

Saimaan ammattikorkeakoulu  
Tekniikka, Lappeenranta  
Rakentamisen koulutusohjelma  
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto (YAMK)

Mikko Pieksamä

## **Teräspaaluanturan solmupisteen jännitysten analysointi paalun ja anturan liitoksessa**

Opinnäytetyö 2019

## Tiivistelmä

Mikko Pieksamä

Teräspaalun päälle syntyvän solmupisteen jännitysten analysointi teräsbetonianturassa, 67 sivua, 1 liite (3 sivua)

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka, Lappeenranta

Rakentamisen koulutusohjelma

Ylempi ammattikorkeakoulututkinto (YAMK), opinnäytetyö 2019

Ohjaajat: Petri Himmi, lehtori, Saimaan ammattikorkeakoulu

Terhi Ala-Ilkka, projektinjohtaja, Ramboll Finland

Antti Perälä, teknologiapäällikkö, SSAB Europe Oy

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia jännitysten muodostumista teräspaaluhatun ja raudoitetun betonianturan liitoksessa käyttäen FEM analyysia. Tavoitteena oli määrittää laskentatapa, millä puristuksen jännityspinta-ala voitaisiin määrittää tilanteessa, jossa raudoitus on suorassa kontaktissa teräksisen paaluhatun päällä. Eurokoodissa ei ole kyseiseen tilanteeseen suoraa ohjetta, kun solmupisteessä vaikuttaa useamman kuin yhden suunnan vetoa.

Työn tilaajana toimi SSAB Europe Oy ja työ toteutettiin Ramboll Finland Oy:n toimesta. SSAB Europe Oy on johtava pohjoismainen korkealaatuisten nauha-, kvarttolevy ja putkituotteiden valmistaja, ja toimii myös vahvasti teräspaalujen ja teräspaaluanturoiden kehitystyössä.

Aiheen suurimpina haasteina oli luoda epälineaarisesti toimiva FEM malli, jossa raudoitettu teräsbetonirakenne liittyy teräksiseen paaluhatuun. Mallinnuksen tarkkuus ja eri osien kontaktit toisiinsa korostuivat, koska jännitys jakauman pienillä muutoksilla oli suurta vaikutusta kokonaisvoimaan. Materiaalimallit pyrittiin luomaan mahdollisimman realistisesti, sisältäen materiaalien eri murtumismekanismit.

Opinnäytetyössä tarkasteltavan solmupisteen lujuuden ollessa useissa tapauksissa teräspaaluanturan kokonaiskapasiteetin rajoittava tekijä, saatiin työn tuloksista tärkeää tietoa paaluanturoiden mitoitukseen ja teräspaalujen kehitykseen.

Asiasanat: Teräspaaluantura, puristusjännitys jakauma, FEM

## **Abstract**

Mikko Pieksemä

Stress analysis of node above pile in reinforced steel pile foundation, 67 Pages,  
1 Appendix (3 pages)

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Degree Programme in Construction

Masters´s Thesis 2019

Instructors: Petri Himmi, lecturer, Saimaa University of Applied Sciences

Terhi Ala-Ilkka, project director, Ramboll Finland

Antti Perälä, technology manager, SSAB Europe Oy

The purpose of the thesis was to analyze formation of stresses in the connection between steel pile and reinforced concrete pile foundation using finite element method (FEM). Main goal was to define a calculation method of concrete compression stress area in a situation where reinforcing bars is in direct contact to pile cap. Eurocode does not have direct formula for this situation when node has more than one direction of tension.

The work was commissioned by SSAB Europe Ltd. and it was carried out by Ramboll Finland Ltd. SSAB is a highly-specialized global steel company which develops high-strength steels and provides services for better performance and sustainability.

The most substantial challenge of the thesis was to create a non-linear FEM model which has reinforced foundation attached to steel pile. The accuracy of modeling and contacts of the different parts of model had a significant effect to results because small changes of stress distribution greatly influenced overall force. The aim was to create material models as realistic as possible, including the various fracture mechanisms of the materials.

The results of this study provided important data about compression stress distribution in steel pile foundation. With the capacity of the connection being limiting factor for steel pile, results directly mirror foundations overall capacity.

Keywords: Steel pile foundation, compression stress distribution, FEM

## Sisälllys

Käsitteet.....	5
1 Tutkimuksen tarpeellisuus ja taustatilanne .....	6
2 Paalun päällisen solmupisteen puristusmitoitus ristikkoanalogialla .....	7
2.1 Eurokoodin mukainen menettely.....	7
2.1.1 Puristuslujuuden määrittäminen .....	7
2.1.2 Puristuspuinta-alan määrittäminen .....	8
2.1.3 Eurokoodin kansalliset liitteet .....	11
2.2 Suomen betoniyhdistyksen ohjeistus.....	11
2.2.1 Puristuslujuuden määrittäminen .....	11
2.2.2 Puristuspuinta-alan määrittäminen .....	12
2.3 Mitoituksen yhteenveto .....	13
3 Aiemmat tutkimukset ja standardien vertailu mitoituksessa .....	15
3.1 ACI-318 Building Code .....	16
4 Laskennan lähtötiedot.....	17
4.1 FE-analyysi .....	17
4.2 Laskennan lähtötiedot.....	18
4.3 Rakenteen mallinnus .....	20
5 Laskentaosuus.....	23
5.1 Vaihe 1, perustilanteen mallinnus ilman raudoitusta .....	23
5.1.1 Mallin luonti .....	23
5.1.2 Tulosten analysointi.....	24
5.2 Vaihe 2, pääraudoituksen lisääminen alueina.....	28
5.2.1 Mallin luonti .....	28
5.2.2 Tulosten analysointi ja vertailu vaiheen 1 tuloksiin .....	32
5.3 Vaihe 3, rengasraudoituksen lisääminen .....	37
5.3.1 Mallin luonti .....	38
5.3.2 Tulosten analysointi.....	38
5.4 Vaihe 4, tarkennettu malli .....	46
5.4.1 Mallin tarkennukset ja laskenta .....	46
5.4.2 Tulosten analysointi.....	48
6 Tutkimuksen yhteenveto .....	59
6.1 Johtopäätökset ja perustelut tuloksiin .....	59
6.2 Tulokset .....	61
Kuvat.....	63
Lähteet.....	67

### Liitteet:

Liite 1

FPS-4RD220/12,5, laskennan lähtötiedot ja tuloksia

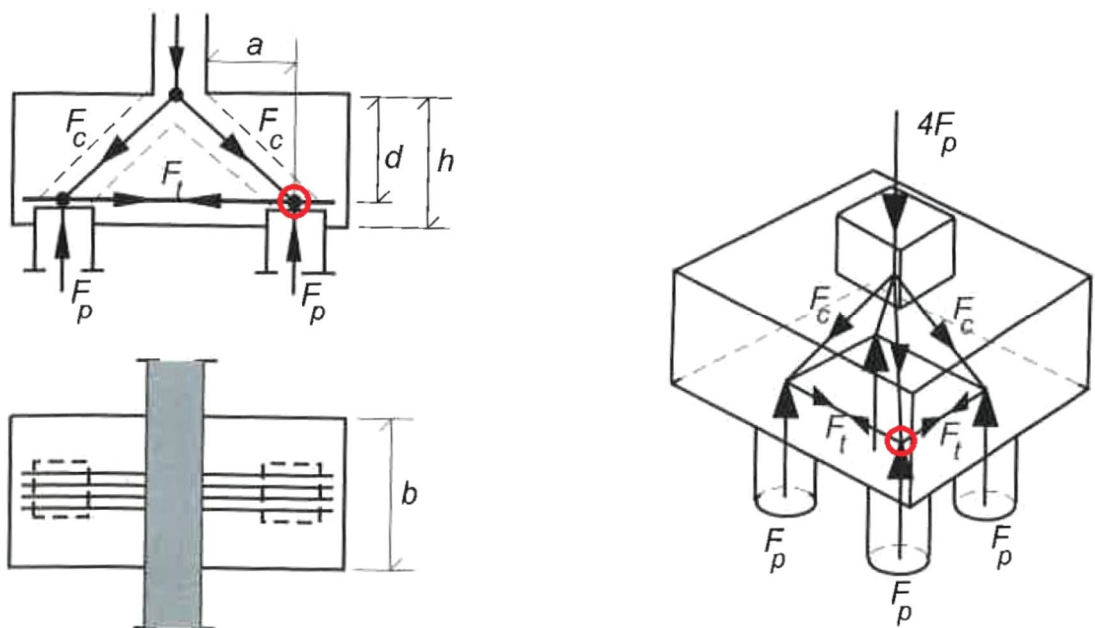
## Käsitteet

$f_{ck}$	Betonin lieriölujuuden ominaisarvo (28 vuorokauden ikäisenä)
$f_{ck,c}$	Betonin lieriölujuuden ominaisarvo, kun laajeneminen on estetty
$f_{cm}$	Betonin lieriölujuuden keskiarvo
$f_{cd}$	Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{ctk,0,05}$	Betonin vetolujuus
$f_{ctm}$	Betonin keskimääräinen vetolujuus
$\nu'$	Solmupisteen lujuuden kerroin betonin lieriölujuuden mukaan
$k_1$	Puristuslujuuden kerroin solmupisteessä, mihin ei ankkuroidu vetosauvoja
$k_2$	Puristuslujuuden kerroin solmupisteessä, mihin ankkuroituu vain yhden suunnan vetosauvoja
$k_3$	Puristuslujuuden kerroin solmupisteessä, mihin ankkuroituu useamman suunnan vetosauvoja
$k_4$	Puristuslujuuden kerroin solmupisteessä, mihin vaikuttaa kolmen akselin suunnan puristus
$\sigma_{RD,max}$	Solmussa vaikuttava puristusjännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{c,2}$	Diagonaalin puristusjännitys BY210 ohjeen mukaan
$E_{cm}$	Betonin kimmokerroin (sekanttimoduuli)
$E_{c,eff}$	Betonin tehollinen kimmokerroin
$E_s$	Raudoituksen kimmokerroin
$E$	Teräksen kimmokerroin
$a_1$	Tuen leveys solmupisteessä
$a_2$	Kuorman suuntaisen puristusalueen leveys solmupisteessä
$f_{yk}$	Teräksen tai raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo
$\gamma_c$	Betonin osavarmuusluku
$\alpha_{cc}$	Kerroin puristuslujuuteen vaikuttaville pitkäaikaistekijöille ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuneille epäedullisille tekijöille

# 1 Tutkimuksen tarpeellisuus ja taustatilanne

Teräspaaluanturoiden ristikkoanalogian mukaisessa mitoituksessa on todettu paaluhatun päälle muodostuvan solmupisteen mitoittamiseen liittyvä ohjeistus Eurokoodissa osin puutteelliseksi. Puutteellinen ohjeistus ajaa kirjavaan mitoituskäytäntöön, mikä johtaa suunnittelijoista riippuviin eriäviin tuloksiin. Teräspaaluanturoiden mitoituksessa on todettu, että käytettäessä SSAB:n teräspaalua ja yhteiselle paalulle osoitettua vakiopaaluhattua, jää Eurokoodin ja ristikkoanalogian mukainen solmupisteelle sallittu puristusvoima vakiopaaluanturan paalulle määrättyä kapasiteettia pienemmäksi, eikä täten teräspaalun täyttä kapasiteettia saada hyödynnettyä. Teräspaalujen lujuuden kehittyessä koko ajan paremmaksi ero kasvaa vielä suuremmaksi.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia jännitysten kulkeutumista ja sitä kautta puristuspinta-alan määrääntymistä paalun päällä FEM analyysillä, sekä määrittää ohjeistus sen laskentaan. Alla olevassa kuvassa on esitetty punaisella ympyrällä opinnäytetyössä tarkasteltava solmupiste. Solmupisteessä ilmenee vinoa ristikkoanalogian mukaista puristusta, sekä pääraudoituksen aiheuttamaa poikittaista vetoa.



Kuva 1. Opinnäytetyössä tarkasteltava puristussolmu paaluanturassa (BY210 2008, kuva 110/6.6)

## 2 Paalun päällisen solmupisteen puristusmitoitus ristikkoanalogiolla

Tässä kappaleessa on tarkasteltu Eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 ja Suomen betoniyhdistyksen ohjeistuksen (kappale 2.2) mitoitustapoja solmupistetarkastelussa. Suomen betoniyhdistyksen ohje BY210, 2008 perustuu Eurokoodiin, mutta sitä tulee tulkita omana erillisenä ohjeena mitoitustavan eroavaisuuden vuoksi.

### 2.1 Eurokoodin mukainen menettely

Paalun ja anturan liitoskohdan solmupistetarkastelu tulee Suomessa mitoittaa Eurokoodin, osan SFS-EN 1992-1-1 kohdan 6.5.4 mukaisesti. Jatkossa Eurokoodiiväittäyksellä tarkoitetaan juurikin osaa 1992-1-1.

Eurokoodiin perustuvassa Betoniteollisuuden ohjeessa (osa 6: Perustukset) on mainittu seuraavaa paaluperustuksista: ”Paaluanturat voidaan suunnitella esimerkiksi ristikkomenetelmällä, joka on esitetty eurokoodin EN 1992-1-1 kohdissa 5.6.4 ja 6.5.” sekä ”Jos paaluantura mitoitetaan taivutukseen perustuvilla menetelmillä, antura tulee tarkastaa myös leikkauksen ja lävistyksen suhteen”. Näin ollen voidaan todeta, että ristikkomenetelmällä mitoitettaessa erillistä leikkaus ja lävistysmitoitusta ei tarvitse tehdä.

#### 2.1.1 Puristuslujuuden määrittäminen

Eurokoodin osan 1992-1-1 kohdassa 6.5.4 on mainittu, että  $\sigma_{RD,max}$  on maksimijännitys, joka voi vaikuttaa solmun reunoilla, eli betonin puristuslujuuden mitoitussarvo tarkasteltavassa solmupisteessä. Lujuus kahteen suuntaan vedetyssä solmupisteessä lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti.

$$\sigma_{RD,max} = k_3 v' f_{cd} \quad (1) \quad (\text{lähde EC kaava 6.62})$$

Opinnäytetyössä tarkasteltavan anturan betonilaadun on oletettu olevan lujuusluokaltaan C35/45, joten kertoimen  $v'$  arvoksi saadaan 0,86.

$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (2) \quad (\text{lähde EC kaava 6.57N})$$

Kerroin  $k_3$  on Eurokoodin suositusarvon mukainen 0,75. Näin ollen tarkasteltavassa solmupisteessä betonin maksimijännitykseksi saadaan arvo  $\sigma_{RD,max} = 12,79 \text{ N/mm}^2$ , mikä on 64,5 prosenttia puristuslujuuden mitoitusarvosta  $f_{cd}$ . Vähennyskerroin  $k_3$  perustuu puristussolmussa vaikuttavaan kahden suunnan vaakasuuntaiseen vetovoimaan. Standardin kertoimet on kalibroitu 2-ulotteisilla palkeilla, jolloin kerroin ei huomioi vaakasuuntaista tukevaa vastavoimaa, mikä paaluanturan tapauksessa on hoidettu rengasraudoituksella. Vastaavasti pilarin mitoituksessa hakaraudoitus toimii vaakasuuntaisen muodonmuutoksen vastavoimana ja lujuutena käytetään arvoa  $f_{cd}$ . Eurokoodin kerrointa  $k_3$  ei ole suoraan määritetty käytettäväksi paaluanturassa, joten lopullinen vähennyskerroimen huomioon ottaminen jää suunnittelijan vastuulle. Paaluanturassa raudoitus ankuroidaan täydelle voimalle solmun takana, eikä vetojännitys raudoituksissa ole kohdassa suurimmillaan, joten kertoimen  $k_3$  käyttö voi aiheuttaa ylimitoitusta.

Eurokoodin kohdassa 6.5.4 (5) on annettu lisämäärittely puristuslujuuden kasvattamiselle. Mikäli vähintään yksi seuraavista ehdoista toteutuu, voidaan puristuslujuuden mitoitusarvoa kasvattaa korkeintaan 10 %:

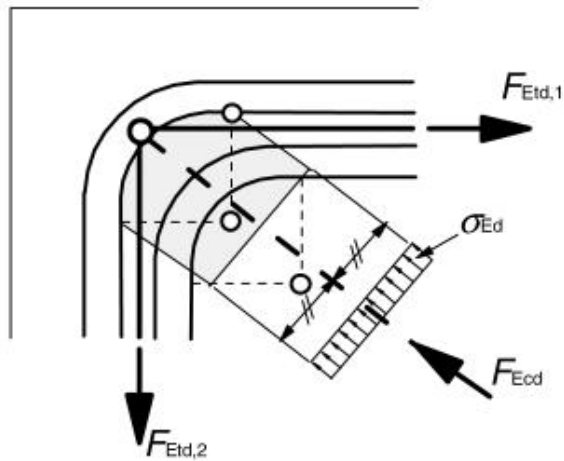
- kolmiakselisen puristustilan kehittyminen on varmistettu
- kaikki puristus- ja vetosauvojen väliset kulmat ovat  $\geq 55^\circ$
- tuilla tai pistekuormien kohdalla vaikuttavat jännitykset jakautuvat tasaisesti, ja solmussa on laajenemista estävä haotus
- raudoitus on jaettu useaan kerrokseen
- solmun laajeneminen on estetty luotettavasti laakerijärjestelyin tai kitkan avulla

10 % korotuksella kyseisen solmun puristuslujuudeksi lujuusluokan C35/45 betonilla saataisiin  $\sigma_{RD,max} = 14,07 \text{ N/mm}^2$ , kun  $k_3$  kertoimena käytetään arvoa 0,75. Mitoitusarvon korotus tulee kuitenkin tarkastella tapauskohtaisesti erikseen.

### 2.1.2 Puristuspinna-alaan määrittely

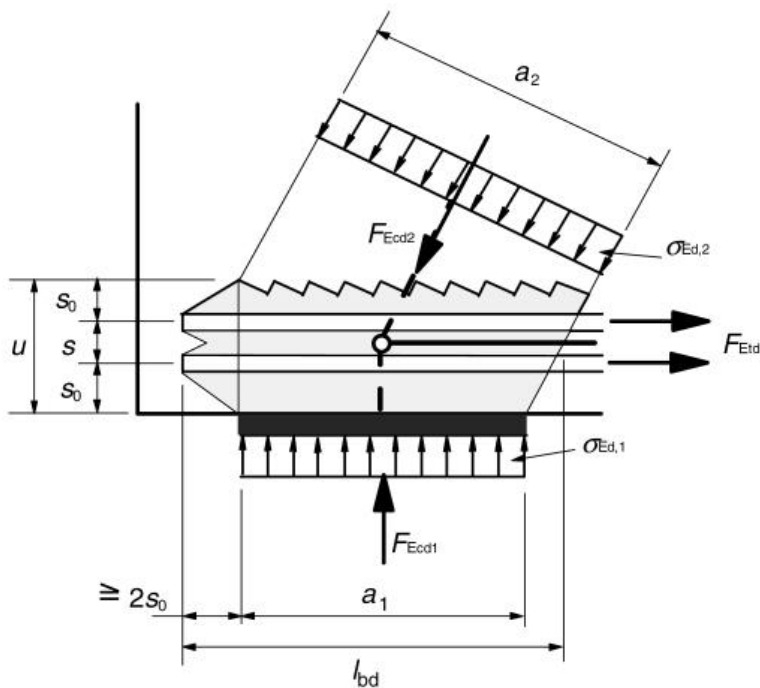
Eurokoodi ei anna suoraa ohjetta kahteen suuntaan vedetyn solmupisteen puristuspinna-alaan määrittelyyn. Tilanteesta on esitetty havainnekuva, mikä jättää tarkemman pinna-alaan määrittelyn suunnittelijan arvioitavaksi.





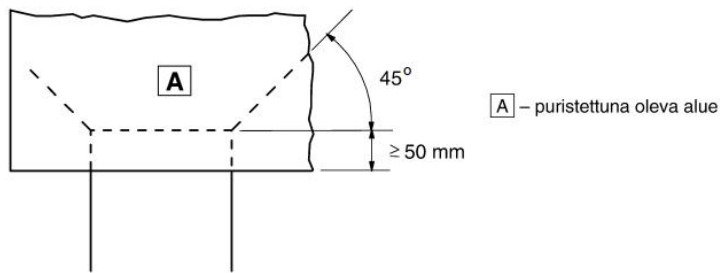
Kuva 2. Puristusalueen määrittäminen kahteen suuntaan vedetyssä solmussa (EC kuva 6.28, kohta 6.5.4 (4))

Yhteen suuntaan vedetyssä solmussa puristusalueen leveys (kuvassa  $a_2$ ) määräytyy, kun paalun leveys projisoidaan tarkastelutasossa voiman suuntaan, niin että projisointi leikkaa raudoituksen painopisteen.



Kuva 3. Puristusalueen määrittäminen yhteen suuntaan vedetyssä solmussa (EC kuva 6.27, kohta 6.5.4 (4))

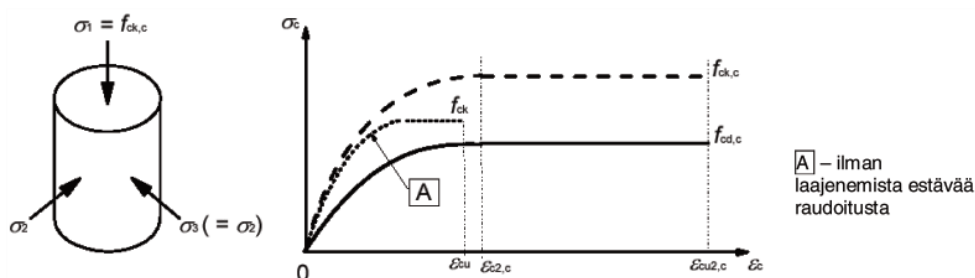
Eurokoodin paaluanturoita käsittelevässä kohdassa 9.8.1 (5) on määritelty betonin puristusvyöhykkeelle leviämiskulma paalun päällä alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 4. Puristusalueen leviäminen paalun päällä Eurokoodin mukaan (EC kuva 9.11, kohta 9.8.1 (5))

Teräspaaluanturassa pääraudoitusten sijaitessa suoraan tukipinnan (paaluhatun) päällä, voidaan olettaa, että kuormitus pääsee siirtymään ainakin osittain raudoituksen yläpinnasta paalulle pääterästen ja paaluhatun suoran kontaktin kautta. Näin ollen yhtenä vaihtoehtona tutkitaan betonin puristusjännitys raudoituksen päällä. Paaluhatun levitessä paalun reunojen ulkopuolelle tulee huomioida paaluhatun reunan taipuman aiheuttama tuen väheneminen, ja sitä kautta jännityksen keskittyminen ainakin osittain enemmän paaluhatun keskiosalle.

Eurokoodin kohdassa 3.1.9 on esitetty lujuuden kasvatus betonissa, kun betoni on raudoituksella estetty laajenemattomaksi. Laajenemattoman betonin lujuuteen  $f_{ck,c}$  vaikuttaa laajenemista estävän raudoituksen aiheuttama tehollinen poikittainen puristusjännitys. Eurokoodin mukaan laajenemista estävä raudoitus voi koostua hyvin ankkuroiduista umpihaoista tai ristikkäisistä poikittaistangoista, jotka voivat plastisoitua betonin poikittaisen laajenemisen takia. Näin ollen paaluanturan tapauksessa pää- tai rengasraudoitus voisivat tuoda lisäkapasiteettia betonin puristuslujuudelle. Kuitenkin epälineaarisisessa rakenneanalyysissä tulee Eurokoodin mukaan käyttää betonin lujuuden arvoa  $f_{cm}$ , joten kyseistä lujuuden korotusta ei tarkastella opinnäytetyössä.



Kuva 5. Laajenemista estävästi raudoitetun betonin jännitys - muodonmuutosyhteys (EC kuva 3.6, kohta 3.1.9)

### 2.1.3 Eurokoodin kansalliset liitteet

Suomen kansallinen liite ei anna lisämäärittelyjä puristussolmun tarkasteluun. Myöskään Ruotsin kansallisessa liitteessä ei ole lisämäärittelyjä kyseisen solmun betonin puristuksen mitoitusmenettelyyn.

Tanskan kansallisessa liitteessä (DS/EN 1992-1-1 DK NA:2013) on annettu muutos kertoimelle yhteen- ja kahteen suuntaan vedettyjen solmupisteiden lujuuden määrittelykselle. Kertoimet  $k_2$  ja  $k_3$  ovat molemmat 1,0, kuten kerroin  $k_1$ . Näin ollen kyseisen solmun teholliseksi puristuslujuudeksi C35/45 betonilla saataisiin  $\sigma_{RD,max}$  17,06 N/mm<sup>2</sup>, vastaavan arvon Suomessa ollessa 12,79 N/mm<sup>2</sup>.

Muiden maiden kansallisia liitteitä ei tässä opinnäytetyössä tarkasteltu.

## 2.2 Suomen betoniyhdistyksen ohjeistus

Suomen betoniyhdistyksen Eurokoodiin perustuvassa ohjeessa BY210, 2008 annetaan myös ohjeet ristikkoanalogian puristussolmujen mitoitukseen. Ristikkoanalogian mitoitusohjeessa ei kuitenkaan suoranaisesti viitata paaluanturan mitoitukseen, jossa paalujen tukipiste sijaitsee anturan sisällä ja rauditus on suoraan kosketuksissa tukipintaan.

### 2.2.1 Puristuslujuuden määrittäminen

Tarkasteltavan solmupisteen betonin puristuslujuus määritetään BY210, 2008 ohjeessa alla olevan kuvan mukaisesti.

$$(a) f_{cd1} = 0,85 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \text{ kun solmuun liittyy vain puristettuja sauvoja,}$$

$$(b) f_{cd2} = 0,60 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \text{ kun solmuun liittyy puristettuja ja vedettyjä sauvoja,}$$

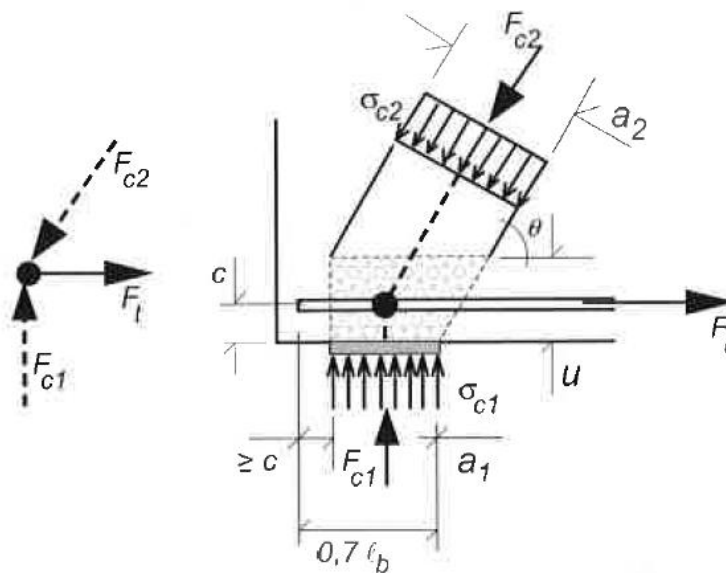
$$(c) f_{cd3} = 0,70 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \text{ sekasolmuissa (esim. solmut II kuvassa 6/6.5).}$$

Kuva 6. Puristuslujuuden määrittäminen solmupisteessä eri tapauksissa (BY210, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, sivu 437)

Neljän paalun anturassa lujuusluokan C35/45 betonilla betonin puristuslujuuden mitoitusarvon  $f_{cd}$  kertoimeksi saadaan 0,516. Näin ollen solmupisteen betonin tehollinen puristuslujuus on 51,6 prosenttia puristuslujuuden mitoitusarvosta  $f_{cd}$ , mikä on 12,9 % vähemmän kuin Eurokoodin mukaisessa menettelyssä. Solmupisteen betonin teholliseksi puristuslujuudeksi saadaan  $\sigma_{c,2} = 10,23 \text{ N/mm}^2$ . Solmupisteen suurin sallittu jännitys tarkastetaan ohjeessa myös tukipaineen mukaan, joten puristuspinna-ala ei voi ylittää tuen leveyttä.

## 2.2.2 Puristuspinna-alan määrittäminen

Alla olevassa kuvassa on esitetty ohjeen menettelytapa puristuspinna-alan määrittämiseen.



Kuva 7. Puristusjännityksen välittyminen solmuun (BY210, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, kuva 8/6.5)

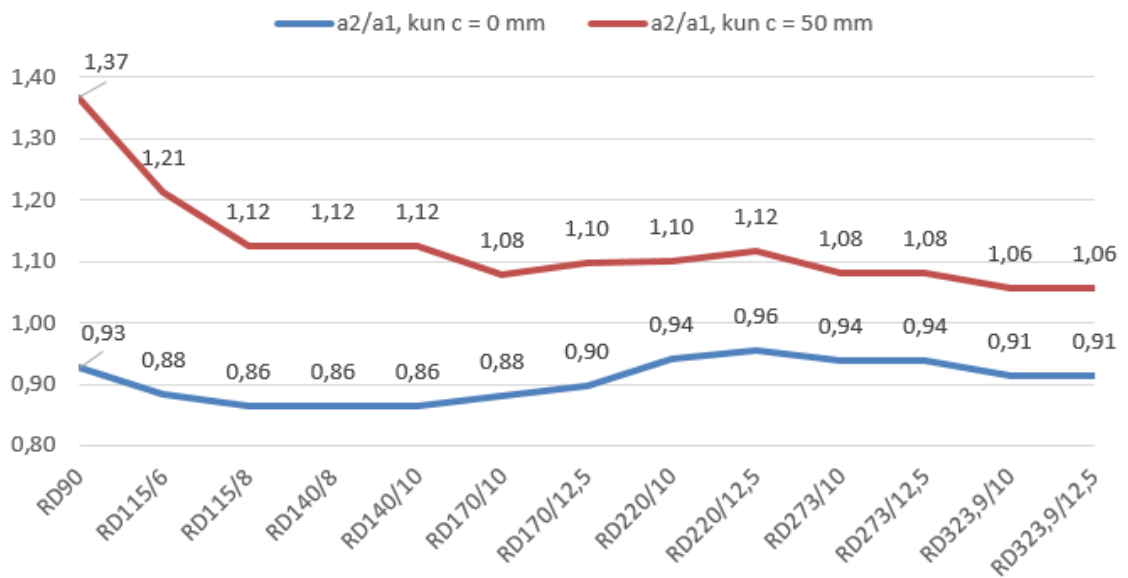
Solmun puristuspinna-alan leveys  $a_2$  määrittyy alla olevan kaavan mukaisesti.

$$a_2 = a_1 \sin \theta + u \cos \theta \quad (3) \quad (\text{lähde BY210})$$

Paaluanturassa käytetään  $u$ :lle arvoa  $2c$ , kun yhdessä kerroksessa oleva raudointi ankkuroituu vähintään mitan  $c$  solmun alueen taakse. Pääraudoituksen sijaitessa suoraan paaluhatun päällä saadaan  $u$ :n arvoksi pääterästen halkaisija. Toiseen suuntaan tarkasteltuna  $u$ :n arvoksi saadaan  $3 \cdot$  pääterästen halkaisija, joten

tarkastelussa voidaan käyttää näiden arvojen keskiarvoa  $2 \cdot$  pääterästen halkaisija. Näin ollen puristussolmun leveydeksi saadaan pienempi arvo kuin tukipintana toimivan paaluhatun leveys.

