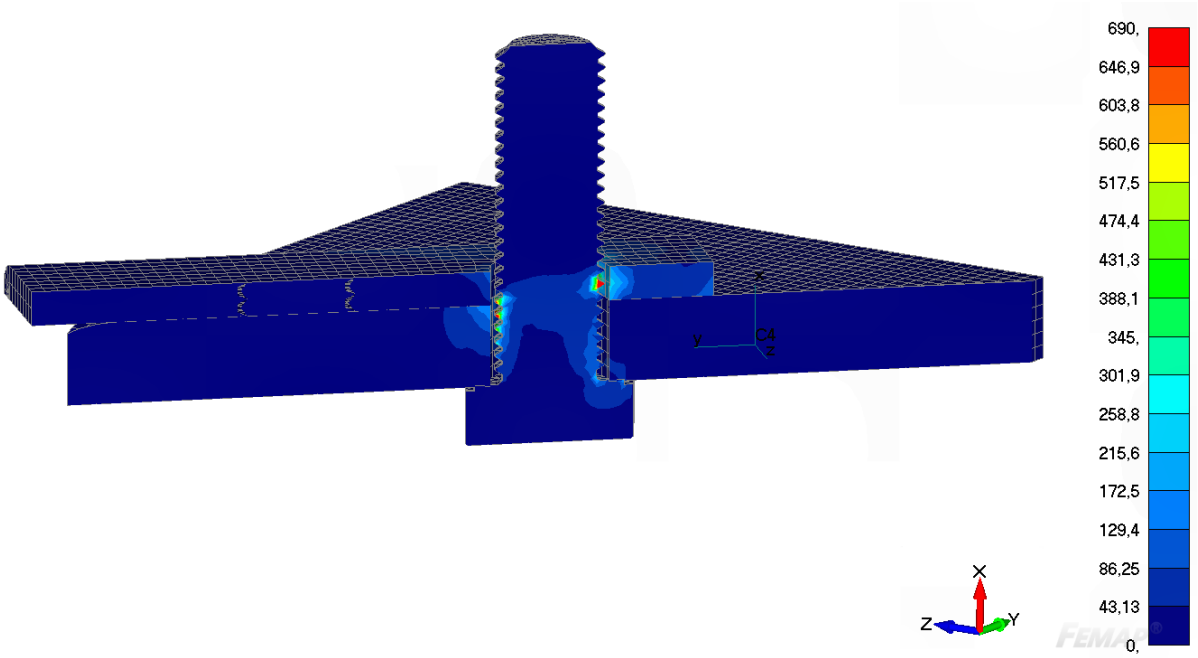
Kuva 37. Täyskierteisen M12-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla.

Kuvassa 38 on osittaiskierteisen M16-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla. Myötörajan ylittävä osuus näkyy punaisella.



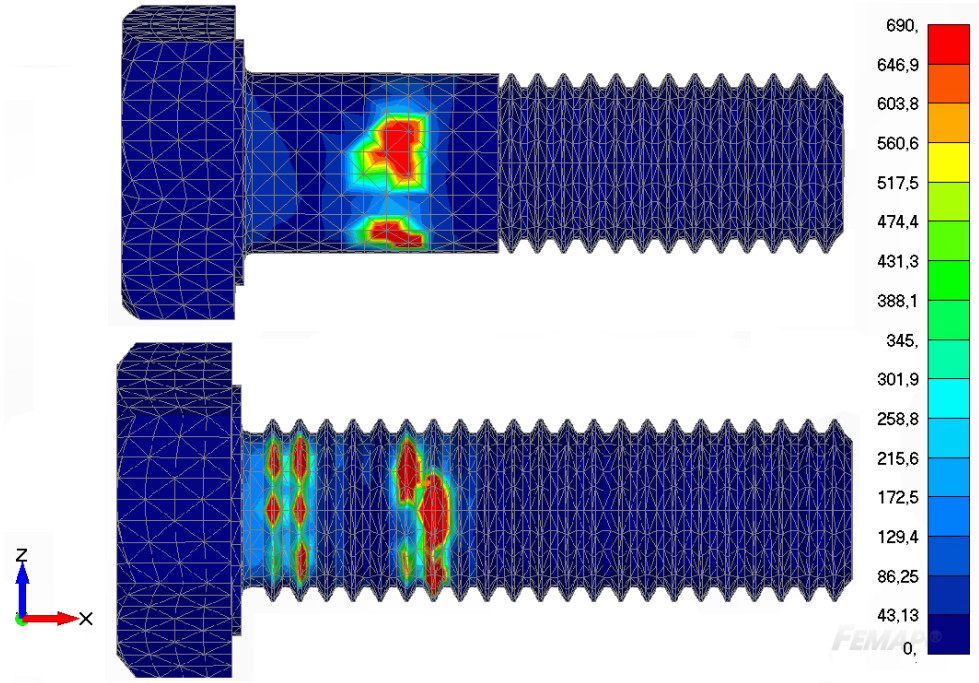
Kuva 38. Osittaiskierteisen M16-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla.

Kuvassa 39 on täyskierteisen M16-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla. Myötörajan ylittävän jännityksen osuus näkyy punaisella.

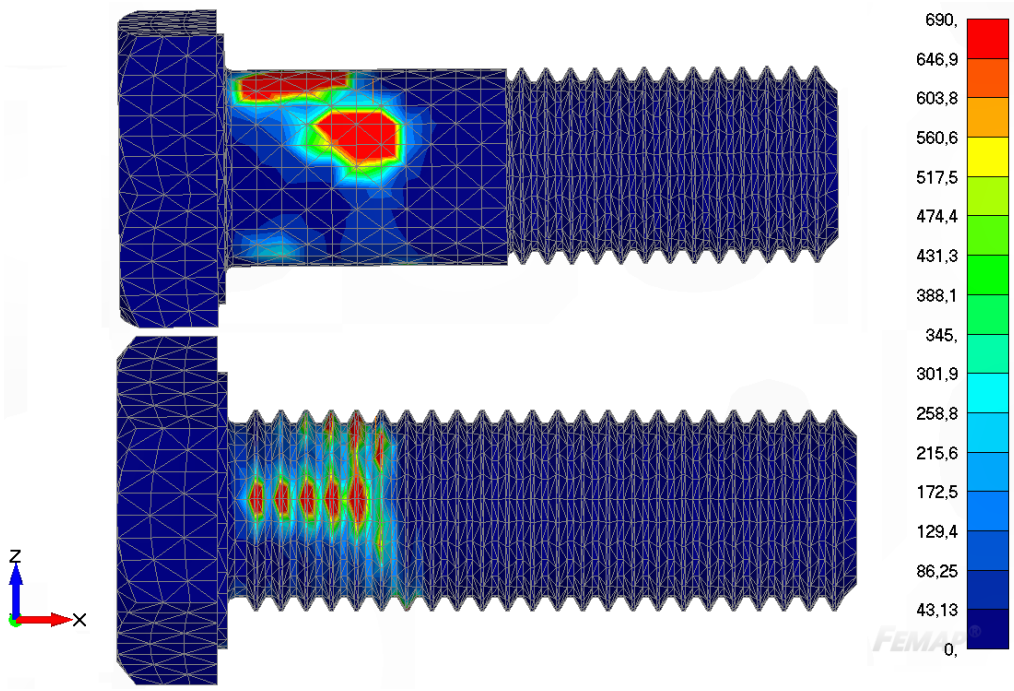


Kuva 39. Täyskierteisen M16-ruuvin jännitykset ruuvin materiaalin myötörajalla.

Kuvissa 40 ja 41 verrataan vielä pelkkien ruuvien jännityksiä ruuvin materiaalin myötörajalla. Kuvassa 40 on osittaiskierteinen ja täyskierteinen ruuvi koossa M12, ja kuvassa 41 koossa M16. Myötörajan ylittävä osuus näkyy punaisella.



Kuva 40. Ruuvien jännitysten vertailu koossa M12.



Kuva 41. Ruuvien jännitysten vertailu koossa M16.

Kuten kuvista ilmenee, erot osittaiskierteisten ja täyskierteisten ruuvien välillä ovat hyvin vähäisiä. Myötörajan ylittävät alueet ovat suunnilleen samoilla aluilla ja samankokoisia. Täyskierteisillä ruuveilla jännitykset ovat kierteellisellä osalla kierteiden päässä, osittaiskierteillä jännitykset ovat kierteettömällä pinnalla. Vaikka tarkasteltavissa malleissa käytettiinkin staattista analyysia, mallit olivat kontaktista johtuen epälineaarisia, sillä osien välissä oleva pintakontakti tekee ratkaisusta epälineaarisen. Lineaarinen materiaalimalli riittää tässä tarkastelussa hyvin, sillä malleihin tulevat myötörajan ylitykset ovat niin vähäisiä, että jännitysten voidaan todeta olevan kimmoisella alueella. Äärikestävyyttä tarkastellessa todennäköisesti tarvittaisiin epälineaarinen materiaalimalli, mutta sitä ei saatu Femap NX Nastran –ohjelman epälineaarisella ratkaisijalla toimimaan.

Malleista tehtiin vielä ruuvin materiaalin myötäämiselle lisätarkastelua kuormitussarjalla. Taulukossa 14 on esitetty kullekin mallille pienin voima, jolla mallissa näkyy myötäämistä. Kuvat kuormitussarjojen tuloksista esitetään liitteessä III.

Taulukko 14. Myödön aikaansaavat kuormitukset FEM-malleille.

Koko	M12, osittaiskierteinen	M12, täyskierteinen	M16, osittaiskierteinen	M16, osittaiskierteinen
Kuorma	1946,1	648,7	7259	2540,65

Osittaiskierteiselle M12-ruuville ruuvin materiaali alkaa myötää 0,35-kertaisella kuormituksella alkuperäisestä voimasta, ja täyskierteiselle pientä myötöä näkyy jo 0,1-kertaisella kuormituksella. Osittaiskierteiselle M16-ruuville täydellä alkuperäiskuormalla myötääminen on hyvin vähäistä, ja 0,9-kertaisella kuormituksella ruuvin materiaali ei ylitä myötärajaa lainkaan. Täyskierteisellä M16-ruuvilla materiaali alkaa myötää 0,35-kertaisella kuormituksella alkuperäisestä.

7.4 Tulosten vertailu

Kaikkien tarkastelumenetelmien perusteella saadut tulokset ovat yhdenmukaisia, eli voidaan todeta täyskierteisten ruuvien kestävän tällaisissa liitoksissa. Täyskierteisillekin ruuveille mitoittavana tekijänä on reunapuristuskestävyys.

Tarkastelumenetelmissä oli jonkin verran eroja. Ftower-ohjelmassa ei tarkasteltu erikseen tiettyjä ruuvikokoja, vaan malleja kokonaisuudessaan. Niistä voidaan todeta, että kokonaisuus kestää, eikä käytetty kapasiteetti ylitä täyskierteisillä ruuveilla sallittua rajaa. Laskenta suoritettiin neljälle eri ruuvikoolle, joista ruuvikoolla M24 täyskierteisen ruuvin leikkauskestävyys oli reunapuristuskestävyyttä pienempi. FEM-analyysit tehtiin vain kahdelle eri ruuvikoolle, ja myös niiden perusteella täyskierteiset ruuvit kestävät hyvin.

8 MUUT RUUVILIITOKSIIN LIITTYVÄT ONGELMAT

Kuten johdannossa mainittiin, muita ongelmia voimansiirtolinjojen ruuviliitoksiin liittyen ovat aiheuttaneet mm. tiedonkulun katkeaminen, kiire, väsymys, osaamispuutteet ja väärin hyllytetyt ruuvit. Myös suunnitelmien muutokset, laadunvalvonta, hävikki, huonolaatuiset ruuvit sekä ruuvien joutuminen väärään paikkaan ovat aiheuttaneet ongelmia.

