



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Valtteri Kulmala

Teräsbetonipilarin mitoitussovellusten ja -menetelmien vertaileva tutkimus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tutkinto-ohjelman nimi

Insinööriyö

22.02.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Valtteri Kulmala Teräsbetonipilarin mitoitussovellusten ja -menetelmien vertailtava tutkimus 48 sivua + 49 liitettä 22.2.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Yksikön johtaja Sami Karvinen Suunnittelupäällikkö Jari Louhivirta Lehtori Mauri Konttila
<p>Tämä insinöörityö tehtiin rakennesuunnitteluun erikoistuneeseen insinööritoimistoon Sweco Rakennetekniikka Oy. Työ toteutettiin keväällä 2021.</p> <p>Rakennesuunnittelussa voidaan käyttää useita mitoitussovelluksia ja erilaisia mitoitusmenetelmiä. Tässä insinöörityössä selvitettiin kolmen eri mitoitussovelluksen ja niiden käyttämien mitoitusmenetelmien eroavaisuuksia teräsbetonipilarin mitoituksessa.</p> <p>Pilarit mitoitettiin SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC mukaisesti. Vertailtaviksi sovelluksiksi valittiin RFEM -ohjelman RF-CONCRETE Columns -mitoitusmoduuli ja SKOL B3 -laskentapohja, jotka mitoittavat kahteen suuntaan taivutetun teräsbetonipilarin nimellisen kaarevuuden menetelmällä. Näiden lisäksi käytettiin Swecon omaa laskentapohjaa, joka käyttää mitoituksessa yleistä menetelmää. Pilarit mitoitettiin ensin RF-CONCRETE Columns -moduulilla, jonka käyttämiä lähtöarvoja käytettiin muissakin sovelluksissa. Lopuksi sovellusten tuloksia vertailtiin keskenään.</p> <p>Vertailtaviksi pilareiksi otettiin mastopilari ja kaksikerrosmastopilari, joihin kohdistui vinoa taivutusta. Mitoitustulosten pienemmät erot syntyivät lähtötietojen tarkkuuksista ja menetelmien vaihtoehtoisista menettelyistä. Rakenteiden sivusiirtyvyyden ja nurjahduskertoimien välinen yhteys aiheutti suurempia poikkeavuuksia mastopilarin mitoituksessa. Pilarien mitoitukset kahdella eri menetelmällä aiheuttivat merkittävimmät eroavaisuudet tuloksissa.</p> <p>Tuloksista huomattiin, että RF-CONCRETE Columns -moduuli sopii hyvin molempien työssä tarkasteltavien pilarien mitoitukseen, kun taas SKOL -laskentapohja sopii vain niiden alustavaan mitoitukseen. Swecon oma sovellus on hieman hankalampi käyttää, mutta sillä voidaan myös mitoittaa monikerrospilari kerralla, mikä nopeuttaa mitoitusprosessia. Se antoi monikerrospilarille myös alhaisemman käyttöasteen, joka mahdollistaa pienempien rauditusmäärien käytön rakenteessa.</p>	
Avainsanat	teräsbetonipilari, toisen kertaluvun vaikutukset, nimellisen kaarevuuden menetelmä, yleinen menetelmä

Author Title Number of Pages Date	Valtteri Kulmala Comparing Designing Programs and Designing Methods for Reinforced Concrete Columns 48 pages + 49 appendices 22 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Sami Karvinen, Department Manager Jari Louhivirta, Designing Manager Mauri Konttila, Senior Lecturer
<p>This thesis was made for Sweco Rakennetekniikka Oy, which is a structural engineering company. The thesis was made in spring 2021.</p> <p>There are many programs and different methods that can be used in construction design. The purpose of this thesis was to compare three different programs and methods they used in reinforced concrete column designing.</p> <p>Columns were designed according to SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Programs chosen to be compared were RFEM's RF-CONCRETE Columns module and SKOL B3 calculation base which are designing biaxially bended concrete columns with the method of nominal curvature. In addition to these, Sweco's own designing program which uses general method was used. In the end, results of the programs were compared to each other.</p> <p>Columns that were chosen to be compared were unstiffened rigidly supported columns in the bottom with biaxial bending. One with two layers. Smaller differences in results were caused by inaccuracy of the output data and alternative procedures of the methods. Larger differences in the column without layers were caused by connection between stiffness and buckling factors. The most significant differences in results were caused by different design methods.</p> <p>Results showed that RF-CONCRETE Columns module is suitable for both column types used in this thesis when SKOL B3 calculation base is suitable for preliminary designing only. Sweco's own designing program was slightly harder to use but it allows designing multilayer columns which makes the process faster. It also gave a lower occupancy rate for the column with two layers which makes it possible to use a lower amount of steel in the structure.</p>	
Keywords	reinforced concrete column, second order effect, method based on curvature, general method

Sisällys

Määritelmiä

1	Johdanto	1
2	Raudoitettun betonipoikkileikkauksen kestävyys	1
2.1	Teoria	1
2.2	Rakennemalli	3
3	Teräsbetonipilarin EN:n mukainen mitoitus	5
3.1	Sauvan päiden momentit	5
3.2	Nurjahduspituus	6
3.2.1	Nurjahduspituuden matemaattiset perusteet	7
3.2.2	Nurjahduspituus normeissa ja ohjeissa	7
3.3	Ensimmäisen kertaluvun momentti	9
3.3.1	Mittaepätarkkuudet	9
3.3.2	Mitoitusmomentti	11
3.4	Hoikkuus	11
3.5	Viruman vaikutukset	13
3.6	Toisen kertaluvun momentti	16
3.6.1	Yleinen menetelmä	16
3.6.2	Nimellisjäykkyyden menetelmä	18
3.6.3	Nimellisen kaarevuuden menetelmä	20
3.7	Vino taivutus	22
3.8	Raudoitussääntöjä	24
4	Tarkasteltavat rakennemallit	26
4.1	RFEM -laskenta	26
4.2	Mastopilari	26
4.3	Kaksikerrosmastopilari	29
5	Mitoitussovellusten ja eri laskentamenetelmien vertailu	33

5.1	RFEM CONCRETE Columns -mitoitusmoduuli	34
5.2	SKOL-pohja	37
5.3	SWECON mitoitussovellus	41
6	Käytettävyys ja tulosten arviointi	44
6.1	Menetelmät	44
6.2	Työkalut	45
7	Yhteenveto	46
	Lähteet	49
	Liitteet	
	Liite 1. Mastopilari: Mitoitusmoduulin ja SKOL-pohjan vertailu	
	Liite 2. Kaksikerrosmastopilari, alempi sauva: Mitoitusmoduulin ja SKOL-pohjan vertailu	
	Liite 3. Kaksikerrosmastopilari, ylempi sauva: Mitoitusmoduulin ja SKOL-pohjan vertailu	
	Liite 4. Mastopilari: Swecon oman mitoitussovelluksen tulos	
	Liite 5. Kaksikerrosmastopilari: Swecon oman mitoitussovelluksen tulos	

Määritelmiä

1. kertaluvun vaikutukset: Lineaarisesti lasketut voimasuureet, joihin huomioidaan kuorman sijainnista aiheutuvat alkuepätkätkuudet.

2. kertaluvun vaikutukset: Taipumasta aiheutuva lisämomentti.

Hoikkuus: Pilarin taipumisherkkyttä kuvaava suure. Kuormitettuun pilariin syntyy lisätaipumaa ja lisämomenttia hoikkuuden kasvaessa.

Jäykistämätön rakenne: Sivusiirtyvä rakenne, joka on jäykistetty vähemmän jäykillä rakenneosilla, kuten pilareilla tai kehillä, joihin vaakakuormat aiheuttavat sivusiirtymiä.

Jäykistetty rakenne: Sivusiirtymätön rakenne, joka sisältää vaakakuormiin nähden hyvin jäykkiä rakenneosia, jotka siirtävät suurimman osan vaakakuormista perustuksille.

Nurjahdus: Epästabiiliusilmiö, jossa puristettu hoikka pilari menettää kantavuuden sen taipuman kasvaessa nopeasti.

Nurjahduspituus: Tehollinen mitoituspituus, joka määritetään puristetun sauvan taipumamuodon mukaisesti.

Vino taivutus: Samanaikainen taivutus rakenteen kummankin pääakselin suhteen.

Viruma: Taipumaa lisäävä muodonmuutos, joka tapahtuu kuormitetussa betonissa ajan kuluessa.

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on vertailla teräsbetonipilarin mitoitussovelluksien ja eurokoodin mukaisten mitoitusmenetelmien tuloksia. Työssä perehdytään ensin eurokoodi- mitoituksen teoriaan ja perehdytään mitoitussovellusten käyttöön. Tämän jälkeen valitaan mallinnetusta rakenteesta vertailtavat pilarit, joiden mitoitus viedään läpi valituilla mitoitussovelluksilla. Tavoitteena on löytää syitä mitoitus tuloksien eroavaisuuksille ja päätellä niistä sopivin työkalu rakenteen mukaan.

Tarkasteltavaksi rakenteeksi otetaan kuvitteellinen teollisuusrakennus, jonka kuormitukset johdetaan perustuksille teräsbetonipilareilla. Vertailuun otetaan teollisuusrakennuksen ulkoseinäpilareita. Valitaan mastopilari, johon kohdistuu normaalivoiman lisäksi taivutusta molempiin suuntiin ja kaksikerrosmastopilari, johon kohdistuu normaalivoiman lisäksi lisätaivutusta pilarin puolivälissä olevasta konsolista. Pilarien poikkileikkaukset ovat neliön ja suorakulmion muotoisia.

Rakennus mallinnetaan RFEM -mitoitusohjelmaan, jonka jälkeen siihen lisätään realistiset kuormitukset. Ohjelma huomioi rakenteiden omat painot automaattisesti, mutta tuuli kuormat, lumikuormat, hyötykuormat ja mahdollisten pintarakenteiden kuormitukset lisätään malliin erikseen. Näistä saadaan ohjelman laskemana kuormien ominaisarvot ja määräävät kuormitusyhdistelyt, joiden arvoja käytetään muidenkin mitoitussovellusten kanssa.

Pilareita vertaillaan RFEM-ohjelman RF-CONCRETE Columns -mitoitusmoduulilla, SKOL B3 -laskentapohjalla ja Swecon omalla mitoitussovelluksella.

2 Raudoitettun betonipoikkileikkauksen kestävyys

2.1 Teoria

Pilareilla tarkoitetaan sauvamaisia rakenneosia, jotka toimivat rakennuksissa pystykanattajina. Pilareihin kohdistuu puristusta ylemmistä kerroksista ja kattorakenteista, mutta

myös taivutusrasituksia esimerkiksi tuulen aiheuttamasta kuormasta. Pilarit eroavat seinistä siten, että niiden poikkileikkauksien pidemmän sivumitan pituus on enintään neljä kertaa pidempi lyhyempään sivumittaan verrattuna. Tyypillisesti pilarin poikkileikkaus on neliön tai suorakaiteen muotoinen, mutta käytössä on myös pyöreitä ja monikulmion muotoisia poikkileikkauksia. [3, s. 97.]

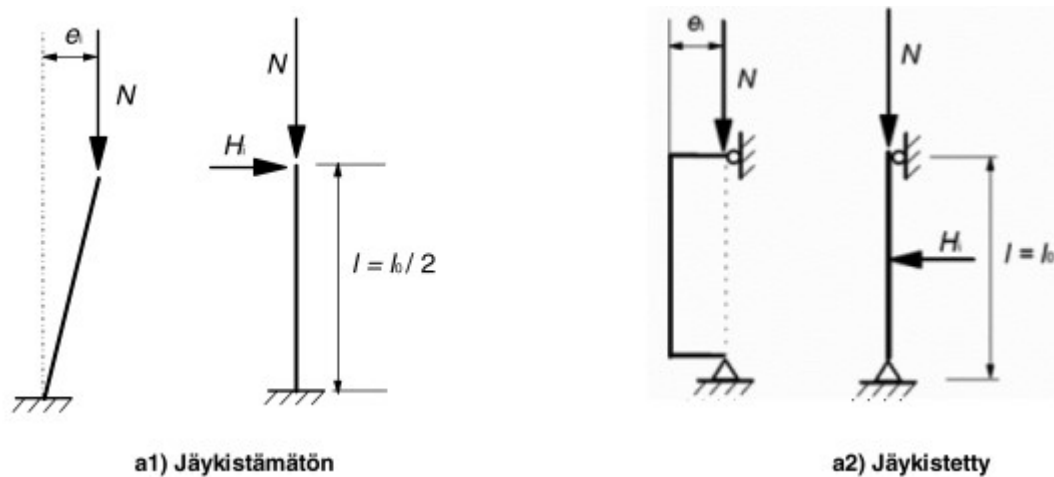
Pilarin rakenteellinen toiminta riippuu rakennuksen jäykistysjärjestelmästä. Rakenteet voivat olla eurokoodin mukaan jäykistettyjä tai jäykistämättömiä. [3, s. 98.] Pilari voi myös olla jäykistetty ja jäykistämätön samanaikaisesti sen poikkileikkauksen eri suunnissa [3, s. 133].

Jäykistetty rakenne ottaa vastaan esimerkiksi seinillä tai ristikoilla suurimman osan vaakakuormista, jolloin ne siirtyvät suoraan perustuksille. Rakenne on siis sivusiirtymätön. Tällöin pilari on jäykistetty, eikä sen ylä- ja alapään väliin pääse syntymään vaakasiirtymiä, jotka aiheuttaisivat siihen lisärasituksia. [3, s. 98.]

Jäykistämättömässä rakenteessa pilarit ja kehärakenteet hoitavat jäykistyksen, jolloin vaakakuormien vaikutuksesta aiheutuu sivusiirtymiä. Sivusiirtyvyydestä aiheutuvat jäykistyskuormat vaikuttavat pilareihin taivutusmomenttina, jonka jakautuminen riippuu pilarin päiden kiinnityksestä. [3, s. 98.]

Pilarin poikkileikkauksen rasitus koostuu taivutusmomentista ja normaalivoimasta. Taivutusmomenttia syntyy usein samanaikaisesti pilarin molempien pääakselien suuntaisesti. Sen raudoitukseen voi kohdistua veto- tai puristusrasitusta, joka tekee mitoituksista eroavan palkin mitoitukseen verrattuna. Kun poikkileikkauksen mitat tunnetaan, sen kestävyys lasketaan normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormitusyhdistelyille, joita voi olla useita erilaisia. Kuormituksista syntyviä voimasuureita verrataan keskenään ja mitoituksessa voidaan käyttää käyrästöjä, jotka ovat valmiiksi laskettu. [3, s. 102.]

Pilariin kohdistuva normaalivoima on aina jonkin verran epäkeskinen, joka aiheuttaa siihen taivutusmomenttia ja sen vaikutuksesta myös taipumaa. Taivutusmomentin lisäksi taipuman suuruuteen vaikuttaa pilarin hoikkuus. [3, s. 101.]

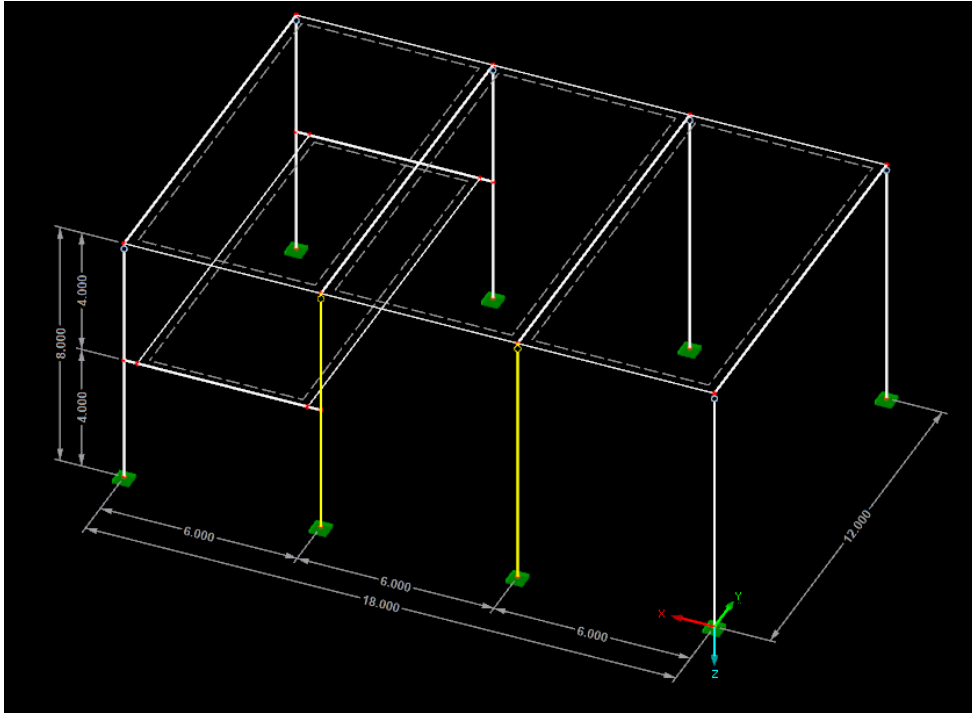


Kuva 1. Erillisiä rakenneosia, joihin vaikuttaa epäkeskinen normaalivoima tai poikittaisvoima. [1, s. 56.]