Alla olevassa kuvassa on esitetty puristuspinta-alan leveyden  $a_2$  suhde paaluhatun pinta-alan leveyteen  $a_1$ . Sininen viiva kuvaa paaluanturan tapausta, kun pääraudoitus on suoraan paaluhatun päällä. Punainen viiva kuvaa tapausta, kun raudoitus sijaitsee betonipeitteen 50 mm verran ylempänä tuesta.



Kuva 8. Solmun puristuspinnan leveyden  $a_2$  suhde tuen leveyteen  $a_1$

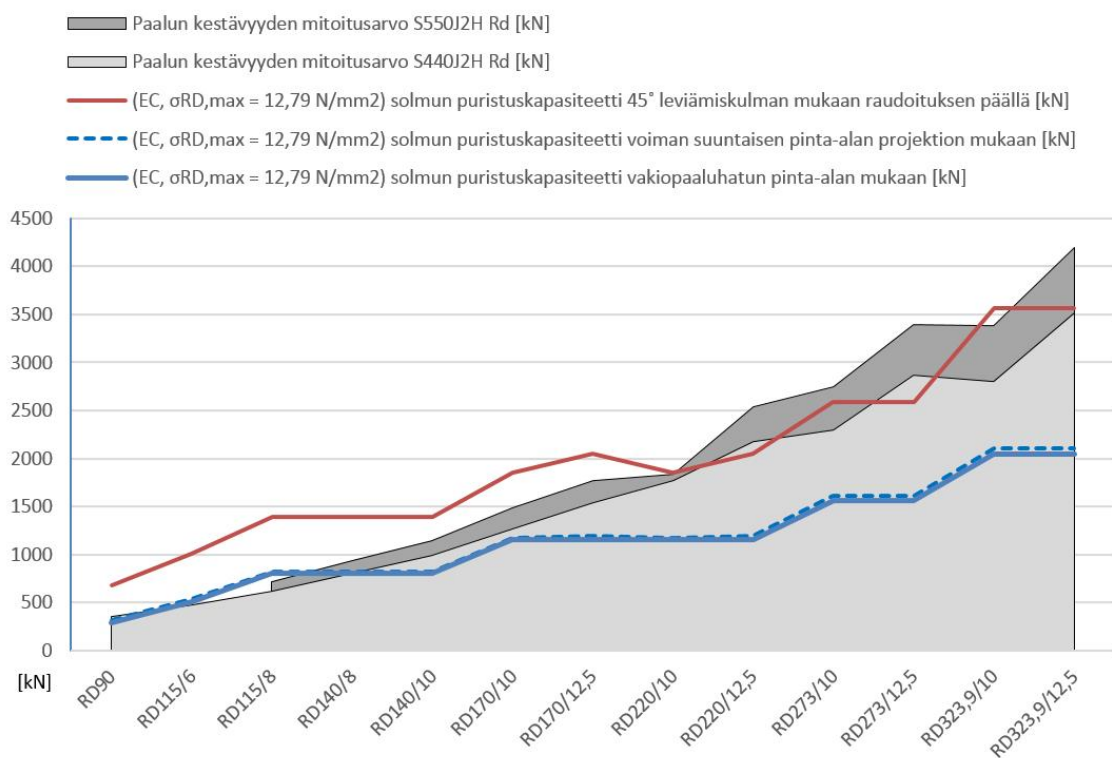
Kaavan mukaan raudoituksen sijaitessa suoraan tuen päällä, tulee puristuspinta-ala määrittää tuen pinta-alaa pienemmäksi. Tämä on kuitenkin ristiriidassa kuvan kanssa, joissa puristuspinta-ala levenee tuen päällä. Näin ollen kaavan käyttö opinnäytetyön tapauksessa, missä raudoitus on suoraan paaluhatun päällä, ei ole järkevää.

### 2.3 Mitoituksen yhteenveto

Alla olevassa kuvassa on esitetty graafisesti RD-paalutyypin kestävyysmitoitussarvot vakiopaaluanturoissa (lyhenne FPS), sekä tarkasteltavan solmupisteen puristusmitoituksen kapasiteetit eri mitoitustavoilla. Sininen viiva kuvaa mitoitustapaa, missä puristuspinta-ala on sama kuin tuen pinta-ala. Sininen katkoviiva kuvaa tapausta, kun puristuspinta-alan leveys projisoidaan voiman suun-

taan leikaten pääraudoituksen painopisteen. Punainen viiva on vakiopaaluanturoiden mitoituksessa käytetty oletama puristus-pinta-alan leviämisestä raudoituksen yläpintaan 45 asteen kulmassa.

Paalujen puristuskapasiteetti vakiopaaluanturoissa on esitetty lujuusluokissa S440 (vaaleampi harmaa alue) ja S550 (tummempi harmaa alue). Mitoituksen lähtötietoina on käytetty SSAB:n RD-paalujen vakiopaaluhattuja, betonin lujuusluokkaa C35/45 ja SSAB:n vakiopaaluanturoiden pääraudoitusta, mikä vaikuttaa kuorman leviämispinta-alaan (punainen viiva).



Kuva 9. Tarkasteltavan solmupisteen puristuskapasiteetit eri mitoitusmenetelmillä verrattuna paalun kestävyuden mitoitusarvoon vakiopaaluanturoissa

Kapasiteettien epälineaarinen kehittyminen perustuu paaluhatun koon vaihtumiseen portaittain. Puristus-pinta-alan levitessä 45° leviämiskulman mukaan, vaikuttaa pinta-alaan myös pääraudoituksen paksuus. Tästä johtuu välillä RD170/10 – RD220/12,5 näkyvä poikkeama.

Vakiopaaluanturoiden FPS-4RD220/12,5 ja FPS-4RD273/12,5 tapauksissa on paalun kestävyuden mitoitusarvoa vähennetty lujuusluokalla S440 (punainen

viiva leikkaa harmaan alueen). Vähennys perustuu opinnäytetyössä tarkasteltavan solmupisteen puristuskapasiteetin rajoittavaan arvoon. Lujuusluokalla S550 sama ilmiö on nähtävissä jo neljällä eri tyypillä.

Kun solmun puristuspinta-ala lasketaan voiman suuntaisen projektion mukaan, kuitenkin enimmillään pääraudoituksen keskipisteen leikkaavan viivan mukaan, saadaan puristuspinta-alaa hieman kasvatettua (sininen katkoviiva). Tämän vaikutus on kuitenkin häviävän pieni, kun raudoitus on suoraan paalun päällä.

Paalun koon ollessa paalun kapasiteettiin nähden melko pieni, tulee betonin puristuspinta-alan määrityksessä huomattavia eroja tarkastelutavasta riippuen. Opinnäytetyön FEM-laskennan pohjalta pyritään löytämään luotettava tapa betonin puristuspinta-alan määritykseen teräspaaluanturassa, kun huomioidaan pääraudoituksen vaikutus suorassa kontaktissa paalun päällä, sekä paalun tunkeuma betoniin.

### **3 Aiemmat tutkimukset ja standardien vertailu mitoituksessa**

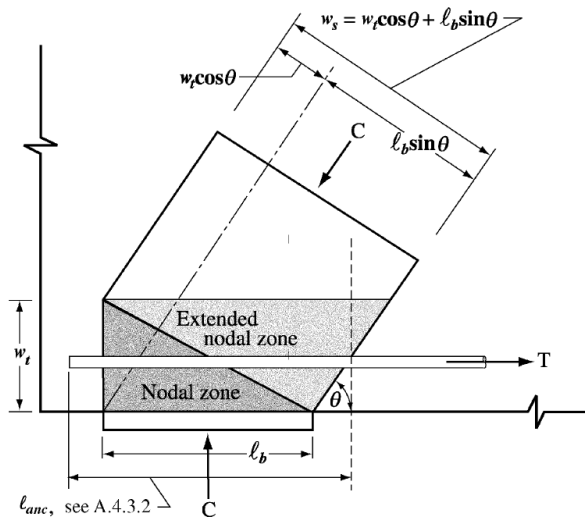
Opinnäytetyön yhtenä osatehtävänä oli tutustua aiheen kirjallisuuteen, sekä etsiä mahdollisia muita jo tehtyjä tutkimuksia aiheesta.

Paaluanturoita on paljon tutkittu, niin käsin laskennallisesti, kuin FEM analyysien pohjalta. Opinnäytetyössä tarkasteltavan puristussolmun pinta-alan määrityksestä ei kuitenkaan löytynyt aiemmin tehtyjä tutkimuksia FEM-analyysiä käyttäen.

Opinnäytetyössä on tarkasteltu Eurokoodin lisäksi standardia, missä on ohjeistusta solmupisteen puristusmitoitukseen ristikkoanalogialla. ACI-318 Building Code on käytössä Amerikassa. Mitoitustapa ei poikkea juurikaan Eurokoodin mukaisesta ja ohjeistus on myös niissäkin hieman puutteellinen kyseistä paaluanturan tapauksista mitoitettaessa.

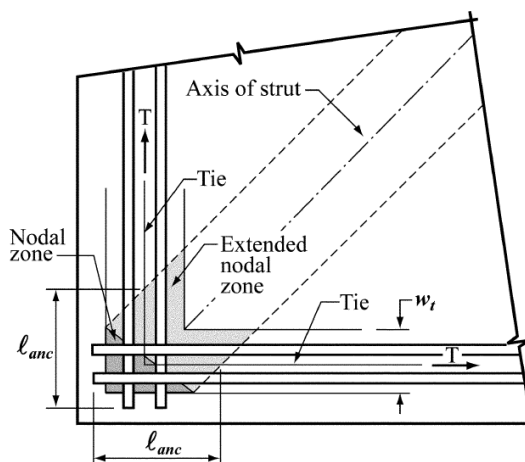
### 3.1 ACI-318 Building Code

ACI (American Concrete Institute) ohjeen 318-05 (Building Code Requirements for Structural Concrete) mukaan solmupisteen pinta-ala määritetään voiman suuntaan kääntyvänä Eurokoodin tavoin.



Kuva 10. Puristusalueen määrittäminen yksikerroksisessa raudoituksessa (iii) (ACI 318-05, Fig.RA.1.6a)

Teräspaaluanturan tapauksessa raudoitusten sijaitessa suoraan tuen päällä saadaan puristusalueen leveyden  $w_s$  kertoimeksi alle 1,00, kuten Suomen betoniyhdistyksen ohjeistuksessa. Näin ollen kaava ei toimi kuvan mukaisesti opinnäytetyössä tarkasteltavassa rakenteessa, missä raudoituksen ja tuen välissä ei ole betonipeitettä.



Kuva 11. Ankkuroinnin määrittäminen kahteen suuntaan vedetyssä solmupisteessä (ACI 318-05, Fig.RA.4.3)



Puristetussa ja kahteen suuntaan vedetyssä solmupisteessä puristusalueen määrittämiseen on annettu kuva, mutta ei laskukaavaa kuten Eurokoodissa.

Solmupisteiden efektiivinen lujuus  $f_{ce}$  lasketaan kaavalla  $0,85 \times \beta_n \times f_c'$ . Betonin puristuslujuus  $f_c'$  tarkoittaa sylinterilujuutta 28 vuorokauden ikäiselle betonille, mikä vastaa lähestulkoon Eurokoodin arvoa  $f_{ck}$ . Kahteen suuntaan vedetyssä solmupisteessä kertoimen  $\beta_n$  arvo on 0,60. Näin ollen sylinterilujuuden vähennyskerroin kyseisen solmupisteiden tarkastelussa on 0,51. Eurokoodin vastaava kerroin, sylinterilujuuden ominaisarvoon  $f_{ck}$  verrattuna on 0,365.

## 4 Laskennan lähtötiedot

### 4.1 FE-analyysi

FE-analyysi (englanniksi FEA = Finite Element Analysis) tarkoittaa numeerista laskentaa, mikä suoritetaan käyttäen elementtimenetelmää. Tavanomaisemmin kyseinen laskentatapa tunnetaan nimellä FEM (Finite Element Method). Elementtimenetelmässä laskettava rakenne jaetaan useampiin osiin, elementteihin. Elementit koostuvat useista solmupisteistä, joista ne liittyvät toisiinsa. Laskenta perustuu siirtymien ja sitä kautta voimien laskentaan solmupisteiden välillä.

Laskenta elementtimenetelmällä on joko epälineaarista tai lineaarista. Lineaarinen laskentatapa on nopeampi suorittaa, mutta se ei ota huomioon siirtymien aiheuttamaa muutosta rakenteessa. Epälinearisessa analyysissä jäykkyyssmatriisi muodostetaan uudelleen muuttuneella geometrialla. Linearisessa analyysissä solmupisteiden siirtymät saadaan ratkaistua kerralla, kun taas epälinearisessa analyysissä käytetään apuna iterointia. Materiaalin myötölujuuden ylittyessä sen jäykkyys muuttuu, mikä johtaa suoraan epälineaarisen analyysin käyttämiseen. Epälinearisessa analyysissä jännitysten ja muodonmuutosten välinen suhde voi olla epälineaarista. Näin ollen voidaan tutkia suuria siirtymiä luotettavasti, kun esimerkiksi betonin vetolujuuden ylittyessä rakenne halkeaa ja vetojännitykset siirtyvät kokonaisuudessaan teräkselle.

Laskettaessa 2D ja 3D rakenteita, saadaan tuloksena aina likiarvoja. Laskennan tarkkuus riippuu pääosin mallin geometriasta, kuormituksesta, tukiehdoista, materiaalityydyksistä sekä elementtiverkon tarkkuudesta, muodosta ja tyypistä. Näin ollen mallin luonnin tarkkuus korostuu merkittävästi. Kyseisellä laskentatavalla voidaan kuitenkin laskea monimutkaisia 3-ulotteisia ja epälineaarisesti käyttäytyviä rakenteita. Laskennan tulos saavutetaan useiden iterointikierrosten päätyttyä, mikäli voima- ja siirtymätasapaino löytyy. Muutoin iterointikiertoja tulee loputon määrä eikä laskenta ikinä saavuta loppuaan.

## 4.2 Laskennan lähtötiedot

FEM-laskennan lähtötietoina käytetään SSAB:n 4 paalun RD-vakiopaaluanturoita, sekä anturatyypin FPS-4RD220/12,5 eri korkeusvariaatioita. Opinnäytetyön laskenta-analyysit on suoritettu Ansys FEM-laskentaohjelmalla. Laskennan lähtötiedot on kasattu alla olevan kuvan taulukkoon.

Tyyppi	Anturan		Pilarin	paaluhatun			Paalun		Pääraudoitus			Rengasraudoitus			Kuorma	
	Valikko	korkeus		leveys	väli	leveys	paksuus	Halkaisija	seinämä	määrä	koko	jako k	määrä	koko		jako k
FPS-4RD90		700	1200	300	700	150	15	88.9	6.3	4	20	80	3	12	225	350
FPS-4RD115/6		700	1200	300	700	200	20	114.3	6.3	4	20	80	3	12	225	480
FPS-4RD115/8		800	1500	300	800	250	25	114.3	8	5	20	80	4	12	180	620
FPS-4RD140/8		800	1500	300	800	250	25	139.7	8	5	20	80	6	12	110	800
FPS-4RD140/10		800	1500	350	800	250	25	139.7	10	6	20	80	4	16	180	990
FPS-4RD170/10		900	1500	400	800	300	30	168.3	10	6	20	80	5	16	160	1270
FPS-4RD170/12,5		900	1500	400	800	300	30	168.3	12.5	5	25	80	5	16	160	1540
FPS-4RD220/10		1200	1500	500	800	300	30	219.1	10	6	20	80	7	16	155	1770
*FPS-4RD220/12,5		1200	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	5	25	80	9	16	115	2180
FPS-4RD270/10		1400	1800	550	1000	350	35	273.0	10	6	25	80	6	20	230	2300
FPS-4RD270/12,5		1400	1800	600	1000	350	35	273.0	12.5	6	25	80	7	20	190	2870
FPS-4RD320/10		1400	2100	550	1200	400	30	323.9	10	6	32	80	7	20	190	2800
FPS-4RD320/12,5		1400	2100	650	1200	400	30	323.9	12.5	6	32	80	8	20	160	3520
*4RD220/12,5 h1600		1600	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	178	2180
*4RD220/12,5 h1400		1400	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	156	2180
*4RD220/12,5 h1200		1200	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	133	2180
*4RD220/12,5 h1000		1000	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	111	2180
*4RD220/12,5 h800		800	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	89	2180
*4RD220/12,5 h600		600	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	67	2180
*4RD220/12,5 h400		400	1500	550	800	300	30	219.1	12.5	6	20	80	9	16	44	2180

Kuva 12. Laskennan lähtötietoaineisto

Kuormitus paalulle on valittu vakiopaaluanturalle määritetyn paalun mitoituskaasiteetin mukaan, vaikka tapauksissa FPS-4RD220/12,5 ja FPS-4RD270/10 paalukuormaa on vähennetty juurikin opinnäytetyössä tarkasteltavan solmupisteen puristusmitoituksen vuoksi.

Materiaalien lähtötietoina käytetään seuraavia arvoja:

- Betonin kimmokerroin  $E_{cm} = 34\,077 \text{ N/mm}^2$  (C35/45)

→ Laskentavaiheesta 2 eteenpäin kimmokerroin määritetään jännitys - muodonmuutos kuvaajan kulmakertoimen mukaan

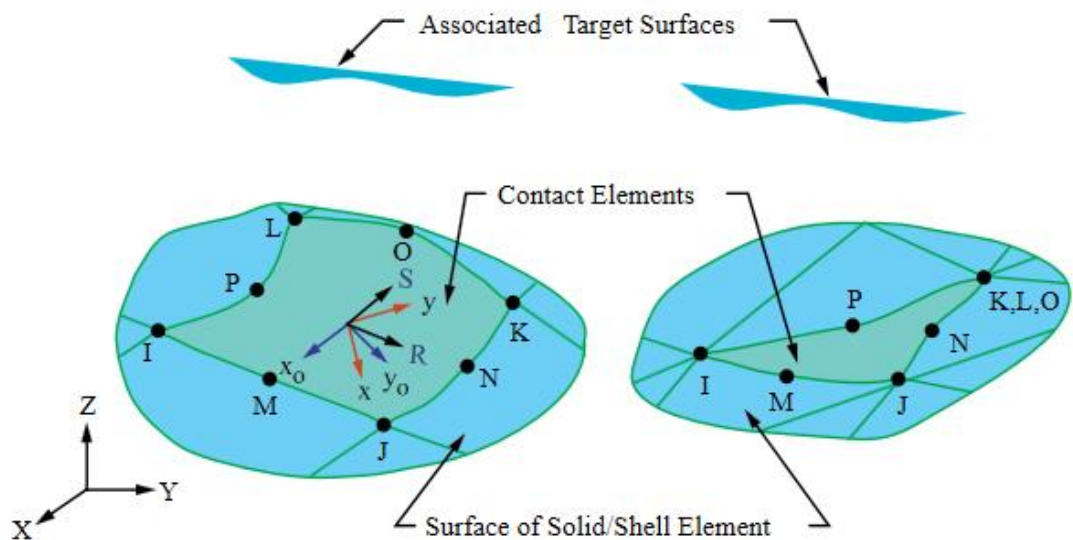
- Betonin poissonin luku = 0,2

Betonin poissonin luku eli suppeamaluku on valittu Liikenneviraston betonin ajasta riippumattomat materiaalimallit -raportin suosituksen mukaan. Lukuarvoa 0,2 tulee käyttää, kun tarkempaa tietoa ei ole. Suppeamaluku tavallisesti vaihtelee välillä 0,14 – 0,26.

- Teräksen kimmokerroin  $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
- Raudituksen kimmokerroin  $E_s = 200\,000\text{ N/mm}^2$
- Raudituksen ja teräksen poissonin luku = 0,3

FEM-laskennan lähtötietoina käytetään seuraavia valintoja:

- Elementtityyppi = SOLID185, laskentavaiheessa 1
- Elementtityyppi = SOLID65, laskentavaiheesta 2 eteenpäin
- Kontaktipinnat = CONTA174 ja TARGE170

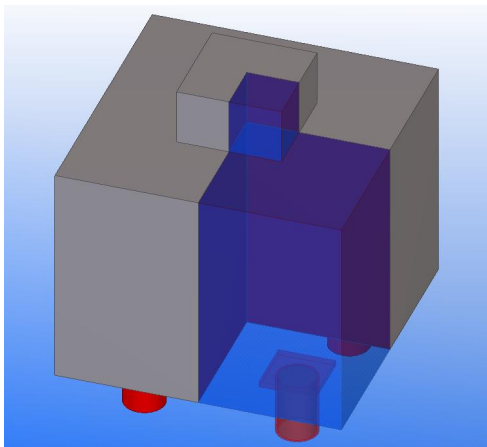


Kuva 13. CONTA174 elementtityyppi (Ansys Help, Figure 174.1)

Kontaktipinnoilla voidaan yhdistää eri muotoisia kappaleita toisiinsa ilman yhteensopivaa elementtiverkotusta. Mallin kontaktipinnat teräs- ja betoniosien välillä ovat liukuvia. Betonin liittyessä betoniin tai teräksen liittyessä teräkseen on kontaktipinnat mallinnettu liikkumattomina.

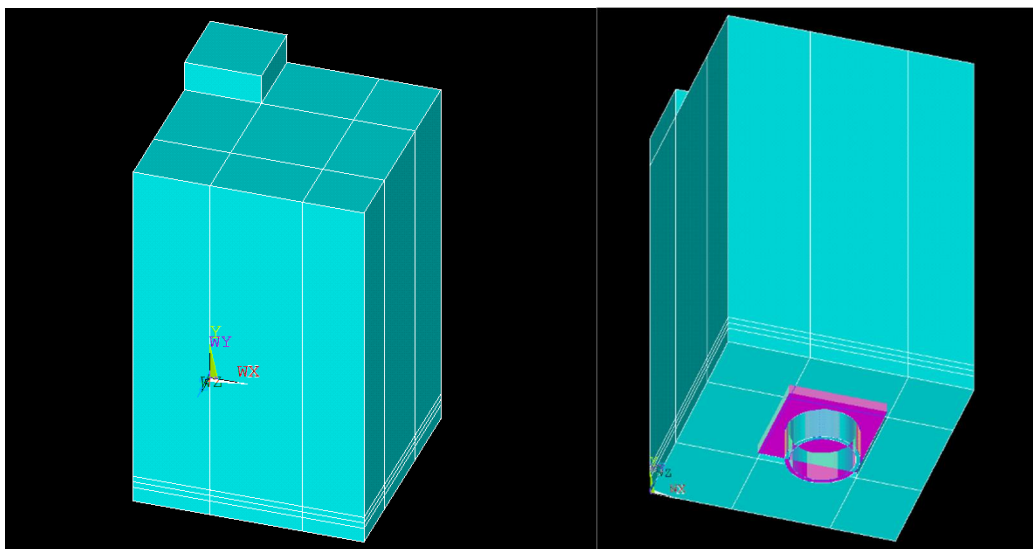
### 4.3 Rakenteen mallinnus

Rakenne mallinnetaan pohjaltaan neliön muotoisen paaluanturan  $\frac{1}{4}$  osana. Leikkaantuviin pintoihin on asetettu tukiehdot kuormitukselle. Näin ollen siirtymät on estetty vaakasuunnassa leikkauspinoilla, mutta pystysuuntaiset siirtymät on mahdollisia. Näin voidaan menetellä, kun antura on symmetrinen molempiin suuntiin ja tästä johtuen myös voimien jakautuminen tapahtuu symmetrisesti. Paalun sijainti mallinnetaan teoreettisen sijainnin mukaan ilman mittapoikkeamaa. Mallinnuksen yksikköinä käytetään arvoja [N] ja [mm].



Kuva 14. Teräspaaluanturan mallinnettava  $\frac{1}{4}$  osa

Antura on jaettu nurkkapisteiltään kohtaaviin suorakulmisiin särmiöihin. Myös rauditusalueet on jaettu omiin osiin. Tämä helpottaa mallin elementtiverkon luomista, eikä erillisiä kontaktipintoja tarvitse kyseisten osien välille asettaa.



Kuva 15. Ansys näkymä, tilavuuskappaleet (volume)

Pilarin sivumitta on muokattu anturan tilavuuskappalejakoon sopivaksi mallinnuksen yksinkertaistamiseksi. Vaikutus solmupisteen puristusmitoituksessa on häviävän pieni varsinkin paaluanturatyypeillä FPS-4RD170/10 – FPS-4RD270/12,5. Eroavaisuus on esitetty alla olevassa kuvassa.



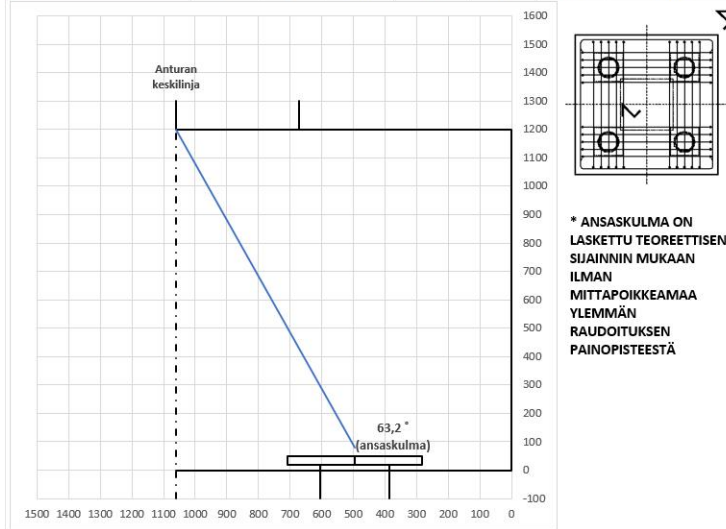
Kuva 16. Mallinnuksen ero todelliseen pilarin sivumittaan

Kuvan vasemmalla on esitetty vakiopaaluanturan FPS-RD4RD220/12,5 mallinnuksen eroavaisuus oikeaan tilanteeseen. Suurimmillaan mallinnettu pilarin reuna on 125 mm sisempänä oikeaa tilannetta. Laskenta antaa kuitenkin näin ollen varmemmalla puolella olevia vastauksia, koska pilarin kontakti ei todellisessa tilanteessa välttämättä jakaudu tasaisesti reunoihin asti.

Teräspaalun ja paaluhatun väliin, kuten myös paalun betonitäytön ja paaluhatun väliin, on luotu kontaktipinta pintojen eriävän muodon vuoksi. Paaluhatun ja sen yläpuolisen tilavuuskappaleen väliin on luotu kontaktipinta materiaalin vaihtumisen vuoksi. Myös pilarin ja anturan väliin on luotu kontaktipinta, koska tilavuuskappaleet on luotu erillistä objekteista. Paalun alapäässä on jäykkä tuki.

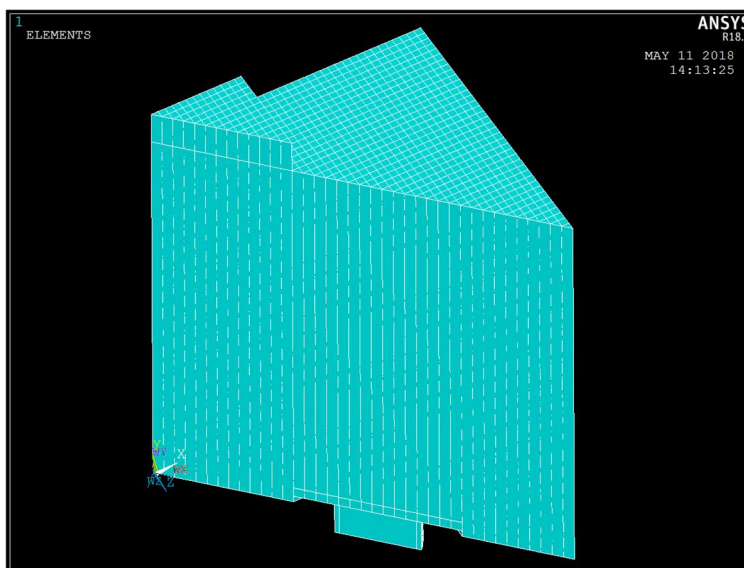
Laskennan lähtöarvojen muuttamista varten luotiin Ansysksen makron luontiin Excel pohjainen työkalu.