Tiedonkulkua voitaisiin parantaa esimerkiksi teettämällä henkilökunnalle kysely, jossa selvitetään ihmisten mielestä toimivin tiedonkulun tapa. Kysely olisi hyvä teettää myös työmaalla työskenteleville, jotta saataisiin kehitettyä kaikille yhteisesti toimiva tiedonkulun menetelmä. Kyselyssä voitaisiin kysyä esimerkiksi seuraavia kysymyksiä:

- Mitkä ovat tämänhetkisen tiedonkulun vahvuudet ja puutteet?
- Mitä kautta tällä hetkellä saat parhaiten tietoa?
- Miten kehittäisit työpaikan tiedonkulkua?
- Kulkeeko työn tekemisen kannalta oleellinen tieto riittävän hyvin?

Tiedonkulun parantaminen auttaisi myös muihin ongelmiin, kuten suunnitelmien muutoksiin, kun tieto kulkisi ajantasaisesti kaikille projektiin liittyville henkilöille. Lisäksi se voisi helpottaa myös kiirettä, jos aikataulu olisi hyvin kaikille tiedossa, ja myös työmaalta ilmoitettaisiin mahdollisista ongelmista ja viivästyksistä.

Suurimpaan osaan muista ongelmista auttaisi selkeän normituksen luominen. Normitusta on hyvä kehittää yhteistyössä ruuvitoimittajan kanssa, ja tavoitteena normituksessa voi olla kokonaislaadun varmistaminen, toimintaa ohjaava luokittelu, asennustyökalujen järkeistäminen, ruuvien nimikemäärän vähentäminen ja hankalasti saatavien tuotteiden saatavuuden varmistaminen. Normituksen sisältöön voi kuulua esimerkiksi normituksen tarkoitus, soveltamislaajuus, raaka-aineet, lujuusluokat, pintakäsittelyt, avainvälit ja –kolot, ruuvityypin valinta, ruuviliitosten lukitusvaihtoehdot, asennustyökalut, laadunvalvonta ja tarkastukset sekä todistukset. (Suunnitteluopas, 2008.)

Normituksella voitaisiin myös määrittää työmaalle selkeät ohjeet ruuvien käytöstä. Työmaalla toivottiin, että ruuvit olisi pakattu valmiiksi lohkoittain, ja jollain muulla tavalla kuin pahvilaatikoihin, sillä laatikoiden rikkoutuminen pahvin kastuessa on aiheuttanut ongelmia. Lisäksi toivottiin että erilaisten ruuvinimikkeiden määrä vähenisi, sillä pienellä pituuserolla olevia ruuveja on hankalaa erottaa toisistaan. Normituksen kehittämisessä voidaan käyttää apuna taulukon 15 listausta.

Taulukko 15. Normituksen kehittäminen, esimerkki normituksen sisällöstä (Suunnitteluopas, 2008).

1. Normituksen tarkoitus
2. Soveltamislaajuus
3. Raaka-aineet
4. Lujuusluokat
5. Pintakäsittelyt
6. Avainvälit ja -kolot
7. Ruuvityypin valinta
8. Mitta-alueet
9. Merkinnät ja tunnistaminen
10. Ruuvien pakkaus
11. Ruuvien varastointi
12. Ruuviliitoksen lukitusvaihtoehdot
13. Asennustyökalut
14. Laadunvalvonta ja tarkastukset
15. Todistukset

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskennan sekä Ftower- ja Femap NX Nastran –analyysien perusteella voidaan todeta täyskierteisten ruuvien kestävyyden olevan riittävä käytettäväksi voimansiirtolinjojen ruuviliitoksissa. Laskennan mukaan täyskierteisten ruuvien leikkauskestävyys oli 73-78 % pienempi kuin osittaiskierteisten ruuvien leikkauskestävyys, mutta reunapuristuskestävyys oli vielä pienempi. Poikkeuksena oli ruuvikoko M24, jossa täyskierteisen ruuvin leikkauskestävyys oli kriittisin. Tämä johtui luultavasti liitettävien levyjen paksuudesta. Mutta tälle ruuvikoolle on mahdollista standardin SFS-EN 1993-1-8 sallimissa rajoissa muuttaa reunapuristuskestävyyden laskennassa käytettäviä parametreja niin, että reunapuristuskestävyys oli pienempi kuin täyskierteisen ruuvin leikkauskestävyys.

Ruuviliitosten 3D-kontaktimallinnuksen luominen Femap NX Nastran –ohjelmalla osoittautui hankalaksi, ja mikäli vastaavanlaisia liitoksia halutaan tarkastella 3D-malleina ja näistä tehtävillä analyyseilla, on parempi käyttää enemmän kontaktimallinnukseen soveltuvaa ohjelmaa. Yleensä tällaisessa tarkastelussa pelkkä laskenta on jo riittävä tapa varmistua liitosten kestävyydestä.

Muut voimansiirtolinjojen ruuviliitoksiin liittyvät ongelmat vaativat vielä jatkokehittämistä. Tiedonkulun parantamisesta ja normituksen kehittämisestä olisi apua moniin ongelmiin.

10 YHTEENVETO JA JATKOEHDOTUKSET

Todetaan yhteenvedon alkuun, että voimansiirtolinjojen ruuviliitoksissa on mahdollista käyttää täyskierteisiä ruuveja. Ruuviliitoksia tarkasteltiin kolmella eri tavalla, laskennalla, Ftower-ohjelmalla ja Femap NX/Nastan –ohjelmalla. Laskenta ja Ftower-analyysi ovat riittäviä tässä työssä tehdyn tarkastelun mukaisesti. Laskennassa käytettiin standardeja SFS-EN 50341-1 ja SFS-EN 1993-1-8.

Kontaktien mallinnus Femap NX Nastran –ohjelmalla oli hyvin haastavaa, ja mikäli tällaisista liitoksista halutaan tehdä vielä tarkempaa 3D-mallien tarkastelua, on suositeltavaa käyttää paremmin kontaktimallinnukseen soveltuvaa ohjelmaa, varsinkin jos halutaan tarkastella liitosten äärikestävyyksiä. Nämä tarkastelut vaatisivat epälineaarista materiaalimallia, jota ei Femap NX Nastran –ohjelman epälineaarisella ratkaisijalla saatu toimimaan. Vaihtoehtoisia ohjelmistovaihtoehtoja ovat esimerkiksi ANSYS tai Abaqus. Jatkoehdotuksena voitaisiin tehdä lisätarkastelua myös muunlaisille ruuvityypeille.

Muiden voimansiirtolinjojen ruuviliitoksiin liittyvien ongelmien pohdinta jäi tässä työssä melko pinnalliseksi tarkasteluksi, joten niitä voidaan lähteä kehittämään paremmin vielä jatkossa. Tiedonkulun parantaminen ja selkeän normituksen kehittäminen ovat tärkeimpiä jatkokehityksen kohteita. Tiedonkulkua voidaan lähteä kehittämään esimerkiksi henkilökunnalle tehtävän kyselyn kautta. Normituksen kehittämisessä voidaan hyödyntää luvussa 8 esitettyä listausta normituksen tavoitteista ja taulukon 13 esimerkkiä normituksen sisällöstä. Lisäksi nykyisiä lujempien materiaalien käyttömahdollisuuksia voitaisiin tutkia jatkossa lisää.

LÄHTEET

Cook, S. 1995. Finite Element Modeling for Stress Analysis. Canada, John Wiley & Sons. 320 s.

Häkkinen, K. Matematiikan propedeuttinen kurssi [verkkokirja]. 2006 [viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: http://www.math.jyu.fi/matyl/propedeuttinen/kirja/index-77.html

Kaitila, O. 2010 Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus (Eurocode 3 –oppikirja).1. painos. Forssan kirjapaino Oy. 183 s.

Kinnunen, J. & Saarinen, E. & Tiira, S. & Ulvinen, S. & Väänänen, E. 2001. Teräsrakenteiden suunnittelu. 4. painos. Tampere, Tammer-Paino Oy. 180 s.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2006. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 1.-2. painos. Helsinki, Werner Söderström Osakeyhtiö. 429 s.

Read, T. Contact Modelling in Femap with NX Nastran. [PDF-dokumentti]. 2014, [viitattu 25.10.2014]. Saatavissa: http://www.cadimageplm.com/wp-content/uploads/2014/10/TechTip-Contact-Modelling-2.pdf

Riisiö, P. Ftower. [www-sivu]. Viimeksi päivitetty 21.10.2013. [viitattu 10.5.2014]. Saatavissa: http://www.kolumbus.fi/finnmast/Ftower.htm

SFS-EN 1090-2 + A1 Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2012. 198 s. Vahvistettu 5.3.2012.

SFS-EN 15048-1 Esijännittämättömät kantavien rakenteiden ruuviliitokset. Osa 1: yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2007. 48 s. Vahvistettu 26.11.2007.

SFS-EN 1993-1-8 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2005. 148 s. Vahvistettu 15.8.2005.

SFS-EN 50341-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2013. 501 s. Vahvistettu 17.2.2013.

SFS-EN ISO 10684 + AC Kiinnittimet. Kuumasinkkipinnoitteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005. 40 s. Vahvistettu 29.3.2005.

SFS-EN ISO 225 Kiinnittimet. Ruuvit, vaarnaruuvit ja mutterit. Tunnukset ja mittojen nimitykset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2010. 63 s.

SFS-EN ISO 4014 Hexagon head bolts. Product grades A and B (ISO 4014:2011). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2011. 14 s. Vahvistettu 23.5.2011.

SFS-EN ISO 4017 Hexagon head screws. Product grades A and B (ISO 4017:2014). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2014. 10 s. Vahvistettu 1.9.2014.

SFS-ISO 68-1 Metrinen ISO-kierre yleiskäyttöön. Perusprofiili. Osa 1: metrinen ruuvikierre. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2010. 9 s. Vahvistettu 20.4.2010.

Suunnitteluopas. Ruuviliitoksen suunnittelu. [PDF-dokumentti]. 2008, [viitattu 25.11.2014]. Saatavissa: http://www.wurthelektronik.fi/site/media/pdf/we/kuvasto/suunnitteluopas06.pdf

Teräsrakenneyhdistys. FAQ/SFS-EN 1090-1 ja SFS-EN 1090-2 - Usein esitettyjä kysymyksiä – kysymyksiin esitetyt vastaukset [julkaisu]. 2014, nro 5 [viitattu 1.9.2014]. Saatavissa:

http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/t__k_ja_jaostot/kaynnissa_olevat_projektit/sfs-en_1090_faq-palsta/

Tukia, K. Teodoliittimittaus – Rakennusmittauksen perusteet. [PDF-dokumentti]. 1997, [viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: http://www.kpnet.com/rakmittaus-eat/tiedostot/Teodoliitti.pdf

MATHCAD-LASKENTA

Leikkauskestävyyden $F_{v,Rd}$ laskenta leikkaustason sijaitessa kierteettömällä osalla

M12

$fub := 800$

$A := \pi \cdot 6^2$

$A = 113.097$

$\gamma := 1.25$

$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot A)}{\gamma}$

$FvRd = 4.343 \times 10^4$

M16

$fub := 800$

$A := \pi \cdot 8^2$

$A = 201.062$

$\gamma := 1.25$

$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot A)}{\gamma}$

$FvRd = 7.721 \times 10^4$

M20

$fub := 800$

$A := \pi \cdot 10^2$

$A = 314.159$

$\gamma := 1.25$

$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot A)}{\gamma}$

$FvRd = 1.206 \times 10^5$

M24

$fub := 800$

$A := \pi \cdot 12^2$

$A = 452.389$

$\gamma := 1.25$

$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot A)}{\gamma}$

$FvRd = 1.737 \times 10^5$

Leikkauskestävyyden $F_{v,Rd}$ laskenta leikkaustason sijaitessa kierteellisellä osalla