Pilarit luokitellaan jäykiksi tai hoikiksi. Hoikkuuden selvittämistä varten on selvitettävä pilarin hoikkuusluku ja rajahoikkuusluku. Jos hoikkuusluku ylittää rajahoikkuusluvun, katsotaan pilari hoikaksi, joka vaikuttaa mitoituseseen toisen kertaluvun vaikutusten huomiointina. Jos rajahoikkuusluku ei ylity, pilari on jäykkä ja sen mitoitusmomentti muodostuu pelkästään ensimmäisen kertaluvun momentista. Jäykät pilarit ovat lyhyitä ja ne puristuvat tasaisesti pysyen melko suorina. Niiden murtuminen tapahtuu puristusjännityksen ylittäessä murtolujuuden. Hoikat pilarit taipuvat ja murtuvat suurimmalla kasvavalla kuormalla. Niiden murtokuorma on jäykkää pilaria pienempi. [3, s. 101.]

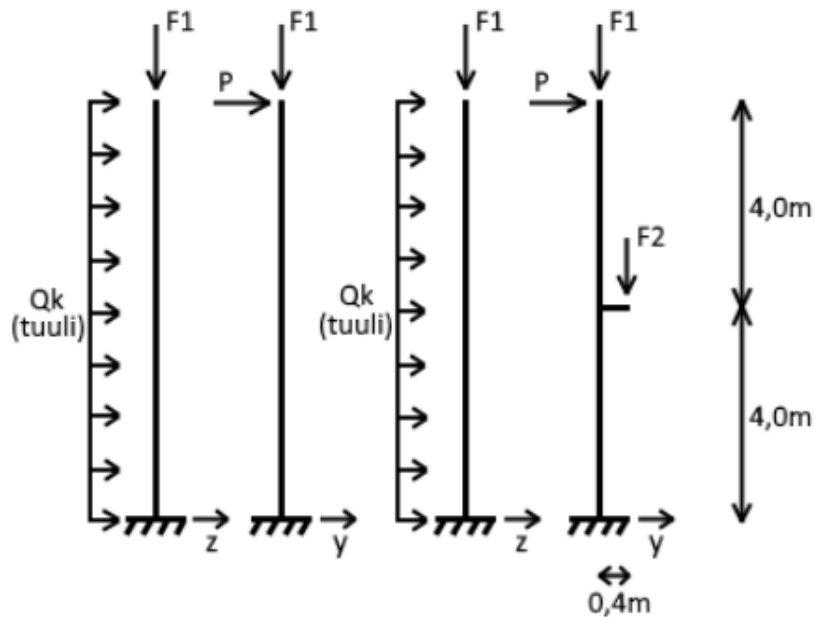
2.2 Rakennemalli

Opinnäytetyön tarkasteltavat pilarit valitaan kuvitteellisesta teollisuusrakennuksesta, jossa on osittain kaksi kerrosta. Rakennuksen jäykistys toteutetaan mastopilareilla, joten sivusiirtyvyyttä esiintyy molemmissa pääsuunnissa. Tarkasteltavat pilarit on mallissa merkitty keltaisina.



Kuva 2. Kuvitteellinen teollisuusrakennus, tarkasteltavat pilarit ovat keltaisia.

Kuvassa 1 oikeanpuoleisen tarkasteltavan mastopilarin pilarin korkeus on kahdeksan metriä ja sen poikkileikkauksen molempien sivujen pituus on 480 mm. Sen alapäässä on jäykkä perustusliitos ja yläpää on nivelellisesti tuettu molemmissa suunnissa. Vasemmanpuoleinen kaksikerrospilari eroaa oikeanpuoleisesta siten, että sen puolivälissä on konsoli, joka ottaa vastaan osan välipohjan kuormituksesta. Sen ala- ja yläpään tuennat ovat kuten oikeanpuoleisessakin pilarissa, mutta poikkileikkaus muuttuu päiden välillä. Kaksikerrospilarin alemman sauvan poikkileikkausmitat ovat 680mm*480mm, kun taas ylemmän sauvan molempien sivujen pituudet ovat 480 mm. Pilarin konsolin kohdalla oleva jousivakio vaikuttaa pilarin nurjahduskertoimiin merkittävästi kasvattaen nurjahduspituutta.



Kuva 3. Pilarien rakennemallit.

Vaakapistekuorma P syntyy tuulikuormasta aiheutuvasta sivusiirtyvyydestä. Pistekuorma $F1$ syntyy rakenteiden omasta painosta ja lumikuormasta. Pistekuorma $F2$ koostuu välipohjan omasta painosta ja hyötykuormasta. Poikkileikkauksen y -akselin suunta vastaa pääkoordinaatiston x -akselia.

3 Teräsbetonipilarin EN:n mukainen mitoitus

3.1 Sauvan päiden momentit

Ensimmäisen kertaluvun momenteja varten on selvitettävä kuormituksen aiheuttamat momentit sauvan molempiin päihin poikkileikkauksen molemmissa suunnissa. Sauvan päiden momentit syntyvät vaakakuormista ja pystykuormien epäkeskisyyksistä. Nivelelliseen päähän ei taivutusmomenttia synny ollenkaan. Kuormituksesta syntyvät taivutusmomentit voidaan laskea käsin tai esimerkiksi RFEM:llä.

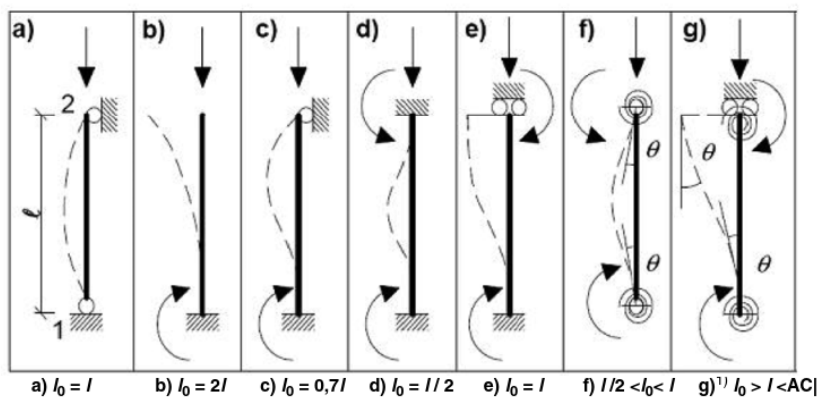
Tuulikuorma voi aiheuttaa sauvaan tasaisen viivakuorman, josta kuorman suuntaisen taivutusmomentin maksimiarvo on helposti ratkaistavissa. Se voi myös aiheuttaa sivusiirtyvyyttä riippuen rakennuksen jäykistystavasta. Pelkillä mastopilareilla jäykistetty

rakennus on sivusiirtävä ja se ilmenee poikittaisina pistekuormina pilarien päissä. Tuulikuormasta syntyy myös painetta rakennuksen sisällä, jolloin esimerkiksi x-akselin suuntainen tuulikuorma aiheuttaa taivutusmomenttia y-akselin suuntaisesti rakenteisiin.

Nimellisen kaarevuuden menetelmällä mitoitettaessa kaksikerrospilari jaetaan kahteen sauvaan konsolin kohdalta. Sauvojen liitoskohtaan syntyy taivutusmomenttia esimerkiksi konsolista aiheutuvan epäkeskisen pystykuorman vaikutuksesta. Tällöin liitoskohdan momentit katsotaan alemmalle sauvalle yläpäähän momentteina ja ylemmälle sauvalle alapään momentteina. Yleisellä menetelmällä koko pilari voidaan mitoittaa kerralla.

3.2 Nurjahduspituus

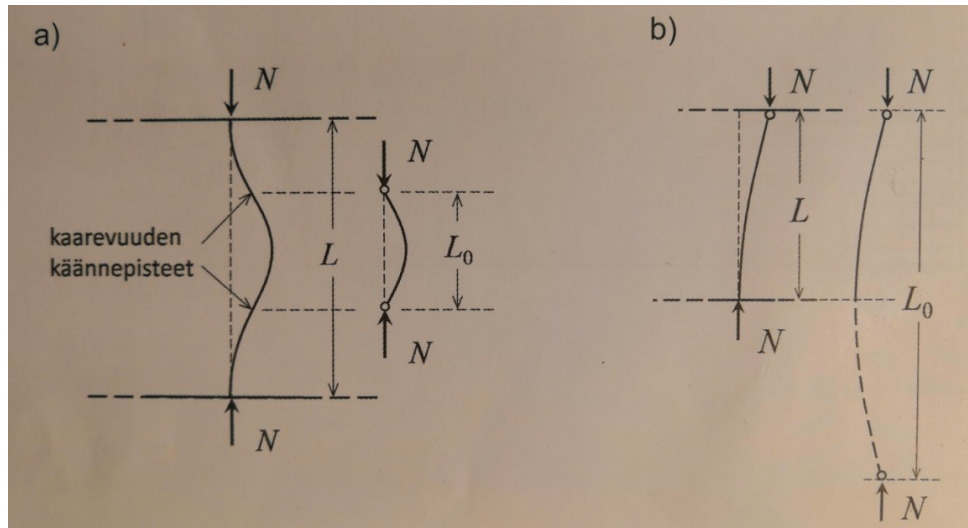
Nurjahduksella tarkoitetaan epästabiiliusilmiötä, eli puristetun hoikan pilarin kantavuuden menettämistä sen taipuman kasvaessa nopeasti [4, s. 62]. Nurjahduspituudella tarkoitetaan tehollista mitoituspituutta, joka määritetään puristetun sauvan taipumamuodon mukaisesti. Nurjahduspituuteen vaikuttavia tekijöitä ovat sauvan pituus, sen päiden tuentatapa, sekä rakenteen jäykistys. [3, s. 118.]



Kuva 4. Esimerkkejä erilaisten sauvojen nurjahdusmuodoista ja nurjahduspituuksista. [1, s. 65.]

3.2.1 Nurjahduspituuden matemaattiset perusteet

Molemmista päistään nivelellisesti tuetulla puristetulla sauvalla nurjahduspituus (L_0) on sama kuin sen todellinen pituus (L). Muilla tuentatavoilla sauvan nurjahduspituus määräytyy kaarevuuden käännepestien välisen etäisyyden mukaisesti. [3, s. 118.]



Kuva 5. Nurjahduspituuden määrätymisperiaate. Vasemmalla jäykistetty pilari, oikealla jäykistämätön. [3, s. 118.]

Jäykistämättömälle eli sivusiirtyvälle pilarille nurjahduspituus on kaksi kertaa sauvan todellinen pituus.

3.2.2 Nurjahduspituus normeissa ja ohjeissa

Täysin jäykän tuennan toteuttaminen on käytännössä vaikeaa, joten kiinnitykset ovat yleisesti ottaen aina jonkin verran joustavia [3, s. 118]. Jäykistetyille ja jäykistämättömille sauvoille on omat laskentakaavat, joilla huomioidaan kehäsauvojen päiden joustavuuden vaikutukset nurjahduspituuteen [1, s. 65].

Jäykistetyille sauvalle:

$$L_0 = 0,5L \sqrt{\left(1 + \frac{k_1}{0,45+k_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{0,45+k_2}\right)}$$

Jäykistämättömälle sauvalle:

$$L_0 = L \cdot \max \left\{ \sqrt{1 + 10 \cdot \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}} ; \left(1 + \frac{k_1}{1 + k_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + k_2}\right) \right\}$$

Kaavojen k_1 ja k_2 -kertoimet ovat sauvan päiden kiertymäjoustavuuksien suhteellisia arvoja. Jäykälle kiinnitykselle voidaan käyttää arvoa $k = 0,1$ ja vapaasti kiertyvälle päälle $k = \infty$. Kertoimet voidaan myös laskea tarkasti kaavalla, jossa EI on puristetun sauvan taivutusjäykkyys, l on puristussauvan vapaa korkeus kiinnityskohtien välillä ja θ on kiinnitysmomenttia M vastaava kiertymistä vastustavien sauvojen kiertymä. [1, s. 66.]

$$k = \left(\frac{\theta}{M}\right) * \left(\frac{EI}{l}\right)$$

Kuvan 2 esimerkkikertoimet nurjahduspituuden määrittämiseksi ovat teoreettisia arvoja, jotka perustuvat täysin jäykkään kiinnitykseen [3, s. 118.]. Alla oleva taulukko antaa suositeltavat minimiarvot eri nurjahdusmuodoille, jotka ovat hieman teoreettista arvoa suurempia lukuun ottamatta molemmista päistä nivelellisesti tuettua sauvaa. Taulukossa nurjahdusmuotojen kirjaimet vastaavat eurokoodin taulukon kirjaimia.

Taulukko 1. Nurjahdusmuotojen teoreettiset nurjahduspituuskertoimet ja niiden suositeltavat minimiarvot. [3, s. 119.]

Nurjahdusmuoto	a	b	c	d	e
Teoreettinen	1	2	0,7	0,5	1
Suosittelava minimi	1	2,18	0,77	0,59	1,23

Nurjahduskertoimet saattavat todellisuudessa poiketa merkittävästi taulukkoarvoista. Esimerkiksi tarkasteltavan rakennuksen mastopilarin nurjahduskertoimet RFEM:n sisäisellä RF-STABILITY-moduulilla laskettuna olivat y-akselin ympäri 1,535 ja z-akselin ympäri 1,415. Taulukkoarvot soveltuvat siis lähinnä alustavaan mitoitukseen.

3.3 Ensimmäisen kertaluvun momentti

Rakenneanalyysistä saadaan normaalivoima ja taivutusmomentista momentit pilarin ala- ja yläpäähän. Normaalivoima oletetaan vakioksi koko pilarin pituudella. Pilarin omapaino voidaan lisätä kuormitukseen, vaikka sen vaikutus yleensä on hyvin vähäinen. Päiden momentit muodostavat yhdessä ensimmäisen kertaluvun momentit. [3, s. 129.]

Taivutusmomentti muuttuu pilarin päiden välillä ja se saattaa myös vaihtua positiivisesta negatiiviseksi. Vaakakuormien aiheuttama muuttuva momenttijakautuma voidaan korvata suoraviivaisella momenttijakautumalla, jolloin päiden momenteiksi saadaan maksimummomentti päiden välillä. Mitoituksessa pilarin poikkileikkauksen kriittisin kohta löytyy siitä, missä taivutusmomentti on suurimmillaan. [3, s. 129.]

3.3.1 Mittaepätarkkuudet

Kuormien sijainnit ja mittapoikkeamat vaikuttavat pilarin taivutukseen epäedullisesti ja ne tulee huomioida rakenneosien analyysissä. Epätarkkuudet esitetään vinouden (θ_i) avulla. [1, s. 54.]