Anturatyyppe	Anturan		Pilarin	Paaluhatus			Paalun	
	korkeus	leveys	Leveys	etäisyys	leveys	korkeus	Halkaisija	seinämä
	1200	1500	550	800	300	30	219,1	12,5
*4RD220/12,5	Pääraudoitus			Rengasraudoitus			Kuormitus paalulle	
	määrä	koko	jako k	määrä	koko	jako k	[kN]	
	6	20	80	9	16	115	2180	



Kuva 17. Excel Makron lähtötietojen syöttösivu

Rakenteen elementtiverkko on luotu suorakulmaisista särmiöistä rakenteen kuutiomaisen muodon vuoksi. Elementtien korkeutta voidaan venyttää pääraudoituksen yläpuolisella osalla laskennan keventämiseksi. Elementin korkeus ei kuitenkaan tule olla elementin leveyteen nähden yli kaksinkertainen, jotta liian pitkä sivumitta ei häiritse kuorman siirtymistä luonnollisesti ansaskulman mukaan pilarilta paalulle. Elementtien sivumitta tulee olla lähellä pääraudoituksen kokoa, jotta elementit pysyvät mahdollisimman kuutiomaisina pääraudoituksen alueella.



Kuva 18. Rakenteen elementtiverkko. Kuva leikattu anturan keskeltä nurkkaan

## 5 Laskentaosuus

Opinnäytetyössä tutkitaan jännityksen jakautumista vaiheittaisen tarkastelun avulla:

1. Laskennan ensimmäisessä vaiheessa luodaan lineaarisen analyysin malli ja tarkastetaan sen toimivuus
2. Toisessa vaiheessa lisätään materiaaleille lujuudet ja pääraudoitus
3. Kolmannessa vaiheessa lisätään rengasraudoitus
4. Neljännessä vaiheessa mallia tarkennetaan vaiheissa 1-3 tehtyjen havaintojen avulla.

Lopulliset tulokset ja johtopäätökset perustuvat vaiheen 4 laskentamallin tuloksiin.

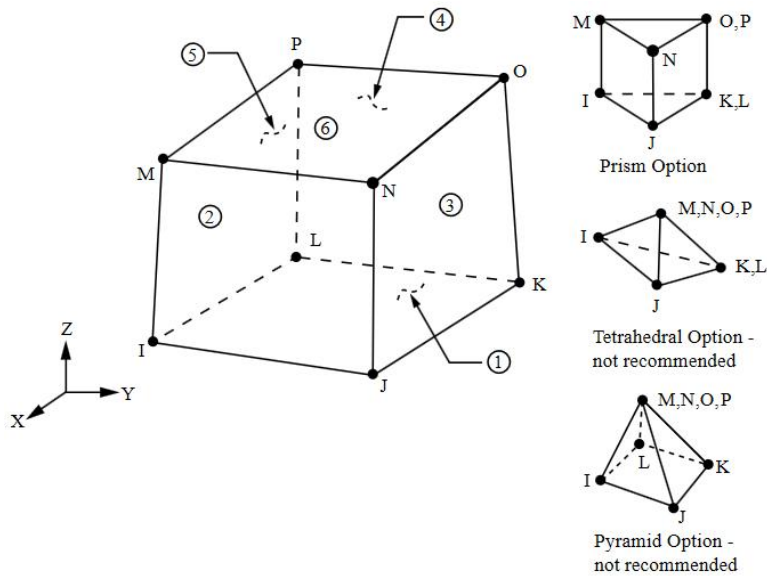
### 5.1 Vaihe 1, perustilanteen mallinnus ilman raudoitusta

#### 5.1.1 Mallin luonti

Ensimmäisessä vaiheessa anturan raudoituksia ei ole huomioitu, vaan teräsbetoniantura on mallinnettu täysin betonisena. Vaiheen tarkoituksena on pääosin tutkia mallinnuksen toimivuutta ennen raudoituksen lisäystä. Kuormitus on annettu pilarin päähän paineena  $\text{N/mm}^2$ .

Elementtiverkon kokona käytettiin kuution muotoista 20 mm sivumitan elementtiä. Raudoituksen yläpuolisen osan elementtejä ei ole venytetty pystysuunnassa. Mikäli tilavuuskappaleen koko ei ole juuri 20 mm kertainen, niin kyseinen elementin sivumitta pienenee hieman, jotta kokonaiset elementit mahtuvat tilavuuskappaleeseen.

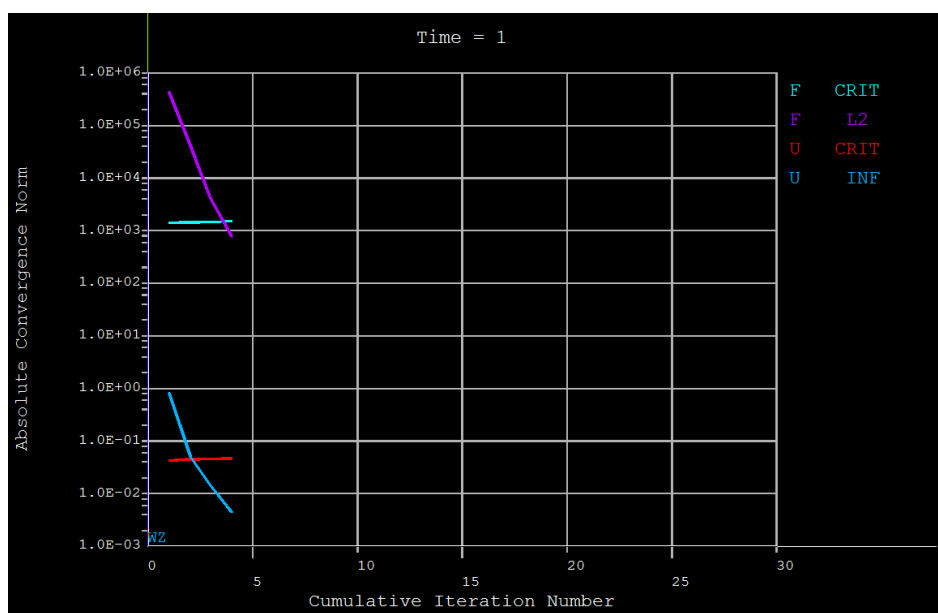
Laskennan ensimmäisessä vaiheessa elementtityyppinä käytettiin SOLID185 elementtiä. Elementti on kahdeksan solmuinen, ja sopii kiinteiden kappaleiden mallintamiseen. Materiaaleille ei asetettu lujuuksia, joten jännityksen ja muodonmuutoksen suhde toimi lineaarisesti kimmokerrointen suhteessa äärettömään arvoon asti.



Kuva 19. SOLID185 elementtityyppi (Ansys Help, Figure 185.1)

### 5.1.2 Tulosten analysointi

Tulokset on laskettu perustapauksella FPS-4RD220/12.5 (tapaus 1.1) ja sen varioidulla anturan korkeudella  $h = 600$  mm (tapaus 1.2). Perustapaus FPS-4RD220/12,5 on laskettu myös kahdella paaluhatun paksuuden variaatiolla 50 mm (tapaus 1.3) ja 100 mm (tapaus 1.4) jännitysjakautumisen seuranta varten. Alla olevassa kuvassa on esitetty Ansyksen FEM-laskennan kehittyminen iterointikierrosten mukaan. Kontaktielementtien epälineaarista käyttäytymisestä johtuen laskenta siirtyi epälineaariseen analyysiin.



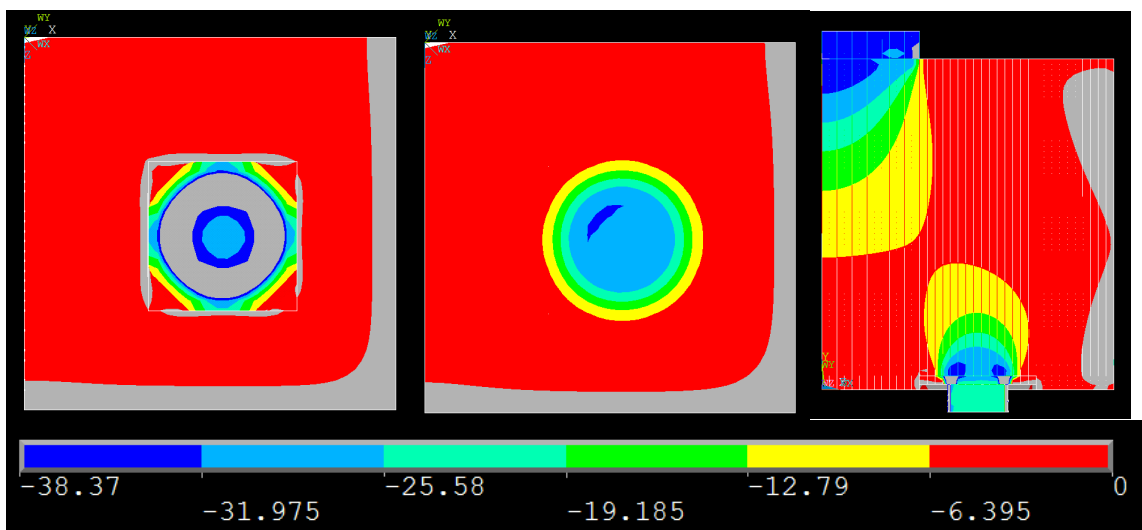
Kuva 20. Ansys FEM-laskentakuvaaja



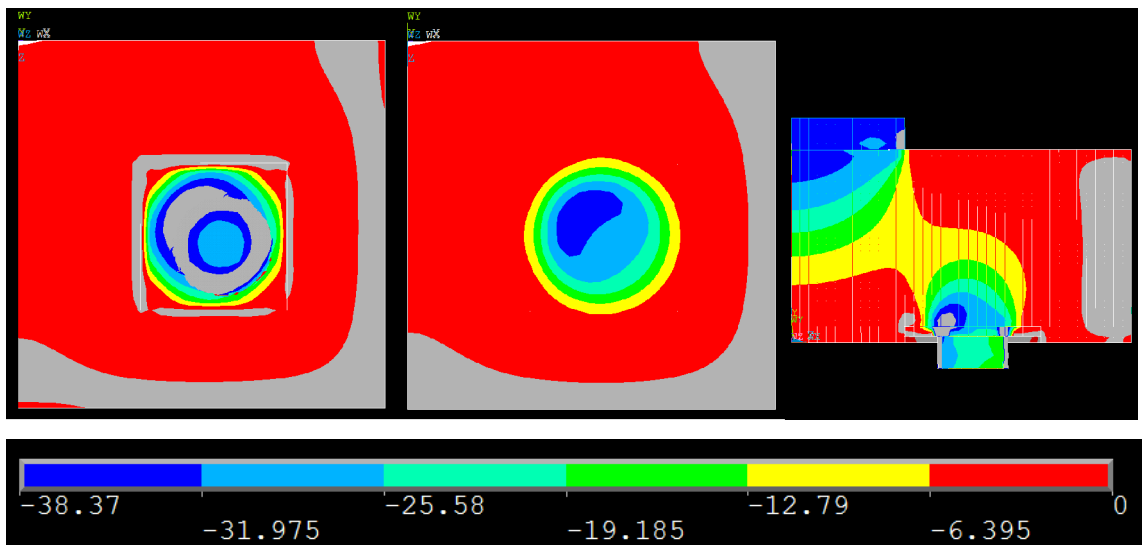
Iterointikiirroksia laskennassa on ollut 4. F kuvaajat esittävät voimatasapainon syntyä ja U kuvaajat siirtymätasapainoa. Viivojen tulee leikata, jotta tarvittava tasapaino löytyy.

Alla olevissa kuvissa (tapaus 1.1 ja tapaus 1.2) on esitetty pystysuuntainen jännitysjaakauma.

- vasen reuna on vaakaleikkaus paaluhatun yläpinnasta
- keskellä on vaakaleikkaus 50 mm paaluhatun yläpuolelta
- oikea reuna on pystyleikkaus anturan nurkasta keskelle



Kuva 21. Tapaus 1.1, FPS-4RD220/12.5 [N/mm<sup>2</sup>]

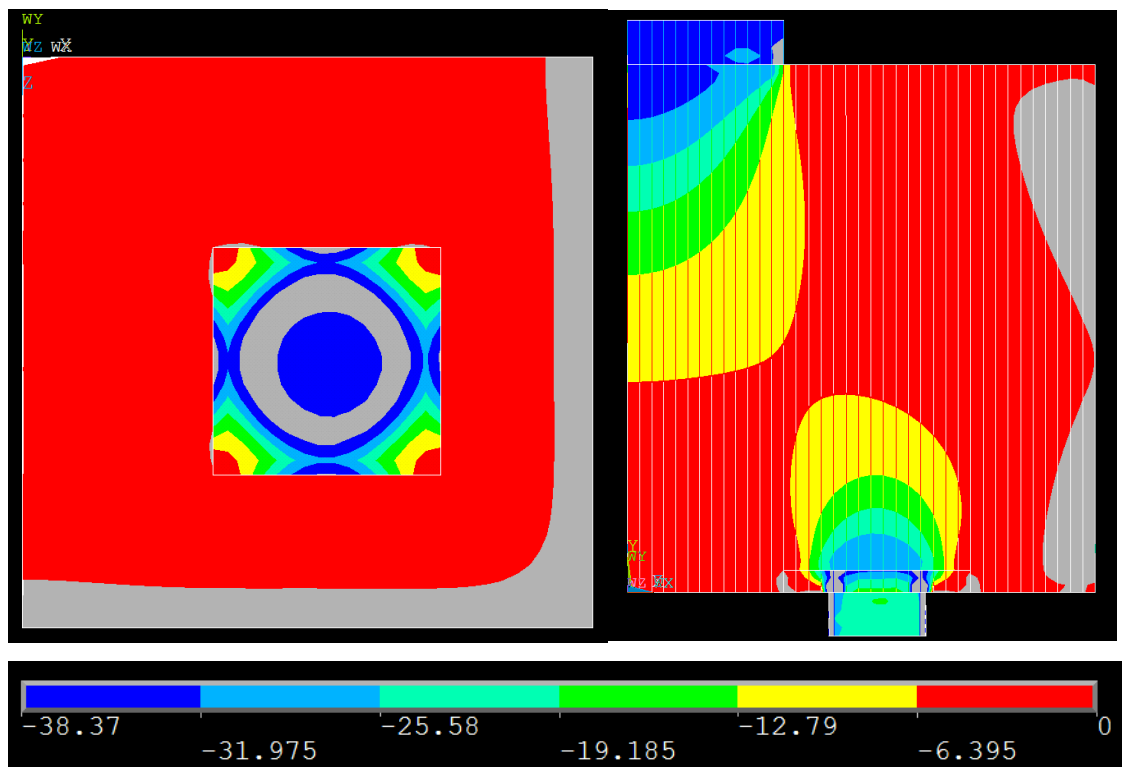


Kuva 22. Tapaus 1.2, FPS-4RD220/12.5, h600 [N/mm<sup>2</sup>]

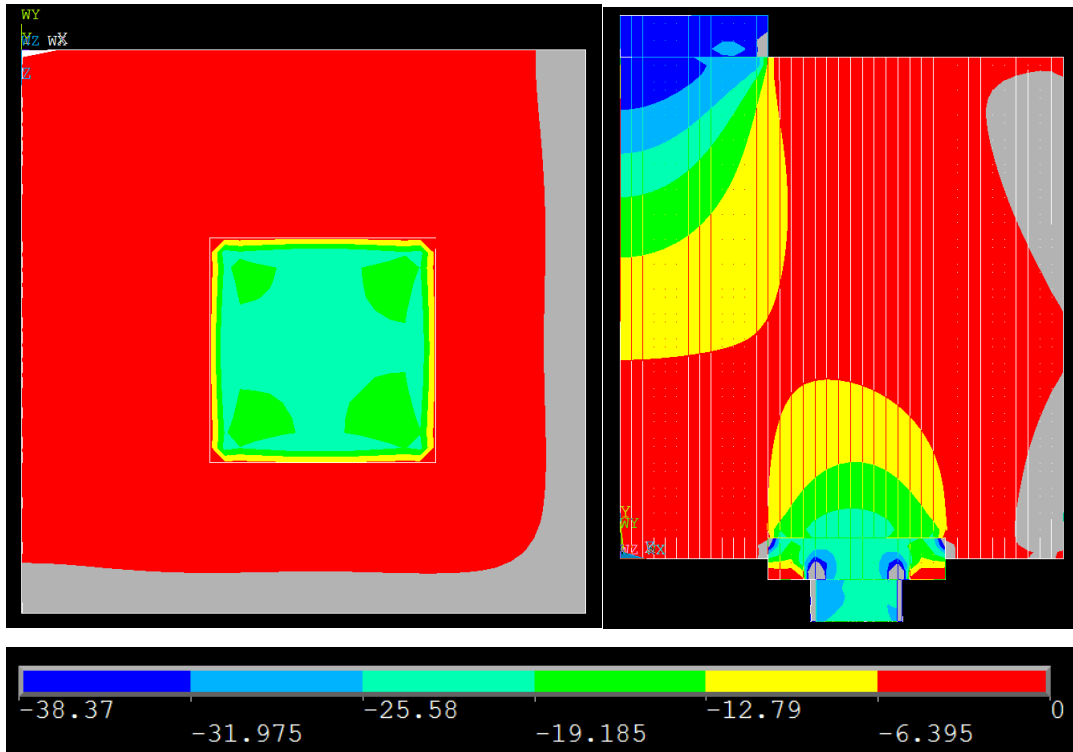
Jännitys jakauma ei suuremmin lähde seuraamaan paaluhattun neliömuotoa va-  
kiokoon 30 mm paksulla paaluhattulla.

Tapauksessa 1.3 paaluhattun jäykkyys riittää tasaamaan kuormituksen paaluhattun suoralle sivulle. Kuitenkin terävät nurkkapisteeet myötäävät sen verran, että jännitys ei jakaudu tasaisesti. Tapauksessa 1.4 paaluhattu on jo niin jäykkä, että jännitys jakautuu lähes tasaisesti koko paaluhattun pinta-alalle. Alla olevissa kuvissa vaakaleikkaus on otettu paaluhattun yläpinnasta.

Eurokoodin mukaisessa laskennassa käytettävät arvot  $\sigma_{RD,max}$ ,  $f_{cd}$  ja  $f_{ck}$  ovat vähennettyjä betonin lieriölujuuden keskiarvon arvosta  $f_{cm}$ . Rakenneanalyysiä tehdessä pyritään saavuttamaan mahdollisimman oikeaa tilannetta vastaava tulos, joten materiaalien lujuuksissa ei tule käyttää epätarkkuutta lisääviä varmuuskerroimia. Lopullisissa laskelmissa ja päätelmissä tulee miettiä lujuuden varmuuskerroin analyysin luotettavuuden mukaan.

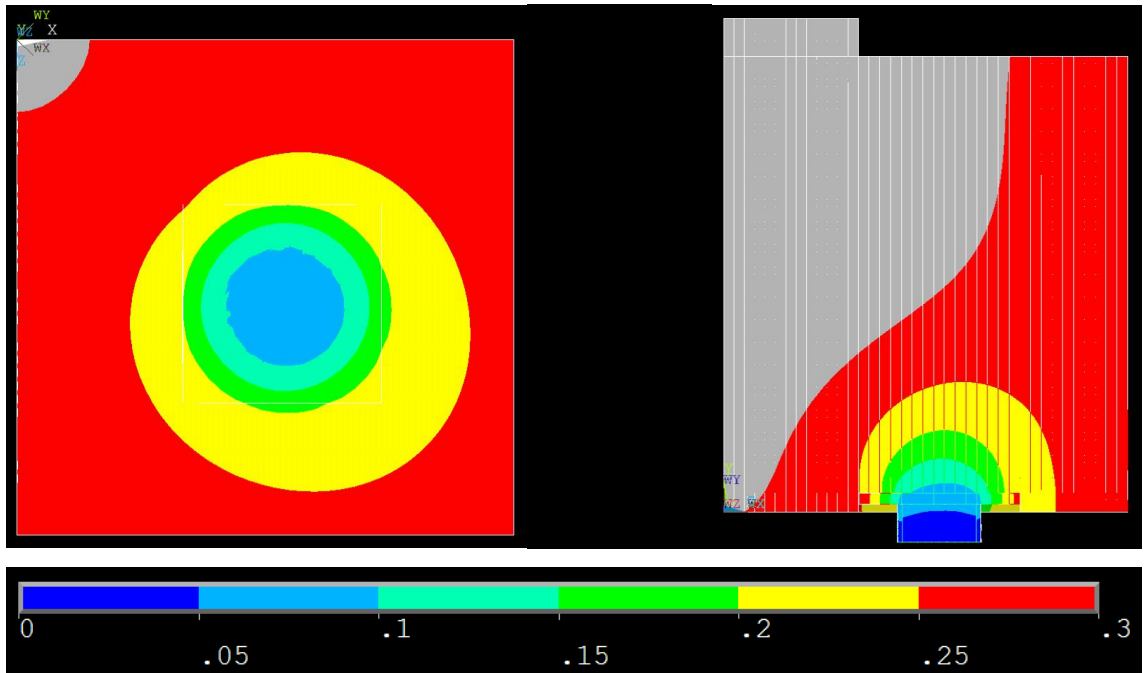


Kuva 23. Tapaus 1.3, FPS-4RD220/12.5, paaluhattu 50 mm [N/mm<sup>2</sup>]



Kuva 24. Tapaus 1.4, FPS-4RD220/12.5, paaluhattu 100 mm [N/mm<sup>2</sup>]

Alla olevissa kuvissa (tapaus 1.1) on esitetty rakenteen pystysuuntaiset siirtymät millimetreinä välillä 0 – 0,3 mm. Yli 0,3 mm siirtymät on esitetty harmaana. Myös siirtymissä on havaittavissa paalun ympyrämuoto.



Kuva 25. Tapaus 1.1, FPS-4RD220/12.5 (siirtymät [mm])

## 5.2 Vaihe 2, pääraudoituksen lisääminen alueina

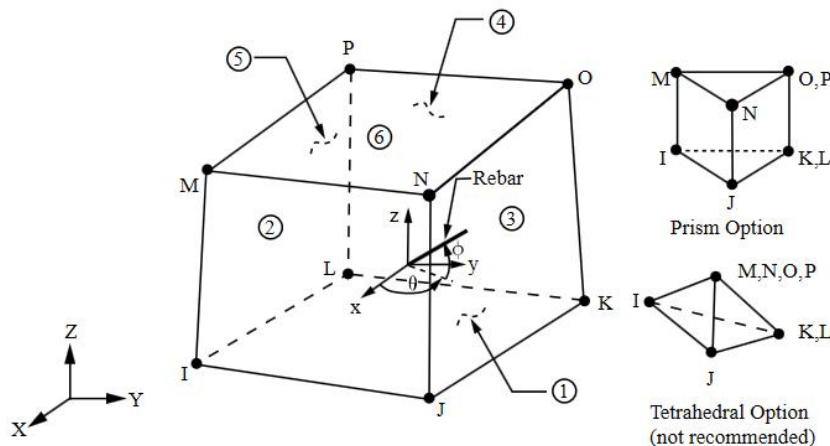
### 5.2.1 Mallin luonti

Laskennan seuraavassa vaiheessa materiaalimalleja ja kuormitusta tarkennettiin, sekä anturaan lisättiin pääraudoitus. Laskelmat toteutettiin opinnäytetyön perustapauksella vakiopaaluanturalla FPS-4RD220/12.5, mikä on lähtötietotaulukossa tähdellä merkittynä.

#### 5.2.1.1 Elementtityyppi ja raudoitus

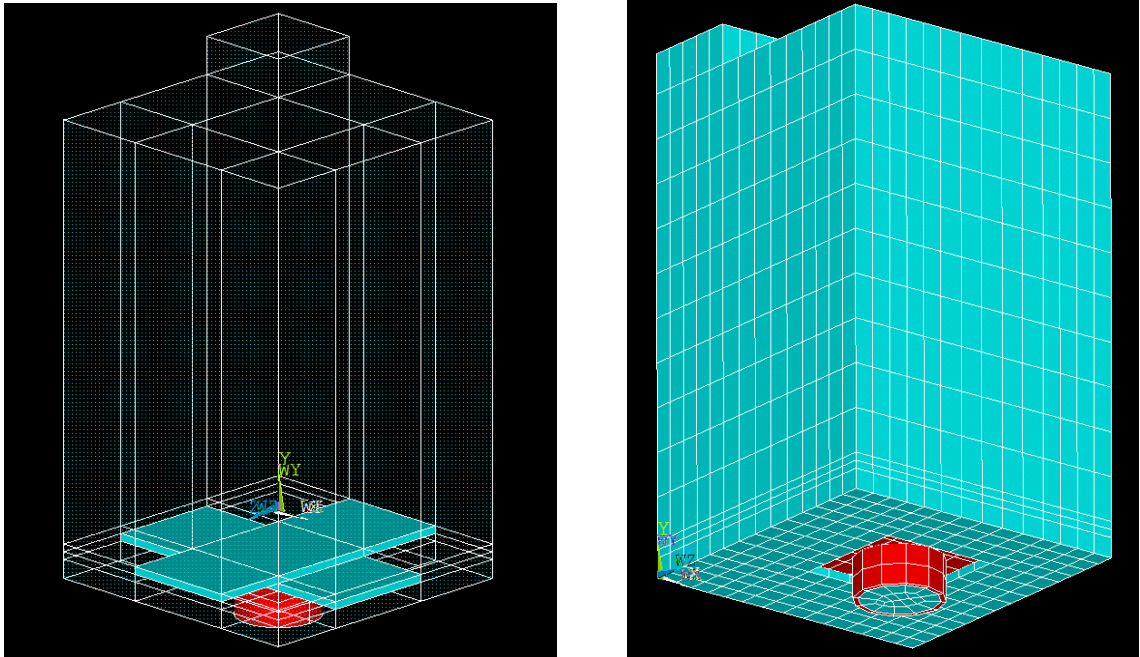
Teräsbetoniosien mallinnuksessa vaihdettiin elementtityypiksi SOLID65, joka huomioi betonin halkeamisen vedossa ja murskaantumisen puristuksessa.

Leikkausvoimaa vastaanottavaksi kertoimeksi betonin halkeilutilassa valittiin seuraavat arvot. Halkeaman ollessa kiinni valittiin 0,9 ja halkeaman ollessa auki on 0,5. Kitkaa ei ole huomioitu. Eurokoodi ei anna kyseisille kertoimille suositusarvoja, joten arvot valittiin kokemukseräisesti verraten muihin vastaaviin tutkimuksiin. Monissa palkin FEM analyysitutkimuksissa oli käytetty tutkimuksen Anthony J. Wolanski, B.S. 2004 lähtötietoja, missä lukuarvot olivat 1,0 halkeaman ollessa kiinni ja 0,3 halkeaman ollessa auki. Tutkimuksessa analysoitiin taivutettua palkkia, mikä omaa opinnäytetyön tapausta suuremman taipuman. Tämä johtaa suurempaan vetojännitykseen ja sitä kautta suurempaan halkeiluun. Tästä johtuen auki olevan halkeaman leikkausvoiman kerrointa korotettiin arvoon 0,5. Halkeaman ollessa kiinni arvoa 1,0 vähennettiin arvoon 0,9, koska haljenneelle betonille ei haluttu olettaa täyttä leikkausvoimakapasiteettia.



Kuva 26. SOLID65 elementtityyppi (Ansys Help, Figure 65.1)

Kahdeksan nurkkainen kiinteän kappaleen elementti SOLID65 sallii useampia materiaaleja saman elementin alueella, mikä mahdollistaa teräsbetonirakenteen mallintamisen raudoitusalueilla. Näille alueille asetettiin raudoitusmäärät prosentuaalisesti raudoitussuhteella, sekä raudoituksen vaikutussuunnat. Raudoitus toimii puristettuna ja vedettynä, mutta ei ota vastaan leikkausvoimaa. Raudoitus ja betoni voivat molemmat venyä ja sallivat plastista muodonmuutosta.

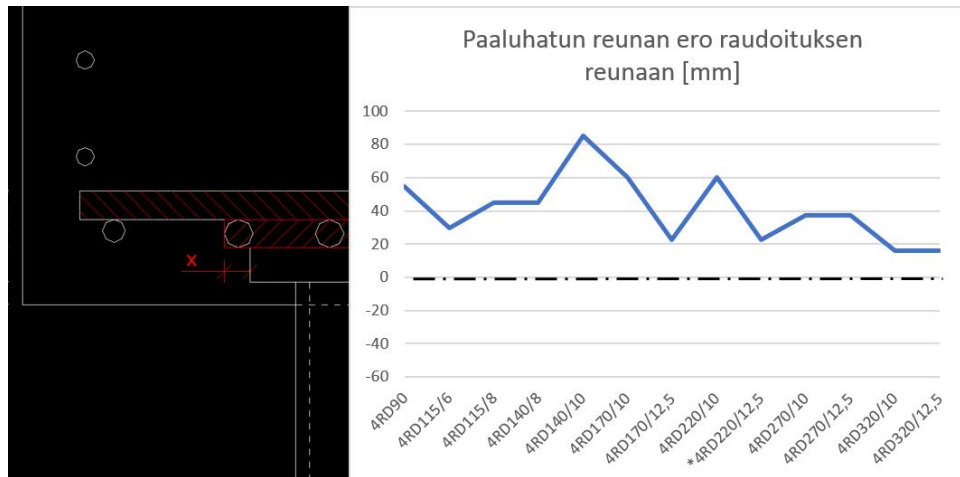


Kuva 27. Laskentamallin raudoitusalueet ja elementtijako

Raudoitus on määritetty toimivaksi pääraudoitusalueilla kahteen suuntaan ja se vaikuttaa raudoituksen pituus- ja pystysuunnassa vedossa ja puristuksessa. Pystysuuntaisella vaikutuksella on pyritty huomioimaan teräksen suuremman puristuslujuuden vaikutusta tarkasteltavassa solmupisteessä. Raudoituksen ja betonin väliin ei ole asetettu liukuvaa kontaktielementtiä, joten ankkurointi toimii täydelle voimalle, kuten se on kyseisillä alueilla suunniteltukin. Ankkurointihakoja ei ole mallinnettu.