M12

$fub := 800$

$As := 84.3$

$\gamma := 1.25$

$$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot As)}{\gamma}$$

$FvRd = 3.237 \times 10^4$

M16

$fub := 800$

$As := 157$

$\gamma := 1.25$

$$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot As)}{\gamma}$$

$FvRd = 6.029 \times 10^4$

M20

$fub := 800$

$As := 245$

$\gamma := 1.25$

$$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot As)}{\gamma}$$

$FvRd = 9.408 \times 10^4$

M24

$fub := 800$

$As := 353$

$\gamma := 1.25$

$$FvRd := \frac{(0.6 \cdot fub \cdot As)}{\gamma}$$

$FvRd = 1.356 \times 10^5$

Reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ standardin SFS-EN 50341-1 mukaan

M12

$e1 := 18$ $\quad fu := 510$

$e2 := 18$ $\quad d := 12$

$p1 := 41$ $\quad t := 4$

$d0 := 13.5$ $\quad \gamma m2 := 1.25$

$\alpha 1 := 1.2 \cdot \left(\frac{e1}{d0}\right)$ $\quad \alpha 1 = 1.6$

$\alpha 2 := 1.85 \cdot \left[\left(\frac{e1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 2 = 1.542$

$\alpha 3 := 0.96 \cdot \left[\left(\frac{p1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 3 = 2.436$

$\alpha 4 := 2.3 \cdot \left[\left(\frac{e2}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 4 = 1.917$

$FbRd := \frac{(\alpha 2 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$

$FbRd = 3.019 \times 10^4$

M16

$e1 := 24$ $\quad fu := 510$

$e2 := 24$ $\quad d := 16$

$p1 := 53$ $\quad t := 5$

$d0 := 17.5$ $\quad \gamma m2 := 1.25$

$\alpha 1 := 1.2 \cdot \left(\frac{e1}{d0}\right)$ $\quad \alpha 1 = 1.646$

$\alpha 2 := 1.85 \cdot \left[\left(\frac{e1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 2 = 1.612$

$\alpha 3 := 0.96 \cdot \left[\left(\frac{p1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 3 = 2.427$

$\alpha 4 := 2.3 \cdot \left[\left(\frac{e2}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 4 = 2.004$

$FbRd := \frac{(\alpha 2 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$

$FbRd = 5.262 \times 10^4$

M20

$e1 := 30$ $\quad fu := 510$

$e2 := 30$ $\quad d := 20$

$p1 := 65$ $\quad t := 7$

$d0 := 22$ $\quad \gamma m2 := 1.25$

$\alpha 1 := 1.2 \cdot \left(\frac{e1}{d0}\right)$ $\quad \alpha 1 = 1.636$

$\alpha 2 := 1.85 \cdot \left[\left(\frac{e1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 2 = 1.598$

$\alpha 3 := 0.96 \cdot \left[\left(\frac{p1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 3 = 2.356$

$\alpha 4 := 2.3 \cdot \left[\left(\frac{e2}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 4 = 1.986$

$FbRd := \frac{(\alpha 2 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$

$FbRd = 9.126 \times 10^4$

M24

$e1 := 36$ $\quad fu := 510$

$e2 := 36$ $\quad d := 24$

$p1 := 72$ $\quad t := 10$

$d0 := 26$ $\quad \gamma m2 := 1.25$

$\alpha 1 := 1.2 \cdot \left(\frac{e1}{d0}\right)$ $\quad \alpha 1 = 1.662$

$\alpha 2 := 1.85 \cdot \left[\left(\frac{e1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 2 = 1.637$

$\alpha 3 := 0.96 \cdot \left[\left(\frac{p1}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 3 = 2.178$

$\alpha 4 := 2.3 \cdot \left[\left(\frac{e2}{d0}\right) - 0.5\right]$ $\quad \alpha 4 = 2.035$

$FbRd := \frac{(\alpha 2 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$

$FbRd = 1.602 \times 10^5$

Reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan

M12

$fu := 510$

$d := 12$

$t := 4$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FbRd := \frac{(1.5 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$$

$FbRd = 2.938 \times 10^4$

M16

$fu := 510$

$d := 16$

$t := 5$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FbRd := \frac{(1.5 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$$

$FbRd = 4.896 \times 10^4$

M20

$fu := 510$

$d := 20$

$t := 7$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FbRd := \frac{(1.5 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$$

$FbRd = 8.568 \times 10^4$

M24

$fu := 510$

$d := 24$

$t := 10$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FbRd := \frac{(1.5 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$$

$FbRd = 1.469 \times 10^5$

Vetokestävyys

M12

$fub := 800$

$As := 84.3$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FtRd := \frac{(0.9 \cdot fub \cdot As)}{\gamma m2}$$

$FtRd = 4.856 \times 10^{4}$

M16

$fub := 800$

$As := 157$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FtRd := \frac{(0.9 \cdot fub \cdot As)}{\gamma m2}$$

$FtRd = 9.043 \times 10^{4}$

M20

$fub := 800$

$As := 245$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FtRd := \frac{(0.9 \cdot fub \cdot As)}{\gamma m2}$$

$FtRd = 1.411 \times 10^{5}$

M24

$fub := 800$

$As := 353$

$\gamma m2 := 1.25$

$$FtRd := \frac{(0.9 \cdot fub \cdot As)}{\gamma m2}$$

$FtRd = 2.033 \times 10^{5}$

Reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ standardin SFS-EN 50341-1 mukaan, pienimmillä sallituilla parametrien e_1, e_2 ja P_1 arvoilla

M24

$e1 := 31.2$ $\quad fu := 510$

$e2 := 31.2$ $\quad d := 24$

$p1 := 57.2$ $\quad t := 10$

$d0 := 26$ $\quad \gamma m2 := 1.25$

$$\alpha 1 := 1.2 \cdot \left(\frac{e1}{d0}\right) \qquad \alpha 1 = 1.44$$

$$\alpha 2 := 1.85 \cdot \left[\left(\frac{e1}{d0}\right) - 0.5\right] \qquad \alpha 2 = 1.295$$

$$\alpha 3 := 0.96 \cdot \left[\left(\frac{p1}{d0}\right) - 0.5\right] \qquad \alpha 3 = 1.632$$

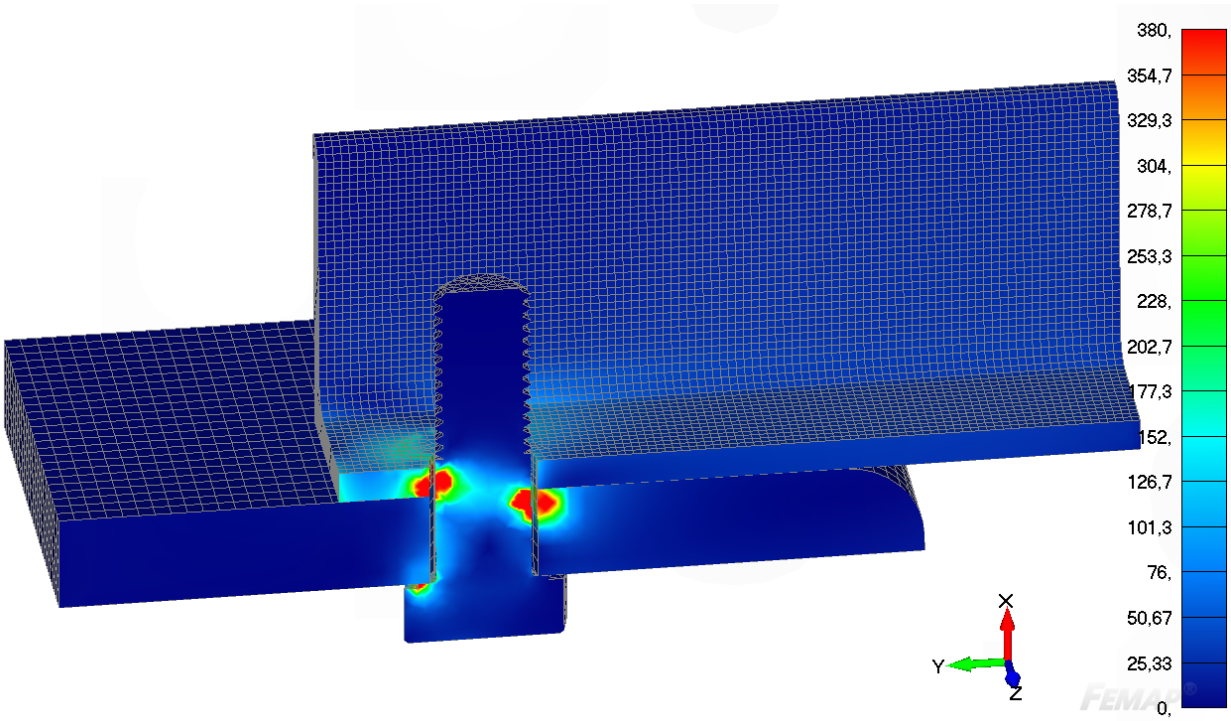
$$\alpha 4 := 2.3 \cdot \left[\left(\frac{e2}{d0}\right) - 0.5\right] \qquad \alpha 4 = 1.61$$

$$FbRd := \frac{(\alpha 2 \cdot fu \cdot d \cdot t)}{\gamma m2}$$

$$FbRd = 1.268 \times 10^5$$

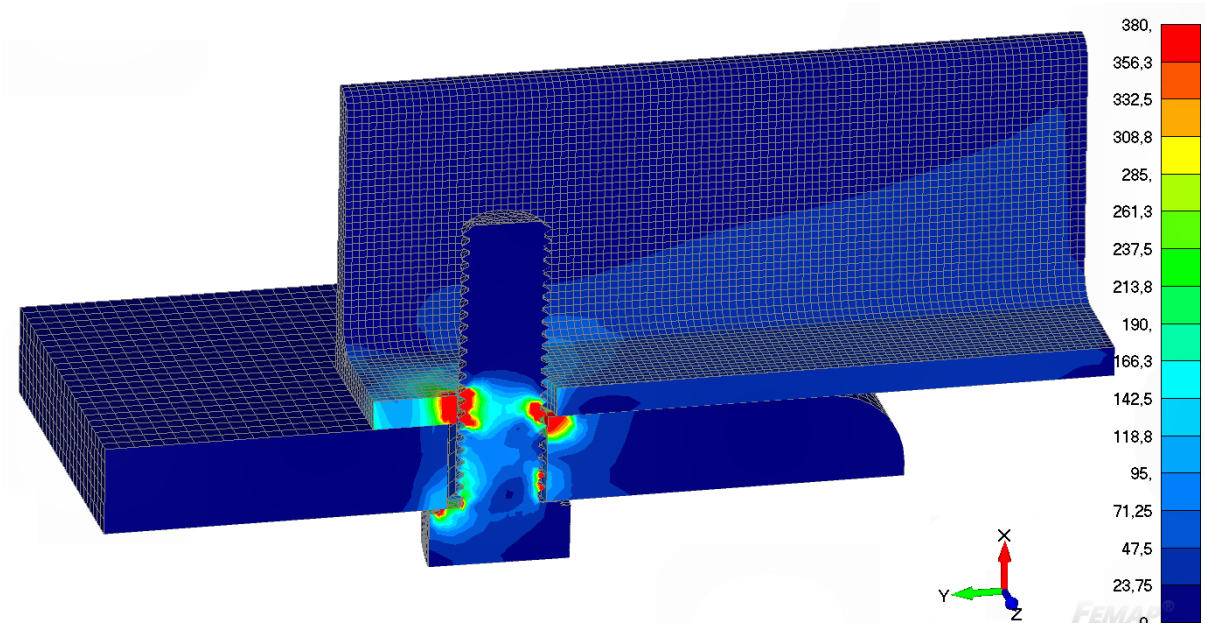
FEM-ANALYYSIEN TULOKSET KULMATERÄSPROFIILIEN MYÖTÖRAJALLA

Tässä liitteessä esitetään samojen mallinnusten tulokset kuin luvussa 7.3, mutta kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla. Kuvassa 1 on osittaiskierteisen M12-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien myötörajalla. Myötörajan ylittävä osuus näkyy punaisella.