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot a_m$$

Kaavassa perusarvon (θ_0) suositusarvo on 1/200. Parametri α_h tarkoittaa sauvan pituuteen perustuvaa pienennyskerrointa, missä l on sauvan korkeus. Parametri a_m tarkoittaa rakenneosien määrästä riippuvaa pienennyskerrointa, missä m tarkoittaa kokonaisvaikutuksen aiheuttavien pystyrakenneosien määrää. Yksittäispilarille käytetään arvoa 1,0. [1, s. 55.]

$$\alpha_h = 2/\sqrt{l}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1$$

$$a_m = \sqrt{0,5(1 + 1/m)}$$

Epätarkkuuksien aiheuttamat vaikutukset huomioidaan epäkeskisyyden (e_i) avulla [1, s. 55.].

$$e_i = \theta_0 \frac{L_0}{2}$$

Vähimmäisepäkeskisyyttä (e_0) puristusvoimalle määritetään poikkileikkauksen korkeuden (h) mukaan alla olevalla ehdolla [1, s. 82.]. Se kerrotaan normaalivoimalla, josta saadaan vähimmäismomentti. Mikäli vähimmäisepäkeskisyydestä laskettu taivutusmomentti on ensimmäisen ja toisen kertaluvun vaikutuksien sisältämää mitoitusmomenttia suurempi, tulee siitä määräävä mitoittava momentti.

$$e_0 = \max\left(\frac{h}{30}; 20 \text{ mm}\right)$$

Epätarkkuudet voidaan myös huomioida poikittaisvoiman (H_i) avulla, joka sijoitetaan kohtaan, jossa maksimimomentti on. Kaavoissa N tarkoittaa normaalivoimaa. [1, s. 55.]

Jäykistämättömälle rakenneosalle:

$$H_i = \theta_i N$$

Jäykistetyille rakenneosalle:

$$H_i = 2\theta_i N$$

Pilarin päiden numerointi tapahtuu siten, että M_{02} on suurempi, kuin M_{01} . Momenttien laskenta tapahtuu seuraavasti [5, s. 6]:

$$M_{01} = \min(M_{ylä}; M_{ala}) + e_i N_{Ed}$$

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{ala}) + e_i N_{Ed}$$

Momenteista pienempi (M_{01}) merkitään negatiiviseksi, jos momentit taivuttavat pilarin vastakkaisia sivuja. [3, s. 130.]

3.3.2 Mitoitusmomentti

Koska toisen kertaluvun aiheuttaman momentin maksimikohdan sijaintia ei tiedetä tarkasti pilarin päiden välillä, ei myöskään saada selville siinä kohdassa vaikuttavan ensimmäisen kertaluvun momentin suuruutta. Momenttijakautuma oletetaan siis suoraviivaiseksi. Ensimmäisen ja toisen kertaluvun momenttien ekvivalentti momentti (M_{0e}) voidaan laskea alla olevalla kaavalla jäykistetyille pilarille, joka vastaa mitoitusmomenttia (M_{0Ed}). [3, s. 131.]

$$M_{0Ed} = M_{0e} = \max(0,6M_{02} + 0,4M_{01}; 0,4M_{02})$$

Jäykistämättömälle pilarille ensimmäisen kertaluvun mitoitusmomentti on sauvan päiden suurempi momentti. [1, s. 71.]

$$M_{0Ed} = M_{02}$$

3.4 Hoikkuus

Hoikkuudella tarkoitetaan pilarin taipumisherkkyyttä ja sitä kuvaa hoikkuusluvun mitta-suure (λ). Se lasketaan nurjahduspituuden (L_0) ja jäyhyysäteen (i) suhteesta. Mitä suurempi hoikkuusluku saadaan, sitä herkemmin kuormitus aiheuttaa lisätaipumaa pilariin. Käytännön rakenteilla hoikkuusluku vaihtelevat kahdenkymmenen ja sadan välillä. [3, s. 123.] Raudoituksia ei yleensä huomioida jäyhyysmomenttiin laskennan yksinkertaistamiseksi.

$$\lambda = \frac{L_0}{i}$$

Jäyhyysäteen laskentaan tarvitaan poikkileikkauksen pinta-ala (A), sekä jäyhyysmomentti (I) [1, s. 73.]. Jäyhyysmomentilla kuvataan rakenteen kykyä vastustaa taivutusta [4, s. 28.].

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Jäyhyysmomentin suuruus riippuu tarkasteltavasta suunnasta, jos sivujen pituudet poikkeavat toisistaan. Suorakulmion muotoisen poikkileikkauksen sivujen pituuksien ollessa z-akselin suuntaisesti b ja y-akselin suuntaisesti h , lasketaan jäyhyysmomentit I_z ja I_y seuraavasti [4, s. 28]:

$$I_z = bh^3/12$$

$$I_y = hb^3/12$$

Hoikkuusluvun ollessa suurempi, kuin sen raja-arvo (λ_{lim}), pilari katsotaan hoikaksi ja taipumasta aiheutuva lisämomentti huomioidaan mitoituksessa. Hoikkuuden ollessa pienempi, kuin sen raja-arvo, pilari katsotaan jäykäksi. Tällöin taipuma ja lisämomentti jäävät pieneksi, eikä niitä tarvitse mitoituksessa huomioida ollenkaan. [3, s. 123.] Parametri n tarkoittaa suhteellista normaalivoimaa [1, s. 64].

$$\lambda_{lim} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}}, \text{ missä}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c f_{cd}}$$

Kaavassa A-kerroin riippuu virumasta. Jos virumisastetta (φ_{ef}) ei tunneta, käytetään sen tilalla arvoa $A = 0,7$. [1, s. 64.] Viruman laskenta selvitetään omassa luvussa.

$$A = 1(1 + 0,2\varphi_{ef})$$

B-kerroin riippuu mekaanisesta raudoitussuhteesta (ω). Jos sitä ei tunneta, käytetään arvoa $B = 1,1$. Mekaaninen raudoitussuhde voidaan laskea, jos betonin mitoituslujuus (f_{cd}), raudoituksen mitoituslujuus (f_{yd}), pääraudoituksen kokonaisala (A_s) ja betonipoikkileikkauksen kokonaisala (A_c) tunnetaan. [1, s. 64.]

$$B = \sqrt{1 + 2\omega}, \text{ missä}$$

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}}$$

C-kerroin riippuu sauvan päiden momenttien suhteesta (r_m). Jos sitä ei tunneta, käytetään arvoa $C = 0,7$ [1, s. 64]. Rakenteen ollessa sivusiirtävä, päiden momenttien suhde on nolla, koska sauvan yläpäässä ei ole momenttia. Tällöin momenttien suhteena käytetään arvoa 1,0. Samaa arvoa käytetään myös sivusiirtymättömissä rakenteissa, jos ensimmäisen kertaluvun momentit syntyvät epätarkkuuksista tai poikittaiskuormituksesta. [1, s. 65.]

$$C = 1,7 - r_m, \text{ missä}$$

$$r_m = \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

3.5 Viruman vaikutukset

Viruma tarkoittaa muodonmuutosta, joka tapahtuu ajan kuluessa betonin ollessa kuormitettu. Se lisää rakenteen taipumaa vähitellen. [2, s. 45]. Viruma riippuu ympäristön kosteudesta, poikkileikkauksen mitoista, sekä betonin koostumuksesta. Betonin kovettumisaste kuormituksen alkaessa on myös virumiseen vaikuttava tekijä. Se riippuu kuormituksen suuruudesta ja sen kestosta. [1, s. 31.]

Viruma vaikuttaa mitoituksessa lisäämällä sauvan taipumaa ja siten myös toisen kertaluvun momenttia. Sen vaikutukset huomioidaan virumisasteella (φ_{ef}), joka saadaan virumaluvun loppuarvosta ($\varphi(\infty, t_0)$). Sen vaikutukset voidaan teräsbetonipilarin mitoituksessa jättää kuitenkin huomioimatta, jos virumaluku on enintään 2,0, hoikkuusluku enintään 75 ja jos kuorman epäkeskisyys on suurempi, kuin epäkeskisyyden suuntainen sivumitta (h). [1, s. 68.]

$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \cdot M_{0Eqp} / M_{0Ed}$$

Virumisasteen kaavassa tarvitaan lineaarisesti laskettu taivutusmomentti käyttörajatilassa (M_{0Eqp}), joka on laskettu kuormien pitkäaikaisyhdistelmällä, sekä lineaarisesti laskettu taivutusmomentti murtorajatilassa (M_{0Ed}), joka lasketaan kuormien mitoitusarvojen yhdistelmänä. [1, s. 67.]

Virumaluku voidaan määrittää eurokoodin kuvasta 3.1, jossa on omat taulukot sisä- ja ulkotiloissa oleville rakenteille. Taulukoiden käyttöä ei suositella, jos virumaluku halutaan selvittää tarkasti. [1, s. 31.]

Virumaluvun $\varphi(t, t_0)$ laskenta tapahtuu kertomalla nimellisen virumaluvun likiarvo (φ_0) kertoimella $\beta_c(t, t_0)$. Se kuvaa kuormittumisen jälkeistä virumisen kehittymistä ajan kuluessa. [1, s. 197.]

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

Nimellisen virumaluvun likiarvo saadaan kaavalla, jolla huomioidaan suhteellisen kosteuden vaikutukset φ_{RH} , betonin lujuuden vaikutus $\beta(f_{cm})$ ja betonin kuormittumisen alkamisajan vaikutus $\beta(t_0)$ [1, s. 197.].

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

Betonin lujuuden vaikutus nimelliseen virumalukuun huomioidaan kaavalla [1, s. 197]:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

Betonin kuormittumisen alkamisajan vaikutus nimelliseen virumalukuun otetaan huomioon kaavalla, jossa betonin kuormittumisesta alkanut aika (t_0) ilmoitetaan vuorokausina. [1, s. 197.]

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1+t_0^{0,20})}$$

Sementtityypin vaikutukset betonin virumalukuun voidaan huomioida kuormittumisen alkamisajan vaikutuksen kaavassa eurokoodin liitteen B mukaisesti, mutta tämä rajataan laskennan ulkopuolelle.

Suhteellisen kosteuden vaikutuksen määrittämiseen on annettu kaksi kaavaa, joiden valinta riippuu betonin puristuslujuudesta (f_{cm}). Sen ollessa enintään 35MPa, käytetään

ensimmäistä kaavaa. Jos se on enemmän kuin 35MPa, käytetään jälkimmäistä kaavaa. [1, s. 197.]

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1-RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad \text{kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

Kaavoissa (RH) tarkoittaa ympäristön suhteellista kosteutta prosentteina ja (h_0) poikkileikkauksen muunnettua paksuutta, jonka laskemiseen tarvitaan poikkileikkauksen pinta-ala, sekä sen haihtumiselle alttiin piirin pituus (u). [1, s. 197.]

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

Alemmassa kaavassa betonin lujuuden vaikutus otetaan huomioon kertoimilla α_1 ja α_2 , kun betonin puristuslujuus on suurempi kuin 35MPa. [1, s. 198.]

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7}$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2}$$

Kuormituksen jälkeiselle virumisen kehittymiselle voidaan laskea likiarvo, kun tiedetään betonin ikä tarkasteluajankohtana (t) ja kuormittumisen alkaessa (t_0), sekä suhteellisesta kosteudesta ja poikkileikkauksen muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin (β_H). Ikä lasketaan vuorokausien mukaan. [1, s. 197.]

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3}$$

Kertoimen β_H määrittämiseen on annettu kaksi kaavaa, joiden valinta riippuu betonin puristuslujuudesta. Puristuslujuuden ollessa enintään 35 MPa, valitaan ensimmäinen kaava. Jos se on enemmän kuin 35 MPa, käytetään jälkimmäistä kaavaa. [1, s.198.]

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 RH)^{18}]h_0 + 250 \leq 1500 \quad \text{kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 RH)^{18}]h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad \text{kun } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa}$$

Alemmassa kaavassa kertoimella α_3 huomioidaan betonin lujuuden vaikutus sen ollessa vähintään 35 MPa. [1, s. 198.]

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5}$$

3.6 Toisen kertaluvun momentti

Toisen kertaluvun vaikutukset voidaan ottaa huomioon yleisellä menetelmällä, joka perustuu epälineaariseen toisen kertaluvun analyysiin. Vaihtoehtoisesti vaikutukset voidaan huomioida myös yksinkertaistetuilla menetelmillä, joita ovat nimellisjäykkyyteen perustuva menetelmä ja nimelliseen kaarevuuteen perustuva menetelmä. [1, s. 68.]

3.6.1 Yleinen menetelmä

Yleisellä menetelmällä tarkoitetaan rakenneosan epälineaarista analyysiä, joka pitää sisällään geometrisen epälineaarisuuden, eli toisen kertaluvun vaikutukset. Menetelmässä käytetään betonille ja teräkselle sopivia jännitys-muodonmuutosyhteyksiä, jotka sopivat rakenteen kokonaistarkasteluun. Myös virumisen vaikutus otetaan huomioon. [1, s. 68.]

Epälineaariseen rakenneanalyysiin käytetään jännitys-muodonmuutosyhteyteen perustuvaa laskukaavaa, jolla esitetään kuvan 3 mukaisesti betonin puristuman (ε_c) ja puristusjäännityksen (σ_c) välistä yhteyttä lyhytaikaiselle aksiaaliselle kuormitukselle. [1, s. 34.]

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}$$

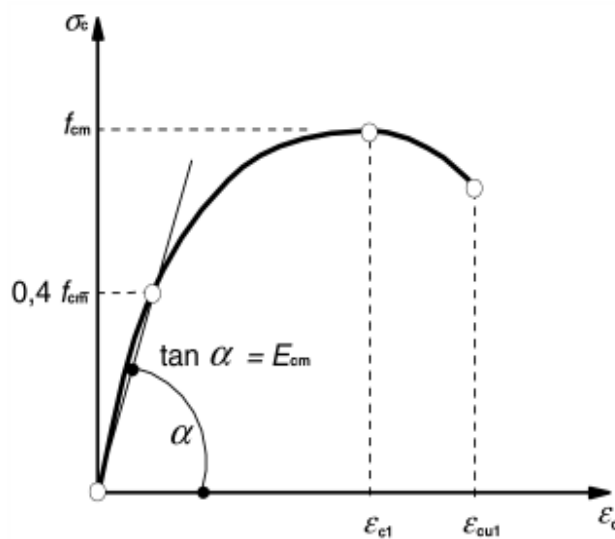
Kaavassa parametrilla (η) tarkoitetaan puristuman ja muodonmuutoksen suhdetta. Muodonmuutos (ε_{c1}) jännityksen huippuarvon kohdalla luetaan eurokoodin taulukosta 3.1. [1, s. 34.]

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

Kaavan k-arvon betonin lieriölujuuden (f_{cm}) tilalle sijoitetaan puristuslujuuden mitoitusarvo (f_{cd}) ja betonin sekanttikertoimen (E_{cm}) sijaan käytetään parametria E_{cd} . Osavarmuusluvun (γ_{CE}) suositusarvo on 1,2. [1, s. 68.]

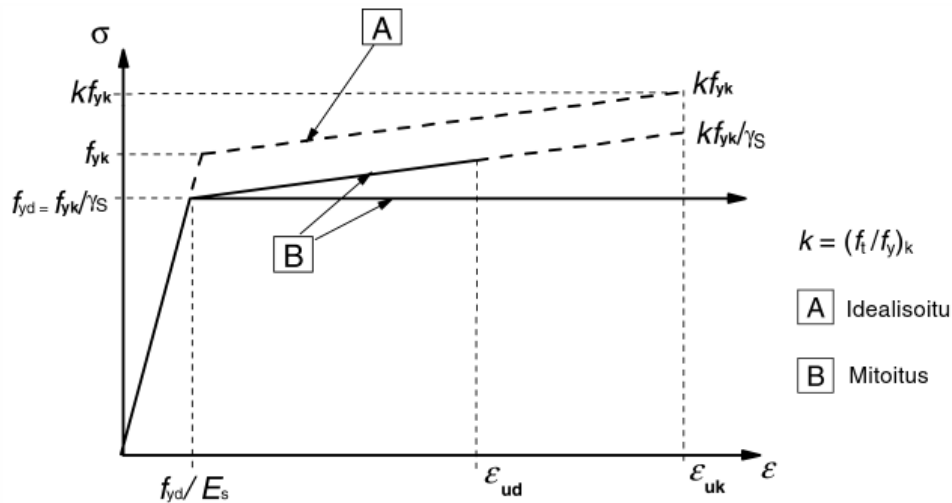
$$k = 1,05 E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$$

$$E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{CE}$$



Kuva 6. Jännitys-muodonmuutosyhteyden periaatekuva. Sekanttimoduuli määritellään likimäärin jännitystä $0,4f_{cm}$ vastaavaksi. [1, s. 35.]