Analysointivaiheen 2 laskelmat on toteutettu 60 mm sivumitan elementtiä käyttäen. Raudoituksen yläpuolisen osan elementtejä venytettiin pystysuunnassa kaksinkertaiseksi laskennan nopeuttamiseksi. Raudoitusalueiden tilavuuskappaleiden koko rajoittaa elementin korkeuden raudoituksen paksuuden mukaan.

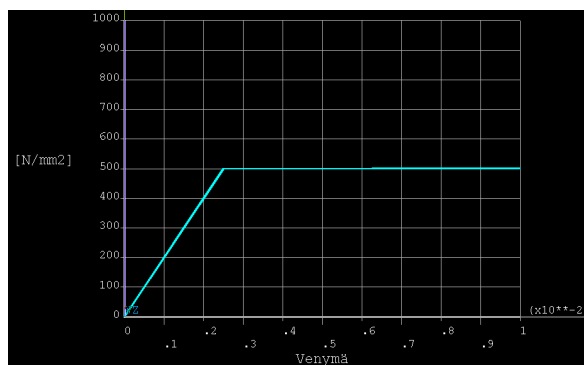
Raudoitusalueet on mallinnettu paaluhatun leveyden mukaisina mallinnuksen yksinkertaistamiseksi. Mallinnuksen eroavaisuus todelliseen vakiopaaluanturan geometriaan on esitetty alla olevassa kuvaajassa. Raudoituksen levitessä paaluhatun ulkopuolelle sen suora kontakti tukena toimivaan paaluhattuun häviää, joten raudoitus mallinnettiin kokonaisuudessaan paaluhatun päälle asetettuna.



Kuva 28. Mallinnuksen ero todelliseen raudoitusalueen leveyteen

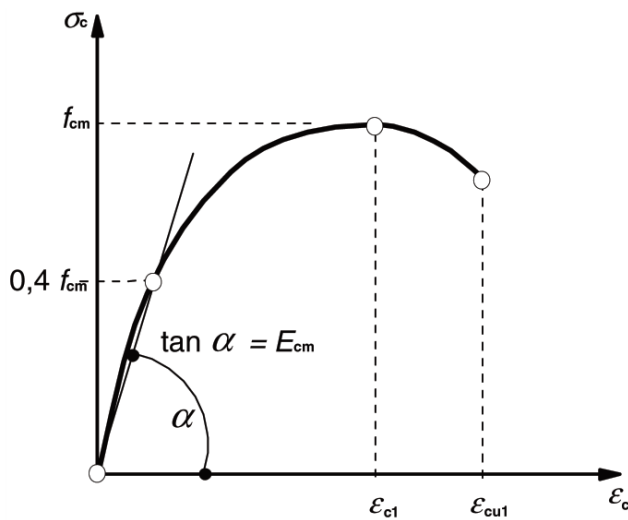
### 5.2.1.2 Materiaalimallit ja niiden lähtöarvot

Teräspaalun ja paaluhatun lujuutena käytetään ominaismyötölujuuden  $f_{yk}$  arvoja  $460 \text{ N/mm}^2$  ja raudoituksella  $500 \text{ N/mm}^2$ . Epälineaarisisessa analyysissä tulee käyttää ominaisarvoja, jotta materiaalit käyttäytyvät mahdollisimman realistisesti. Myötölujuuden saavuttamisen jälkeen jännitys - muodonmuutos kuvaaja kasvaa hienoisesti tangent moduluksen arvolla, mikä on Eurokoodin osan 1993-1-5 liitteen C mukainen arvo ( $E/10000$ ). Myötölujittuminen on näin ollen erittäin vähäistä, mutta laskennan etenemisen kannalta lujuuden kasvaminen myötörajan jälkeen on tarpeen, mikäli myötölujuus jossain alueilla saavutettaisiin.



Kuva 29. Raudoituksen jännitys – muodonmuutos kuvaaja

Eurokoodin kohdassa 3.1.5 on esitetty kaava betonin epälinearisessa analyysissä käytettävälle jännitys - muodonmuutoskuvaajalle puristuksessa. Betonin puristuslujuutena käytetään arvoa  $f_{cm}$ , mikä kuvaa betonin lieriölujuuden keskiarvoa ilman vähennyskertoimia. Vakiopaaluanturan betonilujuudelle C35/45 kyseinen arvo on 43 N/mm<sup>2</sup>. Lujuus saavutetaan muodonmuutoksen arvolla  $\epsilon_{c1}$ , mikä vaihtelee betonin lujuusluokittain. Betonin kimmokertoimen arvo on laskettu jännitys - muodonmuutoskuvaajan mukaan  $0,4 f_{cm}$  kohdalta.



Kuva 30. Rakenneanalyysissä käytettävä jännitys - muodonmuutosyhteyden periaatekuva (EC kuva 3.2, kohta 3.1.5)

Laskentavaiheissa 2 ja 3 betonin vetolujuutena käytetään vetolujuuden ominaisarvoa  $f_{ctk,0,05}$ . Vaiheen 1 laskelmissa betonille ei ole asetettu maksimilujuutta, vaan rakenne toimii äärettömän lujana.

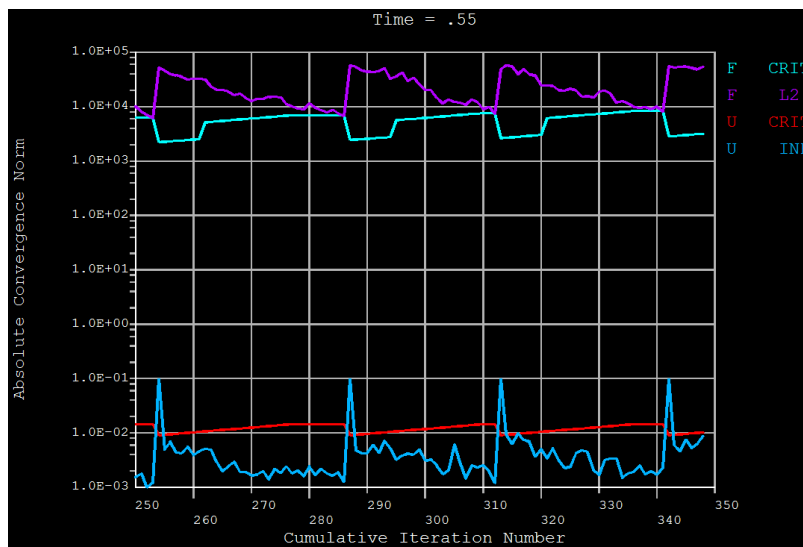
### 5.2.1.3 Kuormitus

Kuormitus vaihdettiin paineesta siirtymäksi, mikä sopii paremmin epälineaariseen analyysiin laskennan tapahtuessa siirtymien kautta.

Rakenneanalyysissä siirtymää lisätään portaittain (substep), jotta siirtymäerot elementtien solmupisteiden tai kontaktielementtien välillä eivät kasva liian suuriksi. Laskennassa suurimmaksi pilarin siirtymäksi valittiin 2,0 mm ja se jaettiin substepeillä 20 osaan. Time = 0.05 vastaa siirtymää 0,1 mm ja time = 1.0 vastaa näin ollen täyttä siirtymää 2,0 mm. Pilarin siirtymästä aiheutuvan paalun tukireaktion tulisi vastata tuloksia analysoidessa paalun maksimikapasiteettia.

## 5.2.2 Tulosten analysointi ja vertailu vaiheen 1 tuloksiin

Materiaalimallien tarkentuessa ja kuormituksen muuttuessa portaittain lisääntyväksi siirtymäksi, laskenta-aika pidentyi merkittävästi. Alla kuvakaappaus laskennan etenemisestä siirtymän kohdassa 1,1 mm raudoitettulla anturalla. Yhden 0,1 mm siirtymän iterointikierrosten maksimimääräksi valittiin 1000 kierrosta.



Kuva 31. Laskennan eteneminen ajassa 0.55

Kuvasta voidaan tulkita, että siirtymätasapaino U saavutetaan nopeasti verrattuna voimatasapainoon F.

2-laskentavaiheen tavoitteena on tutkia pääraudoituksen lisäyksen vaikutusta raudoittamattomaan anturaan. Alla olevassa kuvassa on esitetty iterointikierrosten eteneminen siirtymäportaiden mukaan. Vasemmalla on laskettu raudoitettu betonirakenne ja oikealla raudoittamaton.

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.50000E-01	1	1	6
2	0.10000	1	2	10
3	0.15000	1	3	25
4	0.20000	1	4	34
5	0.25000	1	5	142
6	0.30000	1	6	204
7	0.35000	1	7	253
8	0.40000	1	8	286
9	0.45000	1	9	312
10	0.50000	1	10	341
11	0.55000	1	11	368
12	0.60000	1	12	392
13	0.65000	1	13	418
14	0.70000	1	14	462
15	0.75000	1	15	493
16	0.80000	1	16	519
17	0.85000	1	17	708
18	1.0000	1	999999	1708

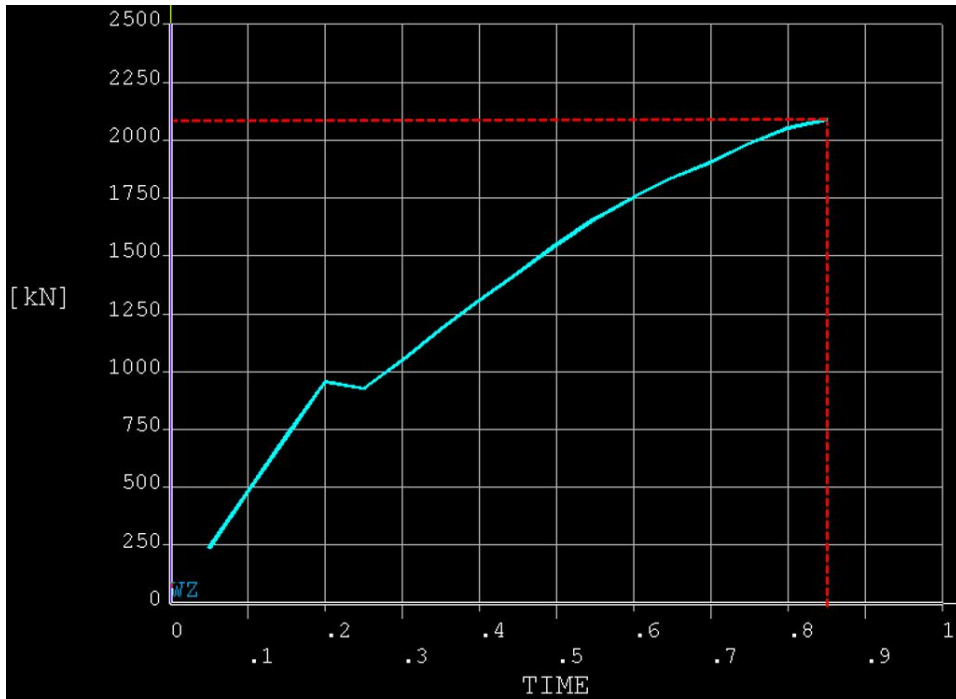
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.50000E-01	1	1	6
2	0.10000	1	2	9
3	0.15000	1	3	23
4	0.20000	1	4	34
5	0.25000	1	5	205
6	0.30000	1	6	292
7	0.35000	1	7	327
8	0.40000	1	8	363
9	0.45000	1	9	400
10	0.50000	1	10	427
11	0.55000	1	11	456
12	0.60000	1	12	511
13	0.65000	1	13	541
14	0.70000	1	14	576
15	0.75000	1	15	645
16	1.0000	1	999999	1645

Kuva 32. Laskennan eteneminen iterointikierröksittäin

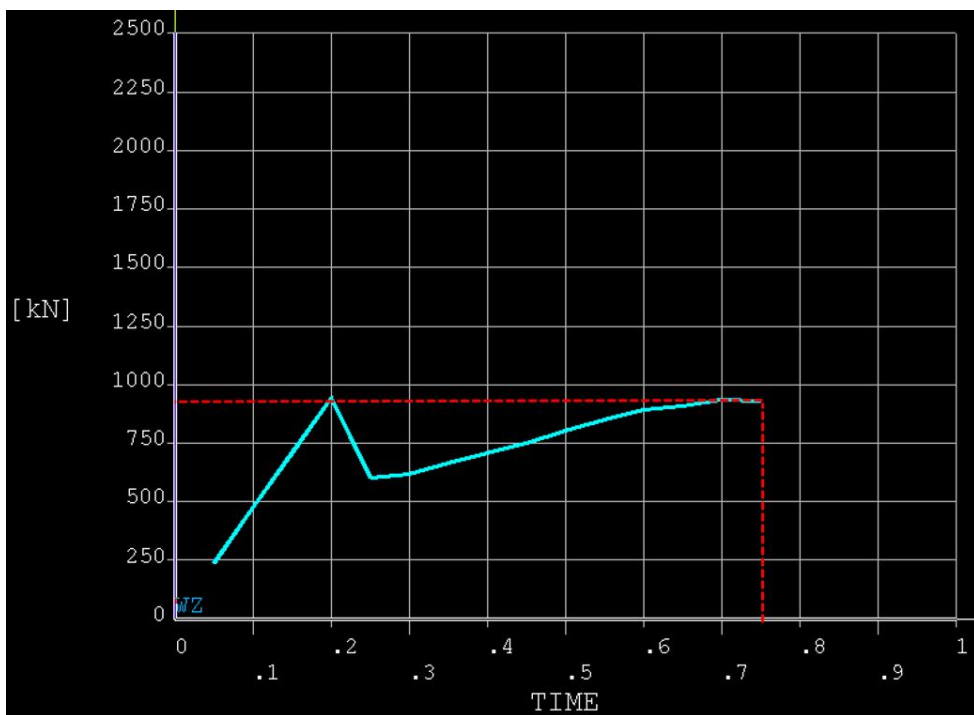


Tulokset luetaan viimeisen saavutetun siirtymäportaan kohdalta alla olevan mukaisesti (U= siirtymä, F= tukireaktio):

- Raudoitettu antura: time = 0.85; U= 1,7 mm; F= 2 090 kN
- Raudoittamaton antura: time = 0.75; U= 1,5 mm; F= 934 kN



Kuva 33. Tukireaktion kehittyminen, raudoitettu antura

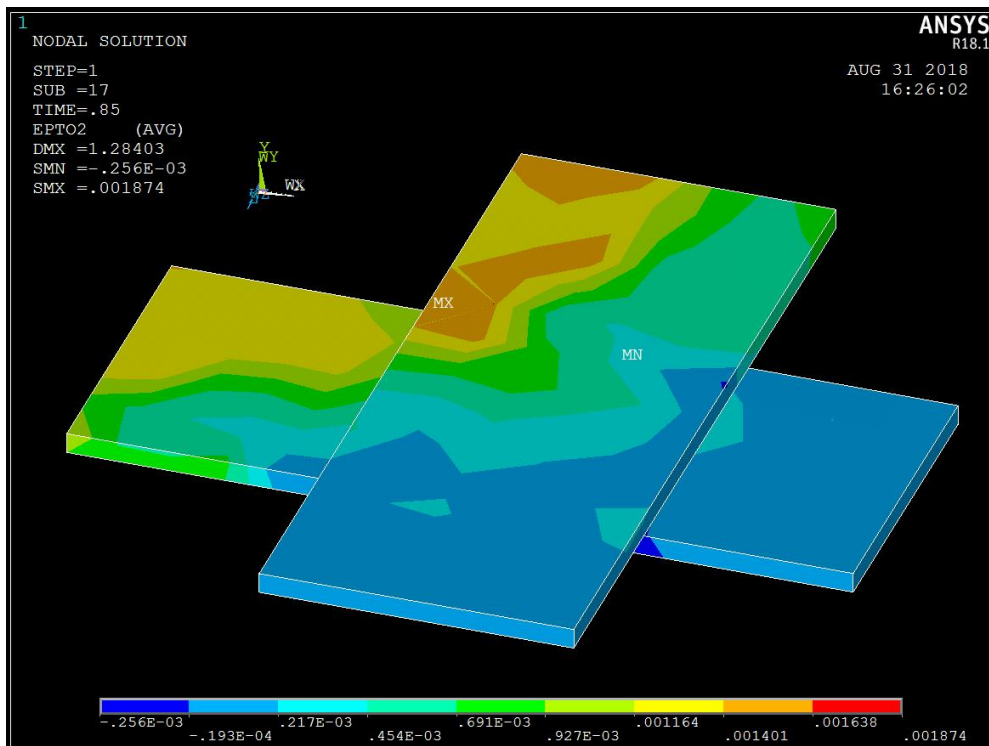


Kuva 34. Tukireaktion kehittyminen, raudoittamaton antura

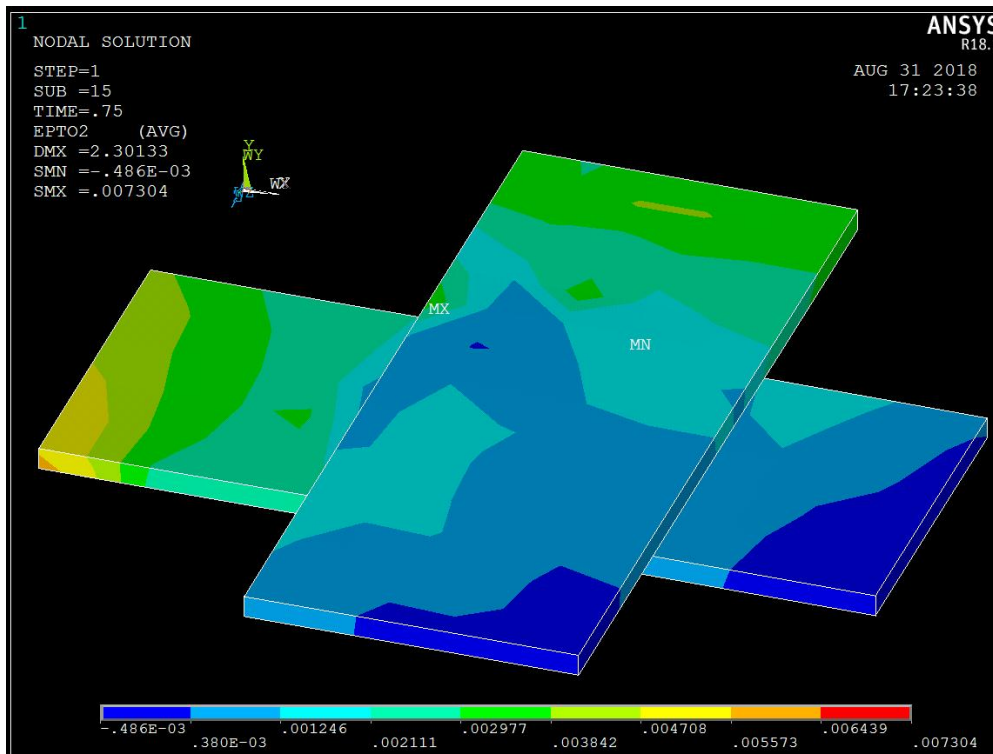
Vakiopaaluanturalle FPS-4RD220/12.5 on asetettu paalun suurimmaksi sallituksi kuormitukseksi 2 180 kN. Kyseistä kuormitusta ei aivan saavutettu raudoitettukaan tapauksella, johtuen todennäköisesti rengasraudoituksen puutteesta. Ilman rengasraudoitusta antura pääsee halkeamaan vaakasuunnassa ja laskenta ei pääse etenemään halkeamisen levitessä ilman vastatukea lähes loputtomasti.

Siirtymän 0,2 mm kohdalla tukireaktio kehittyy molemmissa tapauksissa suora-  
viivaisesti arvoon 950 kN. Tämän jälkeen rakenteessa tapahtuu suuria muutoksia betonin halkeilun suhteen, joten raudoittamaton rakenne ei pysty enää kasvattamaan tukireaktiota.

Alla olevassa kuvissa on esitetty raudoitusalueiden suurimmat venymät. Raudoituksen myötövetolujuus saavutetaan venymän arvolla 0,0025. Suurin venymä raudoitettulla anturalla on noin 0,0019, joten pääraudoituksen käyttöaste on 76%. Suurin venymä on kuitenkin vain pistemäisesti alueen reunassa, joten koko raudoitusalueen käyttöaste on paljon alhaisempi. Raudoittamattoman anturan betonin vetolujuus saavutetaan venymän arvolla 0,00007. Suurin venymä on 0,0073, joten betoni on täysin haljennut ja rakenne pääsee liikkumaan x-suunnassa ilman vastusta.

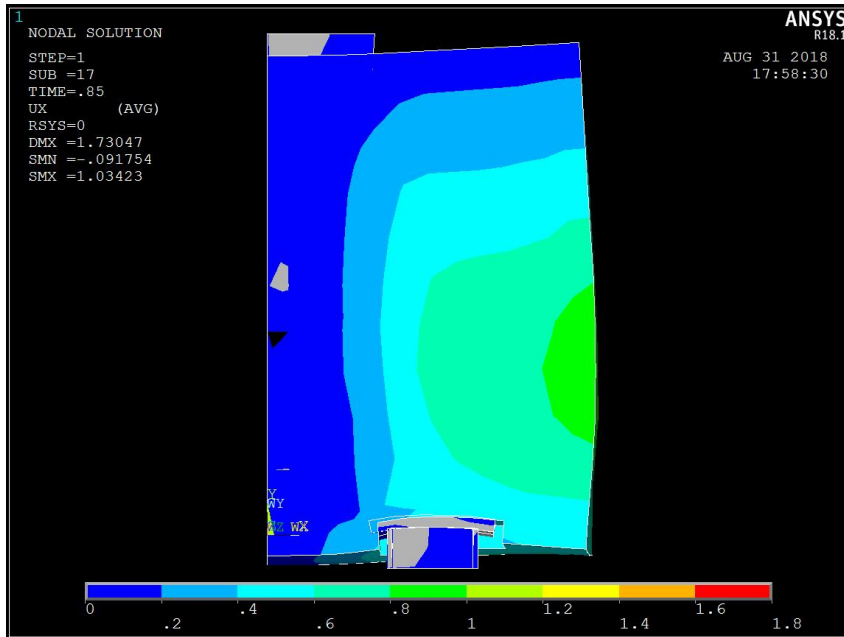


Kuva 35. Raudoitusalueiden venymä (2nd Principal strain), raudoitettu antura

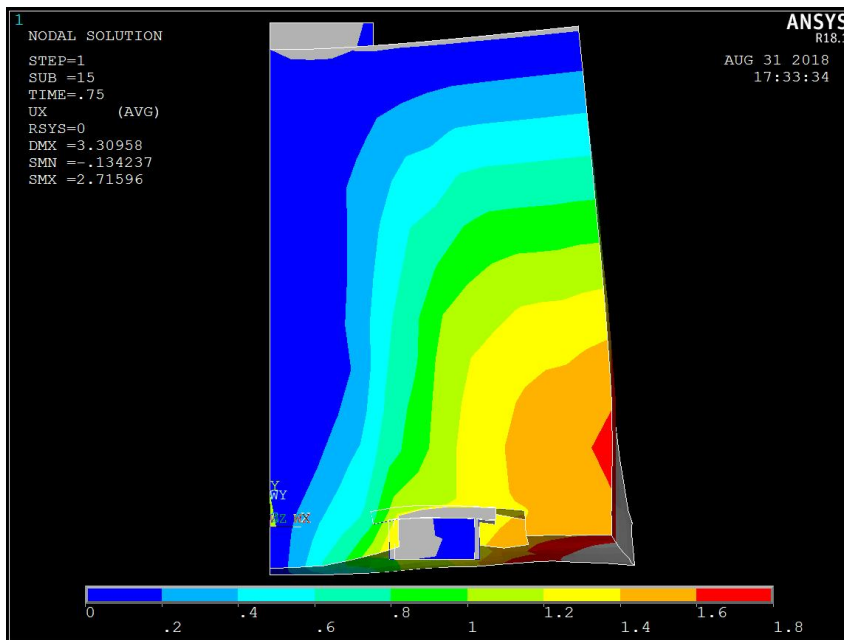


Kuva 36. Raudoitusalueiden venymä (2nd Principal strain), raudoittamaton an-  
 tura

Alla olevissa kuvissa on esitettyä siirtymät vaakasuunnassa, eli leikkauspinnan  
 suunnassa x. Leikkauspinta on asetettu paalun ja raudoituksen keskelle alempaa  
 raudoitusaluetta pitkin. Ilman pääraudoitusta rakenne leviää alapinnastaan.  
 Pääraudoituksella rakenne leviää eniten keskeltä pullahtamalla, mikä estetään  
 myöhemmissä tarkasteluissa rengasraudoituksella. Kuvakaappauksen muodon-  
 muutos on esitetty 50-kertaisena siirtymien hahmottamisen helpottamiseksi.

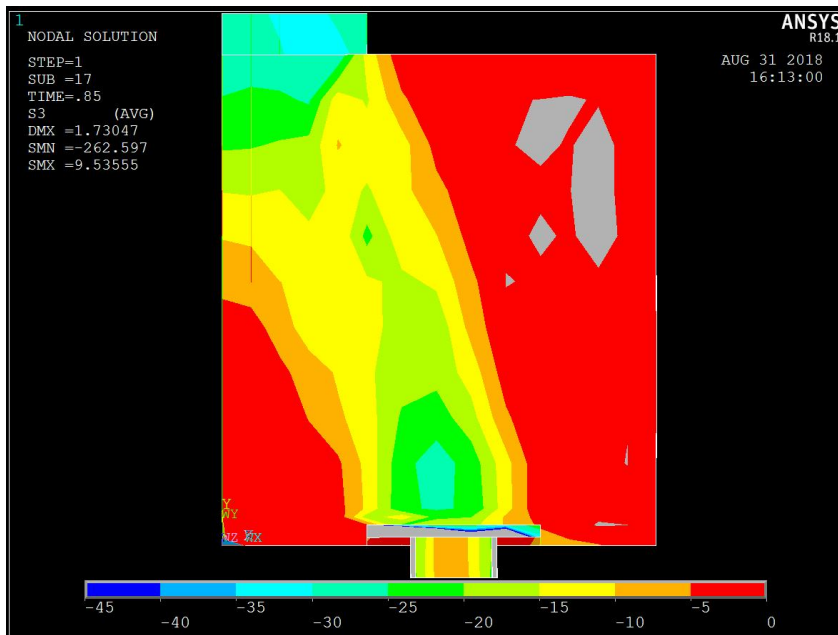


Kuva 37. Siirtymät x-suunnassa [mm], raudoitettu antura

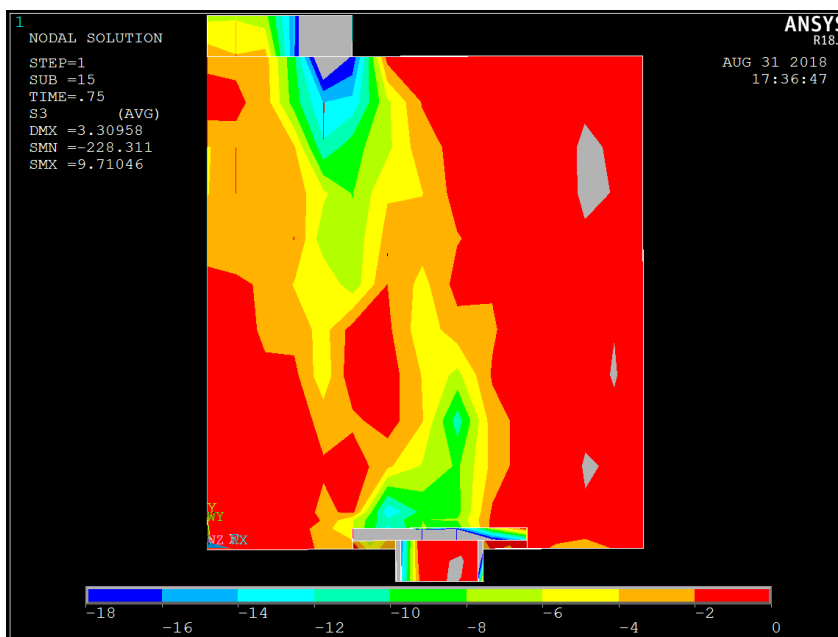


Kuva 38. Siirtymät x-suunnassa [mm], raudoittamaton antura

Seuraavissa kuvissa on esitetty puristusjännitys betonissa. Teräsosien jännitykset ovat reilusti valitun skaalan yläpuolella, joten ne näytetään harmaana. Leikkauspinta on anturan keskeltä nurkkaan. Raudoitettujen anturan puristusjännityksissä päästään tarkasteltavassa solmupisteessä suurimmillaan arvoon 35 N/mm<sup>2</sup>, mikä on 81 % puristuslujuuden arvosta  $f_{cm}$ . Raudoittamattoman anturan tapauksessa puristussauvaa ei kunnolla pääse muodostumaan.