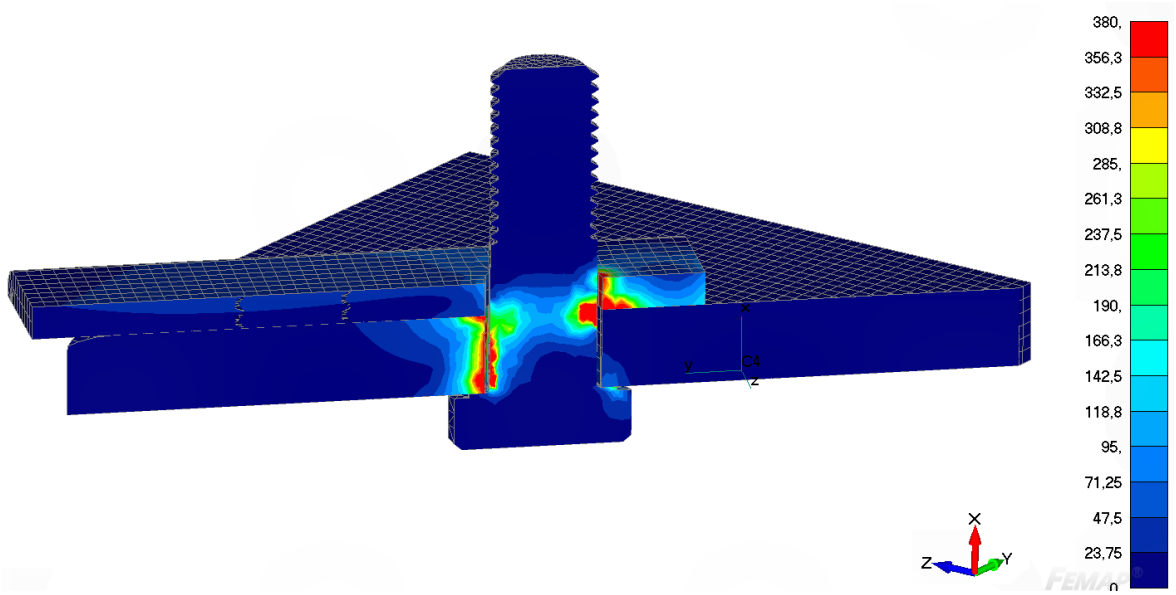
Kuva 1. Osittaiskierteisen M12-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla.

Kuvassa 2 on täyskierteisen M12-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla. Myötörajan ylittävä osuus näkyy punaisella.



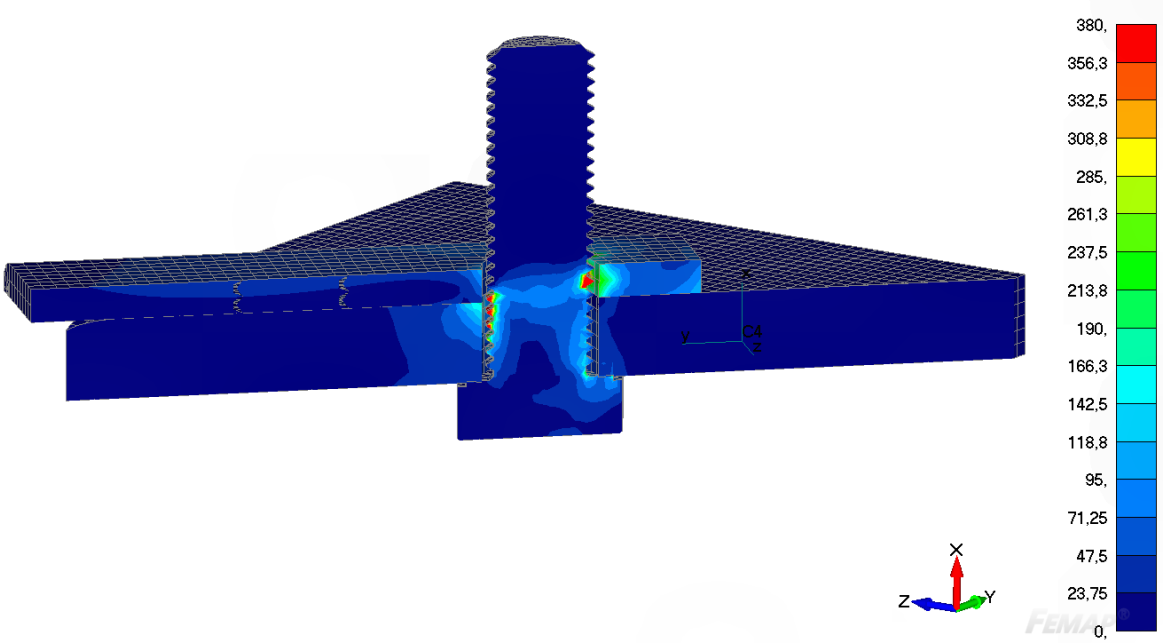
Kuva 2. Täyskierteisen M12-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla.

Kuvassa 3 on osittaiskierteisen M16-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla.



Kuva 3. Osittaiskierteisen M16-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien myötörajalla.

Kuvassa 4 on täyskierteisen M16-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien myötörajalla. Myötörajan ylittävän jännityksen osuus näkyy punaisella.



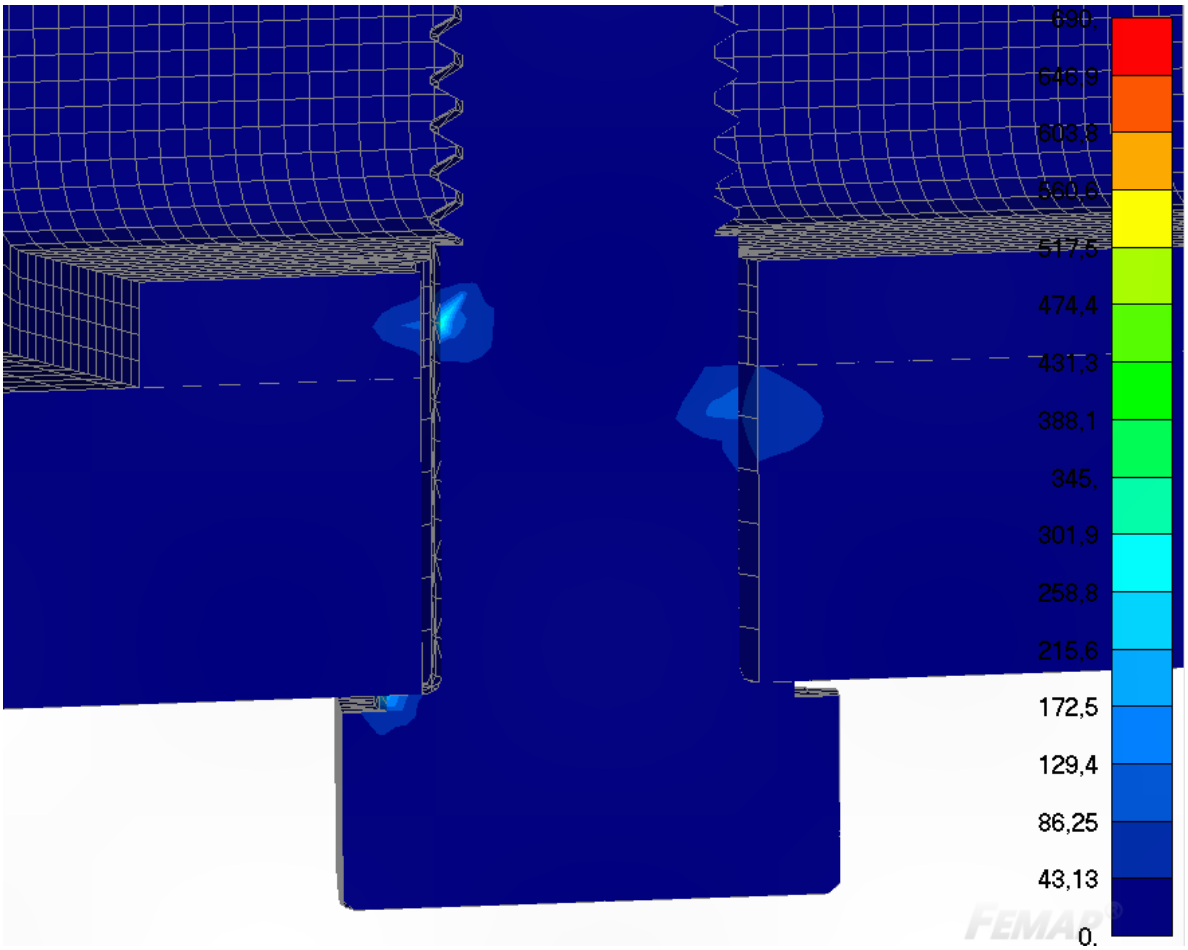
Kuva 4. Täyskierteisen M16-ruuvin jännitykset kulmateräsprofiilien materiaalin myötörajalla.

FEM-ANALYYSIEN TULOKSET KUORMITUSSARJALLA

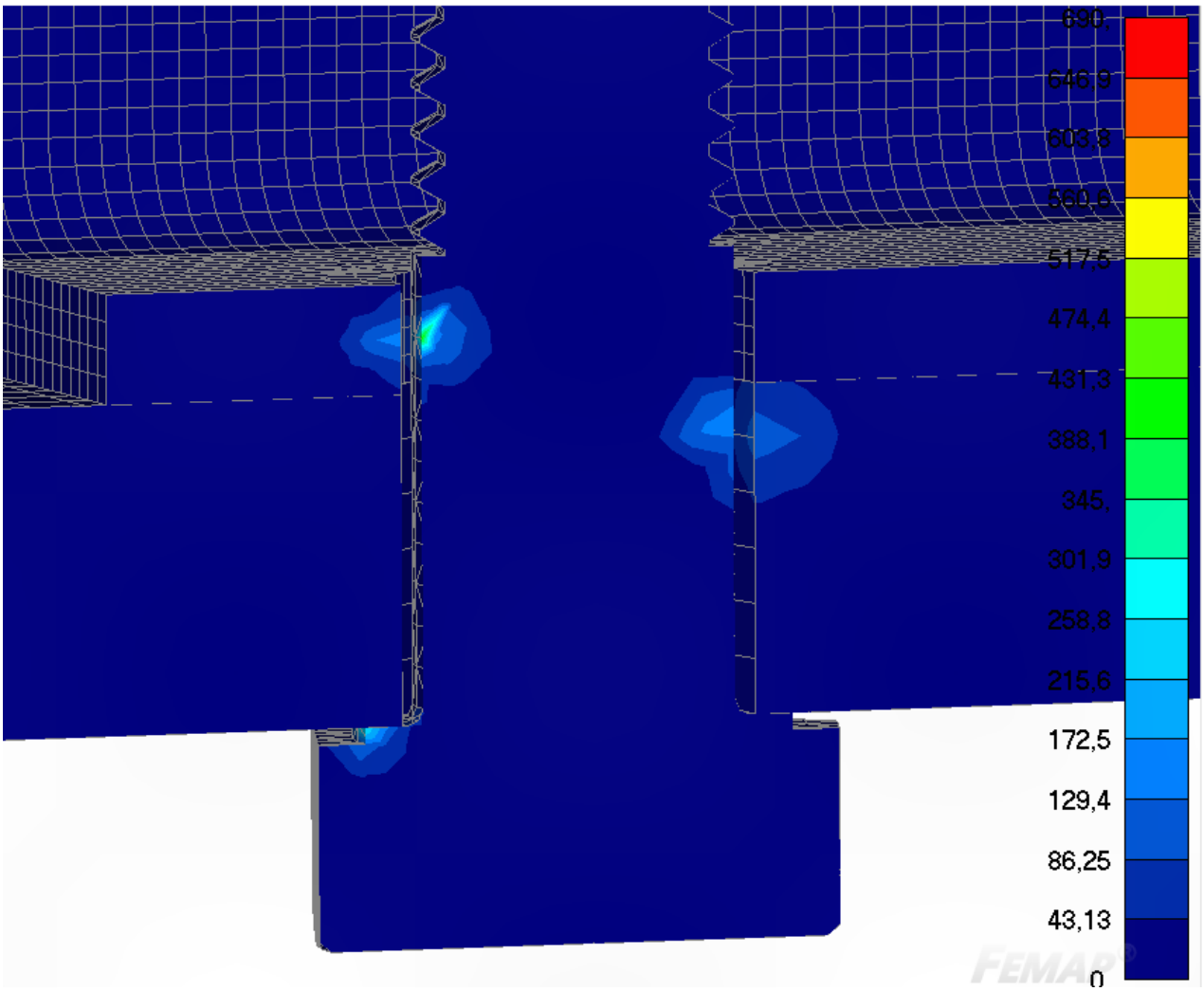
Jokaiselle mallille kuvat alkavat pienimmästä kuormituksesta, ja viimeinen kuva on myötörajan ylittävästä kuormituksesta.