Jännitys-venymäyhteyden mallina voidaan käyttää kuvassa 7 esitettyä nousevaa jännitystä muodonmuutoksen sallittuun ylärajaan (ε_{ud}) asti. Jännitys määritetään yläviistoon nousevasta suorasta, jossa muodonmuutosta (ε_{uk}) vastaa jännitys ($k f_{yk} / \gamma_s$). Vaihtoehtoisesti myötörajan saavuttamisen jälkeen jännitys pysyy vakiona, eikä muodonmuutoksen suuruutta tarvitse rajoittaa. [1, s. 41.]



Kuva 7. Betoniteräksen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat. [1, s. 41.]

Teräksen tiheytenä (ρ_s) käytetään arvoa 7850 kg/m^3 ja kimmokertoimena (E_s) arvoa 200 GPa . [1, s. 41.]

3.6.2 Nimellisjäykkyyden menetelmä

Toisen kertaluvun vaikutuksia voidaan tarkastella käyttäen jäykkyyteen perustuvia taivutusjäykkyyden nimellisarvoja. Tällä menetelmällä hoikan puristetun sauvan toisen kertaluvun vaikutuksiin huomioidaan halkeilu, materiaalin epälineaarisuus ja virumisen vaikutus, joiden vaikutuksista lasketaan nimellisjäykkyys (EI). [1, s. 69.]

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$$

Nimellisjäykkyys lasketaan kaavalla, jossa I_c on betonipoikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja I_s on raudoituksen jäyhyysmomentti betonipoikkileikkauksen pintakeskiön suhteen [1, s. 69]. Raudoituksen jäyhyysmomentin määrittämistä varten on laskettava sen yhteenlaskettu pinta-ala (A_s), sekä raudoituksen keskiöetäisyys poikkileikkauksen pintakeskiöstä (e_s). Parametri d' tarkoittaa raudoitusten tehollista korkeutta. [3, s. 151.]

$$I_s = A_s e_s^2, \text{ missä}$$

$$e_s = \frac{h}{2} - d'$$

Parametri E_{cd} tarkoittaa betonin kimmokertoimen mitoitusarvoa ja se lasketaan betonin 28 vuorokauden ikää vastaavan kimmomoduulin E_{cm} ja osavarmuuskertoimen γ_{CE} suhteesta. Betonin kimmomoduuli voidaan lujuusluokan mukaan lukea eurokoodin taulukosta sivulta 30. Osavarmuuskerroin voidaan hakea kunkin maan kansallisesta liitteestä, mutta sen suositusarvo on 1,2. Parametri E_s on raudoituksen kimmokertoimen mitoitusarvo. [1, s. 69.]

$$E_{cd} = E_{cm}/\gamma_{CE}$$

$$E_s = 200GPa$$

Betonin halkeilun ja virumisen vaikutukset huomioidaan K_c -kertoimella. Parametri K_s tarkoittaa raudoituksen vaikutuskerrointa. [1, s. 69.]

Nimellisjäykkyyteen perustuva menetelmä voidaan jakaa yksinkertaiseen menettelyyn ja tarkempaan menettelyyn. Yksinkertaista menettelyä käytetään, jos mekaaninen raudoitussuhde (ρ) on vähintään 0,01. Tällöin kaavassa voidaan käyttää raudoituksen vaikutuskertoimena nollaa ($K_s = 0$) ja parametri (K_c) laskea erikseen kaavalla. Tällä tavalla voidaan tehdä alustava laskenta, jonka perusteella laskentaa tarkennetaan. [1, s. 70.]

$$K_c = 0,3/(1 + 0,5\varphi_{ef})$$

Tarkempaa menettelyä käytetään, jos mekaaninen raudoitussuhde (ρ) on vähintään 0,002. Silloin kaavassa käytetään raudoituksen vaikutuskertoimena lukua 1 ($K_s = 1$), ja (K_c) lasketaan erikseen kaavalla. [1, s. 70.]

$$K_c = k_1 k_2 / (1 + \varphi_{ef}), \text{ missä}$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20 \text{ MPa}}} \quad \text{ja} \quad k_2 = n \frac{\lambda}{170} \leq 0,20$$

Kun nimellisykykyys on laskettu, lasketaan Eulerin nurjahduskestävyyden kaavalla nurjahduskuorma (N_B). [3, s. 125.]

$$N_B = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2}$$

Kokonaismitoitusmomentti (M_{Ed}) saadaan lisäämällä toisen kertaluvun momentti ensimmäisen kertaluvun taivutusmomenttiin. Toisen kertaluvun momentin vaikutukset otetaan huomioon kaavalla, jossa sen selvittämiseen käytetään nimellisykykyteen perustuvaa nurjahduskuormaa (N_B). Lisäksi on selvitettävä kerroin (β), joka saadaan laskettua ensimmäisen ja toisen kertaluvun momenttien jakautumasta. Tähän vaikuttaa ensimmäisen kertaluvun momentin jakautuma (c_0) pilarin päiden välillä. Jos momentti on päiden välillä vakio, käytetään arvoa 8, jos momenttijakautuma on parabolinen, käytetään arvoa 9,6, jos momentti on jakautunut symmetrisesti kolmioksi, valitaan arvoksi 12. [1, s. 70.]

$$M_{Ed} = M_{0Ed} \left[1 + \frac{\beta}{(N_B/N_{Ed}) - 1} \right], \text{ missä}$$

$$\beta = \pi^2 / c_0$$

3.6.3 Nimellisen kaarevuuden menetelmä

Nimellisen kaarevuuden menetelmä soveltuu ensisijaisesti erillispilariin, johon vaikuttaa normaalivoima vakiosuuruisesti ja jonka nurjahduspituus tiedetään. Menetelmällä voidaan selvittää pilarin taipumasta aiheutuva nimellinen lisämomentti. Sen laskemiseen käytetään nurjahduspituuden mukaan arvioitua kaarevuuden maksimiarvoa. [1, s. 71.] Menetelmä soveltuu ainoastaan poikkileikkauksille, joiden poikkileikkausmitat ja raudoitukset ovat symmetrisiä [3, s. 126].

Mitoitusmomentin laskentaan selvitetään ensin lisämomentti (M_2), joka saadaan kertomalla normaalivoima (N_{Ed}) taipumalla (e_2). Itse mitoitusmomentti (M_{Ed}) saadaan ensimmäisen kertaluvun momentin ja toisen kertaluvun lisämomentin summana. [1, s. 72.]

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2$$

Ennen taipuman selvittämistä lasketaan pilarille kaarevuus ($1/r$). Siihen vaikuttavat normaalivoimasta riippuva korjauskerroin (K_r), virumisesta riippuva kerroin (K_φ), sekä raudoituksen myötövenymästä (ε_{yd}) ja poikkileikkauksen tehollisesta korkeudesta (d) riippuva kerroin ($1/r_0$). [1, s. 72.]

$$\frac{1}{r} = K_r K_\varphi \frac{1}{r_0}$$

Normaalivoimasta riippuvan kertoimen määrittämiseen tarvitaan suhteellinen normaalivoima (n), sekä tasapainotilaa vastaava suhteellinen normaalivoima (n_{bal}), jossa voidaan käyttää arvoa 0,4. Lisäksi tarvitaan suhteellisen puristuskestävyyden maksimiarvo (n_u), joka saadaan luvun 1 ja mekaanisen raudoitussuhteen (ω) summana. [1, s. 73.]

$$K_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1$$

Virumisesta riippuvan kertoimen määrittämiseen selvitetään virumisaste (φ_{ef}), sekä kerroin (β), jossa vaikuttavat betonin lujuus (f_{ck}) ja hoikkuusluku (λ). [1, s. 73.]

$$K_\varphi = 1 + \beta \varphi_{ef} \geq 1$$

$$\beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200 \text{ MPa}} - \frac{\lambda}{150}$$

Tehollisen korkeuden määrittämiseen tarvitaan pääraudoituksen keskiöetäisyys (d'), johon vaikuttavat betonipeitteen paksuus ja valittu raudoitus. Raudoituksen myötövenymästä riippuvan kertoimen määrittämiseen raudoituksen mitoituslujuus (f_{yd}) ja sen kimmokerroin (E_s), johon käytetään arvoa 200 GPa. [1, s. 72.]

$$\frac{1}{r_0} = \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45d}, \text{ missä}$$

$$\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$$

$$d = \frac{h}{2} + i_s$$

Taipuman (e_2) selvittämiseen tarvitaan kaarevuus ($1/r$), nurjahduspituus (L_0). Näiden lisäksi tarvitaan kerroin (c), joka riippuu kokonaiskaarevuuden jakautumasta. Vakiopoikkileikkauksilla käytetään yleensä arvoa 10, mutta ensimmäisen kertaluvun laskennassa momentin ollessa vakio, käytetään pienempää arvoa. Alaraja kertoimelle on 8, joka vastaa vakiosuuruista kokonaismomenttia. [1, s. 72.]

$$e_2 = \frac{1 L_0^2}{r c}$$

3.7 Vino taivutus

Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksia tarkastellaan poikkileikkauksen molemmissa suunnissa. Näistä lasketaan epäkeskisyydet molemmissa suunnissa jakamalla taivutusmomentti normaalivoimalla. Y-akselin suuntainen epäkeskisyys (e_y) lasketaan jakamalla z-akselin suhteen laskettu mitoitusmomentti ($M_{Ed,z}$) normaalivoimalla (N_{Ed}). Z-akselin suuntainen epäkeskisyys (e_z) taas jakamalla y-akselin suuntainen mitoitusmomentti ($M_{Ed,y}$) normaalivoimalla (N_{Ed}). Mitoitusmomentit pitävät sisällään toisen kertaluvun vaikutukset. [1, s. 73.]

$$e_y = \frac{M_{Ed,z}}{N_{Ed}} \quad (\text{y-akselin suuntainen epäkeskisyys})$$

$$e_z = \frac{M_{Ed,y}}{N_{Ed}} \quad (\text{z-akselin suuntainen epäkeskisyys})$$

Lisäksi selvitetään jäyhyysäteet ja nurjahduspituudet molempien akselien suhteen, joista lasketaan hoikkuusluvut. Jäyhyysäte y-akselin suhteen (i_y) lasketaan jakamalla z-akselin suuntaisen sivun pituus arvolla ($\sqrt{12}$) ja z-akselin suhteen päinvastoin. Tämän jälkeen hoikkuusluvut selvitetään molemmissa suunnissa jakamalla nurjahduspituudet jäyhyysäteillä. [1, s. 73.] Ne voivat olla erisuuruiset, koska nurjahduspituuteen vaikuttaa tuentatapa ja jäyhyysäteeseen poikkileikkauksen mitat [3, s. 112].

$$\lambda_y = \frac{L_{0y}}{i_y}, \text{ jossa } i_y = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{0z}}{i_z}, \text{ jossa } i_z = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

Seuraavat tarkistukset ovat riittäviä käytettäessä yksinkertaistettuja mitoitusmenetelmiä, jos hoikkuudet toteuttavat molemmat niille asetetuista ehdoista ja suhteelliset epäkeskisyydet (e_y/h_{eq}) ja (e_z/b_{eq}) toteuttavat toisen niille asetetuista ehdoista. Parametrit b_{eq} ja h_{eq} tarkoittavat poikkileikkauksen leveyttä ja korkeutta. [1, s. 112.] Ehtojen toteutuminen merkitsee sitä, että epäkeskisyyttä on toisessa suunnassa huomattavasti enemmän. [3, s. 112.]

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_z} \leq 2$$

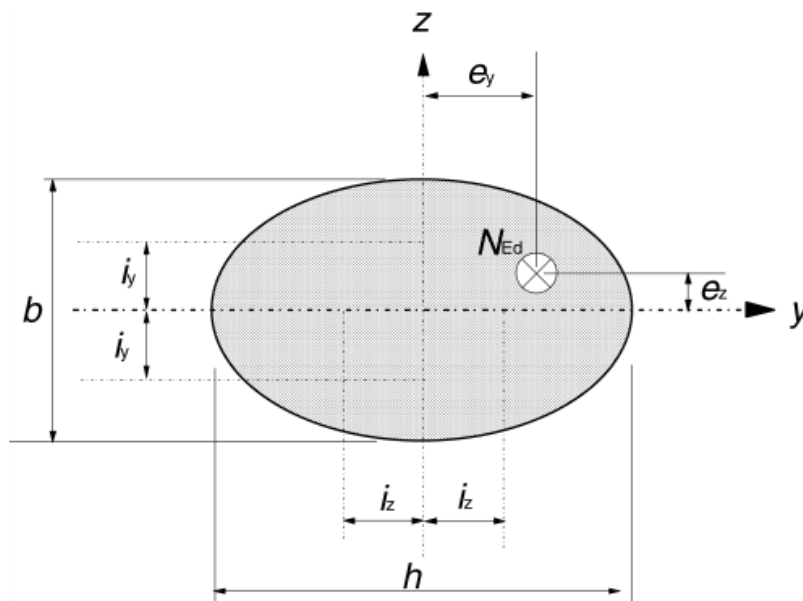
ja

$$\frac{\lambda_z}{\lambda_y} \leq 2$$

$$\frac{e_y/h_{eq}}{e_z/b_{eq}} \leq 0,2$$

tai

$$\frac{e_z/b_{eq}}{e_y/h_{eq}} \leq 0,2$$



Kuva 8. Epäkeskisyyksien e_y ja e_z määritelmä. [1, s. 74.]

Jos ehdot eivät toteudu, on epäkeskisyyttä kummassakin suunnassa merkittävästi [3, s. 112.]. Tällöin vino taivutus huomioidaan käyttämällä mitoitusmomenteina epälineaarisuudesta aiheutuvan lisän sisältämiä arvoja. Jos poikkileikkauksen mitoitusta ei tehdä suoraan vinosta taivutuksesta aiheutuvalle jännitystilalle, voidaan mitoitukseen käyttää yksinkertaistettua mitoitusetta. Mitoitusehdossa huomioidaan samanaikaisesti

molempien suuntien taivutuskestävyydet ($M_{Rd,z/y}$) ja taivutusmomentit ($M_{Ed,z/y}$). Taivutusmomentit sisältävät toisen kertaluvun vaikutuksesta aiheutuvat lisät. [1, s. 74.]

$$\left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}}\right)^a + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}}\right)^a \leq 1,0$$

Kaavassa eksponentti a interpoloidaan suorakaidepoikkileikkauksille taulukosta, joka riippuu normaalivoiman mitoitusarvon (N_{Ed}) ja poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvon (N_{Rd}) suhteesta. Ympyrän ja ellipsin muotoisissa poikkileikkauksissa eksponentti a :n arvona voidaan käyttää lukua 2. [1, s. 74.]

Taulukko 2. Normaalivoimasta ja puristuskestävyydestä riippuva eksponentti a .

N_{Ed}/N_{Rd}	0,1	0,7	1,0
$a =$	1,0	1,5	2,0

Poikkileikkauksen puristuskestävyyden määrittämiseen tarvitaan betonipoikkileikkauksen bruttoala (A_c), pääraudoituksen poikkileikkausala (A_s), sekä betonin ja raudoituksen mitoituslujuudet f_{cd} ja f_{yd} [1, s. 74].

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + A_s f_{yd}$$

3.8 Raudoitussääntöjä

Pääterästen välisen vapaan välin pituus täytyy olla sellainen, että betonia valettaessa ja tiivistettäessä riittävä tartunta saavutetaan. Minimietäisyys pääteräksille (a_{min}) voidaan laskea seuraavasti, kun tiedetään pääterästen halkaisija (ϕ_{main}) sekä kiviaineksen suurin raekoko (d_g) [1, s. 130]:

$$a_{min} = \max \begin{cases} k_1 \cdot \phi_{main} \\ d_g + k_2 \\ 20 \text{ mm} \end{cases}$$

Kaavassa arvon k -arvot esitetään kansallisessa liitteessä, mutta suositusarvot ovat $k_1 = 1$ ja $k_2 = 5$ mm. [1, s. 130.]