Kuva 39. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), raudoitettu antura



Kuva 40. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), raudoittamaton antura

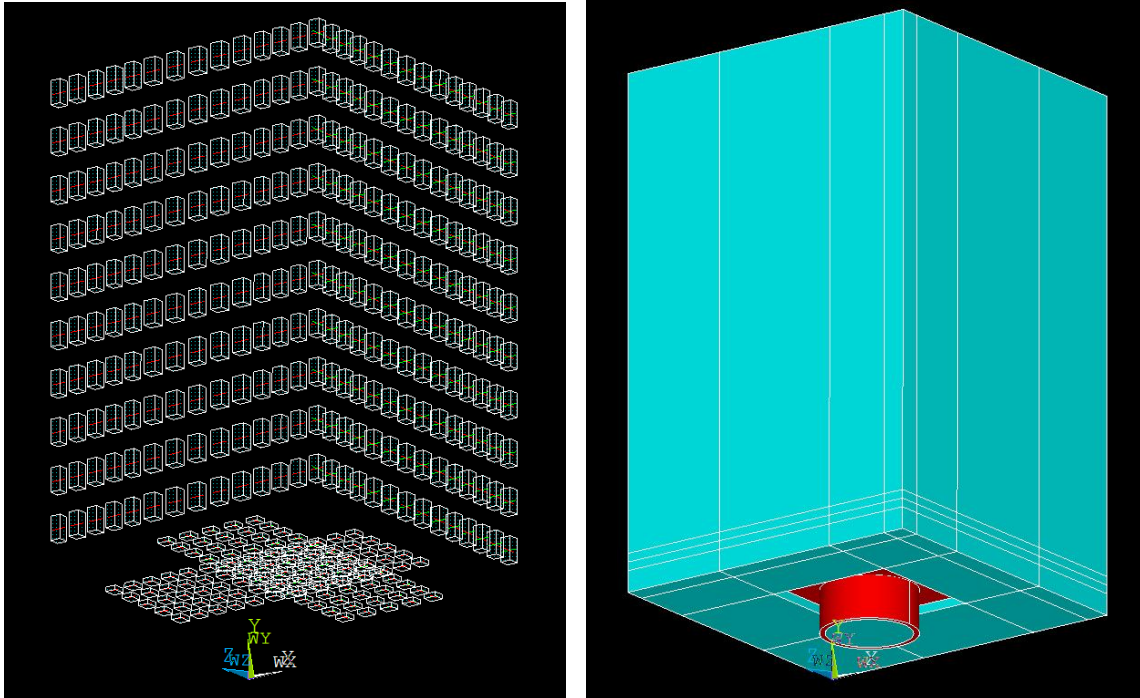
Raudoitus vaikuttaisi toimivan rakennemallissa suunnitellusti, joten työssä voitiin edetä seuraavaan vaiheeseen.

### 5.3 Vaihe 3, rengasraudoituksen lisääminen

Analysointivaiheen 3 laskelmat on toteutettu 60 mm sivumitan elementtiä käyttäen. Elementtejä ei venytetty, jotta kuutiosta poikkeava elementtimuoto ei häiritse rengasraudoituksen vaikutusta kuormituksen kulkiessa pilarilta paalulle.

### 5.3.1 Mallin luonti

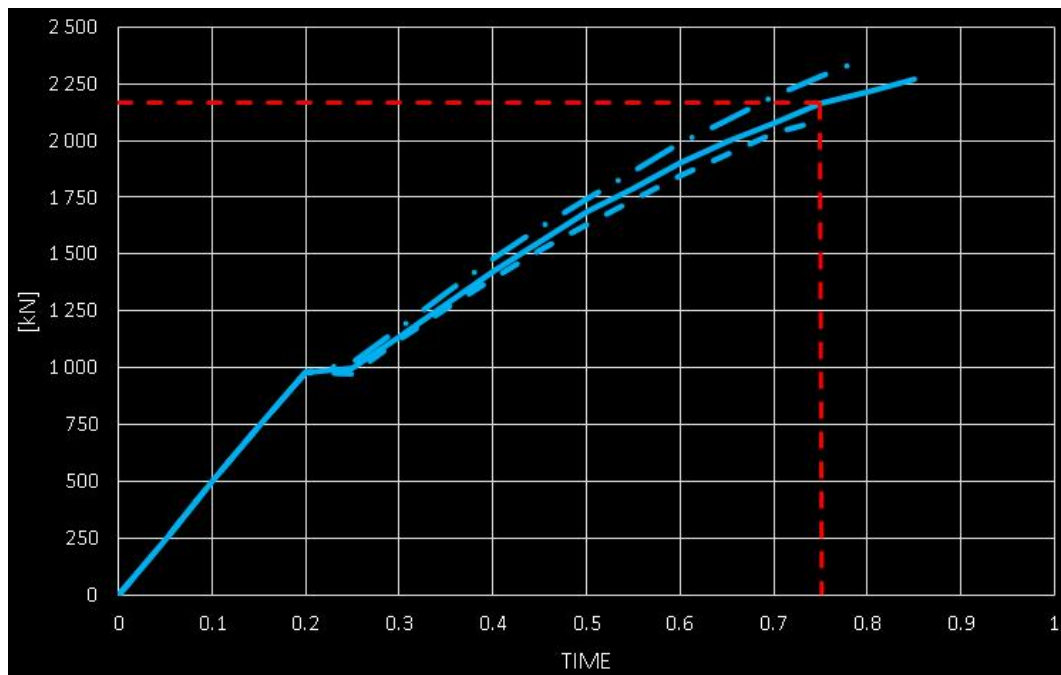
Anturan reunaan asetettiin rengasraudoituksen teräsmäärä %-osuuksilla pääraudoitusalueiden tavoin. Rengasraudoituksissa raudoituksen vaikuttava suunta asetettiin ainoastaan toimimaan raudoituksen pituussuunnassa.



Kuva 41. Raudoitetut elementit anturassa

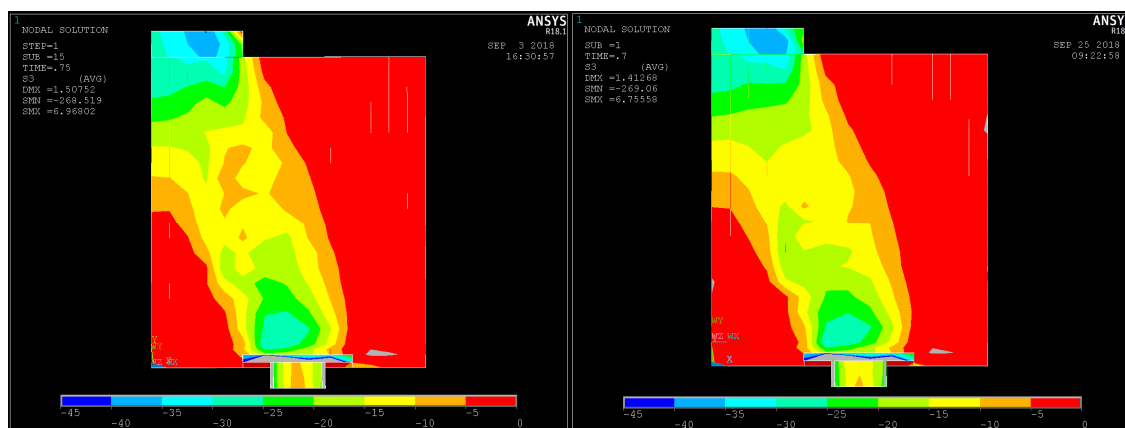
### 5.3.2 Tulosten analysointi

Paalun tukireaktio – pilarin siirtymä -kuvaajaksi saatiin alla olevan kuvan mukaiset käyrät. Pilarin siirtymällä 1,5 mm (time = 0.75) saavutetaan vakiopaaluanturan perustapauksella paalulle kestävyuden mitoitusarvoa 2180 kN lähimpänä oleva arvo 2165,3 kN (punainen katkoviiva).



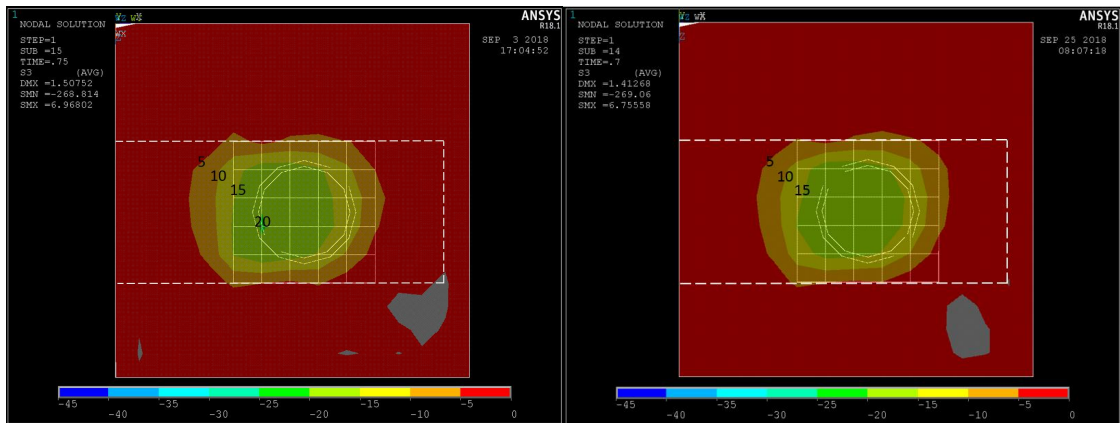
Kuva 42. Tukireaktion kehittyminen sallitulle paalukuormalle

Lisäksi vaiheessa 3 tutkittiin rengasraudoituksen määrän vaikutusta. Yllä olevassa kuvaajassa on sinisellä katkoviivalla esitetty tapaus, kun rengasraudoitusmäärä on vähennetty puoleen ja sinisellä pisteviivalla tapaus, kun rengasraudoitusmäärä on kaksinkertainen. Paalun tukireaktio kasvaa pienemmällä pilarin siirtymällä, kun rengasraudoitusta lisätään. Suuremman rengasraudoitusmäärän vertailutulokset luetaan kohdasta time = 0.7, missä tukireaktio 2191,4 kN on lähimpänä paalun kestävyuden mitoitusarvoa. Seuraavissa kolmessa kuvassa (vaaka- ja pystyleikkaukset) on vasemmalla puolella esitetty perustapaus vakio-paaluanturan rengasraudoitusmäärällä, ja oikealla vertailutapaus, kun rengasraudoitusmäärä on kaksinkertainen.

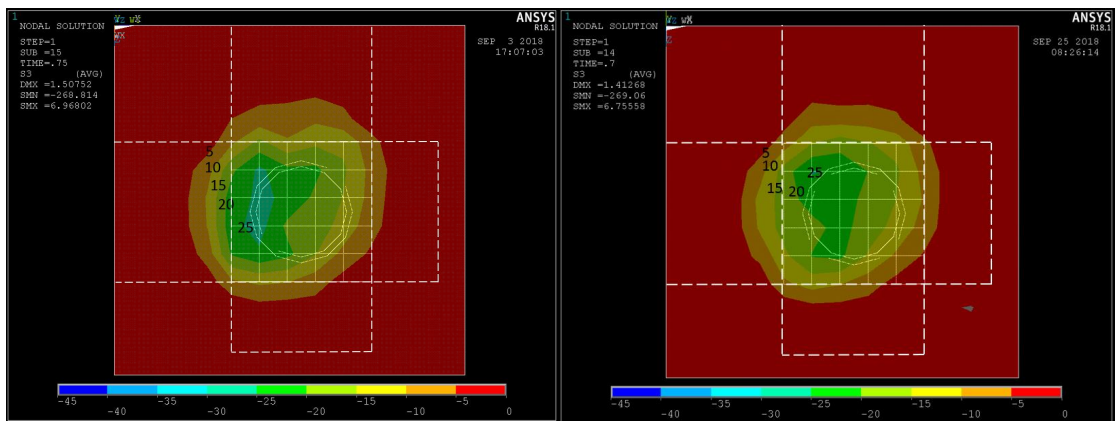


Kuva 43. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), leikkauspinta 45 astetta

Puristusjännityksen huippupiste paalun yläpuolella asettuu paaluhatun pinnasta noin 50 mm ylemmäs raudoitusalueiden yläpuolelle. Jännitys paaluhatun päällisessä solmupisteessä on kuitenkin pienempi kuin pilarin alapuolisessa solmupisteessä. Jännitykset jakautuvat jokseenkin epätasaisesti johtuen kohtalaisen suuresta elementtikoosta. Tarkemmat jännitykset on esitetty vaakaleikkauksissa.

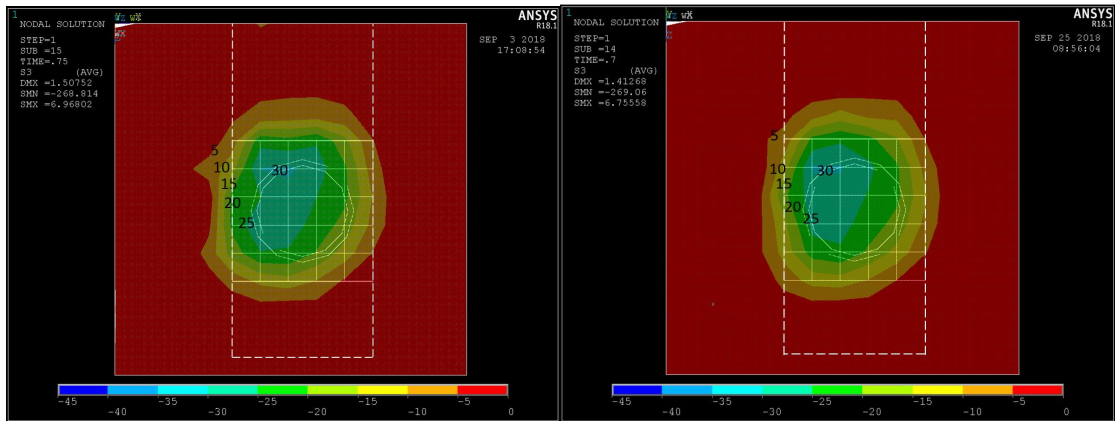


Kuva 44. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus paaluhatun päältä, raudoitusalue esitetty valkoisella katkoviivalla



Kuva 45. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus raudoitusten välistä, raudoitusalue esitetty valkoisella katkoviivalla

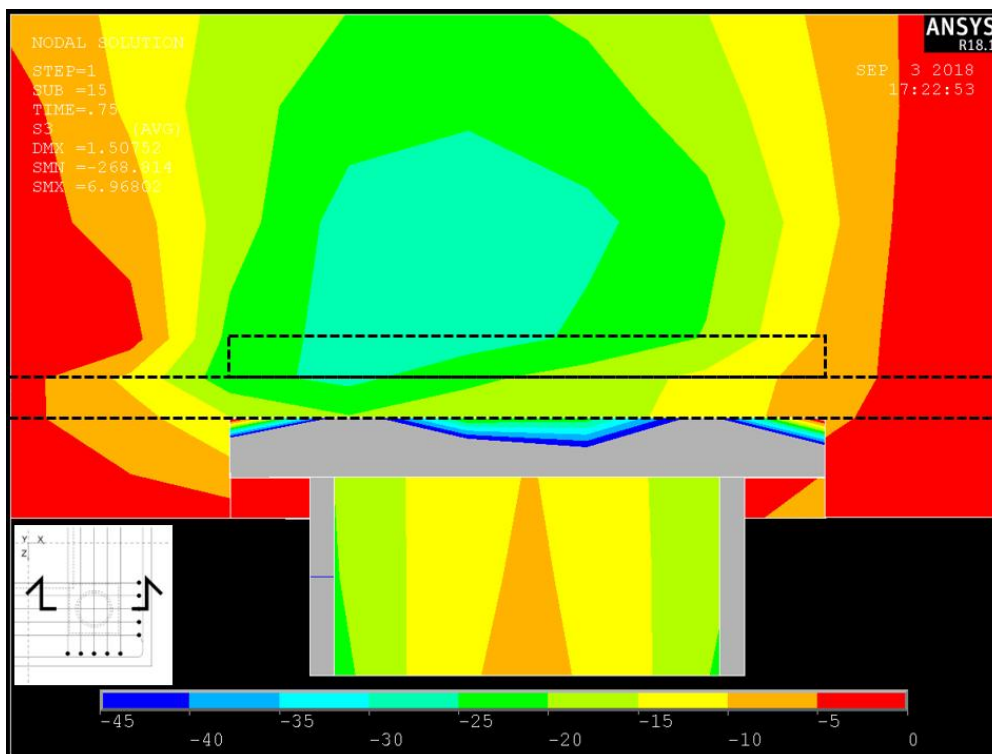




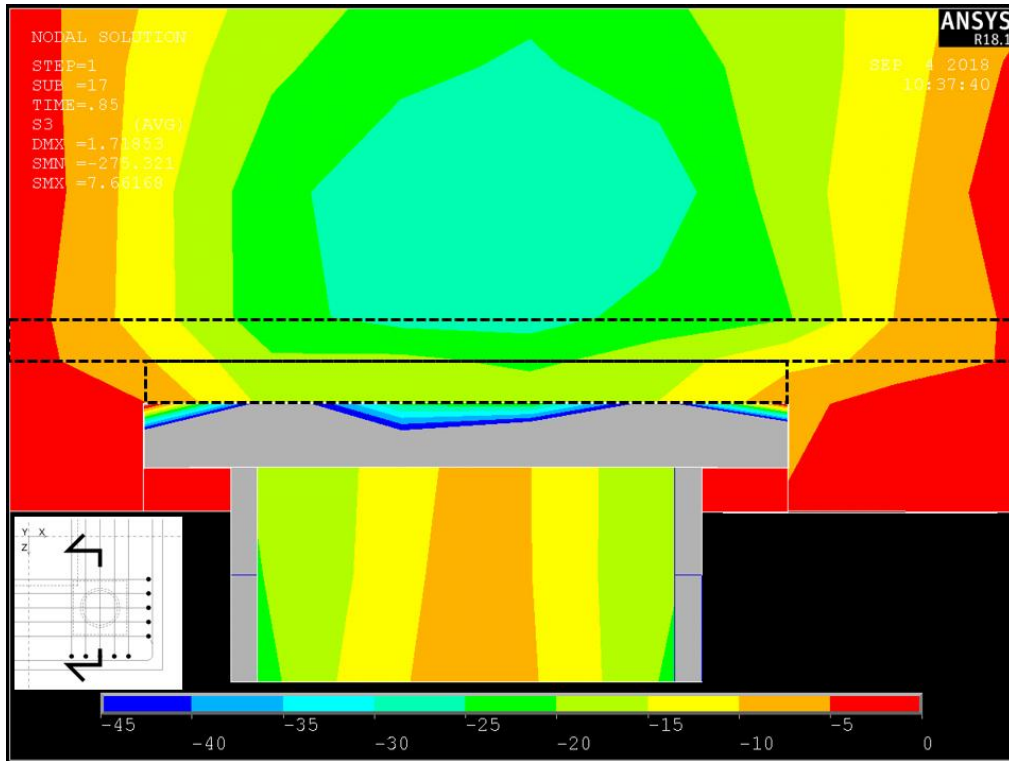
Kuva 46. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus raudoitusten päältä, raudoitusalue esitetty valkoisella katkoviivalla

Vaakaleikkauksista huomataan, että rengasraudoitusmäärän lisäys aiheuttaa jännitysalueeseen pientä tasoittumista. Ero puristusjännityksen tasoittumisessa on kuitenkin häviävän pieni, joten rengasraudoituksen lisäyksellä ei saada merkittävää hyötyä opinnäytetyössä tarkasteltavaan asiaan.

Alla olevissa puristusjännitysleikkauksissa on tarkasteltu vain perustapausta (FPS-4RD220/12,5) vakiopaaluanturan mukaisella rengasraudoituksella.



Kuva 47. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), pystyleikkaus alempaa pääraudoitusta pitkin

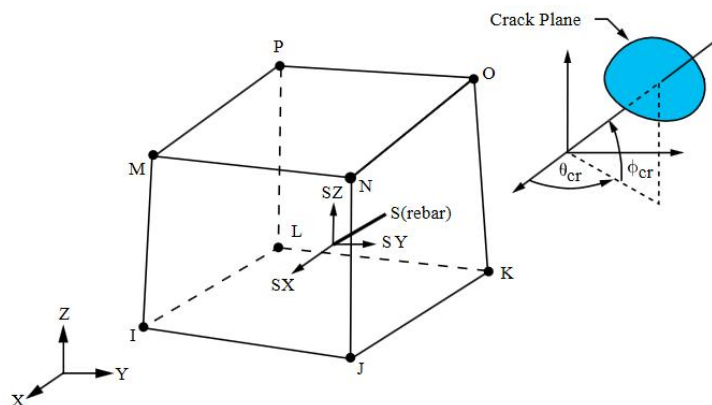


Kuva 48. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), pystyleikkaus ylemmää pääraudoitusta pitkin

Suurin puristusjännitys (30 - 35 N/mm<sup>2</sup>) syntyy raudoitusten yläpuolelle, mikä on noin 76 % betonin puristuslujuuden arvosta  $f_{cm}$ . Jännitysalue leviää katkoviivalla esitetyn pääraudoituksen suuntaan enemmän vedon puolelle, mutta myös jonkin verran vastapuolelle.

### 5.3.2.1 Betonin halkeaminen ja murskaantuminen

Laskennan tuloksia esittäessä vetohalkeama on esitetty ympyränä ja sen halkeamasuunta on ympyrän tason suuntaisesti alla olevien kuvan mukaisesti.

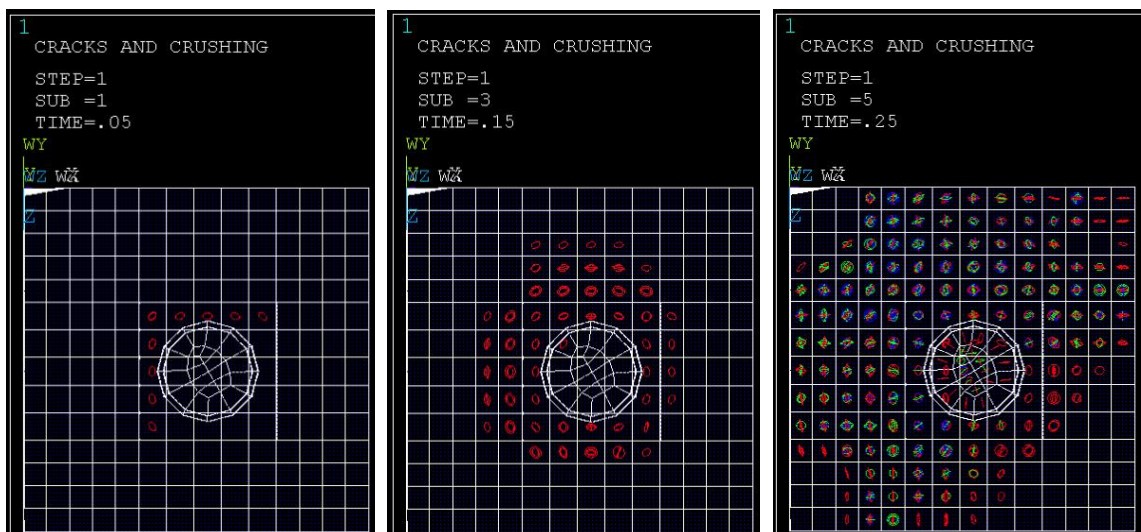


Kuva 49. SOLID65 elementin halkeamissuunta (Ansys Help, Figure 4.65-2)

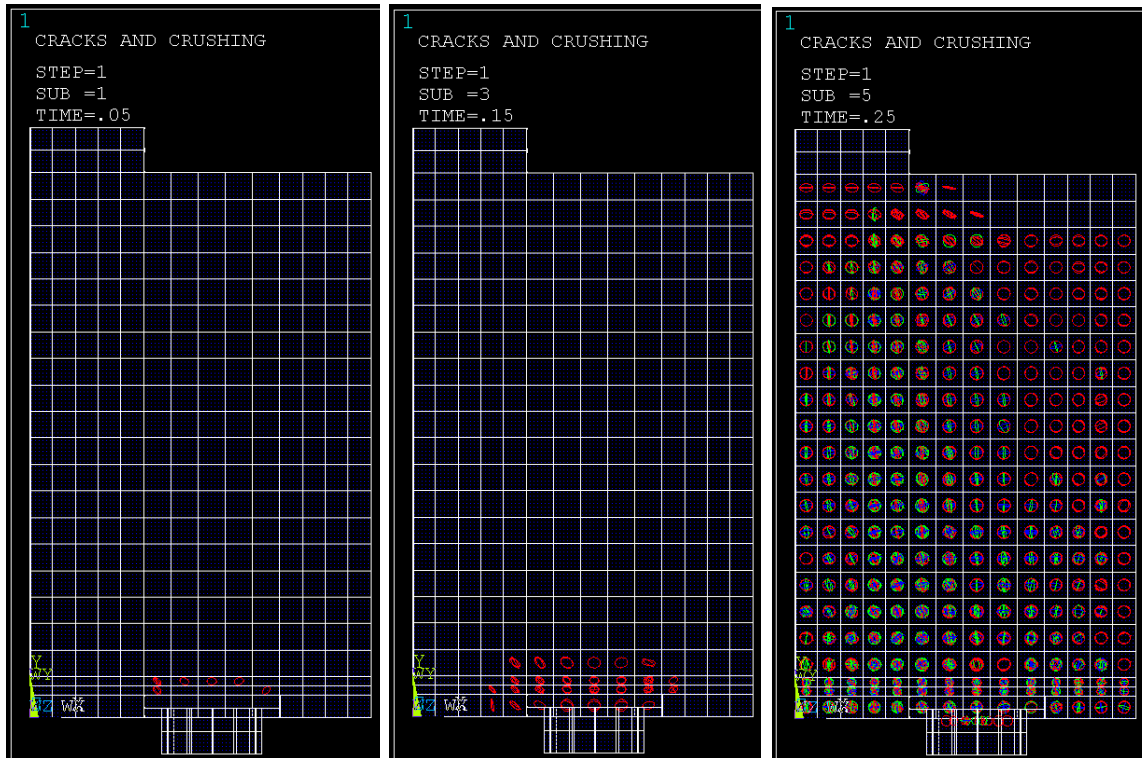
Seuraavat kuvakaappaukset on esitetty vakiopaaluanturan perustapauksella. Elementtiverkko on asetettu läpinäkyväksi, joten leikkauspinnan taakse jäävät halkeamat näkyvät myös. Halkeamat voidaan esittää jokaisen elementin kohdalla tai jokaisen elementin sauvan kohdalla. Halkeamat on esitetty tuloksissa elementtien mukaan havainnoinnin helpottamiseksi.

Jos halkeama on syntynyt, mutta mennyt uudestaan umpeen tulee ympyrän sisälle raksi. Halkeama voi ilmaantua ja vaikuttaa enimmillään 3 eri suuntaan. Ensimmäinen halkeama esitetään punaisella, toinen virheällä ja kolmas sinisellä värillä. Puristusmurto on esitetty oktaedrimuodolla (◊).

Kuvakaappaukset on otettu kolmelta eri ajanhetkeltä (time = 0.05; 0.15; 0.25). Ajanhetkellä time = 0.15 tukireaktion ollessa 750 kN rakenne halkeaa vain paalun päällä. Ajanhetkellä time = 0.25 (tukireaktio 1000 kN) rakenteessa tapahtuu paljon vetohalkeilua moneen eri suuntaan vetojännitysten siirtyessä raudoituksille. Betonin heikon vetokestävyyden johdosta halkeilu alkaa jo ensimmäisellä kuorimitushetkellä.

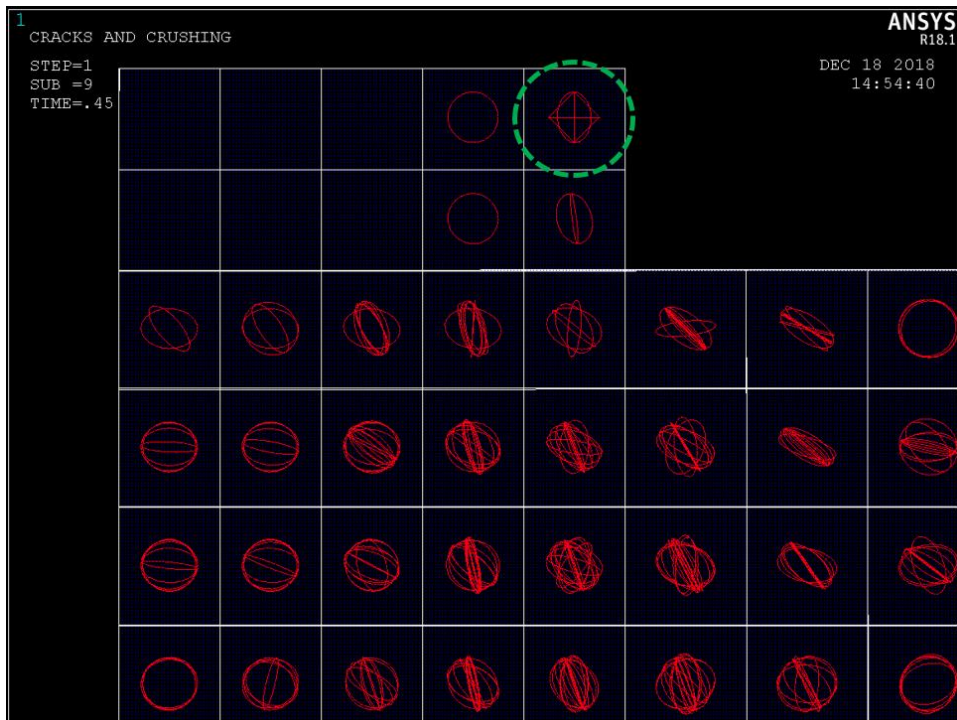


Kuva 50. Betonin halkeilu, vaakaleikkaus ylemmän raudoituksen yläpinnasta



Kuva 51. Betonin halkeilu, pystyleikkaus alemman raudoituksen keskeltä

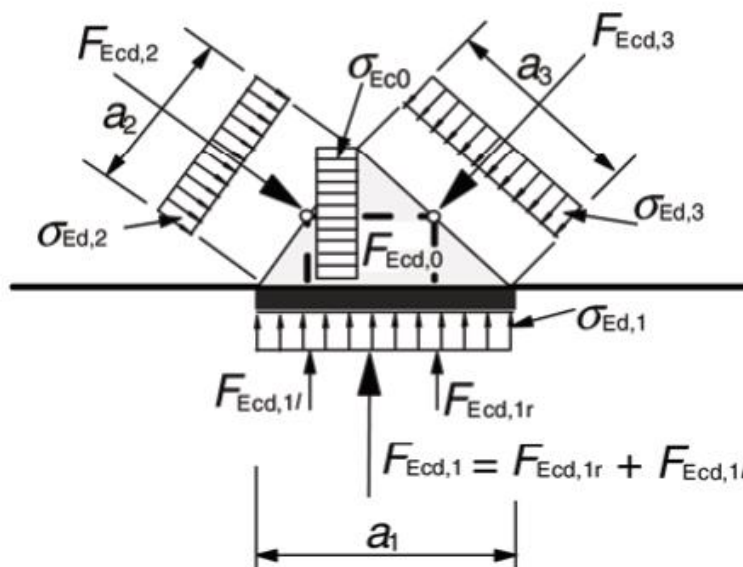
Ensimmäinen puristusmurto tapahtuu ajassa time = 0.45 tukireaktion ollessa noin 1550 kN. Puristusmurto ilmestyy pilarin reunaan. Kuvassa on esitetty lisäksi vain ensimmäisen suunnan halkeamat (punainen rengas) selkeyden vuoksi.