Osittaiskierteinen M12-ruuvi

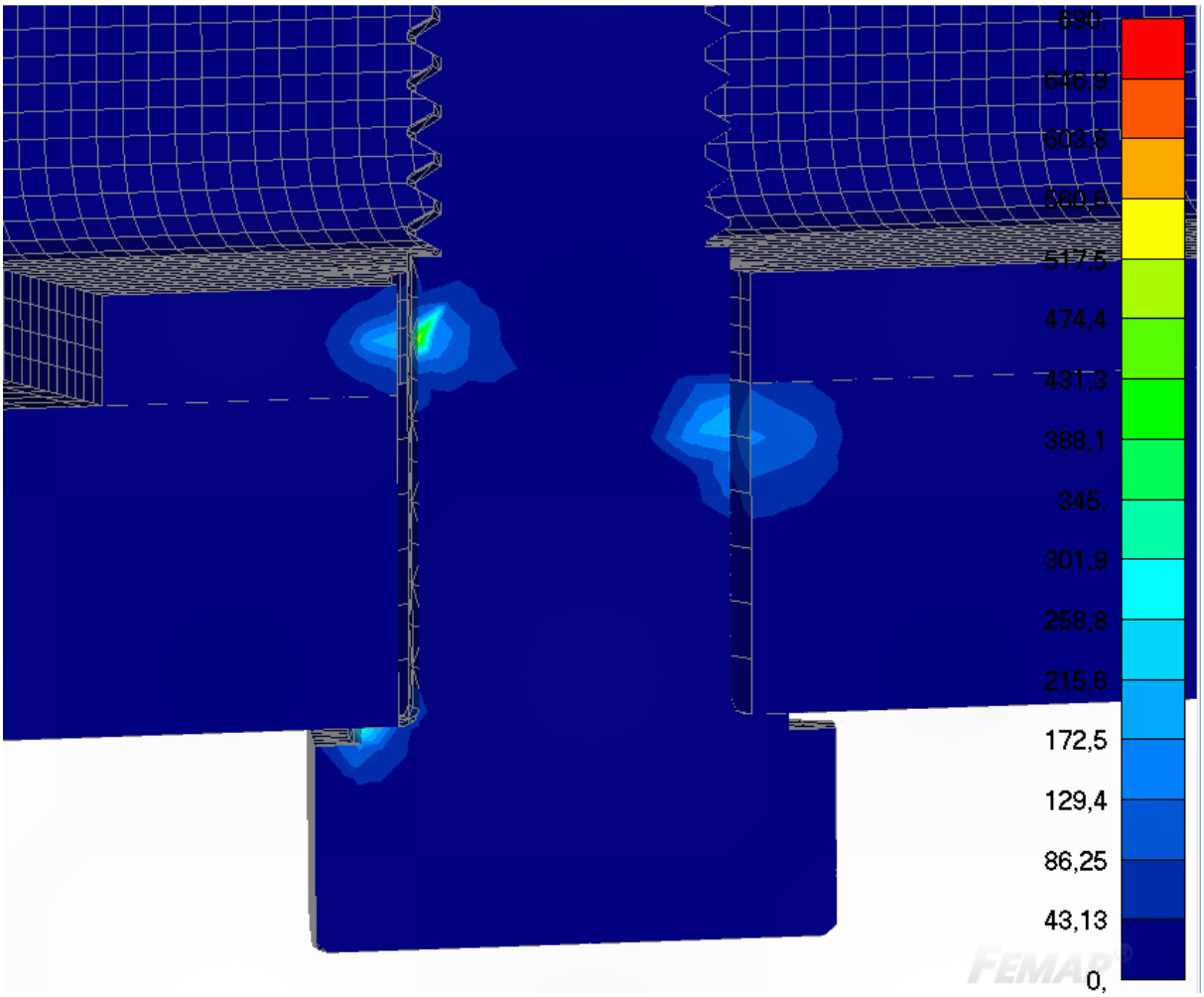
Kuvissa 1-6 on esitetty osittaiskierteiselle M12-ruuville suoritettu analyysi kuormitussarjalla.



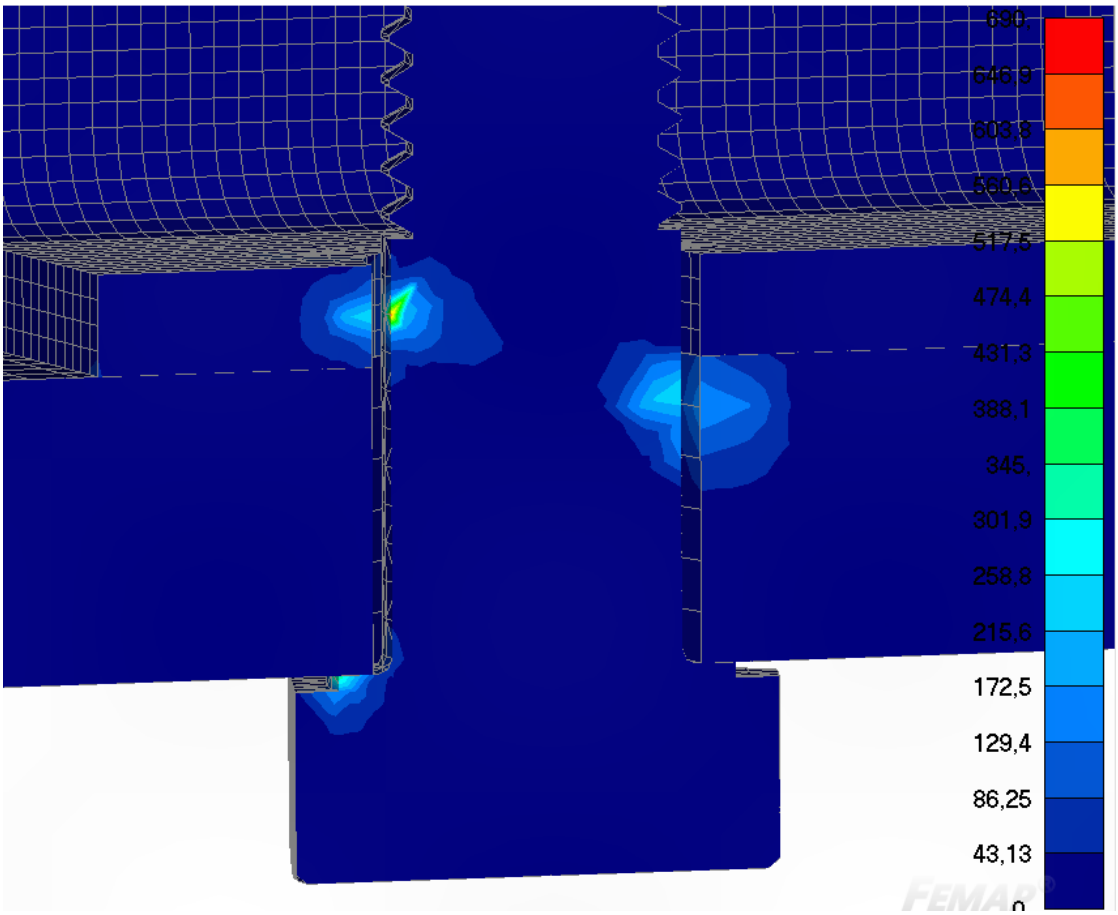
Kuva 1. Kuormitus 0,1-kertaisena alkuperäiskuormituksesta.



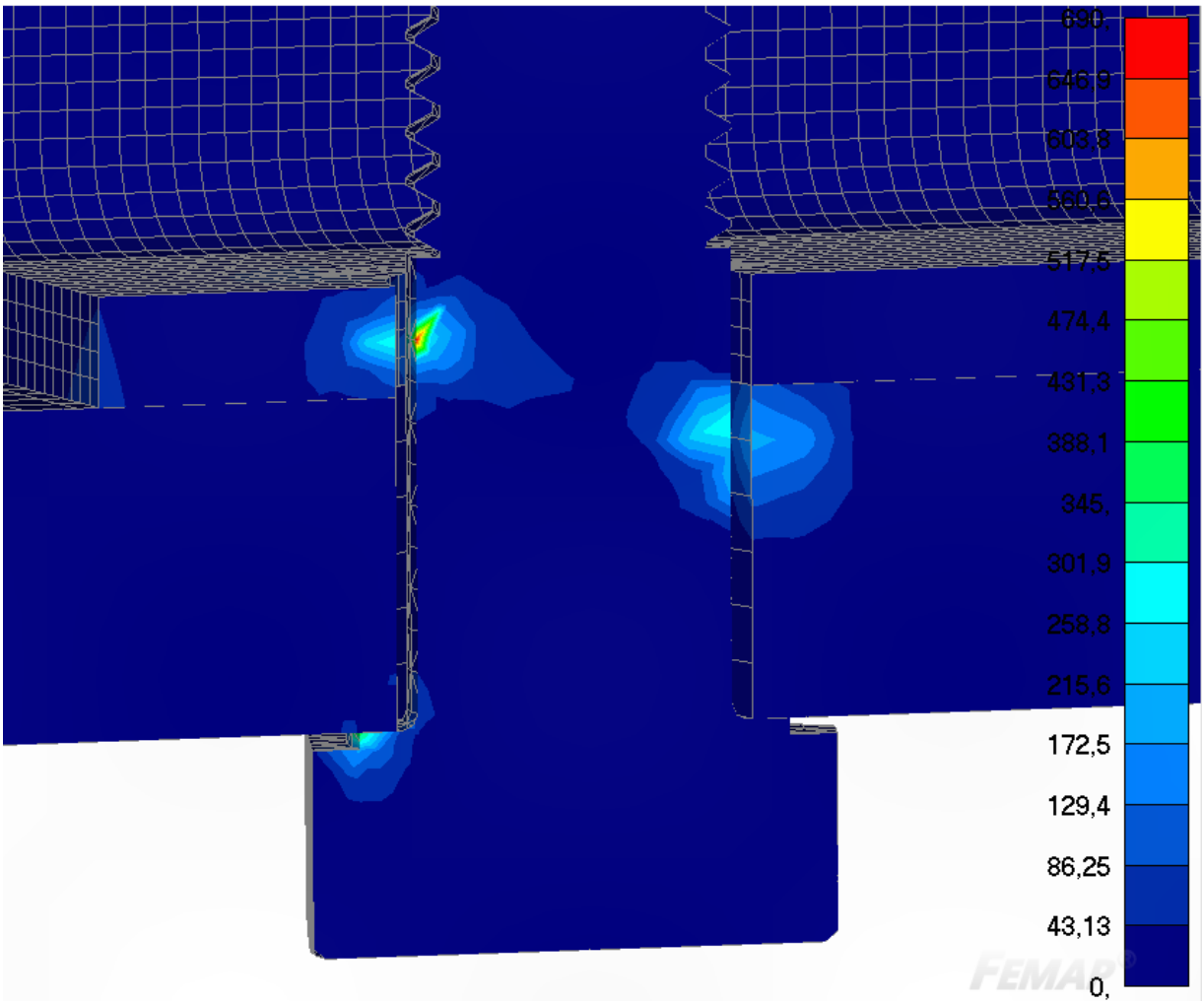
Kuva 2. Kuormitus 0,15-kertaisena alkuperäiskuormituksesta.