Pääterästen vähimmäishalkaisijan (ϕ_{min}) suositusarvo on 8 mm. Pääraudoituksen pinta-alan tulee olla vähintään ($A_{s,min}$) ja enintään ($A_{s,max}$). [3, s. 135.]

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,1 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} \\ 0,002 \cdot A_c \end{array} \right.$$

$$A_{s,max} = 0,06 \cdot A_c$$

Pääraudoitukset sidotaan hakaraudoituksilla, joiden halkaisijoiden on oltava vähintään 6 mm tai 25 prosenttia pääraudoituksen suurimmasta halkaisijasta. Näistä valitaan suurin arvo. Hakojen pääraudoitusten suuntaiset jakovälit saavat olla enintään $S_{cl,tmax}$. [3, s. 137.]

$$S_{cl,tmax} = \min \left\{ \begin{array}{l} 15 \cdot \phi_{main} \\ \min(h, b) \\ 400 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Pilarin pituussuunnassa hakaväliä tihennetään poikkileikkauksen pidemmän sivun pituuden verran pilarin päissä, jos sen ylä- tai alapuolella on palkki tai laatta. Myös limitsjatkoksien lähellä hakaväliä tihennetään, jos päätankojen suurin halkaisija on enemmän kuin 14 mm. Hakavälien tihennys tapahtuu kertomalla pilarin hakojen enimmäisjakoväli kertoimella 0,6. [1, s. 160.]

Jokainen poikkileikkauksen nurkassa oleva pääteräs tai tankonippu sidotaan haoilla. Poikkileikkauksen puristetussa osassa muiden pääterästen etäisyys saa olla enintään 150 mm etäisyydellä sidotusta teräksestä. [1, s. 160.]

4 Tarkasteltavat rakennemallit

4.1 RFEM-laskenta

Rakennuksen kuormien ominaisarvot, määräävät kuormitusyhdistelyt ja voimasuureet selvitettiin RFEM-laskennalla. Malliin lisättiin eurokoodin mukaiset tuulikuormat, lumi-kuormat, pintarakenteiden kuormat ja välipohjan hyötykuormat. Pilareille selvitettiin myös tarkat nurjahduskertoimet RF-STABILITY moduulilla, josta ne valittiin pilarin mitoitusmoduuliin ja SKOL-pohjaan. SKOL-pohja ei selvitä voimasuureita, vaan siihen on syötettävä ne valmiiksi laskettuina. Swecon oma sovellus taas käyttää kuormien ominaisarvoja, mutta nekin on selvitettävä erikseen pilarin omaa painoa lukuun ottamatta.

Mitoitusmoduuliin syötettiin SKOL-pohjalla laskettu virumaluku, jotta olosuhdetekijät eivät aiheuttaisi eroavaisuuksia laskennoissa. Samaa virumalukua käytettiin myös Swecon omassa mitoitussovelluksessa.

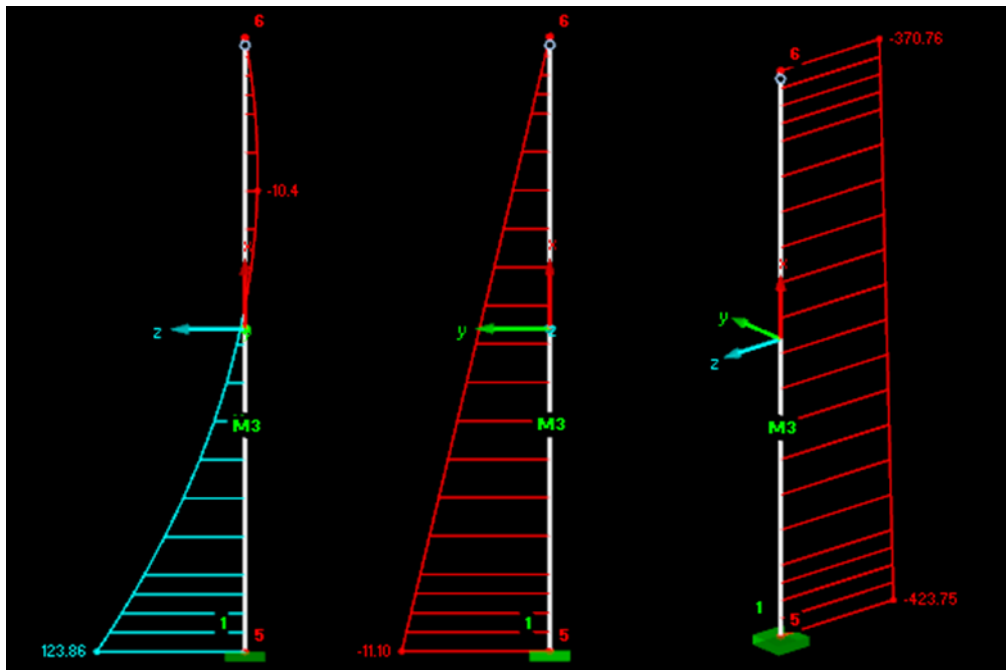
4.2 Mastopilari

Mastopilarille selvitettiin normaalivoima ja jäykästi tuetun pilarin alapään momentit mo-lemmissa suunnissa eri kuormitusyhdistelyillä. Yläpään momenttia ei syntynyt. Pilarin pituus on 8 metriä ja sen poikkileikkauksen mitat ovat 480mm x 480mm.

Member No.	A Node No.	B Location x [m]	C	D Forces [kN]			E Moments [kNm]			I
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
3	5	0.000	max N	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8
			min N	-465.79	2.82	26.44	0.02	-42.25	22.58	CO 6
			max V _y	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9
			min V _y	-423.75	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 12
			max V _z	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9
			min V _z	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8
			max M _T	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8
			min M _T	-465.79	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	CO 7
			max M _y	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8
			min M _y	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9
			max M _z	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9
			min M _z	-423.75	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 12

Kuva 9. RFEM:n alapaneeli, jonka "Members – Internal Forces" -valikosta löytyvät ohjelman laskemat voimasuureet. Viimeisessä lohkoissa on voimasuureita vastaava kuormitusyhdistely.

Kuva 9 sisältää mastopilarin kuormitustietoja, jossa M_y tarkoittaa taivutusmomenttia y-akselin ympäri ja M_z taas z-akselin ympäri. RF-CONCRETE Columns -mitoitusmoduuli mitoitti mastopilarin kuormitusyhdistelmällä CO12. Kyseisen yhdistelyn voimasuureet ja kuvaajat ovat helposti tarkasteltavissa valitsemalla yläpalkista kuormitusyhdistely tarkasteltavaksi ja tämän jälkeen avaamalla Project Navigator -paneelista Results-välilehti. Internal Forces -alaotsikosta voidaan valita tarkasteltava suure.



Kuva 10. Vasemmalta oikealle suureet M_y , M_z ja N . Kuormitusyhdistely CO12. Sauvan korkeus on 8 metriä.

Määrävän kuormitusyhdistelyn z-akselin suuntainen taivutusmomentti syntyy samansuuntaisen tuulikuorman vaikutuksesta. Sen paine aiheuttaa myös sauvan yläpäähän y-akselin suuntaisen pistemäisen vaakakuorman, josta syntyy taivutusmomenttia. Normaali voiman suuruus kasvaa sauvan päiden välissä tasaisesti, koska se huomioi pilarin oman painon.

Vastaavalla tavalla voidaan selvittää pilariin kohdistuvien kuormien ominaisarvot. Tällöin valitaan yläpalkista esimerkiksi pelkkä lumikuorma ilman osavarmuuskertoimia ja tarkastellaan sen vaikutuksia, kuten kuvassa 10. Swecon oma mitoitussovellus muodostaa

kuormitusyhdistelyt itse, joten siihen syötetään lähtötietoina kuormien ominaisarvot viiva- ja pistekuormina, sekä niiden osavarmuuskertoimet.

Kyseiseen pilariin kohdistuu rakenteiden oman painon lisäksi lumikuormaa ja tuulikuormaa molemmista suunnista. Alla olevasta taulukosta selviää niiden aiheuttamat ominaisarvot.

Taulukko 3. Mastopilarin kuormien ominaisarvot.

RFEM:n laskemat ominaisarvot mastopilarille	
Gk	N = 283,97 kN
Qk(lumi)	N = 93,37 kN
Qk(tuuli Y+)	Myy = 82,57 kNm (PL:n y-akselin ympäri)
	Mzz = -7,39 kNm (PL:n z-akselin ympäri)
Qk(tuuli X+)	Myy = -46,94 kNm (PL:n y-akselin ympäri)
	Mzz = 25,10 kNm (PL:n z-akselin ympäri)

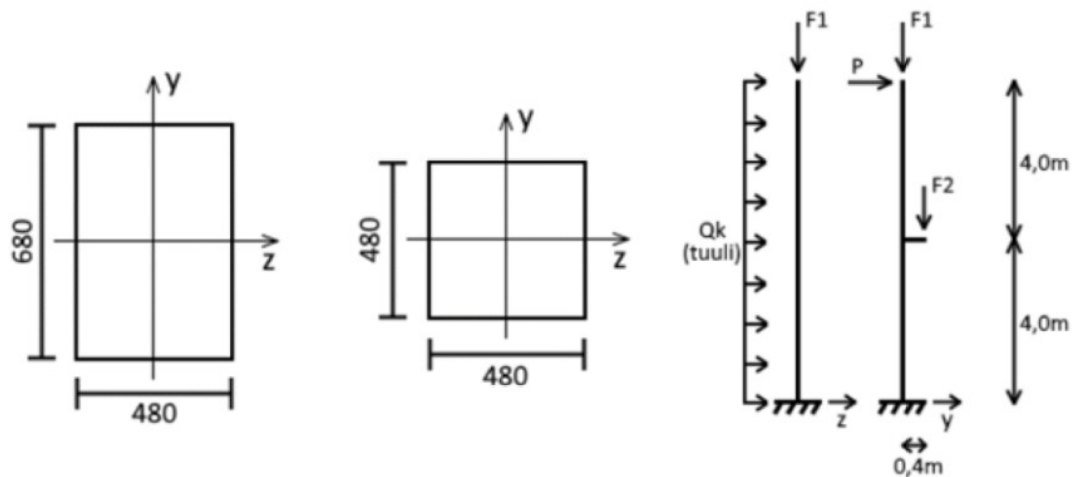
RFEM laski kuormitusyhdistelyt CO 6, CO 8, CO 9 ja CO 12 määrääviksi. Alla olevasta taulukosta selviää mistä yhdistelyistä tapaukset muodostuvat. Merkinnyt "X+" ja "Y+" tarkoittavat mallin pääkoordinaatiston suuntia.

Taulukko 4. RFEM-ohjelman laskemat määräävät kuormitusyhdistelyt ja voimasuureet. Määräävänä kuormitusyhdistelynä CO 12.

Kuormitusyhdistely	Osavarmuuskertoimet	N (kN)	Myy (kNm)	Mzz (kNm)
CO 6	$1,15 \cdot Gk + 1,5 \cdot Qk(\text{lumi}) + 0,9 \cdot Qk(\text{tuuli X+})$	465,8	-42,3	22,6
CO 8	$1,15 \cdot Gk + 1,5 \cdot Qk(\text{tuuli Y+})$	325,4	123,9	-11,1
CO 9	$1,15 \cdot Gk + 1,5 \cdot Qk(\text{tuuli X+})$	325,4	-70,4	37,7
CO 12	$1,15 \cdot Gk + 1,05 \cdot Qk(\text{lumi}) + 1,5 \cdot Qk(\text{tuuli Y+})$	423,8	123,9	-11,1

4.3 Kaksikerrosmastopilari

Kaksikerrosmastopilarin mitoitus tehtiin mitoitusmoduulissa ja SKOL-pohjassa siten, että pilari jaettiin kahdeksi sauvaksi konsolin kohdalta. Molemmille sauvoille selvitettiin kuormien ominaisarvot ja määräävät kuormitusyhdistelyt erikseen. Alemman sauvan ala- ja yläpäähän syntyi momenttia. Ylemmän sauvan alapäähän syntyi momenttia mutta yläpäähän ei. Molemmat sauvat ovat neljä metriä pitkiä. Alemman sauvan y-akselin suuntainen sivumitta valittiin 200 mm z-akselin suuntaista sivumittaa pidemmäksi.



Kuva 11. Alemman sauvan poikkileikkaus, ylemmän sauvan poikkileikkaus ja koko pilarin rakennemalli.

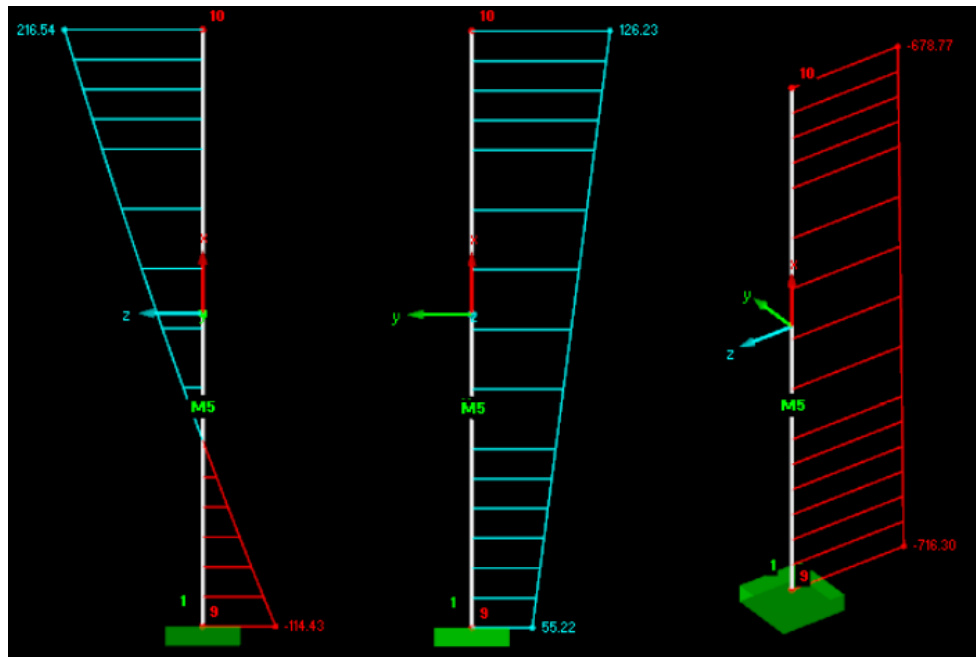
Kuvassa 12 näkyy alemman sauvan määräävät kuormitusyhdistelyt ja niiden mitoitusarvot. Punaisella rajatut arvot tarkoittavat murtorajatilan voimasuureita pilarin alapäässä ja sinisellä rajatut taas ovat yläpäähän voimasuureita.