Kuva 52. Betonin puristusmurto, ympyröity vihreällä

Pilarin pinta-ala on pienempi kuin paaluhattujen yhteenlaskettu pinta-ala, mikä johtaa suurempaan puristusjännitykseen, ja näin ollen ensimmäiseen puristusmurtoon. Laskentamallissa ei ole kuitenkaan huomioitu pilarin pään raudoitusta, mikä todennäköisesti kasvattaisi pilarin pään puristuskapasiteettia.

Pilarin alapuolisen solmupisteen puristuslujuus on Eurokoodissa suurempi kuin opinnäytetyössä tarkasteltavaan solmupisteeseen lujuus  $k_1$  kertoimen ollessa 1,00. Lisäksi Eurokoodin kohdassa 6.5.4(6) on annettu lisämäärittely lujuuden kasvatukselle kertoimella  $k_4$ , kun solmupiste on puristettu vähintään kolmen akselin suunnassa, missä lujuus lasketaan kaavojen 3.24 ja 3.25 mukaan ylärajan ollessa 3,0. Näin ollen vaiheen 4 laskelmissa on pilarin alapuolisen solmupisteen puristuslujuutta kasvatettu.



Kuva 53. Puristussolmu, johon ei ankkuroidu vetosauvoja (EC kuva 6.26, kohta 6.5.4)

Opinnäytetyössä tarkasteltavan solmupisteen kannalta pilarin tai sen alapuolisen osan puristusmurto ei ole oleellinen, joten niiden kestävyyttä kasvatetaan vaiheen 4 laskelmissa, jotta laskelmissa päästään pidemmälle paaluhattujen liittymän tarkasteluissa.

## 5.4 Vaihe 4, tarkennettu malli

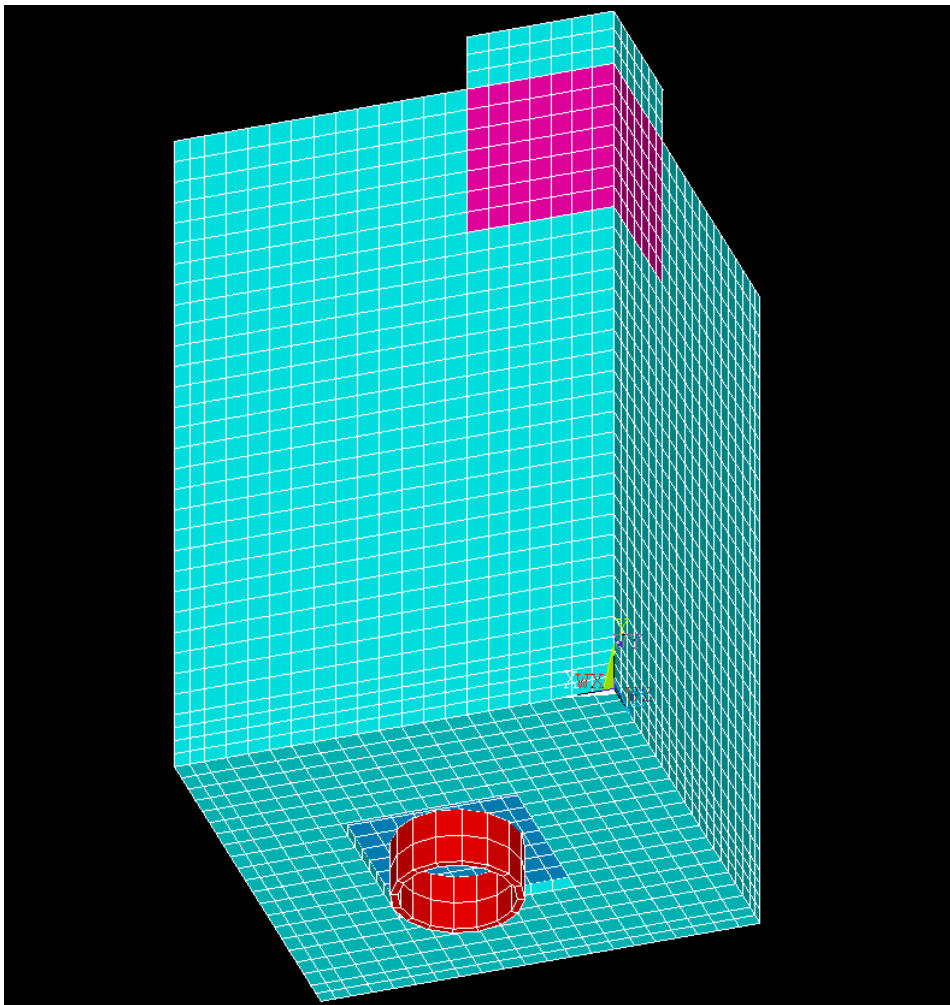
Vaiheessa 4 laskentamallia tarkennettiin vaiheiden 1-3 havaintojen perusteella. Tarkoituksena oli kehittää malli lopullisten tulosten analysointia varten.

### 5.4.1 Mallin tarkennukset ja laskenta

Vaiheen 3 laskentamallia tarkennettiin alla olevilta osin:

- Elementtikoko pienennettiin sivumitan 40 mm elementiksi tulosten tarkentamiseksi anturassa ja paaluhatussa. Elementti on kuution muotoinen, paitsi raudoitusalueilla, missä tilavuuskappaleen paksuus pienentää sivumitan raudoituksen paksuuden 25 mm mukaan. Paalun elementtikoko pidettiin 50 mm sivumitassa laskennan nopeuttamiseksi. Elementtikoon pienentäminen aiheutti tukireaktiovoiman hienoista vähenemistä siirtymään nähden.
- Siirtymän suurimmaksi arvoksi valittiin 2,0 mm ja se jaettiin 100 osaan tarkasteltavien kuormitusvaiheiden tarkentamiseksi.
- Paalun betonitäyttö poistettiin, koska täytön kontaktista paaluhattuun ei voida täysin varmistua.
- Paaluhatun lujuus korjattiin  $460 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 355 \text{ N/mm}^2$ . Lujuuden korjauksella ei kuitenkaan ole vaikutusta kappaleen taipumaan ennen rakenteen myötölujuuden saavuttamista, joten se ei vaikuta vaiheiden 1-3 tuloksiin.
- Pilarille asetettiin sivuttaissuunnassa toimiva raudoitus raudoitussuhteella 10 % estämään sen halkeamista, ja näin ollen laskentamallin hajoamista anturan ulkopuolella. Ennen lisäystä ensimmäinen elementin murskaantuminen tapahtui juurikin pilarissa.
- Betonin vetolujuus vaihdettiin betonin keskimääräisen vetolujuuden arvoon  $f_{ctm}$ , mikä vastaa paremmin betonin realistista käyttäytymistä verraten käytettävään puristuslujuuden arvoon  $f_{cm}$ . Muutoksesta johtuen betonin ensimmäiset vetohalkeamat ilmestyvät myöhemmällä siirtymällä kuormituksen ollessa myös korkeampi, mutta vaikutus puristusjännitysten muodostumiseen paalun sallitun kuormituksen kohdalla on hyvin vähäinen.

- Anturan puristuslujuutta kasvatettiin pilarin alapuolella kertoimella 1,2. Lujjuuden kasvatus perustuu solmupisteen useamman suunnan puristuksiin ilman poikittaista vetoa. Kerroin on kuitenkin rajattu melko alhaiseksi, koska laskennassa käytetään jo korkeaa puristuslujuuden keskimääräistä arvoa  $f_{cm}$ . Kasvatettu lujuus on kokeilemalla saatu vähimmäisarvo, millä rakenne saadaan puristumurtumaan enemmän paaluhatusn päältä kuin pilarin alta. Betonin jännitys - muodonmuutos kuvaajaa kasvatettiin pitäen kimmokerroin muuhun betoniin nähden samana, jotta lujjuuden kasvatuksella ei olisi vaikutusta siirtymiin.



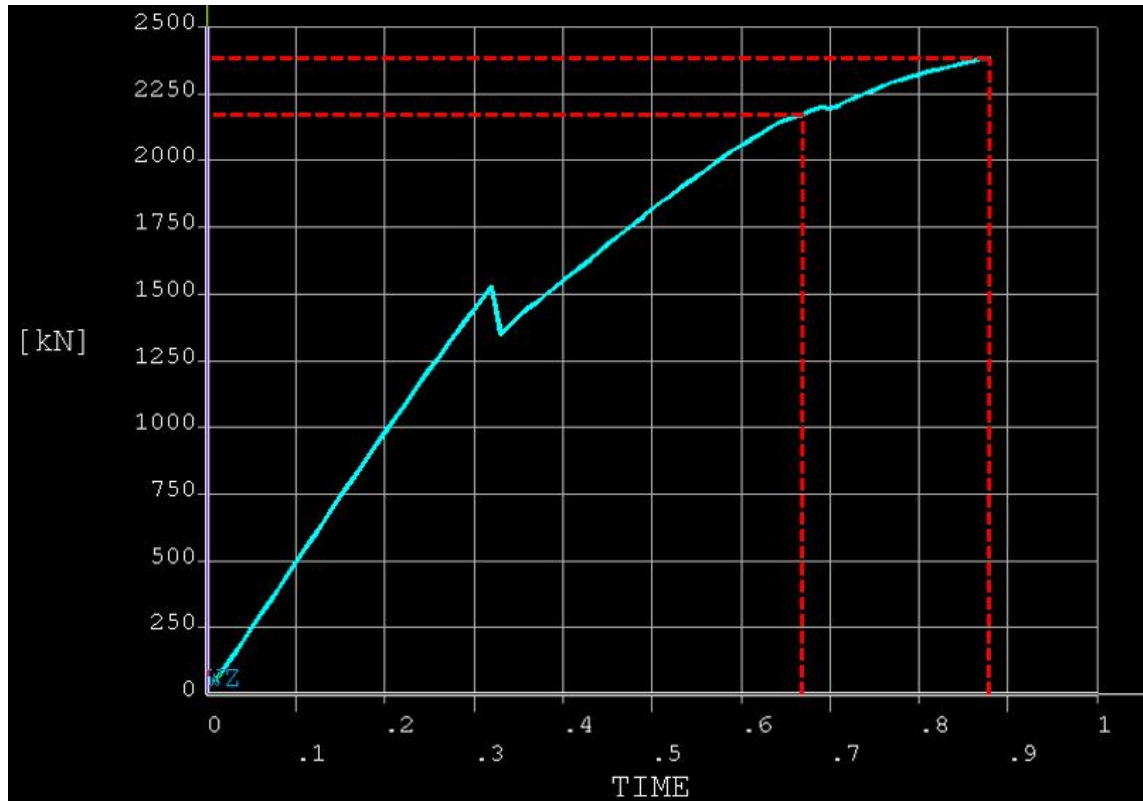
Kuva 54. Materiaalimuutokset pilarin alla (violetit elementit) ja paaluhatussa (siniset elementit)

Kooste tarkasteltavan tapauksen laskennan lähtötiedoista esitetty liitteessä 1.

## 5.4.2 Tulosten analysointi

### 5.4.2.1 Kuormitus

Paalun tukireaktio – pilarin siirtymä -kuvaajaksi saatiin alla olevan kuvan mukainen käyrä.



Kuva 55. Tukireaktion kehittyminen pilarin siirtymään nähden

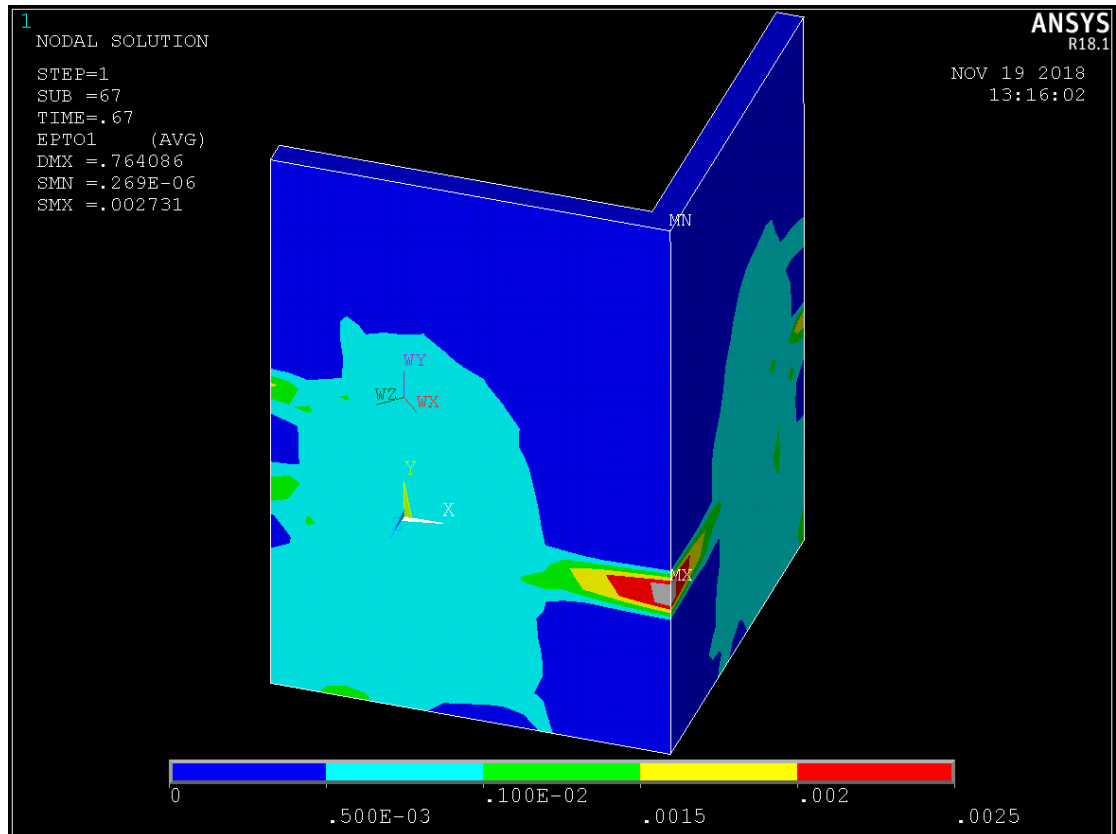
Laskenta pysähtyy ajassa time = 0.89 solmupisteen loputtomaan Y-siirtymään. Siirtynyt solmupiste sijaitsee paaluhatun yläpuolella noin 170 mm korkeudella paaluhatun yläpinnasta mitattuna. Paalun tukireaktio viimeisellä tarkasteluajankohdalla time = 0.88 on 2382 kN, pilarin yläpään siirtymän ollessa 1,76 mm. Paalun kestävyuden mitoitusarvolla 2180 kN pilarin yläpää on siirtynyt 1,34 mm ajanhetken ollessa time = 0.67.

Ajanhetkellä time = 0.70 on havaittavissa pieni notkahdus. Kyseisessä kohdassa rakenne murskaantui laajasti pilarin alta ennen solmupisteen lujuuden kasvusta. Nyt laskenta etenee lähemmäksi paaluhatun yläpuolisen solmupisteen kapasiteettia.



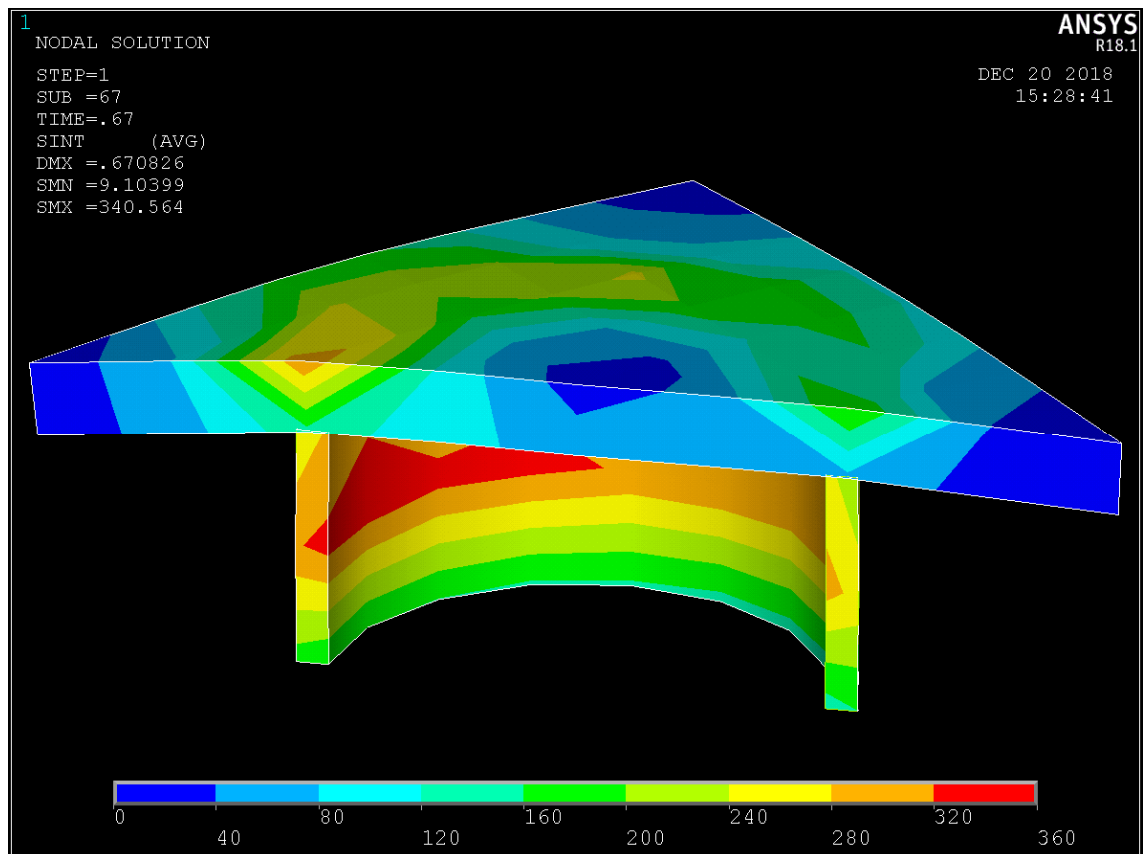
### 5.4.2.2 Rakenneosien tarkastelu

Seuraavassa kuvassa on tarkasteltu rengasraudoitusalueita paalun kestävyysmitoitustarvon kohdalta  $\text{time} = 0.67$ . Pääraudoituksen venymät eivät ylitä myötövenymän arvoa 0,0025. Rengasraudoituksessa myötölujuus ylittyy pääraudoituksen yläpuolella alla olevan kuvan harmaan alueen mukaisesti anturan nurkassa.



Kuva 56. Rengasraudoitusalueiden venymät

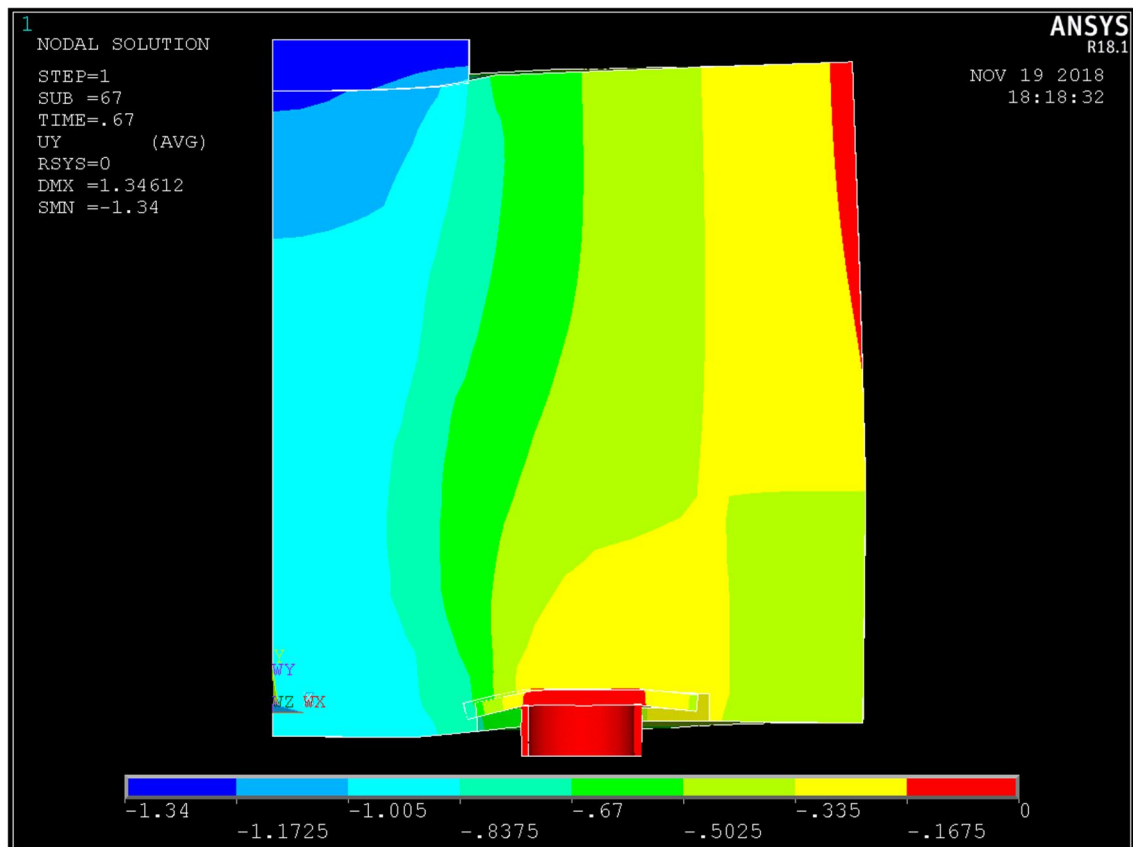
Rengasraudoituksen venymän huippuarvo 0,0027 on kuitenkin lähes pistemäinen, ja myötövenymän ylittävät arvot asettuvat melko pienelle alueelle. Myötövenymän korkeus on noin 1/3 anturan koko korkeudesta, joten rengasraudoituksen merkitys korostuu eniten kyseisellä alueella. Rengasraudoitus on optimaalisesti suunniteltu, kun raudoitus tihenee kyseisellä kohdalla. Laskentamallissa rengasraudoituksen tihennystä ei ole otettu huomioon.



Kuva 57. Paaluhatun jännitykset (stress intensity)

Paalun mitoitusarvon kohdalla paaluhatun jännitykset ovat suurimmillaan noin 280 N/mm<sup>2</sup>. Paaluhatun lujuus on 355 N/mm<sup>2</sup>, joten taivutuksen käyttöaste on noin 79 %. Suurimman rasituksen alla on paaluanturan keskelle osoittava paaluhatun nurkka, mikä on paaluhatussa heikoin kohta. Paaluhatut voisivat toimia optimaalisemmin käännettynä 45 asteen kulmaan, jolloin suora reuna olisi kohtisuorassa kuormitussuuntaan.

Paalun jännitys on suurimmillaan 340 N/mm<sup>2</sup>, lujuuden ollessa 460 N/mm<sup>2</sup> ja käyttöasteen 74 %. Jännitys kasautuu hieman enemmän paalun kuormanpuoleiseen reunaan. Vakiopaaluanturoiden suuresta korkeudesta johtuen, jännitys on kuitenkin melko tasainen. Laskentamalli on kuitenkin luotu vain paaluhatun yläpuolisen solmupisteen tarkasteluihin, joten tuloksia ei voi suoraan käyttää paalun mitoitukseen. Mallissa ei myöskään ole huomioitu paalun betonitäyttöä, mikä keventää jännitystä teräksessä siirtäen kuormitusta betoniin.



Kuva 58. Pystysuuntaiset Y-siirtymät [mm], leikkauspinta 45 astetta

Yllä olevassa kuvassa on esitetty koko teräspaaluanturan pystysuuntaiset siirtymät 45 asteen leikkauspinnan mukaan.

Kuvassa muodon siirtymiä on liioiteltu 50 kertaisena hahmottamisen parantamiseksi, mutta lukuarvot ovat todellisia siirtymiä. Tulokset on luettu paalun kestävyden mitoitusarvon kohdalta, kuormitetun pilarin yläpään siirtymän ollessa 1,34 mm. Anturan alapinta siirtyy paalujen välistä vain noin yhden millimetrin, joten betoni painuu kasaan keskeltä erotuksen 0,34 mm verran. Siirtymät ovat sen verran pieniä, että niillä on vaikutusta lähinnä vain jännitysten kulkeutumiseen.

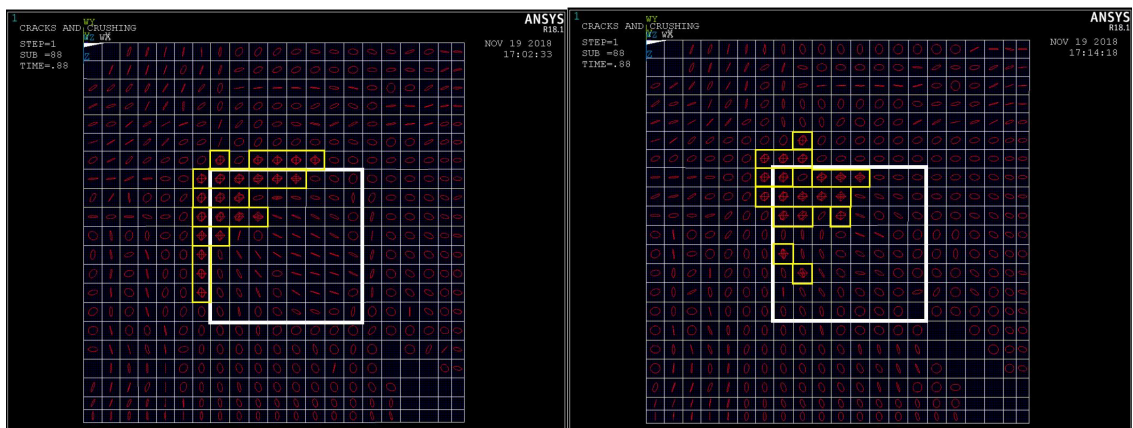
#### 5.4.2.3 Solmupisteen kokonaisvoimatarkastelu

Kun kuormitus lähestyy anturan ominaiskapasiteettia, paalun tukireaktio – pilarin siirtymä -kuvaajan loppupää alkaa kaareutumaan, kuten kuvasta 55 voidaan lukea. Kuvaajan loppupään kaareutuessa siirtymä alkaa kasvamaan tukireaktion kehittymiseen nähden nopeammin. Tämä johtuu rakenteen alkaessa myötämään lisääntyvästi, kun betoni alkaa murskaantumaan. Kuormitetun pilarin siirtymillä 1,74 mm ja 1,76 mm (time 0.87 ja 0.88) paalun tukireaktio on lähes sama,

joten laskentamallin ominaiskapasiteetiksi voidaan olettaa 2382 kN. Malli on luotu yksinomaan paalun päällisen solmupisteen tarkasteluun, joten ominaiskapasiteetti kuvaa ainoastaan solmupisteen ominaiskapasiteettia.

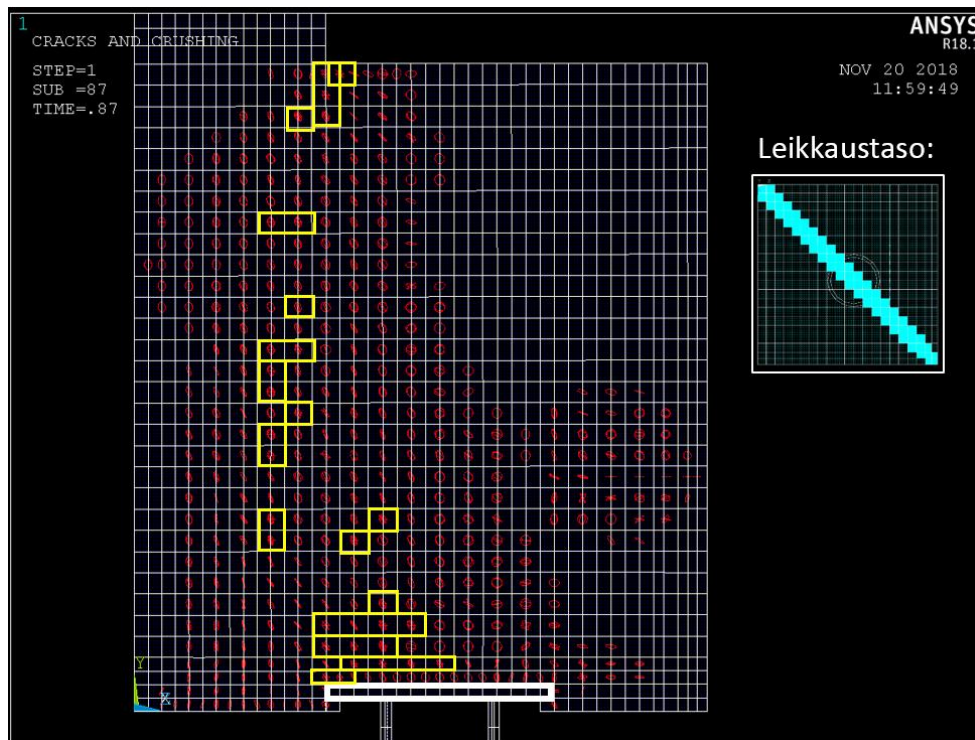
Ensimmäinen yksittäisen elementin puristusmurto paaluhatus päälliselle alueelle syntyi jo ajassa  $\text{time} = 0.48$  paaluhatus kuorman puoleiseen etunurkkaan. Puristusmurto johtui todennäköisesti paaluhatus nurkan aiheuttamasta jännityspiikistä. Elementin puristusmurtoja syntyy kiihtyvästi laskennan loppua kohden.