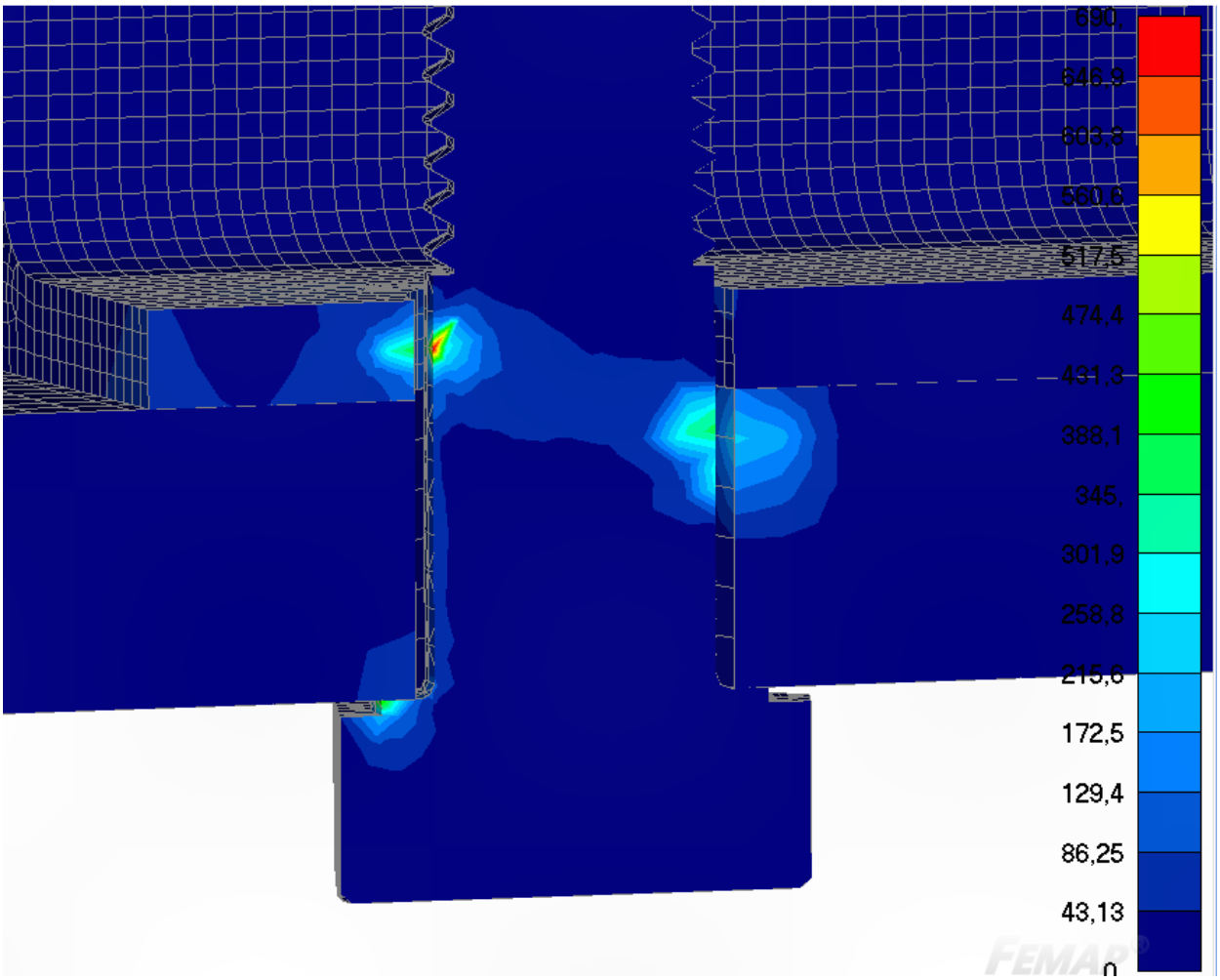
Kuva 3. Kuormitus 0,2-kertaisena alkuperäiskuormituksesta.



Kuva 4. Kuormitus 0,25-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.



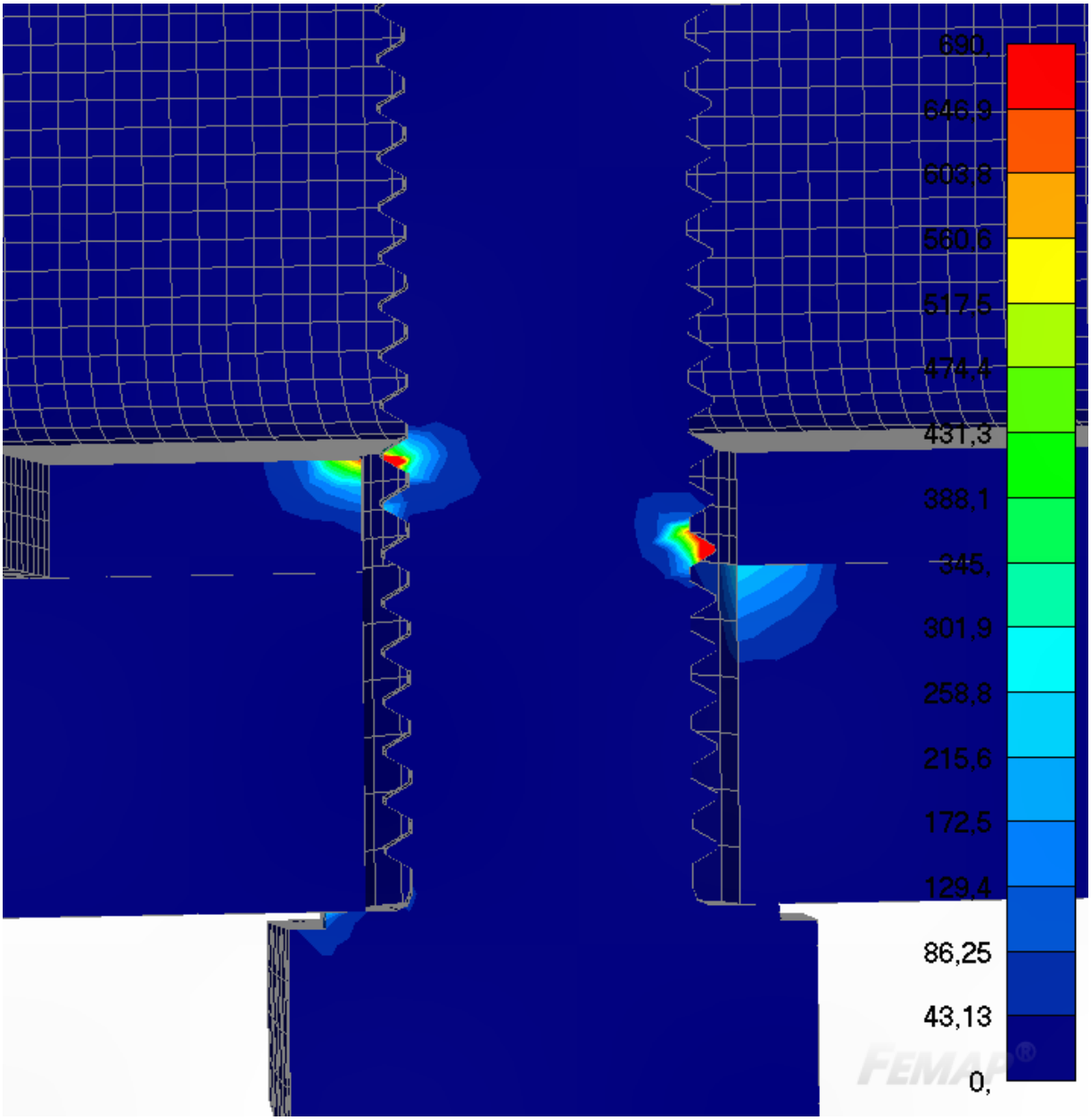
Kuva 5. Kuormitus 0,3-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.



Kuva 6. Kuormitus 0,35-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.

Täyskierteinen M12-ruuvi

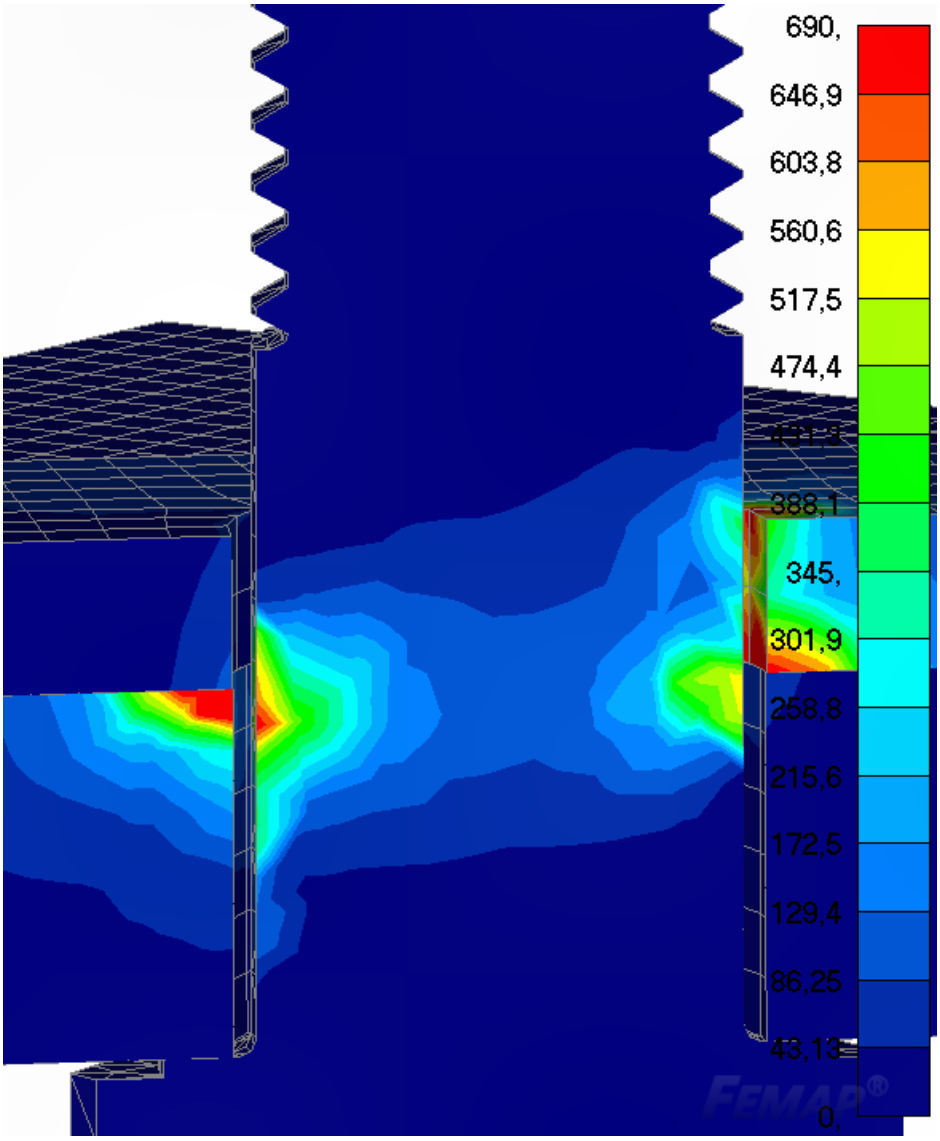
Täyskierteisellä M12-ruuvilla materiaali alkoi myötää jo 0,1-kertaisella kuormituksella.



Kuva 7. Kuormitus 0,1-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.