Member No.	A		C	D	E			G	H			I
	Node No.	Location x [m]			N	Forces [kN] V _y	V _z		M _T	Moments [kNm] M _y	M _z	
5	9	0.000	max N	-494.13	-12.32	1.56	11.77	65.86	-25.11	CO 8		
			min N	-758.45	-23.54	90.45	9.49	-109.50	16.70	CO 6		
			max V _y	-501.30	-4.32	59.99	1.28	-68.58	72.36	CO 9		
			min V _y	-758.45	-32.23	81.34	13.03	-102.10	-41.09	CO 7		
			max V _z	-716.30	-17.75	96.52	7.13	-114.43	55.22	CO 13		
			min V _z	-494.13	-12.32	1.56	11.77	65.86	-25.11	CO 8		
			max M _T	-709.13	-25.75	38.08	17.62	20.01	-42.24	CO 12		
			min M _T	-501.30	-4.32	59.99	1.28	-68.58	72.36	CO 9		
			max M _y	-494.13	-12.32	1.56	11.77	65.86	-25.11	CO 8		
			min M _y	-716.30	-17.75	96.52	7.13	-114.43	55.22	CO 13		
			max M _z	-501.30	-4.32	59.99	1.28	-68.58	72.36	CO 9		
			min M _z	-709.13	-25.75	38.08	17.62	20.01	-42.24	CO 12		
Member No.	A		C	D	E			G	H			I
	Node No.	Location x [m]			N	Forces [kN] V _y	V _z		M _T	Moments [kNm] M _y	M _z	
5	10	4.000	max N	-456.59	-12.32	25.46	11.77	127.34	24.16	CO 8		
			min N	-720.91	-23.54	75.63	9.49	219.23	110.87	CO 6		
			max V _y	-463.76	-4.32	35.29	1.28	116.28	89.64	CO 9		
			min V _y	-720.91	-32.23	81.34	13.03	223.27	87.83	CO 7		
			max V _z	-720.91	-32.23	81.34	13.03	223.27	87.83	CO 7		
			min V _z	-456.59	-12.32	25.46	11.77	127.34	24.16	CO 8		
			max M _T	-671.59	-25.75	61.99	17.62	227.60	60.75	CO 12		
			min M _T	-463.76	-4.32	35.29	1.28	116.28	89.64	CO 9		
			max M _y	-671.59	-25.75	61.99	17.62	227.60	60.75	CO 12		
			min M _y	-463.76	-4.32	35.29	1.28	116.28	89.64	CO 9		
			max M _z	-678.77	-17.75	71.82	7.13	216.54	126.23	CO 13		
			min M _z	-456.59	-12.32	25.46	11.77	127.34	24.16	CO 8		

Kuva 12. Alemman sauvan määräävät kuormitusyhdistelyt ja niitä vastaavat voimasuureet.

Mitoitusmoduulin käyttämät voimasuureet ovat yhdistelystä CO13. Normaaliavoiman se huomioi yläpäästä, koska siellä on mitoituksen kannalta suurimmat taivutusmomentit. Tämä vaikutti ensimmäisen ja toisen kertaluvun momenttien laskentaan. Niistä tulee suurempia normaalivoiman kasvaessa, joten nyt ne jäivät hieman pienemmiksi.

Sauvojen määräävät kuormitusyhdistelyt eivät ole samoja, joka vaikuttaa sauvojen päiden momenttien mitoitusarvoihin merkittävästi. Mitoitusmoduulin laskennan mukaan alemmalle sauvalle määräävä kuormitusyhdistely on CO13 ja ylemmälle CO7.



Kuva 13. Vasemmalta oikealle voimasuureet M_y , M_z ja N . Alempi sauva, CO13. Sauvan korkeus on 4 metriä.

Z-akselin suuntainen taivutusmomentti syntyy poikkileikkauksen y-akselin suuntaisen tuulikuorman paineen vaikutuksesta vaihtaen merkkiä päiden välillä. Rakennuksen välipohjan kuormitus jakautuu palkin kautta normaalivoimana konsoliin, jonka epäkeskisyys aiheuttaa taivutusmomenttia y-akselin suunnassa. RFEM:n mitoitusmoduuli käytti alemman sauvan mitoituksessa kuvan 13 voimasuureita.

Taulukko 5. Alemman sauvan kuormien ominaisarvot.

Ominaisarvot sauvan yläpäässä	
Gk	N = 403,28 kN
	$M_{yy} = 106,96$ kNm
	$M_{zz} = 44,56$ kNm
Qk(lumi)	N = 93,65 kN
Qk(hyöty)	N = 77,78 kN
	$M_{yy} = 66,84$ kNm
	$M_{zz} = 24,39$ kNm
Qk(tuuli X+)	$M_{yy} = -4,49$ kNm
	$M_{zz} = 25,6$ kNm

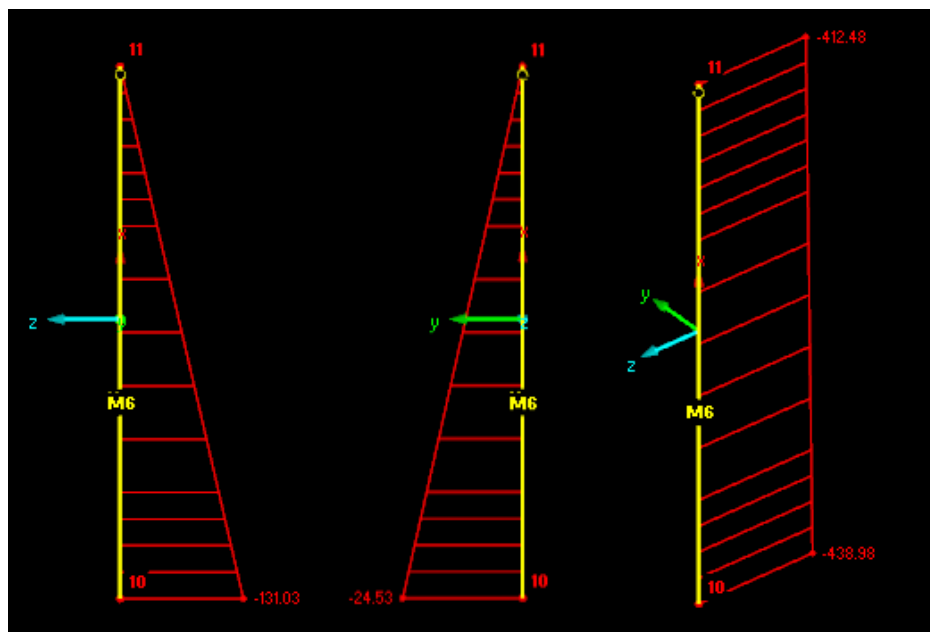
Taulukko 6. Määrävän kuormitusyhdistelmän voimasuureet.

CO 13:	$1,15 \times G_k + 1,05 \times Q_k(\text{lumi}) + 1,5 \times Q_k(\text{hyöty}) + 1,5 \times Q_k(\text{tuuli X+})$
N =	$1,15 \times 403,28 \text{ kN} + 1,05 \times 93,65 \text{ kN} + 1,5 \times 77,78 \text{ kN} = \mathbf{678,8 \text{ kN}}$
Myy =	$1,15 \times 106,96 \text{ kNm} + 1,5 \times 66,84 \text{ kNm} + 1,5 \times (-4,49 \text{ kNm}) = \mathbf{216,5 \text{ kNm}}$
Mzz =	$1,15 \times 44,56 \text{ kNm} + 1,5 \times 24,39 \text{ kNm} + 1,5 \times 25,6 \text{ kNm} = \mathbf{126,2 \text{ kNm}}$

Member No.	A Node No.	B Location x [m]	C	D			E			F			G			H			I		
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z
6	10	0.000	max N	-298.50	3.47	45.56	-3.42	-138.55	13.88	CO 15											
			min N	-439.32	-7.21	4.08	-1.69	-40.52	-28.83	CO 3											
			max V _y	-298.83	6.02	30.85	-0.54	-79.70	24.09	CO 9											
			min V _y	-396.86	-12.18	9.48	-3.33	-78.27	-48.72	CO 12											
			max V _z	-396.83	3.47	45.56	-3.42	-138.55	13.88	CO 13											
			min V _z	-298.85	-9.63	-5.23	-0.46	-19.42	-38.51	CO 8											
			max M _T	-298.85	-9.63	-5.23	-0.46	-19.42	-38.51	CO 8											
			min M _T	-438.98	-6.13	32.76	-6.40	-131.03	-24.53	CO 7											
			max M _y	-298.85	-9.63	-5.23	-0.46	-19.42	-38.51	CO 8											
			min M _y	-396.83	3.47	45.56	-3.42	-138.55	13.88	CO 13											
			max M _z	-298.83	6.02	30.85	-0.54	-79.70	24.09	CO 9											
			min M _z	-396.86	-12.18	9.48	-3.33	-78.27	-48.72	CO 12											

Kuva 14. Ylemmän sauvan määrävät kuormitusyhdistelyt ja niiden voimasuureet.

Koska ylemmän sauvan taivutusmomentit ovat suurimmillaan sen alapäässä, valitsi ohjelma myös mitoittavan normaalivoiman sieltä.



Kuva 15. Vasemmalta oikealle voimasuureet My, Mz ja N. Ylempi sauva, CO 7. Sauvan korkeus on 4 metriä.

Kuormitusyhdistelmässä CO 7 ei tuulikuorma vaikuta kummassakaan suunnassa, joten taivutusmomentti syntyy konsolin epäkeskisestä normaalivoimasta.

Taulukko 7. Alemman sauvan kuormien ominaisarvot.

Ominaisarvot sauvan alapäässä	
Gk	N = 259,89 kN
	Myy = -62,76 kNm
	Mzz = -12,45 kNm
Qk(lumi)	N = 93,65 kN
Qk(hyöty)	Myy = -39,23 kNm
	Mzz = -6,81 kNm

Taulukko 8. Määrävä kuormitusyhdistelmä ja sen voimasuureet.

CO 7:	$1,15 \times Gk + 1,5 \times Qk(\text{lumi}) + 1,5 \times Qk(\text{hyöty})$
N =	$1,15 \times 259,89 \text{ kN} + 1,5 \times 93,65 \text{ kN} = \mathbf{439,0 \text{ kN}}$
Myy =	$1,15 \times (-62,76 \text{ kNm}) + 1,5 \times (-39,23 \text{ kNm}) = \mathbf{-131,0 \text{ kNm}}$
Mzz =	$1,15 \times (-12,45 \text{ kNm}) + 1,5 \times (-6,81 \text{ kNm}) = \mathbf{-24,5 \text{ kNm}}$

5 Mitoitussovellusten ja eri laskentamenetelmien vertailu

Pilarien mitoitussovelluksia vertailtiin keskenään RFEM -ohjelman RF-CONCRETE Columns -mitoitusmoduulin, SKOL B3 -laskentapohjan ja Swecon oman mitoitussovelluksen kanssa. Pilarit laskettiin ensin läpi RF-CONCRETE Columns -moduulilla, josta saatiin sopivat raudoitukset selville. Tämän jälkeen vastaavat raudoitukset asetettiin muihin sovelluksiin, jonka jälkeen pilarit mitoitettiin. RF-CONCRETE Columns -moduuli ja SKOL-pohja mitoittavat pilarin nimellisen kaarevuuden menetelmällä. Swecon oma mitoitussovellus käyttää mitoituksessa yleistä menetelmää.

Kaksikerrospilarin ylemmän ja alemman sauvan mitoitukset tehtiin erikseen mitoitusmoduulilla ja SKOL-pohjalla. Swecon omalla mitoitussovelluksella koko pilari voitiin mitoitaa kerralla.

5.1 RFEM CONCRETE Columns -mitoitusmoduuli

Mitoitusmoduulissa voi valita minkä tahansa kuormitusyhdistelyn tarkasteltavaksi. Sillä voidaan myös laskea kaikki yhdistelmät läpi, jolloin se huomioi niistä automaattisesti eniten rasiusta aiheuttavan. Nurjahduskertoimiksi voidaan antaa itse laskettu arvo, mutta niille on myös mahdollista hakea tarkat arvot RF-STABILITY -moduulin laskemana. Myös raudoituksien paksuudet valitaan ennen laskentaa, jonka perusteella ohjelma määrittää niille vaadittavan määrän. Samanaikaisesti voidaan valita tankopaksuuksiksi useita eri vaihtoehtoja. Mitoitusmoduulilla voidaan laskea virumaluku, mutta vaihtoehtoisesti sille voidaan myös syöttää manuaalisesti käsin laskettu, tai jonkun toisen mitoituksosovelluksen laskema arvo. Tarkasteltavissa rakenteissa käytettiin SKOL-pohjan laskemaa virumalukua.

Laskennan jälkeen tuloksia voidaan tarkastella "Results" välilehdellä kattavasti. Se näyttää mitoituksen kulun lähtötiedoista käyttöasteen määrittämiseen asti melko selkeästi. Käyttöasteen määrittämiseen on erikseen valittava eurokoodin mukainen vinon taivutuksen menetelmä "Details" -valikosta. Oletuksena käyttöasteen laskemiseen on täysin eri menetelmä, joka antoi tarkasteltavissa rakenteissa kymmeniä prosentteja alhaisempia käyttöasteita. Mitoitusmoduulilla on myös mahdollista tehdä palomitoitus, mutta sen tarkastelu jätetään tässä pois.

Tulosten alussa selviää murtorajatilan voimasuureet, joilla mitoitus on suoritettu. Samat voimasuureet voi etsiä "Internal forces" -paneelista, jolloin selviää myös kuormitustapaus. Tämän jälkeen ohjelma laskee nurjahduspituudet ja hoikkuusluvut molemmissa suunnissa.

Seuraavaksi tulospuussa näkyy rajahoikkuuden tulos ja sen sisältämät parametrit A, B ja C molemmissa suunnissa. Moduuli laskee virumisasteen tarkasti eurokoodin mukaisella kaavalla. Tämä on kuitenkin hieman epäselvästi esitetty, koska parametrit eroavat eurokoodin kanssa toisistaan. Lineaarisen laskennan mukainen käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmän taivutusmomentti M_{0Eqp} vastaa mitoituksmoduulissa parametria $M_{c-quasi,1}$ ja murtorajatilan taivutusmomentti M_{0Ed} taas parametria $M_{c,1}$. Hoikkuus- ja rajahoikkuusluvuista tulee vielä yhteenveto, josta selviää rakenteen hoikkuus molemmissa suunnissa ja onko toisen kertaluvun vaikutukset otettava huomioon.

Mitoitusmoduuli laskee murtorajatilan taivutusmomenttien ja normaalivoiman suhteesta epäkeskisyyden e_0 molemmissa suunnissa. Tämän alle on eritelty vinouden avulla mittaepätarkkuuksista aiheutuvat epäkeskisyydet $e_{i,z}$ ja $e_{i,y}$, jonka jälkeen esitetään vielä sivumitoista riippuvat vähimmäisepäkeskisyydet. Eurokoodin mukaan mittaepätarkkuuksien huomiointi riittää rasitetummassa suunnassa, mutta mitoitusmoduuli huomioi ne molemmissa suunnissa, mikä on varmalla puolella.

Ensimmäisen kertaluvun momenttien määrittämiseen tarvittavat epäkeskisyydet löytyvät yhteenvedona tulospuussa seuraavana. Epäkeskisyydet e_0 ja e_i lasketaan yhteen, jonka jälkeen ne kerrotaan normaalivoimalla. Näistä saadaan ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentit molempiin suuntiin.

Seuraavaksi moduuli laskee eurokoodin mukaisen vinon taivutuksen ehdot. Jos jompikumpi ehdoista ei toteudu, ohjelma käyttää yksinkertaistettua mitoitusehto käyttöasteen määrittämiseen.

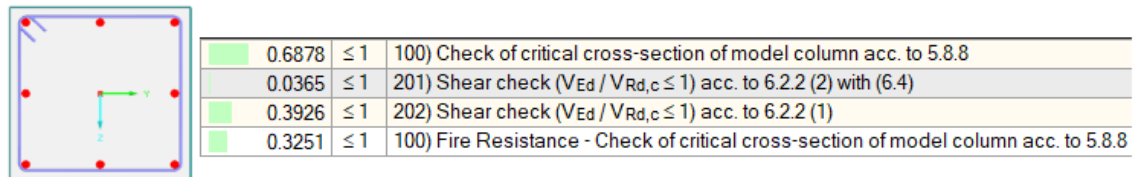
Toisen kertaluvun vaikutukset mitoitusmoduuli laskee nimellisen kaarevuuden menetelmällä. Taipumaan (e_2) vaikuttavat parametrit on purettu alaotsikoittain siististi molemmissa suunnissa erikseen. Normaalivoiman ja viruman korjauskertoimien arvot on laskettu tarkasti, mutta ehtojen mukaisesti sovellus huomioi niiden raja-arvot. Kaarevuuteen vaikuttava raudoituksien tehollinen korkeus d voi aiheuttaa eroavia tuloksia muiden ohjelmien kanssa. Mitoitusmoduulin lähtötiedoissa syötettävä betonipeite ei huomioi reunahakoja ollenkaan, eli mikäli siihen syötetään paksuudeksi 30 mm, on todellinen paksuus 22 mm laskennassa, koska siitä otetaan vielä 8 mm paksuiset reunahaat pois.