Tarkasteluajankohdalla  $\text{time} = 0.88$  elementin puristusmurtoja oli syntynyt paaluhatus päälliselle alueelle laajasti alla olevan kuvan mukaisesti (keltaiset alueet). Rakenne alkaa murskaantumaan paaluhatus päältä, joten tilanne on lähellä tarkasteltavan solmupisteen ominaiskapasiteettia.



Kuva 59. Murskautuneet elementit, vaakaleikkaus paaluhatus yläpuolelta 70 mm (vasen) ja 110 mm (oikea)

Puristusmurrot keskittyvän paaluhatus kuormanpuoleiseen reunaan. Teräksinen 90 asteen terävä reuna luo kohtaan jännityspiikin.



Kuva 60. Murskautuneet elementit, leikkauspinta 45 astetta

Betonin osavarmuusluku normaalisti vallitsevassa mitoitustilanteessa on Eurokoodin mukaan  $\gamma_c = 1,50$ . Suomen kansallisen liitteen mukaan osavarmuusluvulla vähennetty lujuus tulee kertoa vielä kertoimella  $\alpha_{cc} = 0,85$ . Kerroin ottaa huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamisesta aiheutuvat epäedulliset tekijät. Eurokoodissa suositusarvo on 1,00, mutta kussakin maassa kertoimen arvo voidaan valita väliltä 0,80 – 1,00.

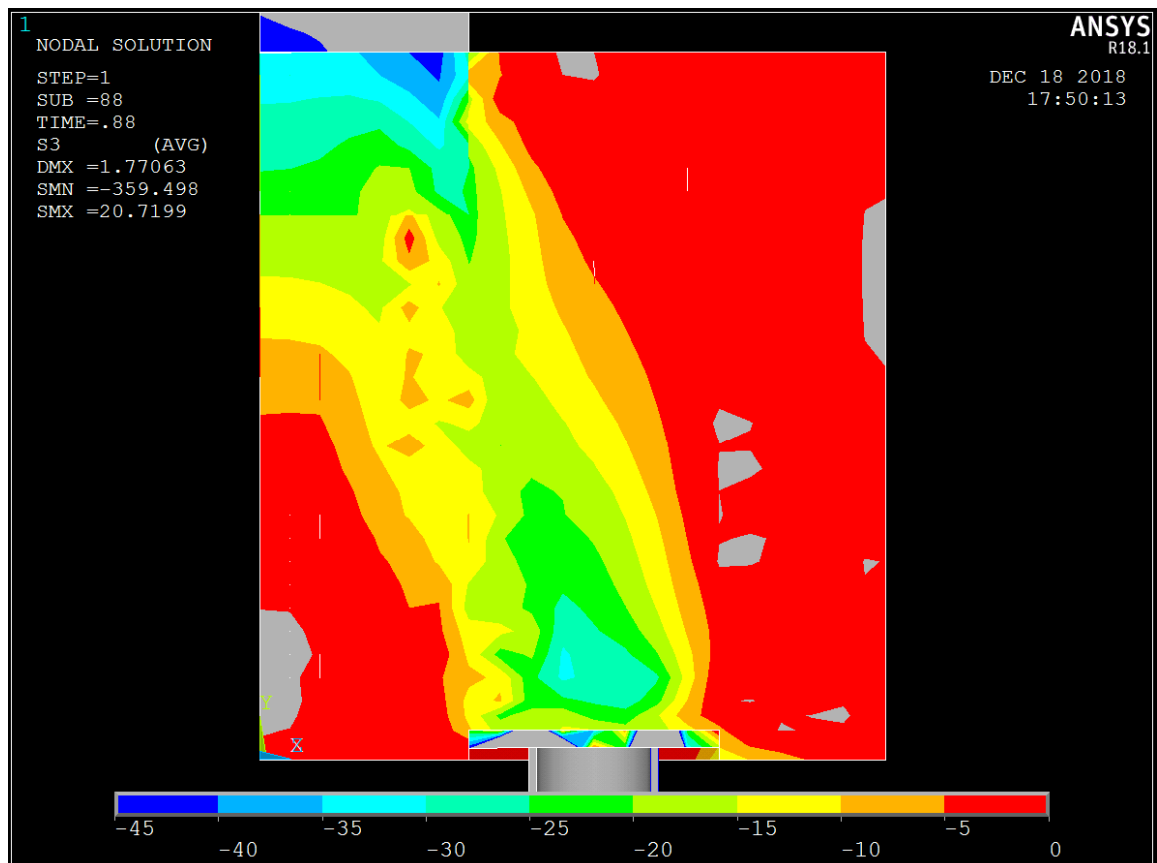
Näin ollen kokonaisosavarmuudeksi saadaan 1,765, mitä sovelletaan puristuslujuuden mitoitusarvon määrittämiseen. Kun laskennan mukainen ominaiskapasiteetti 2382 kN jaetaan osavarmuuskertoimella 1,765, saadaan mitoituskapasiteettiä noin 1350 kN. Mikäli mitoituskapasiteetti jaettaisiin paaluhatun koko pinta-alalle, saadaan tasaisesti jakautuneeksi mitoitusjännitykseksi 15 N/mm<sup>2</sup> ominaisjännityksen ollessa noin 26 N/mm<sup>2</sup>. Vastaavat arvot ilman Suomen kansallista vähennystä olisivat 18 % suuremmat.

Laskentamallin ominaiskapasiteetti muuttuu herkästi pienilläkin mallin lähtötietomuutoksilla. Substeppien lisäys sekä elementtikoon ja muodon muutoksilla on suurta merkitystä, joten saatuja arvoja voidaan pitää vain suuntaa antavina.

#### 5.4.2.4 Solmupisteen puristus-pinta-alan tarkastelu

Seuraavat kuvakaappaukset on luettu edellisen kappaleen tapaan paaluanturan ominaiskapasiteetin ajanhetkeltä  $\text{time} = 0.88$ . Paalun todelliset kuormitukset rajoittuvat kuitenkin ominaiskapasiteettia 2382 kN paljon alemmas, kun otetaan huomioon osavarmuuskertoimet sekä kuormakertoimet.

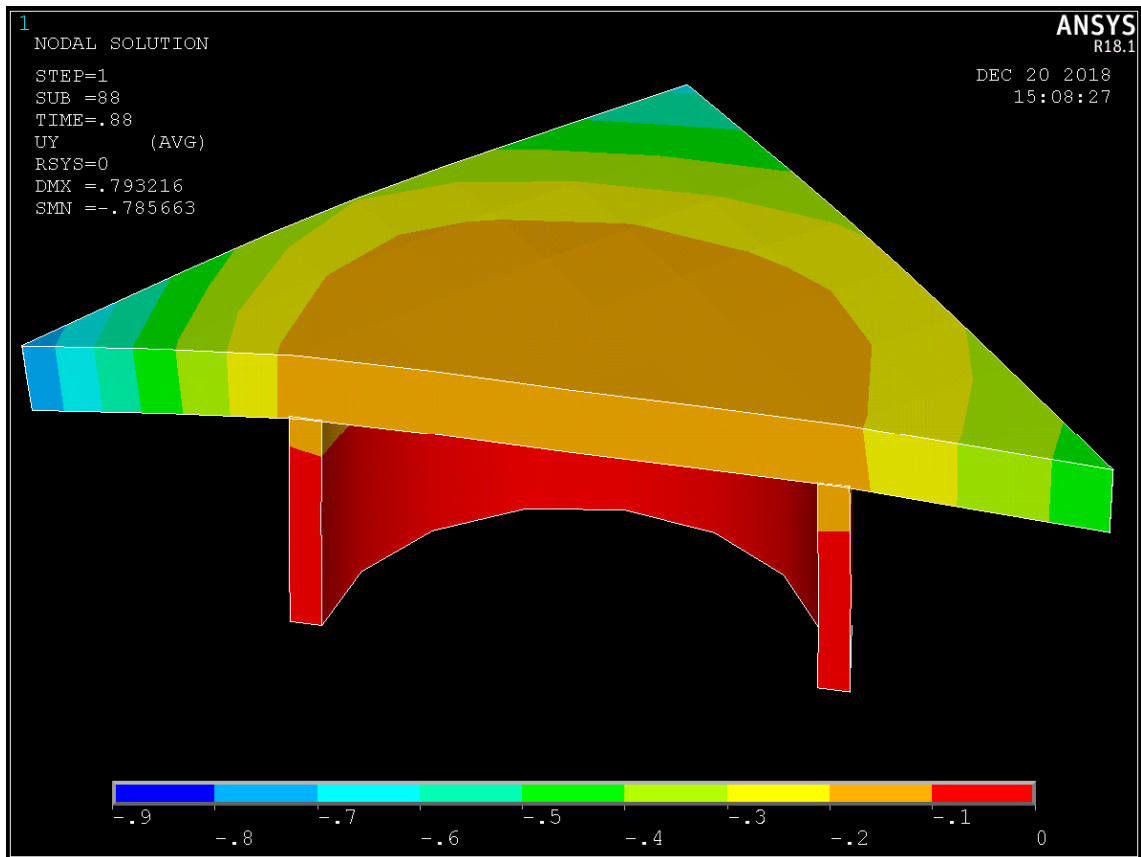
Tarkastelu on tehty solmupisteen maksimikapasiteetin kohdalta, jotta betonissa tapahtuva kuormituksen leviäminen vastaisi tilannetta, minkä jälkeen tarkasteltava solmupiste murtuu. Näin ollen myös tulokset ovat vertailukelpoisia edellisen kappaleen kokonaisvoimatarkasteluun. Käytettäessä betonin lujuutena ja kimmo-kertoimena ominaisarvoja, ei mitoituslujuuden kohdalta tarkasteltua puristus-pinta-alaa voi suoraan verrata kertoimilla vähennettyyn mitoituslujuuteen.



Kuva 61. Puristusjännitys [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] (3rd Principal stress), leikkauspinta 45 astetta

Puristusjännityksen huippupiste paalun yläpuolisella alueella asettuu paaluhatus pinnasta noin 100 mm ylemmäs raudoitusalueiden päälle. Tämä tukee ajatusta, että solmupisteen puristusmitoitus voidaan tehdä raudoitusten päällä, jonka jäl-

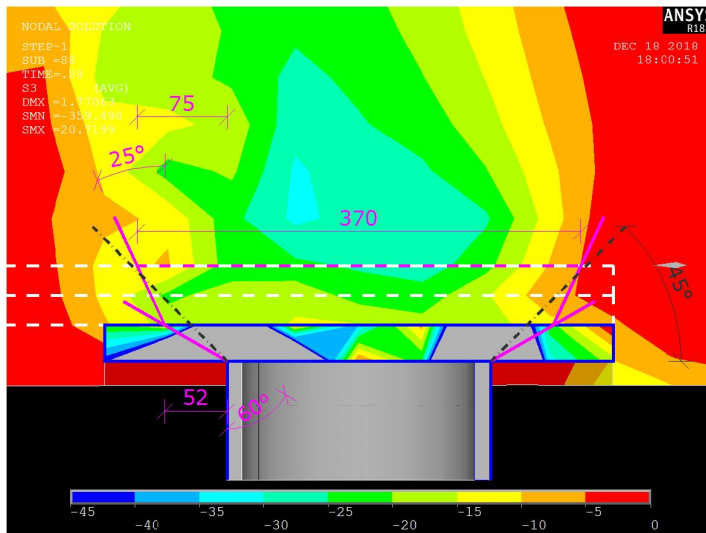
keen voimat kulkeutuvat paaluhatululle raudoitusten suoran kontaktin kautta. Jännityshuippu paaluhatun päällisessä solmupisteessä on noin  $30 \text{ N/mm}^2$ . Jännityshuippu on kuitenkin solmupisteiden keskiarvojännitys, joten yksittäisten elementtien jännityshuiput ovat kuitenkin ylittäneet puristusmurtojännityksen  $43 \text{ N/mm}^2$ , kun puristusmurtoja on syntynyt.



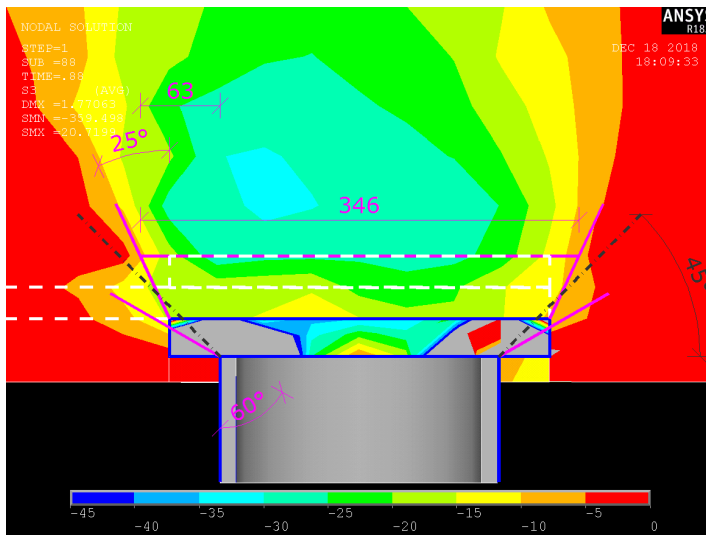
Kuva 62. Paalun ja paaluhatun pystysuuntaiset siirtymät

Paaluanturan ollessa melko massiivinen ja jäykkä kappale, tulee paaluhatun pienillekin siirtymille suuri merkitys jännitysten jakautumiseen. Tasapaksulla paaluhatulla pystysuuntaiset siirtymät seuraavat tukipisteenä toimivan paalun ympyrämuotoa. Näin ollen myös kuormituspinta-ala leviää jokseenkin ympyrämuodossa. Paaluhatun muoto voisi olla pyöreä, mutta valmistusteknisesti voi neliömuoto olla kannattavampi.

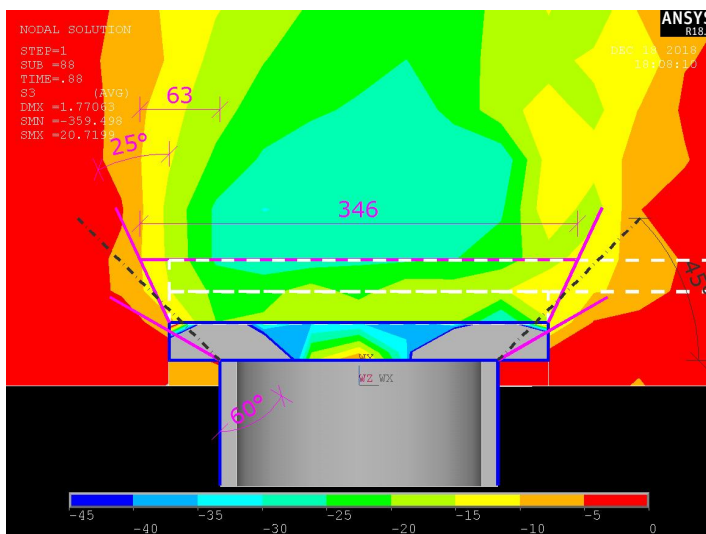
Jännityksen leviäminen paaluhatussa on tehty alla olevien leikkausten mukaan.



Kuva 63. Puristusjännityksen leviäminen, leikkaus 45 astetta (ks. kuva 66)



Kuva 64. Puristusjännityksen leviäminen, leikkaus alempi rauditus (ks. kuva 66)



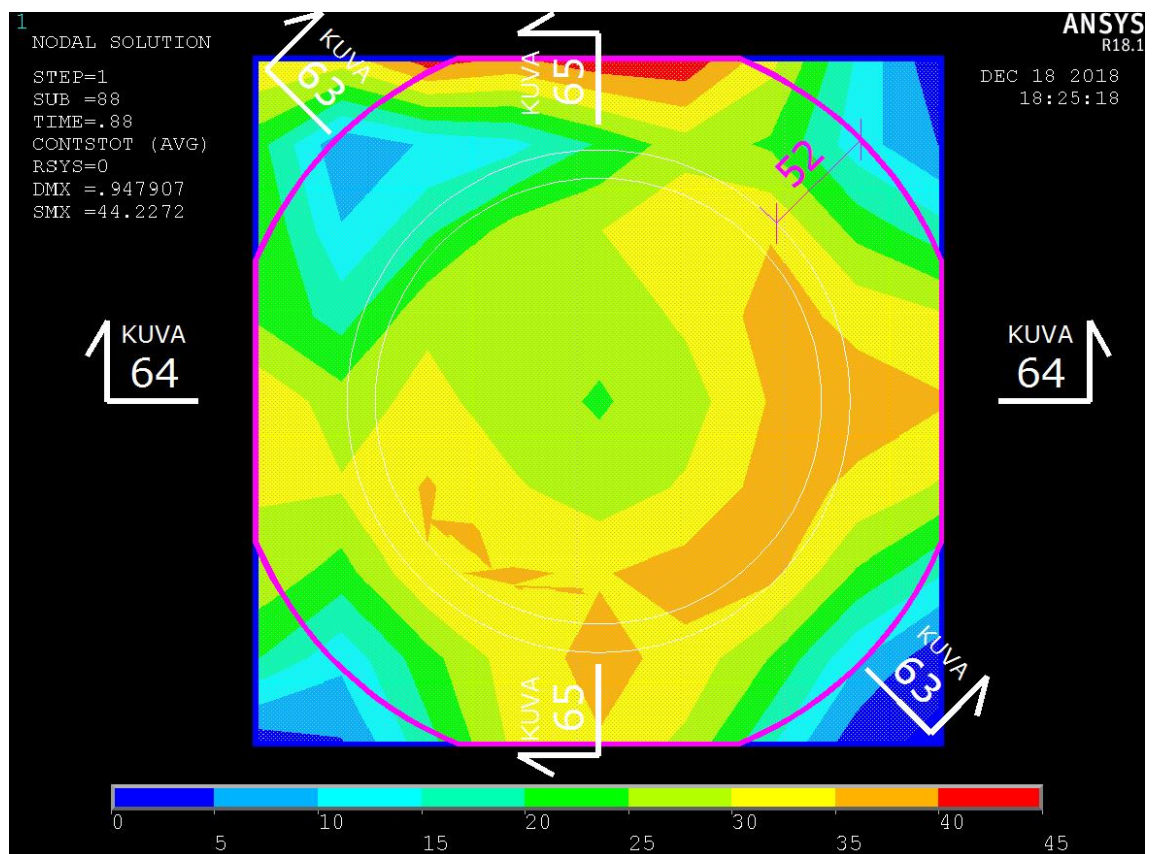
Kuva 65. Puristusjännityksen leviäminen, leikkaus ylempi rauditus (ks. kuva 66)



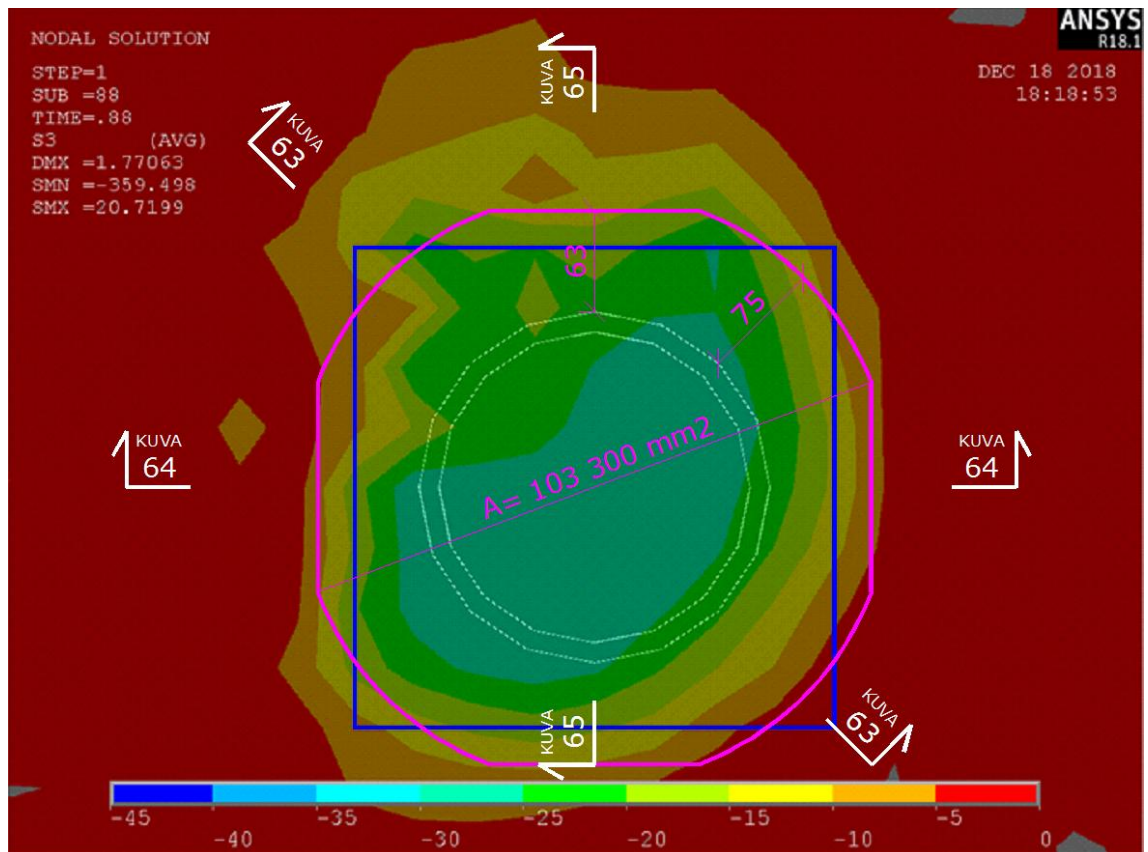
Paaluhatussa jännityksen on oletettu leviävän 60° kulmassa, rajoittuen kuitenkin paaluhatun reunaan.

Leikkauksista voidaan arvioida, että puristusjännitysalue on hieman leveämpi raudoituksen yläpuolella kuin suoraan paaluhatun päältä mitattuna. Kyseisellä tapauksella tuo jännityksen leviäminen teräsbetonirakenteessa on oletettu tapahtuvan 25° kulmassa raudoituksen yläpintaan. Jännitysalue leviää enemmän voiman suuntaan, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi leviämiskulma on arvioitu molempien puolien keskiarvolla. Myös raudoitusalueiden suurempi jäykkyys leviättä kuormitusta, mutta kuormituksen leviäminen on melko paikallista.

Tehollinen jännityspinta-ala raudoituksen päällä vastaa kyseisellä laskentatavalla suurin piirtein tapausta, kun jännitys leviää paalun reunasta raudoituksen päälle 45 asteen kulmassa.



Kuva 66. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>], kontaktipinnan jännitykset



Kuva 67. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus raudoitusten päältä, paaluhatusta 50 mm ylöspäin

Vaikka paaluhatun tehokasta pinta-alaa on jouduttu vähentämään paaluhatun taipuman vuoksi, on raudoituksen suoran kontaktin johdosta saatu hyöty pinta-alan leviämiseen suurempi. Raudoituksen yläpuolisen tehokkaan jännitysalueen suhde paaluhatun koko pinta-alaan on kyseisellä tapauksella ja valitulla tarkastelutavalla noin 1,15-kertainen. Tarkastelukohdassa keskimääräinen ominaisjännitys solmupisteen tehokkaan pinta-alan sisällä on kuvasta arvioituna noin 20–25 N/mm<sup>2</sup> huippuarvon ollessa 25–30 N/mm<sup>2</sup>.

Pinta-alaa verrattaessa kokonaisvoimatarkastelun mitoituskapasiteettiin 1350 kN saadaan solmupisteen laskentajännitykseksi noin 13 N/mm<sup>2</sup>, mikä on lähellä Eurokoodin mukaista puristusjännityksen mitoitusarvoa  $\sigma_{RD,max}$ .

Voima kulkeutuu helpoiten sitä kautta, missä tukipiste siirtyy vähiten. Betonin ollessa laskennassa tasalaatuista, jännityksellä ei ole syytä levitä puristussauvan alueelta ulos ennen betonin puristuslujuuden menetystä. Kuorma kuitenkin siirtyy pilarilta paaluhatulle puristussauvassa jokseenkin pullomaisesti. Mikäli betoni

pääsisi murtumaan huippuarvon kohdalta paaluhatun keskeltä, niin jännitys voisi levitä laajemmalle alueelle. Anturat suunnitellaan kuitenkin, niin että betonin puristusmurtoa ei pääse syntymään.

Raudoituksen puristuslujuus riittää siirtämään kuormituksen paaluhatulle. Suuremman kimmokertoimen omaavassa raudoituksessa voidaan jopa olettaa jännityksen leviäminen pienemmäksi kuin joustavammassa ja pienemmän lujuuden omaavassa betonissa. Näin ollen anturan pääraudoitus ei levitä kuormituspinta-alaa paaluhatun päällä, mutta paaluhatun ulkopuolelle menevät teräkset levittävät jännitystä paikallisesti raudoitustankojen pituussuunnassa.

## **6 Tutkimuksen yhteenveto**

### **6.1 Johtopäätökset ja perustelut tuloksiin**

Mallin luonnin tarkkuus ja kolmiulotteisen FEM-laskentamallin oikeellisuus korostuvat tämänkaltaisessa tutkimuksessa merkittävästi. Opinnäytetyön tuloksista ei voida vetää suoria johtopäätöksiä teräspaaluanturan toiminnasta tuntematta laskennan vaiheita. Tuloksissa on huomioitava rakennemallin luonnin yksinkertaistukset ja FEM-laskennan virhemarginaali. Esimerkiksi elementtiverkon tarkkuus ja tyyppi vaikuttavat tuloksiin merkittävästi varsinkin kokonaisvoimatarkastelussa.

Paalujen teräslaadun parantuessa ja siitä johtuvan kapasiteetin kasvun myötä olisi tehokasta kasvattaa vakiopaaluhattujen kokoa. Hattujen paksuutta olisi tehokasta myös lisätä kuten vaiheen 1 tarkasteluissa oli jo huomattu. Vaihtoehtoisesti tai lisäksi paaluhattuja tulisi jäykistää esimerkiksi niiden nurkkien tueksi asetetuilla vahvistussiivekkeillä. Paaluhatun suora reuna voisi olisi tehokasta kääntää voiman suuntaan kohtisuoraksi jännityspiikkien tasaamiseksi. Paaluhatun pyöreällä muodolla saataisiin enemmän hyötyä puristuspinnaan teräsmäärään verraten.

Betonin lujuutta kasvattamalla saataisiin lisäkapasiteettia solmupisteelle. Lujuuden kasvatus tuo solmupisteelle kapasiteettia lähes lineaarisesti. Lujuusluokan kasvatus perustuksissa voi tuoda kuitenkin muita haasteita valmistukseen.

Rengasraudoitus tulee merkittäväksi osaksi rakenteen kokonaistoimintaa estäen tehokkaasti betonin poikittaista vetoa. Laskelmien perusteella vakiopaaluanturoiden raudoitusmäärät vaikuttivat sopivilta ilman tarkempia raudoituksen analysointeja. Ilman esijännitystä raudoitusmäärän lisäys ei ole tehokasta, johtuen rakenteen erittäin pienistä siirtymistä. Rengasraudoituksen tihennys tulisi kuitenkin olla suurin piirtein anturan 1/3 korkeudella, missä poikittainen vetovoima on suurimmillaan.

Vakiopaaluanturoissa käytetty paaluhatun päällisen solmupisteen puristuslujuuden vähennyskerroin  $k_3 = 0,75$  perustuu solmupisteessä vaikuttavaan kahden suunnan vetoon, mutta vain yhden suunnan puristukseen. Paaluanturassa puristussuuntia on kuitenkin kaksi, joten kertoimen käyttö voi aiheuttaa ylimitoitusta. Kerroin  $k_2 = 0,85$  kuvaa tapausta, kun solmupiste on vedetty yhteen suuntaan ja kahteen suuntaan puristettu. Neljän paalun paaluanturassa kertoimeksi voidaan arvioida kyseisten arvojen välistä luku 0,80. Kertoimet on määritetty 2-ulotteisissa tapauksissa, joten käytettävän kertoimen määrittäminen kolmiulotteisessa paaluanturan solmupisteessä jää suunnittelijan vastuulle. Vakiopaaluanturoiden suuren korkeuden vuoksi pääraudoitukselle ei tule merkittävää vetoa, joten myös puristusjäännityksen mitoitusarvon kasvatus 10 %:lla voi olla järkevää. Kerroin  $k_3 = 1,00$  kuvaa selvästi tapausta missä solmupisteeseen ei ankkuroidu vetosauvoja, joten kyseistä arvoa ei tarkasteltavassa solmupisteessä voi suositella käytettäväksi, vaikka Tanskan kansallinen liite sallii kertoimen 1,00 käytön kaikille  $k_1$ ,  $k_2$  ja  $k_3$  tapauksille. FEM laskennassa ei ole otettu huomioon lujuuden vähennyskerroimia, joten kertoimen määrittäminen on tehty Eurokoodia tulkitsemalla.

Paaluanturan pääraudoituksen ollessa kiinni paalussa, voidaan opinnäytetyön tuloksena esittää puristuspinna-alaan leviävän paaluhatun päältä raudoituksen päälle 25 asteen kulmassa. Paaluhatun tehollista pinta-alaa tulee kuitenkin vähentää nurkista. Tehokas paaluhatun pinta-ala leviää paalun ulkoreunasta 60 asteen kulmassa, rajoittuen kuitenkin paaluhatun reunaan. Näin ollen paaluhatun tehokas pinta-ala on osittain pyöreämuotoinen. Tarkastelu perustuu vaiheen 4 laskelmissa analysoituun tapaukseen FPS-4RD220/12,5 eikä kyseistä tarkastelutapaa voi suoraan soveltaa kaikkiin paaluanturoihin.

Laskelmissa käytetty kuutiomainen elementtiverkko ei käyttäydy optimaalisesti eri rakenneosien liittymien terävissä nurkissa. Tarkempia analyyssejä tehdessä, tulisi elementtiverkko muuttaa viuhkamaiseksi terävien nurkkien osalta, jotta singulariteetin aiheuttamilta jännityspiikeiltä vältyttäisiin.