Osittaiskierteinen M16-ruuvi

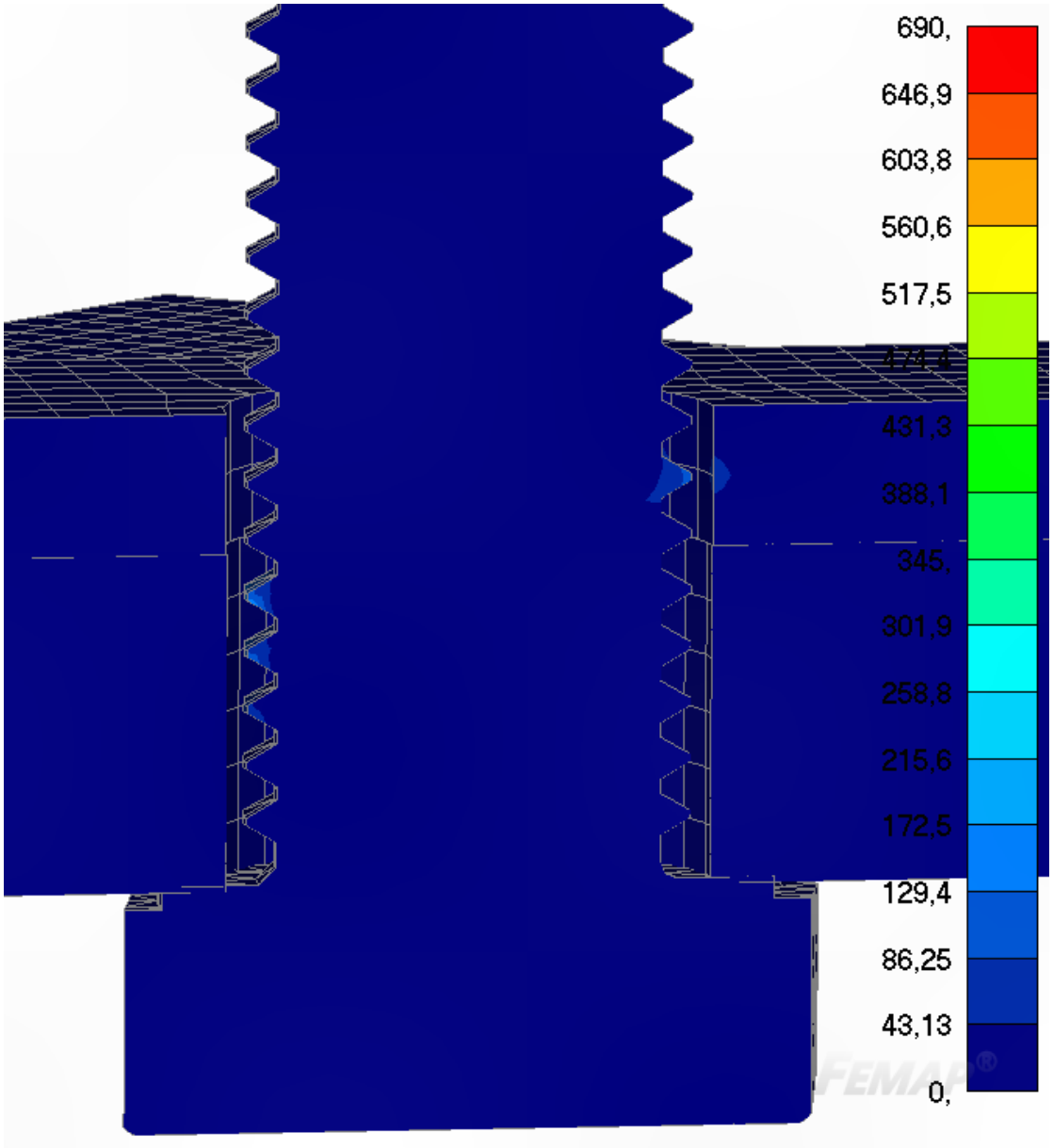
Osittaiskierteisellä M16-ruuvilla materiaalin myötääminen oli hyvin vähäistä jo alkuperäisellä kuormalla.



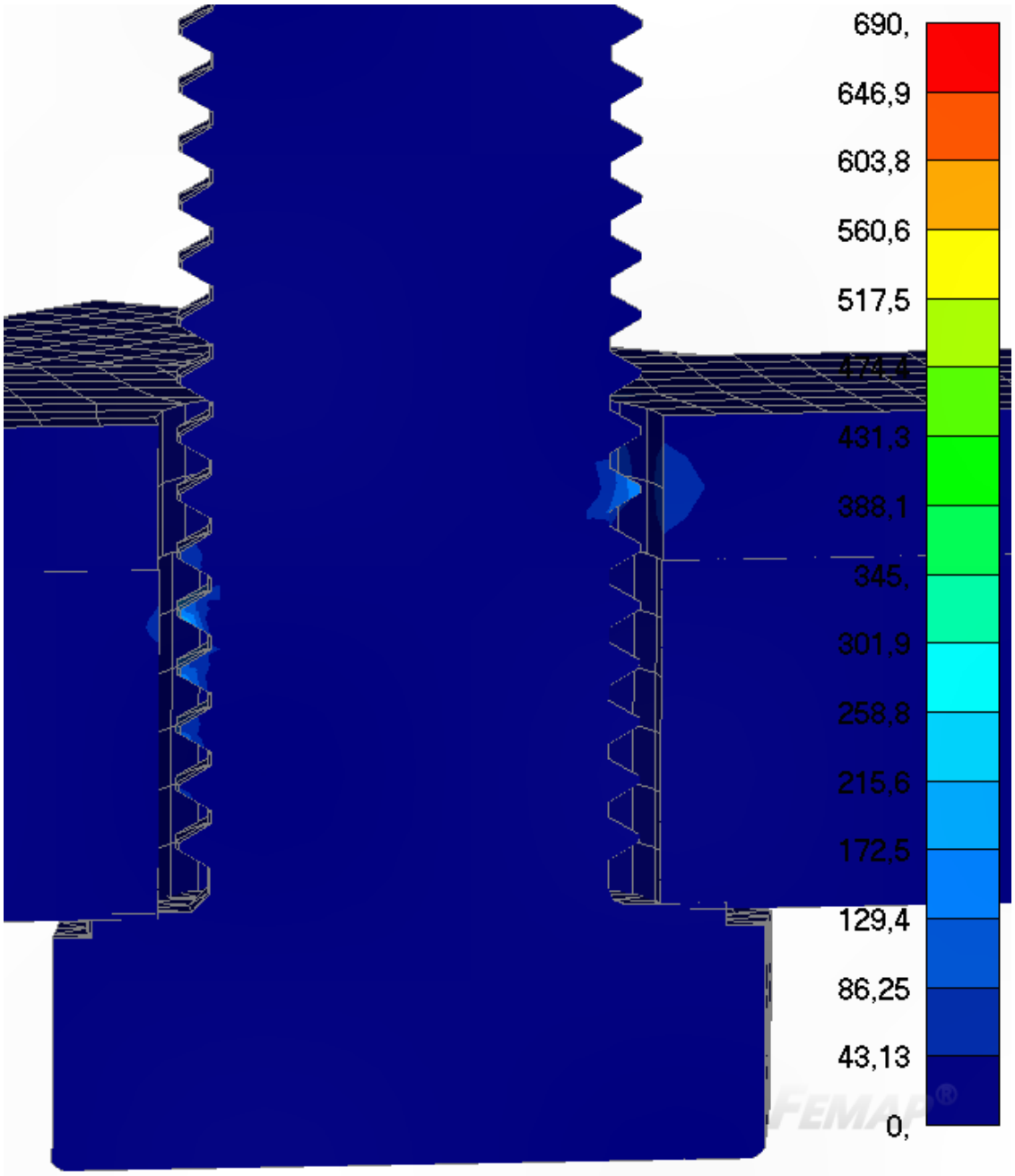
Kuva 8. Osittaiskierteisen M16-ruuvin jännitykset alkuperäisellä kuormituksella.

Täyskierteinen M16-ruuvi

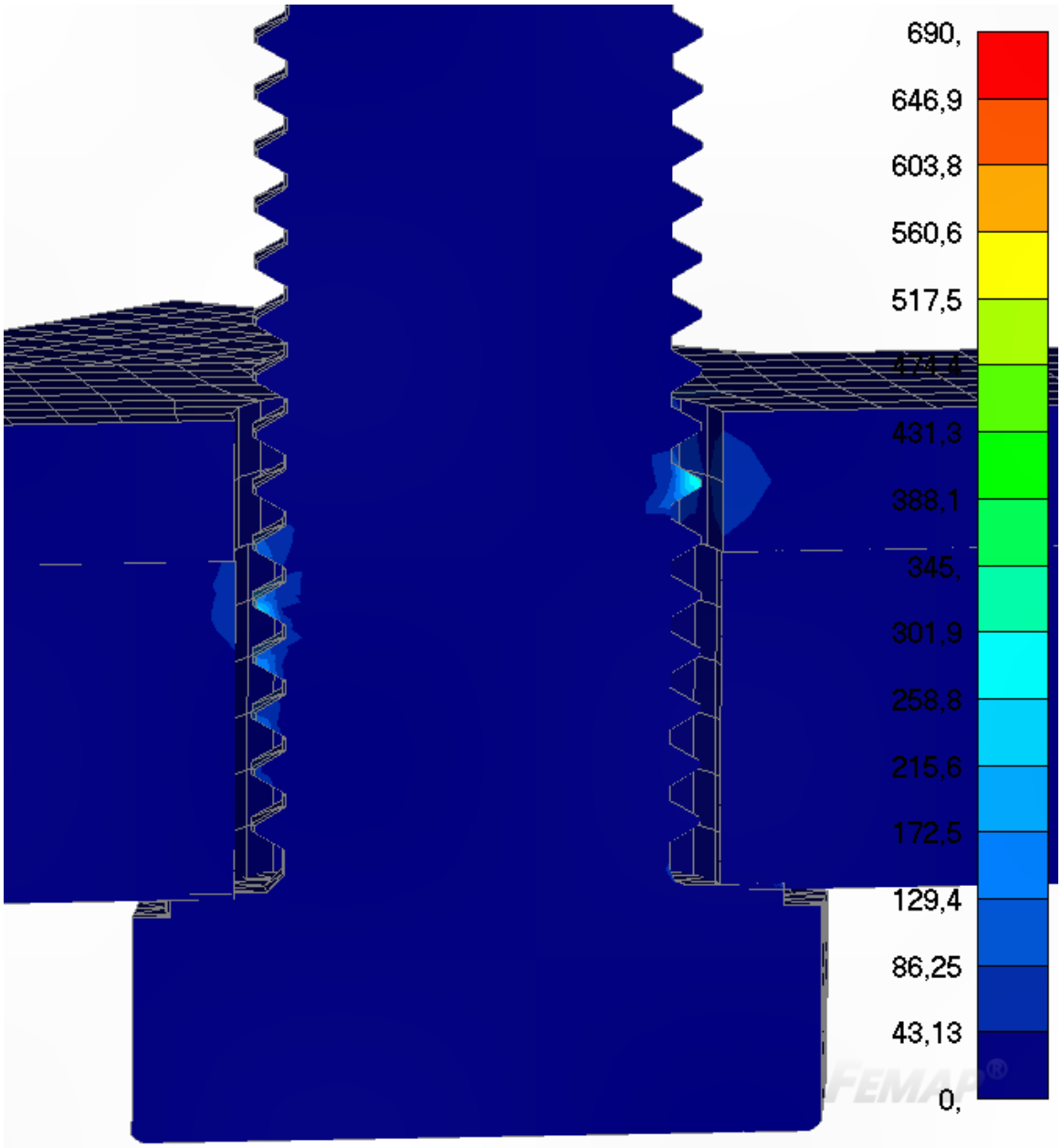
Kuvissa 9- on esitetty täyskierteiselle M16-ruuville suoritettu analyysi kuormitussarjalla.