Mitoitusmoduuli ei erikseen laske toisen kertaluvun taivutusmomenteja. Se laskee epäkeskisyydet ja taipuman yhteen molemmissa suunnissa ($e_{2,tot} = e_i + e_0 + e_2$), jonka jälkeen kertoo ne normaalivoimalla. Tästä saadaan molempien suuntien mukaiset mitoitusmomentit.

Lopuksi tulee vielä yhteenvedo käytetyistä raudoituksista. Mitoitusmoduuli laskee myös puristuskestävyyden ja molempien suuntien taivutuskestävyydet, joista saadaan selville pilarin käyttöaste riippuen vinon taivutuksen alkuehdoista.

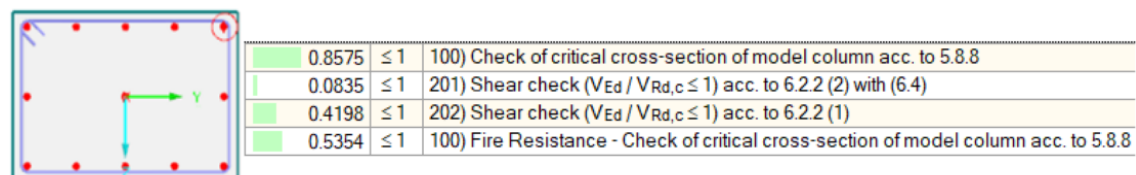
Mitoitusmoduuli otsikoi välituloksia vaihtelevasti, joko "z- tai y-akselin suuntaisesti" tai "z- z- tai y-y-akselin ympäri", joka saattaa toisinaan hankaloittaa tulosten tulkintaa.

Mastopilarin mitoituksessa sovellus laskee vinon taivutuksen yksinkertaistetulla mitoitus- ehdolla käyttöasteeksi 68,8% kahdeksalla 25 mm pääteräksellä. Pilari on sivusiirtävä ja sen hoikkuusluvut ylittävät rajahoikkuusarvot molemmissa suunnissa, jolloin mitoitusmo- duuli huomioi niissä toisen kertaluvun vaikutukset.



Kuva 16. Mastopilarin poikkileikkaus; 8T25 & reunahaat T8, sekä sen käyttöaste.

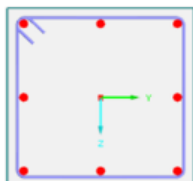
Kaksikerrosmastopilarin alemman sauvan käyttöasteeksi tuli 85,75% vinon taivutuk- sen yksinkertaistetulla mitoitusehdolla. RFEM-laskennan mukaan suurimmat taivutus- momentit löytyivät sauvan yläpäästä. Se huomioi myös normaalivoiman samasta koh- dasta, vaikka se on suurempi pilarin alapäässä, jossa on huomioitu myös pilarin oma paino.



Kuva 17. Kaksikerrosmastopilarin alemman sauvan poikkileikkaus; 12T25 & reunahaat T8, sekä sen käyttöaste.

Rajahoikkuuteen vaikuttavan A-tekijän määrittäminen meni y-akselin suhteen normaalisti, mutta z-akselin suhteen virumisasteeksi tuli huomattavasti pienempi. Moduuli oli laske- nut virumisasteeksi 1,0398, vaikka käsin laskettuna samoilla arvoilla tulos oli 1,566. Joka tapauksessa hoikkuuden raja-arvot ylittyivät reilusti, jolloin toisen kertaluvun vaikutukset otettiin huomioon.

Kaksikerrosmastopilarin ylemmän sauvan käyttöasteeksi tuli 80,65% vinon taivutuksen yksinkertaistetulla mitoitus ehdolla.



0.8065	≤ 1	100) Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8
0.0632	≤ 1	201) Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (2) with (6.4)
0.2077	≤ 1	202) Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (1)
0.5208	≤ 1	100) Fire Resistance - Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8
0.1827	≤ 1	202) Fire Resistance - Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (1)

Kuva 18. Kaksikerrosmastopilarin ylemmän sauvan poikkileikkaus; 8T25 & reunahaat T8, sekä sen käyttöaste.

5.2 SKOL-pohja

SKOL-laskentapohjan lähtötietoihin syötetään materiaalista ja olosuhteista riippuvat lähtötiedot. Laskennat toteutettiin siten, että nurjahduskertoimiksi asetettiin RF-STABILITY-moduulin laskemat kertoimet. Raudoituksiksi asetettiin samat, mitkä mitoitusmoduuli oli laskenut sopiviksi. Lähtötietoihin voi syöttää samanaikaisesti neljän eri kuormitusyhdistelmän voimasuureet. Tämä on hyödyllinen ominaisuus, jos määräävä yhdistely ei ole tiedossa. Vertailu tehtiin tässä kuitenkin RFEM-laskennan mukaan määrävimmällä kuormitusyhdistelmällä. Käyttörajatilan pitkäaikaisen ja murtorajatilan momenttien suhteeksi on asetettu vakioarvo 1/1.35, joka tulee osavarmuuskertoimista. Tähän on kuitenkin mahdollista asettaa myös tarkka käsin laskettu arvo. Mittaepätarkkuuksille valitaan suunta, jossa ne huomioidaan. Vaihtoehtoisesti ne voidaan myös huomioida poikkileikkauksen molemmissa suunnissa, kuten mitoitusmoduuli tekee, mutta se ei ole eurokoodin mukaan tarpeellista. Rakenne määritetään vielä sivusiirtyväksi tai sivusiirtymättömäksi molemmissa suunnissa ennen varsinaisen mitoituksen aloittamista.

Laskentapohja laskee ensin virumaluvun ja raudoituksien jäyhyysasteet molempien akselien suhteen. Tämän jälkeen se tarkistaa raudoituksen ja betonipeitteen säännöt. Seuraavana pohja laskee ekvivalentin momentin, mutta sivusiirtyvälle rakenteelle sitä ei tarvita, jolloin tästä kohdasta huomioidaan ainoastaan suurempi sauvanpäämomentti (M_{02}). Mittaepätarkkuuksien aiheuttamat taivutusmomentit määritetään seuraavaksi molemmissa suunnissa. Nämä lasketaan vain suunnassa, jossa epätarkkuudet on asetettu huomioitavaksi lähtötiedoissa. SKOL-pohja ei huomioi ekvivalentin vakiomomentin

laskentakaavoissa mittaepätarkkuuksista johtuvaa lisää. Tämä vaikuttaa ainoastaan sivusiirtymättömiin rakenteisiin, jos ekvivalentti momentti tulee lopullisen mitoitusmomentin kaavassa määrääväksi.

Hoikkuuskriteerit tarkistetaan molemmissa suunnissa, jonka jälkeen laskentapohja selvittää taipumat ja niiden aiheuttamat toisen kertaluvun momentit. Jos rakenne ei ole hoikka, pohja laskee taipuman, mutta ei huomioi mitoitusmomenttiin siitä aiheutuvaa momenttia.

Toisin kuin RFEM:n mitoitusmoduuli, SKOL-pohja laskee momentit erikseen, jonka jälkeen se laskee ne yhteen riippuen rakenteen sivusiirtyvyyden määrittämistä ehdoista. Laskentapohja ei tee eurokoodin ehtojen 5.38a eikä 5.38b mukaisia tarkistuksia, vaan laskee käyttöasteen suoraan vinon taivutuksen yksinkertaistetulla mitoitusehdolla. Tämä on varmallalla puolella.

Mastopilarin mitoituksessa SKOL-pohjan tulokset eivät olleet vertailukelpoisia RFEM:n mitoitusmoduulin kanssa, jos siinä noudatti virheilmoitusta, jonka mukaan nurjahduskertoimet eivät voi olla alle 2 sivusiirtyvälle rakenteelle. Ongelmaksi syntyi RF-Stabilityn laskemat nurjahduskertoimet, jotka olivat y-akselin ympäri 1,535 ja z-akselin ympäri 1,415. Tästä syystä mitoitusta jatkettiin niin, että rakenne olisi sivusiirtymätön molemmissa suunnissa.

Rajahoikkuudessa syntyi merkittäviä eroja sovellusten välillä, koska parametri C määrytyi eri ehdolla sivusiirtymättömyyden takia. Myös parametri A oli SKOL-pohjassa molemmissa suunnissa pienempi. Tähän vaikutti virumisaste, jonka mitoitusmoduuli laski huomattavasti pienemmäksi poikkileikkauksen molemmissa suunnissa, koska KRT ja MRT momenttien suhde oli vakioarvoa alhaisempi. RFEM:n mitoitusmoduuli laski pilarin molemmissa suunnissa hoikaksi, kun taas SKOL-pohjan laskennan mukaan rajahoikkuus ei ylittynyt kummassakaan suunnassa. Tämä johti siihen, että SKOL-pohja ei huomioinut toisen kertaluvun vaikutuksia ollenkaan.

Myös ensimmäisen kertaluvun momenttien laskenta tapahtuu eri kaavalla, riippuen siitä onko rakenne sivusiirtävä vai ei. Sivusiirtymättömän rakenteen mitoitusmomenttiehdosta kuitenkin tuli tässä pilarissa määrääväksi tapaukseksi sama, kuin sivusiirtävässä

rakenteessa ilman toisen kertaluvun momenttia. Lopullinen käyttöaste jäi 37,7 prosenttiin, kun mitoitusmoduuli laski sen 68,8 prosenttiin.

Kaksikerrosmastopilarin alemman sauvan RFEM:n poikkileikkauksen pääakselit menevät tässä sauvassa niin, että sen y-akselin suunta vastaa SKOL-pohjan z-akselia. Tämä johtuu siitä, että SKOL-pohjassa z-akselin suuntaisen sivun pituuden on oltava y-akselin suuntaista sivua pidempi. Eli kaikki lähtötiedot ja tulokset akselien suhteen oli ajateltava päinvastaisesti sovellusten välillä.

Nurjahduskertoimet RF-Stability-moduulin mukaan olivat y-akselin ympäri 2,874 ja z-akselin ympäri 3,754, joten SKOL-pohjassakin voitiin asettaa poikkileikkauksen molemmat suunnat sivusiirtymiksi ilman virheilmoitusta. Sauvan molempiin päihin kohdistuu taivutusmomenttia, joten päiden momentit selvitettiin Internal forces -paneelistä erikseen. Rakenteen sivusiirtävyyden takia oleellisinta oli selvittää se sauvan pää, jossa taivutusmomentit ovat suurempia, koska sen mukaan ensimmäisen kertaluvun momentit määräytyvät. Tässä tapauksessa suurimmat taivutusmomentit sijaitsivat sauvan yläpäässä, mutta suurin normaalivoima alapäässä, jossa on huomioitu myös pilarin oma paino. Tämä poikkeaa mitoitusmoduulin käyttämästä normaalivoimasta. SKOL-laskentapohjaan asetettiin siis normaalivoima, johon huomioitiin myös pilarin oma paino.

SKOL-pohjan virumisasteen määrittämiseen käytettävät käyttörajatilan ja murtorajatilan momenttien suhteet ovat oletuksena asetettu 1/1,35. Se poikkeaa mitoitusmoduulin tarkasti laskemasta käyttörajatilan ja murtorajatilan momenttien suhteesta, josta syntyy pieni ero rajahoikkuuskaavan A-parametriin molemmissa suunnissa. Myös sauvan alapään normaalivoiman valinta antaa suhteelliselle normaalivoimalle hieman suuremman arvon. Näistä syistä SKOL-pohjan rajahoikkuusarvot eroavat hieman mitoitusmoduulin laskemista arvoista, mutta hoikkuuskriteerit ylittyivät silti molemmissa suunnissa.

Mittaepätarkkuudet huomioitiin tässä vain rasitetummassa suunnassa, jolloin lopullisesta mitoitusmomentista tuli vähemmän rasitetussa suunnassa pienempi.

Taipuma oli muutaman millimetrin suurempi, kuin mitoitusmoduulissa. Tämä johtui tehollisen korkeuden määrittämisestä, jossa betonipeitteen paksuudet ovat hieman eri suuruiset sovellusten välillä. Normaalivoiman korjauskertoimen laskettu tulos oli myös

hieman suurempi mitoitusmoduuliin nähden, johtuen parametrissa n_{bal} , jonka SKOL-pohja laskee puristuskestävyyden kautta. Mitoitusmoduuli käyttää tälle suositusarvoa 0,4. Molemmista maksimiarvo 1,0 kuitenkin ylittyi, joten näistä ei syntynyt poikkeavuuksia. Myös viruman korjauskerroin oli hieman pienempi mitoitusmoduuliin verrattuna johtuen virumisasteesta. Tämä on kuitenkin niin marginaalinen ero, ettei se kaarevuuteen vaikuttanut.

Laskentapohjan mitoitusmomentti oli y-akselin suhteen hieman pienempi mitoitusmoduuliin verrattuna, johtuen suuremmasta taipumasta ja mittaepätarkkuuksien huomioinnista vain rasettumassa suunnassa. Z-akselin suhteen taas mitoitusmomentti oli hieman suurempi, mitoitusmoduuliin verrattuna, koska taipumasta aiheutuva taivutusmomentti oli hieman suurempi.

Lopulliseksi käyttöasteeksi tuli 87.8% vinon taivutuksen yksinkertaistetulla mitoitus ehdolla, joka on vain pari prosenttia suurempi kuin mitoitusmoduulissa. Osittain tähän vaikuttaa myös pienet erot taivutuskestävyyksien laskennassa, joihin myös betonipeite vaikuttaa.

Kaksikerrosmastopilarin ylemmän sauvan mitoituksessa nurjahduskertoimet olivat y-akselin suhteen 3.142 ja z-akselin suhteen 2.897. Myös tämä sauva voitiin käsitellä SKOL-laskentapohjassa sivusiirtyvänä. Rajahoikkuuden laskennassa tulokset olivat lähes samat mitoitusmoduulin kanssa, virumisasteen arvot olivat muutaman desimaalin suurempia. Normaali voimaksi tässä käytettiin samaa arvoa, kuin mitoitusmoduulissa. Se ei siis aiheuttanut eroavaisuuksia, kuten alemmassa sauvassa. Sauvan rajahoikkuusarvot ylittyivät molemmissa suunnissa.

Mittaepätarkkuudet huomioitiin tässä sauvassa molemmissa suunnissa, kuten mitoitusmoduulissakin, jolloin niiden aiheuttamat lisämomentit olivat täysin samat. Taipuman laskennassa betonipeitteeseen huomioitiin myös reunahaat. Siitä aiheutuva toisen kertaluvun momentit olivat molemmissa suunnissa vain noin 1 kNm suurempia. Tämä johtui virumisasteen laskennan pienistä eroista.

Käyttöasteeksi laskentapohja sai vinon taivutuksen yksinkertaistetulla mitoitus ehdolla 81.8%, joka on noin 1,1% enemmän, kuin mitoitusmoduulissa. Tämä johtuu

enimmäkseen taivutuskestävyyksistä, jotka laskentapohja laskee hieman pienemmiksi molemmissa suunnissa. SKOL -pohja laskee siis käyttöasteen varmemmalle puolelle.