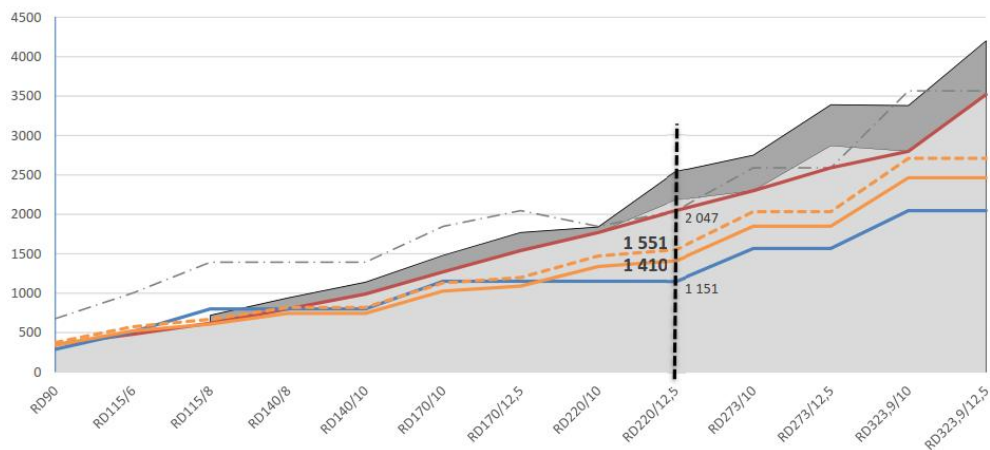
Työn jatkona olisi tarpeellista tehdä kuormituskoee, missä pyritään saamaan teräspaaluantura murtumaan paaluhatun yläpuolisen solmupisteen puristuslujuuden ylittyessä. Rakenteen käyttäytymistä kuormitusta lisäämällä verrattaisiin laskennan mukaiseen aikahistoriaan. Lisäksi työn jatkona olisi tarpeen tehdä vastaava tarkastelu kaikille anturatyypeille.

## 6.2 Tulokset

Seuraavassa taulukossa on vertailtu solmupisteen mitoituskapasiteetin erilaisia laskentatapoja. Taulukko on luotu käyttäen vakiopaaluanturan FPS-RD220/12,5 lähtöarvoja.

Solmun puristuskestävyyden mitoitusarvo [kN]	RD220/12,5	Solmupisteen pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]				
		Paaluhatun pinta-ala	Voiman suuntainen	Opinnäytetyö	paalusta 45 astetta	Vakiopaaluantura
Solmun puristusjännityksen mitoitusarvo [N/mm <sup>2</sup> ]		90 000	90 625	103 353	113 411	160 000
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo fcd	19,83	1 785	1 797	2 050	2 249	3 173
↓ 10% korotuksella (EC 6.5.4 (5))	18,76	1 689	1 700	1 939	2 128	3 002
Ilman vetosauvoja, k1	17,06	1 535	1 546	1 763	1 934	2 729
↓ 10% korotuksella (EC 6.5.4 (5))	15,95	1 435	1 445	1 648	1 809	2 552
Yhtein suuntaan vedetty solmupiste, k2	14,50	1 305	1 314	1 498	1 644	2 320
↓ 10% korotuksella (EC 6.5.4 (5))	15,01	1 351	1 360	1 551	1 702	2 402
k3 ja k2 Interpoloitu väliarvo k=0,80	13,65	1 228	1 237	1 410	1 548	2 183
↓ 10% korotuksella (EC 6.5.4 (5))	14,07	1 266	1 275	1 454	1 596	2 251
Kahteen suuntaan vedetty solmupiste, k3	12,79	1 151	1 159	1 322	1 451	2 047

- Paalun kestävyuden mitoitusarvo S550J2H Rd [kN]
- Paalun kestävyuden mitoitusarvo S440J2H Rd [kN]
- - - (EC, σRD,max = 12,79 N/mm<sup>2</sup>) solmun puristuskapasiteetti 45° leviämiskulman mukaan raudituksen päällä [kN]
- (EC, σRD,max = 12,79 N/mm<sup>2</sup>) Solmun puristuskapasiteetti vakiopaaluanturan mukaan [kN]
- (EC, σRD,max = 12,79 N/mm<sup>2</sup>) solmun puristuskapasiteetti vakiopaaluhatun pinta-alan mukaan [kN]
- - - Solmun puristuskapasiteetti opinnäytetyön mukaan (+10%) [kN]
- Solmun puristuskapasiteetti opinnäytetyön mukaan [kN]



Kuva 68. Solmupisteen pinta-alan ja lujuuden yhteisvaikutustaulukko

Opinnäytetyön solmupisteen pinta-alaksi on valittu johtopäätösten mukainen paaluhatus tehollinen pinta-ala, mikä levenee raudoituksen päälle valitulla kullalla. Oranssit viivat kuvaavat kyseistä tarkastelutapaa käyttäen  $k_2$  ja  $k_3$  kerrointen interpoloitua väliarvoa. Katkoviivalla esitetään 10 % korotusta. Tarkastelu on kuitenkin tehty vain tyyppillä FPS-4RD220/12,5, joten käyrästä tulokset muiden tyyppien kohdalla ovat vain viitteellisiä.

Vakiopaaluanturoiden solmupisteen kapasiteetti on esitetty punaisella viivalla. Harmalla pistekatkoviivalla on esitetty vakiopaaluanturan solmupisteen laskentatapa, mikä rajoittaa paalujen RD220/12,5 ja RD273/12,5 kapasiteettia.

Sininen viiva kuvaa solmupisteen kapasiteettia, kun käytetään tehollisena solmupisteen pinta-alana paaluhatus pinta-alaa ja kertoimella  $k_3$  vähennettyä lujuutta.

Tuloksista huomataan, että solmupisteen mitoitus valitulla ristikkoanalogiaan perustuvalla laskentatavalla tuottaa paalun kapasiteettia alempia lujuuksia. Paalujen kapasiteetin kasvaessa yhä suuremmaksi lujempien teräslaatuojen myötä, tulee solmupisteen kapasiteetin parannus merkittäväksi tekijäksi.

Liitteessä on esitetty tarkemmat FEM-laskennan lähtöarvot FPS-4RD220/12,5 vakiopaaluanturalla, sekä jännitys jakaumat.

## Kuvat

Kuva 1. Opinnäytetyössä tarkasteltava puristusolmu paaluanturassa (BY210 2008, kuva 110/6.6), s. 6

Kuva 2. Puristusalueen määrittäminen kahteen suuntaan vedetyssä solmussa (EC kuva 6.28, kohta 6.5.4 (4)), s. 9

Kuva 3. Puristusalueen määrittäminen yhteen suuntaan vedetyssä solmussa (EC kuva 6.27, kohta 6.5.4 (4)), s. 9

Kuva 4. Puristusalueen leviäminen paalun päällä Eurokoodin mukaan (EC kuva 9.11, kohta 9.8.1 (5)), s.10

Kuva 5. Laajenemista estävästi raudoitetun betonin jännitys - muodonmuutosyhteys (EC kuva 3.6, kohta 3.1.9), s. 10

Kuva 6. Puristuslujuuden määrittäminen solmupisteessä eri tapauksissa (BY210, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, sivu 437), s. 11

Kuva 7. Kuva 69. Puristusjännityksen välittyminen solmuun (BY210, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, kuva 8/6.5), s. 12

Kuva 8. Solmun puristuspinnan leveyden  $a_2$  suhde tuen leveyteen  $a_1$ , s. 13

Kuva 9. Tarkasteltavan solmupisteeseen puristuskapasiteetit eri mitoitusmenetelmällä verrattuna paalun kestävyysmitoitukseen vakiopaaluanturoissa, s. 14

Kuva 10. Puristusalueen määrittäminen yksikerroksisessa raudoituksessa (iii) (ACI 318-05, Fig.RA.1.6a), s. 16

Kuva 11. Ankkuroinnin määrittäminen kahteen suuntaan vedetyssä solmupisteessä (ACI 318-05, Fig.RA.4.3), s. 17

Kuva 12. Laskennan lähtötietoaineisto, s. 18

Kuva 13. CONTA174 elementtityyppi (Ansys Help, Figure 174.1), s. 19

Kuva 14. Teräspaaluanturan mallinnettava  $\frac{1}{4}$  osa, s. 20

Kuva 15. Ansys näkymä, tilavuuskappaleet (volume), s. 20

Kuva 16. Mallinnuksen ero todelliseen pilarin sivumittaan, s. 21

Kuva 17. Excel Makron lähtötietojen syöttösivu, s. 22

Kuva 18. Rakenteen elementtiverkko. Kuva leikattu anturan keskeltä nurkkaan, s.22

Kuva 19. SOLID185 elementtityyppi (Ansys Help, Figure 185.1), s. 24

- Kuva 20. Ansys FEM-laskentakuvaaja, s. 24
- Kuva 21. Tapaus 1.1, FPS-4RD220/12.5 [N/mm<sup>2</sup>], s. 25
- Kuva 22. Tapaus 1.2, FPS-4RD220/12.5, h600 [N/mm<sup>2</sup>], s. 25
- Kuva 23. Tapaus 1.3, FPS-4RD220/12.5, paaluhattu 50 mm [N/mm<sup>2</sup>], s. 26
- Kuva 24. Tapaus 1.4, FPS-4RD220/12.5, paaluhattu 100 mm [N/mm<sup>2</sup>], s. 27
- Kuva 25. Tapaus 1.1, FPS-4RD220/12.5 (siirtymät [mm]), s. 27
- Kuva 26. SOLID65 elementtityyppi (Ansys Help, Figure 65.1), s. 28
- Kuva 27. Laskentamallin raudoitusalueet ja elementtijako, s. 29
- Kuva 28. Mallinnuksen ero todelliseen raudoitusalueen leveyteen, s. 30
- Kuva 29. Raudoituksen jännitys – muodonmuutos kuvaaja, s. 30
- Kuva 30. Rakenneanalyysissä käytettävä jännitys - muodonmuutosyhteyden periaatekuva (EC kuva 3.2, kohta 3.1.5), s. 31
- Kuva 31. Laskennan eteneminen ajassa 0.55, s. 32
- Kuva 32. Laskennan eteneminen iterointikierröksittäin, s. 32
- Kuva 33. Tukireaktion kehittyminen, raudoitettu antura, s. 33
- Kuva 34. Tukireaktion kehittyminen, raudoittamaton antura, s. 33
- Kuva 35. Raudoitusalueiden venymä (2nd Principal strain), raudoitettu antura, s. 34
- Kuva 36. Raudoitusalueiden venymä (2nd Principal strain), raudoittamaton antura, s. 35
- Kuva 37. Siirtymät x-suunnassa [mm], raudoitettu antura, s. 36
- Kuva 38. Siirtymät x-suunnassa [mm], raudoittamaton antura, s. 36
- Kuva 39. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), raudoitettu antura, s. 37
- Kuva 40. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), raudoittamaton antura, s. 37
- Kuva 41. Raudoitetut elementit anturassa, s. 38
- Kuva 42. Tukireaktion kehittyminen sallitulle paalukuormalle, s. 39



Kuva 43. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), leikkauspinta 45 astetta, s. 39

Kuva 44. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus paaluhattun päältä, raudoitusalue esitetty valkoisella katkoviivalla, s. 40

Kuva 45. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus raudoitusten välistä, raudoitusalue esitetty valkoisella katkoviivalla, s. 40

Kuva 46. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus raudoitusten päältä, raudoitusalue esitetty valkoisella katkoviivalla, s. 41

Kuva 47. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), pystyleikkaus alempää pääraudoitusta pitkin, s. 41

Kuva 48. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), pystyleikkaus ylempää pääraudoitusta pitkin, s. 42

Kuva 49. SOLID65 elementin halkeamissuunta (Ansys Help, Figure 4.65-2), s. 42

Kuva 50. Betonin halkeilu, vaakaleikkaus ylemmän raudoituksen yläpinnasta, s. 43

Kuva 51. Betonin halkeilu, pystyleikkaus alemman raudoituksen keskeltä, s. 44

Kuva 52. Betonin puristusmurto, ympyröity vihreällä, s. 44

Kuva 53. Puristussolmu, johon ei ankkuroidu vetosauvoja (EC kuva 6.26, kohta 6.5.4), s. 45

Kuva 54. Materiaalimuutokset pilarin alla (violetit elementit) ja paaluhatussa (siniset elementit), s. 47

Kuva 55. Tukireaktion kehittyminen pilarin siirtymään nähden, s. 48

Kuva 56. Rengasraudoitusalueiden venymät, s. 49

Kuva 57. Paaluhattun jännitykset (stress intensity), s. 50

Kuva 58. Pystysuuntaiset Y-siirtymät [mm], leikkauspinta 45 astetta, s. 51

Kuva 59. Murskautuneet elementit, vaakaleikkaus paaluhattun yläpuolelta 70 mm (vasen) ja 110 mm (oikea), s. 52

Kuva 60. Murskautuneet elementit, leikkauspinta 45 astetta, s. 53

Kuva 61. Puristusjännitys [N/mm<sup>2</sup>] (3rd Principal stress), leikkauspinta 45 astetta, s. 54

Kuva 62. Paalun ja paaluhatus pystysuuntaiset siirtymät, s. 55

Kuva 63. Puristusjännityksen leviäminen, leikkaus 45 astetta (ks. kuva 66), s. 56

Kuva 64. Puristusjännityksen leviäminen, leikkaus alempi raudoitus (ks. kuva 66), s. 56

Kuva 65. Puristusjännityksen leviäminen, leikkaus ylempi raudoitus (ks. kuva 66), s. 56

Kuva 66. Puristusjännitys [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ], kontaktipinnan jännitykset, s. 57

Kuva 67. Puristusjännitys [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] (3rd Principal stress), vaakaleikkaus raudoitusten päältä, paaluhatus 50 mm ylöspäin, s. 58

Kuva 68. Solmupisteen pinta-alan ja lujuuden yhteisvaikutustaulukko, s. 61

## Lähteet

SFS-EN 1992-1-1+A1+AC: Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

SFS-EN 1993-1-5: Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet

Betoniteollisuus, Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan, Osa 6: Perustukset (versio 22.1.2010)

BY210, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008

Suomen rakentamismääräyskokoelma, rakenteiden lujuus ja vakaus, betonirakenteet, kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992 (20.12.2016)

Konsekvensutredning EKS 10 (2015), Ruotsin kansallinen liite Eurokoodiin

DS/EN 1992-1-1 DK NA:2013, Tanskan kansallinen liite Eurokoodiin 1992-1-1

ACI 318-05 Building Code Requirements for Structural Concrete (and Commentary 318R-05)

Ansys Help

SSAB: Perustukset, teräsbetoniset vakiopaaluanturat RR- ja RD-paaluille (FPS)

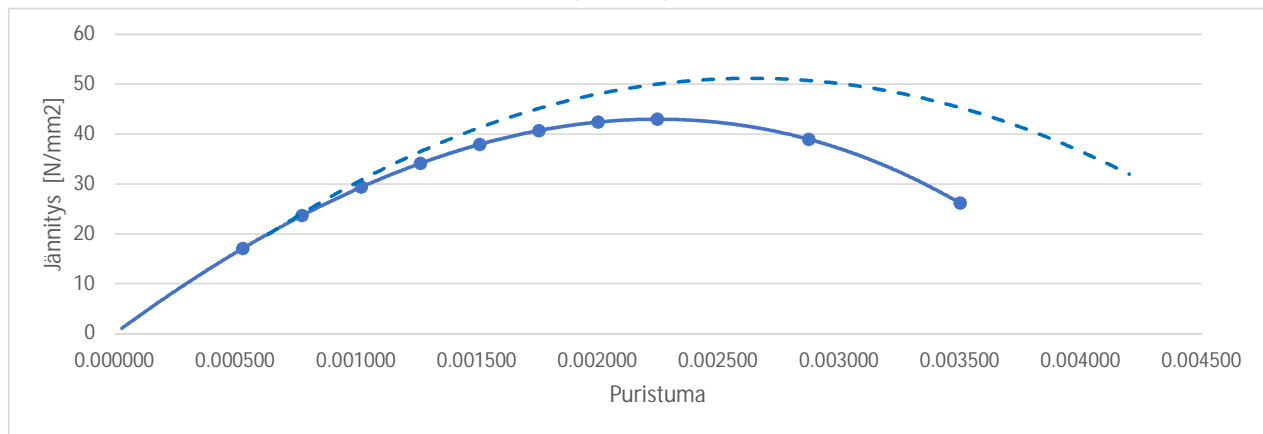
Liikennevirasto, betonin ajasta riippumattomat materiaalmallit (38.2013)

Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis (Anthony J. Wolanski, B.S. 2004)

Anturatyyppe	Anturan		Pilarin	Paaluhatun			Paalun	
	korkeus	leveys	Leveys	etäisyys	leveys	korkeus	Halkaisija	seinämä
*FPS-4RD220/12,5	1200	1500	550	800	300	30	219.1	12.5

Betonin materiaaliominaisuudet:

C35/45 Betonin lujuusluokka  
32 260.08 E Betonin kimmomoduuli [N/mm<sup>2</sup>]



\* Ehjä viiva on teräsbetonirakenteen jännitys-puristuma kuvaaja ja katkoviiva vahvennetun yläosan kuvaaja

3.21 Betonin vetolujuus [N/mm<sup>2</sup>]  
0.9 Betonin leikkausvoimakerroin halkeaman ollessa kiinni  
0.5 Betonin leikkausvoimakerroin halkeaman ollessa auki  
0.2 Poissonin luku (NCCI 2, taulukko 3,2)  
1.20 Puristuslujuuden kerroin pilarin alapuoliselle betonille

Raudoitustiedot ja materiaaliominaisuudet:

32.7 % Pääraudoituksen raudoitussuhde ( $A_{\text{raudoitus}} / A_{\text{volume}}$ )  
3.2 % Rengasraudoituksen raudoitussuhde ( $A_{\text{raudoitus}} / A_{\text{volume}}$ )  
200 000 Es Raudoituksen kimmokerroin [N/mm<sup>2</sup>]  
500 fyk Raudoituksen ominaismyötölujuus [N/mm<sup>2</sup>]

Teräspaalun materiaaliominaisuudet:

210 000 Es Teräksen kimmokerroin [N/mm<sup>2</sup>]  
460 fyk Paalun ominaismyötölujuus [N/mm<sup>2</sup>]  
355 fyk Paaluhatun ominaismyötölujuus [N/mm<sup>2</sup>]

Poissonin luku teräsojat ja raudoitus:

0.3

Betonipeitepaksuudet:

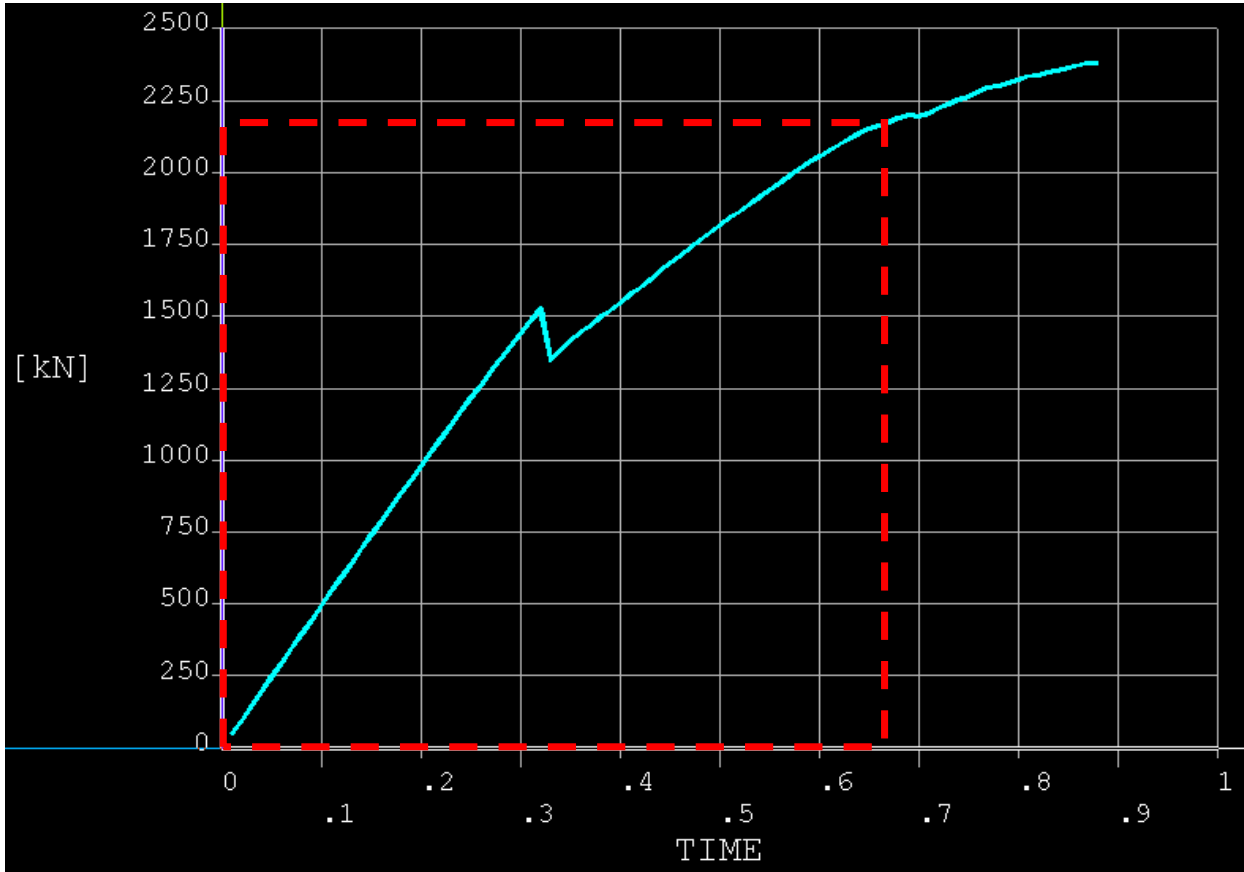
50 Betonipeitepaksuus alapinnasta [mm] (EI TOIMI)  
35 Betonipeitepaksuus sivusta [mm]

Elementtikoot ja -tyyppi:

40 Elementtikoko vaakasuunnassa yleensä [mm]  
50 Paalun elementtikoko [m]  
40 Raudoituksen yläpuolisen betoniosan elementtikorkeus [mm]  
40 Pilarin elementtikorkeus [mm]  
SOLID65 Elementtityyppi

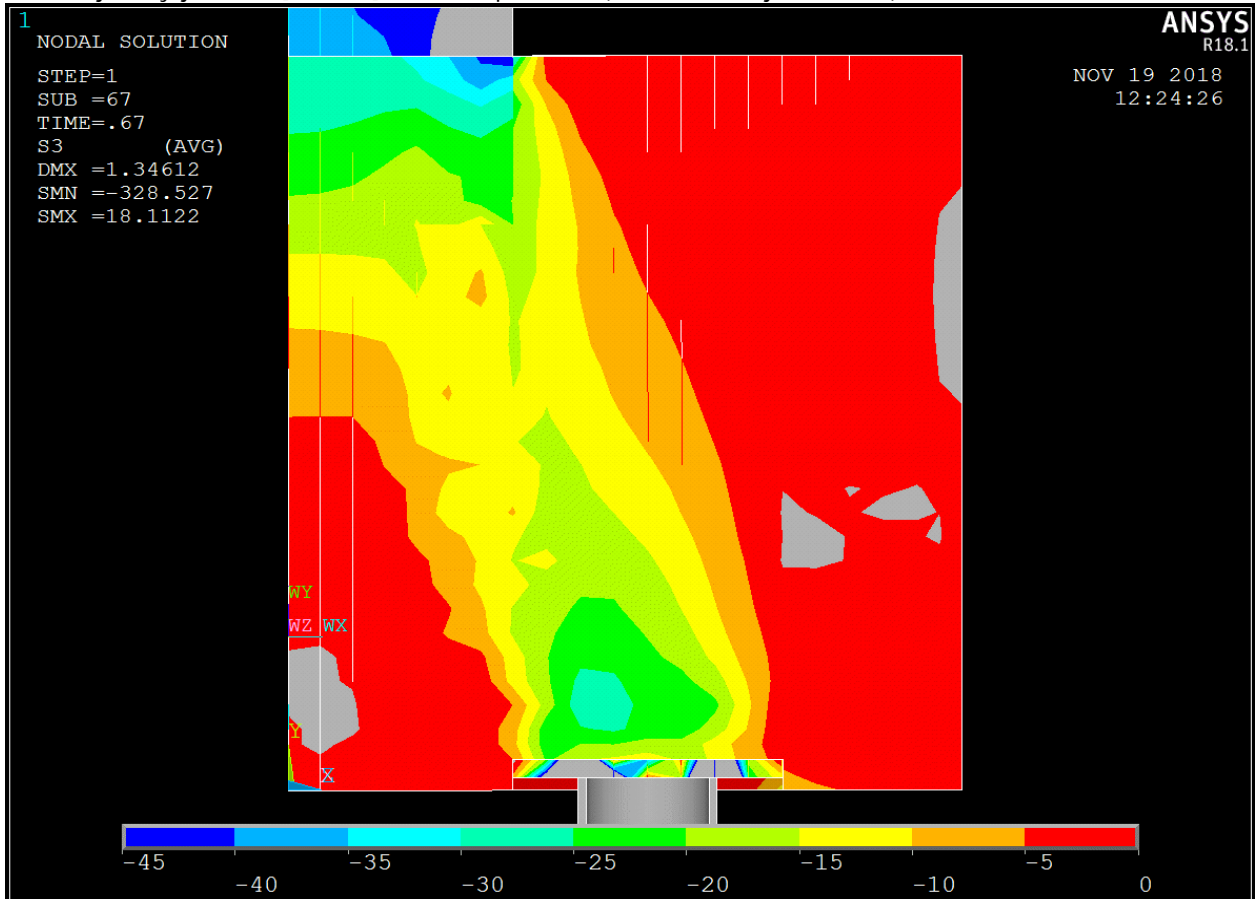
(Kontaktielementit eri materiaalien ja muotojen välillä raportin mukaan)

Pilarin Y-siirtymä - paalun tukireaktio -kuvaaja: (TIME 1 vastaa pilarin Y-siirtymää -2.00 mm)

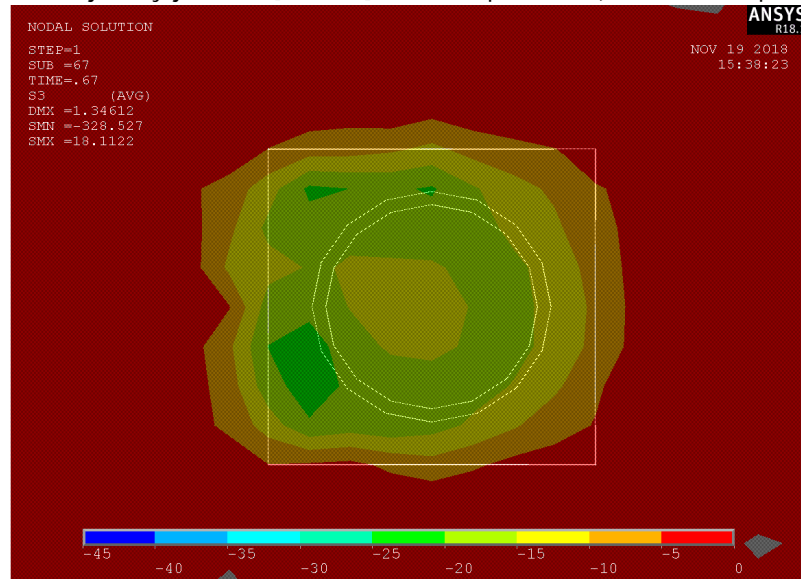


Tulokset luettu TIME = 0.67, paalun tukireaktion ollessa 2 173,7 kN

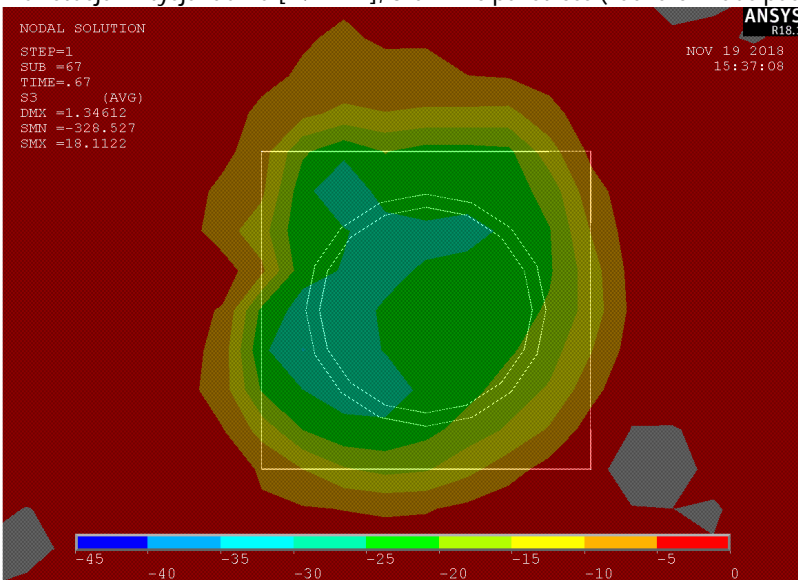
Puristusjännitysjaakauma [N/mm<sup>2</sup>], 3rd Principal stress (45° leikkauslinjan mukaan):



Puristusjännitysjaakauma [N/mm<sup>2</sup>], 3rd Principal stress (vaakaleikkaus paaluhatun päältä 5mm ylöspäin):



Puristusjännitysjaakauma [N/mm<sup>2</sup>], 3rd Principal stress (vaakaleikkaus päällimmäisen raudoituksen päältä):



Siirtymät Y-suunnassa [mm] (45° leikkauslinjan mukaan):