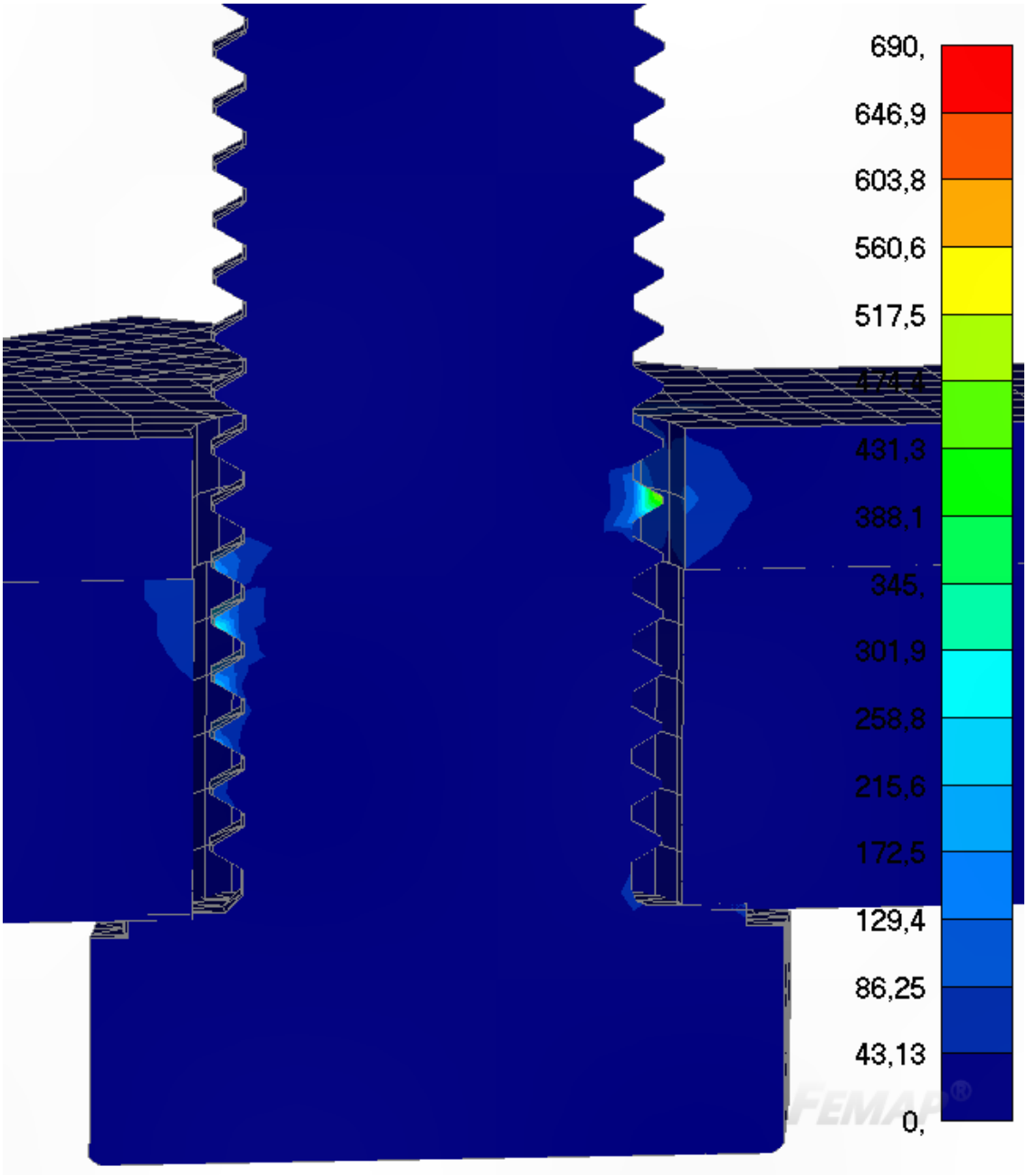
Kuva 9. Kuormitus 0,1-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.



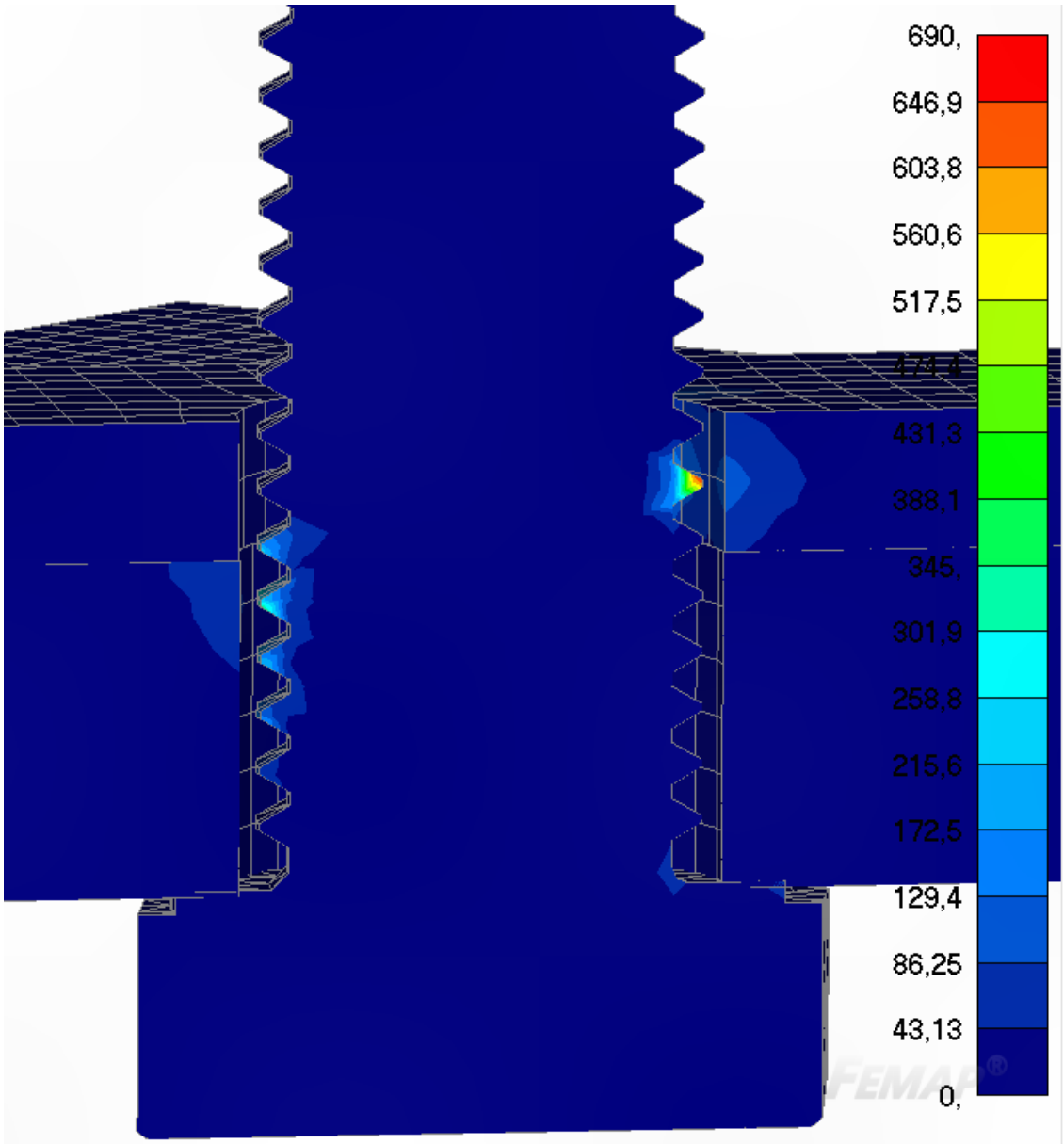
Kuva 10. Kuormitus 0,15-kertainen alkuperäisestä.



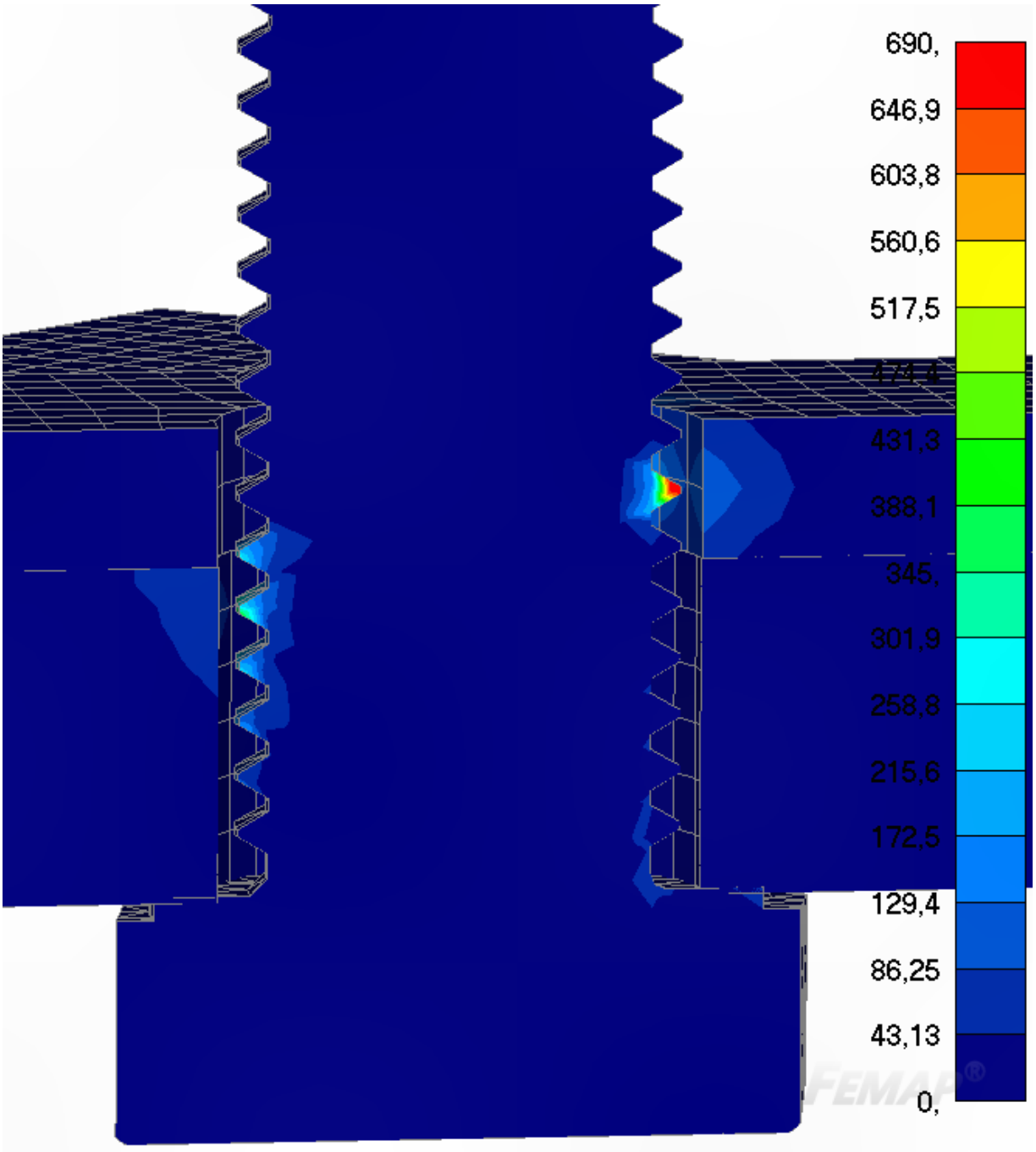
Kuva 11. Kuormitus 0,2-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.



Kuva 12. Kuormitus 0,25-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.



Kuva 13. Kuormitus 0,3-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.



Kuva 14. Kuormitus 0,35-kertaisena alkuperäisestä kuormituksesta.