5.3 SWECON mitoitussovellus

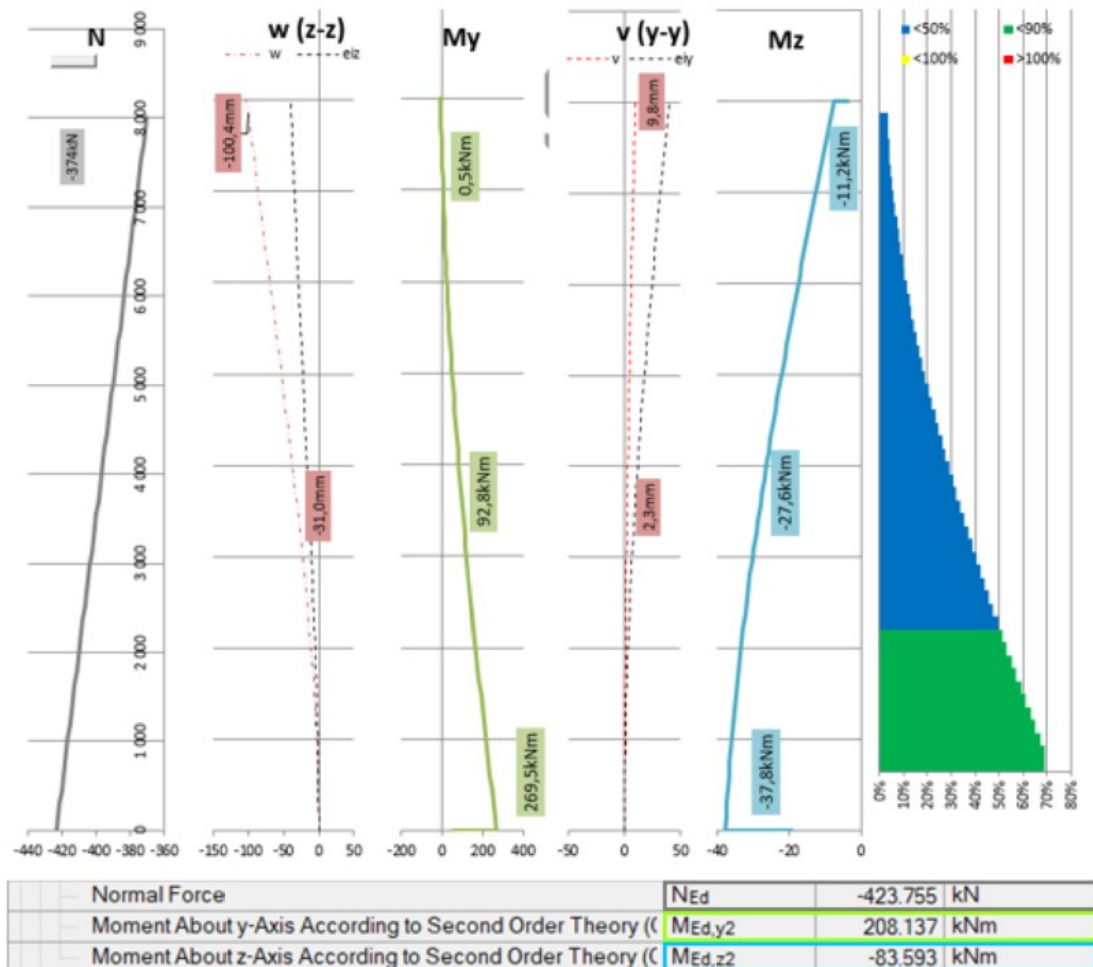
EXCEL-pohjaan tehty SWECON oma mitoitussovellus eroaa muista sovelluksista siten, että se mitoittaa pilarin eurokoodin mukaisella yleisellä menetelmällä. Sovelluksella on mahdollista mitoittaa erilaisia poikkileikkauksia, ja yksi- tai useampikerroksisia pilareita. Poikkileikkaus voi myös muuttua pilarin päiden välillä, joten vertailtava kaksikerrospilari voitiin mitoittaa sovelluksessa sellaisenaan. Raudoitukset annetaan poikkileikkaukseen koordinaateittain ja kuormitustietoihin syötetään niiden ominaisarvot ja osavarmuuskerroimet.

Sovellus laskee poikittaiskuormitusten ja pystykuormien epäkeskisyyksien aiheuttamat taivutusmomentit, jonka jälkeen se selvittää niiden tuottamat käyritymät pituusakselin pisteillä. Tämän jälkeen käyritymät integroidaan taipumiksi. Käyritymien laskennassa sovelletaan materiaalien muodonmuutos/jännitysyhteyksiä. Pilarin taivutuskapasiteettia verrataan kuormitusten ja taipumien aiheuttamiin taivutusmomentteihin, josta saadaan käyttöastediagrammi. Diagrammissa suurin arvo vastaa pilarin käyttöastetta.

Kuormien osavarmuuskerroimet syötettiin RFEM:n laskemien määräävien kuormitusyhdistelmien kertoimien mukaisiksi. Sovellus laskee pilarin omasta painosta syntyvän kuormituksen automaattisesti, joten normaalivoimat annettiin yläpäähän mukaan. Sen osavarmuuskerroin sovelluksessa on 1.35, joka on varmallalla puolella.

Mastopilarin tuulen aiheuttaman z-akselin suuntaisen vaakakuorman ominaisarvo haettiin RFEM:n mallista asettamalla kuorma näkyviin ja tämän jälkeen aktivoimalla "display separately" -asetus. Sama tuulikuorma aiheutti myös y-akselin suunnassa pistekuorman pilarin yläpäähän. Sen suuruus selvitettiin valitsemalla tarkasteltavaksi tulospaneelistä leikkausvoima V_y , joka vastaa yläpäähän tukireaktiota.

Käyttöasteeksi tuli 69%, joka on lähes sama mitoitusmoduulin kanssa. Mitoitusmomentti y-akselin ympäri oli yli 60 kNm suurempi, kun taas z-akselin ympäri noin 46 kNm pienempi.



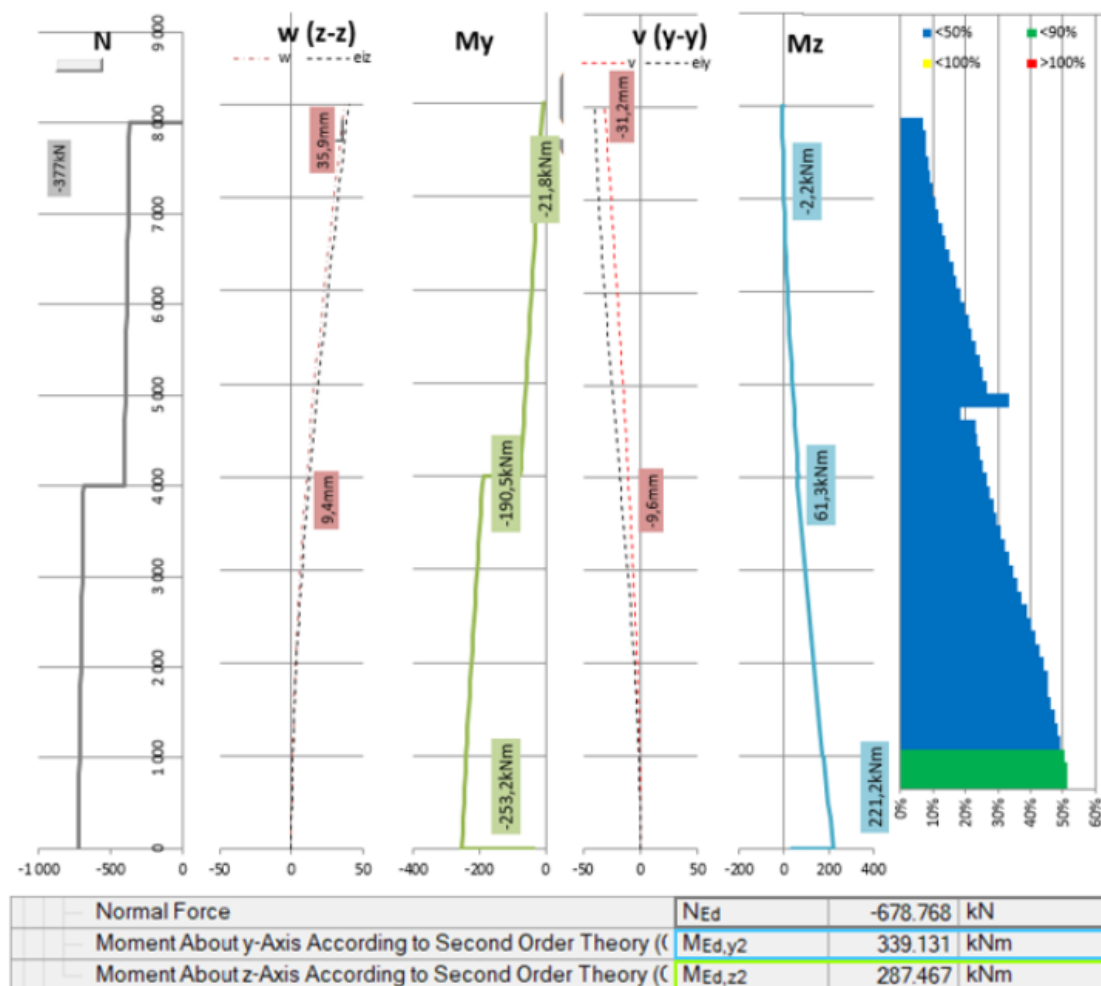
Kuva 19. Swecon mitoitussovelluksen tulokset ylempänä. Alhaalla RFEM:n mitoitusmoduulin tulokset.

Koska poikkileikkauksen molemmat sivut ovat saman pituisia, voitiin akselitkin ajatella sovellusten välillä samansuuntaisiksi.

Kaksikerrosmastopilarin mitoituksessa sauvat saivat eri kuormitustapaukset määrääviksi. Molemmissa kuormitustapauksissa hyötykuorman osavarmuuskertoimeksi tuli 1,5. Lumikuorman osavarmuuskerroin oli kuitenkin 1,5 ylemmässä sauvassa ja alemmassa 1,05. Ylemmän sauvan määräävässä kuormitusyhdistelmässä ei myöskään tuulikuorma

vaikuta ollenkaan, kun taas alemmassa sauvassa se on määräävänä muuttuvana kuormana kertoimella 1,5. Tästä syystä pilari mitoitettiin molemmilla kuormitusyhdistelmillä, joista määrääväksi tuli alemman sauvan kuormitustapaus CO13, jossa tuulikuormakin oli vaikuttavana tekijänä. Eri osavarmuuskertoimien käyttö ja tuulikuorman lisääminen ylempään sauvaan tekee lähtötiedoista poikkeavat sovellusten välillä, joka vaikutti lopulliseen mitoitustulokseen merkittävästi.

Tuulikuorma oli paineesta ja sivusiirtävyydestä johtuvaa, joten kuormitus ei ollut tasaista viivakuormaa. RFEM:ssä voidaan kuitenkin esittää muuttuva viivakuorma ”display separately” -toiminnolla, jonka mukaan kuormitus voitiin syöttää todenmukaisesti myös Swecon mitoitussovellukseen.



Kuva 20. Swecon mitoitussovelluksen tulokset ylempänä. Alempana RFEM:n mitoitusmoduulin tulokset alemmalle sauvalle.

Pilarin poikkileikkauksen suunnat poikkeavat toisistaan sovellusten välillä siten, että mitoitusmoduulissa momentti M_y vastaa Swecon mitoitussovelluksen momenttia M_z . Mitoitusmoduulin momentti M_z taas vastaa Swecon sovelluksen momenttia M_y , mutta niiden merkit ovat päinvastaiset, koska poikkileikkauksen akselien suuntia ei voitu kummassakaan sovelluksessa muuttaa.

Mitoitusmomentit ovat suurimmillaan pilarin alapäässä, mutta sovellusten välillä syntyi huomattavia eroja. Kuten kuvasta 21 nähdään, mitoitusmomentti M_z oli Swecon mitoitussovelluksessa noin 118kNm pienempi ja M_y noin 34kNm pienempi. Käyttöasteeksi koko pilari sai 51%, kun mitoitusmoduulissa se sai alemmalle sauvalle 85,8% ja ylemmälle sauvalle 80,7%.

6 Käytettävyys ja tulosten arviointi

6.1 Menetelmät

Pilarien mitoitukseen käytettiin nimellisen kaarevuuden menetelmää ja yleistä menetelmää. Samaan nimellisen kaarevuuden mitoitusmenetelmään perustuva mitoitusmoduuli ja SKOL-pohja eivät tuottaneet suuria eroavaisuuksia mitoitusmomenteissa tai käyttöasteissa. Poikkeuksena oli mastopilarin mitoitus, jossa merkittäväksi tekijäksi syntyi rakenteen nurjahduspituuden ja sivusiirtyvyyden yhteys. Pienemmät eroavaisuudet johtuivat mitoituksessa käytetyistä lähtöarvoista.

Yleisellä menetelmällä mitoittava Swecon oma sovellus antoi täysin eri tuloksia mitoitusmomenteille. Eurokoodin mukaan yksinkertaistetut menetelmät, kuten nimellisen kaarevuuden menetelmä, antavat tuloksiksi usein suurempia mitoitusmomenteja, jotka ovat varmemmalla puolella. Tämä tuli esille kaksikerrospilarin mitoituksessa. Mastopilarin mitoituksessa kuitenkin toisessa suunnassa taivutusmomentti oli huomattavasti suurempi ja toisessa taas pienempi muiden sovellusten tuloksiin verrattuna.

Pilarien käyttöasteet olivat kaikilla sovelluksilla toteutuskelpoisia mastopilarin SKOL - pohjan mitoitustulosta lukuun ottamatta. Sillekin sivusiirtyvyyden virheilmoituksen

ohittaminen olisi antanut lähes saman käyttöasteen mitoitusmoduulin kanssa. Kaksikerrospilarin huomattavasti pienempi käyttöaste johtui tarkemmasta menettelystä.

6.2 Työkalut

RFEM on kätevä mitoitusohjelma, mutta sen käyttö vie hieman enemmän aikaa muihin mitoitussovelluksiin verrattuna. Siihen on mallinnettava suurempi kokonaisuus ja siihen kohdistuvat kuormat, ennen kuin voidaan mitoittaa rakennuksen yksittäisiä osia. Sillä on kuitenkin helppo tarkastella yksittäisiin rakenteisiin kohdistuvia kuormia ja määrääviä kuormitusyhdistelmiä, mikä myös nopeuttaa laskentaa.

RF-CONCRETE Columns -mitoitusmoduuli sopii hyvin mastopilarin ja monikerrospilarin mitoittamiseen. Tulosteessa otsikointi tapahtuu vaihtelevasti ”akselin suunnassa” tai ”akselin ympäri”, ja parametreilla on jonkin verran eri merkintätapoja eurokoodiin verrattuna, jotka on syytä tiedostaa ennen mitoittamista. Mitoitusmoduulissa esimerkiksi vähimmäisepäkeskisyydelle käytetään parametria e_{min} , kun taas SKOL-pohjassa sille on eurokoodin mukainen merkintä e_0 . Muuten tuloste on selkeä.

Nurjahduskertoimien selvittämiseen käytetty RF-STABILITY-moduuli osoittautui käteväksi työkaluksi. Sen laskemat kertoimet poikkesivat huomattavasti eurokoodin suuntaa antavista suositusarvoista.

Etuna mitoitusmoduulin käytössä on se, että raudoituksille voi syöttää useita eri paksuuksia, joista ohjelma laskee rakenteelle sopivimman ratkaisun. SKOL-pohjassa taas on arvattava alustava raudoitus, jonka toimivuutta tarkastellaan mitoituksen edetessä. Raudoitukset voidaan myös asettaa mitoitusmoduulissa nipuiksi, joka ei SKOL:ssa ole mahdollista. SKOL-pohja soveltuu sivusiirtymättömän rakenteen mitoitukseen, mutta sivusiirtyvälle rakenteelle vain alustavaan mitoitukseen.

Mitoitusmoduulilla ja SKOL-pohjalla mitoitetaan monikerrospilarin sauvat erikseen, kun taas Swecon omalla mitoitussovelluksella voidaan koko pilari mitoittaa kerralla. Swecon mitoitussovelluksen käyttö on välillä hieman hidasta ja sen lähtötietoja syötettäessä on otettava automaattilaskenta pois päältä.

7 Yhteenveto

Nimellisen kaarevuuden menetelmää käyttävien sovellusten kanssa nurjahduskertoimien ja sivusiirtävyyden välinen yhteys vaikutti merkittävästi mitoituksen kulkuun ja lopputulokseen mastopilarin mitoituksessa SKOL-pohjalla. Jos rakennetta ei tarkastele nurjahduskertoimien takia sivusiirtävänä, sen ensimmäisen kertaluvun momenttien laskenta etenee eri tavalla. Myös rajahoikkuusluku saa suurempia arvoja sivusiirtymättömälle rakenteelle, eikä tällöin välttämättä toisen kertaluvun vaikutuksia tarvitse huomioida mitoituksessa ollenkaan. Taulukosta 9 selviää toisen kertaluvun momenttien puuttumisen vaikutus mitoitusmomenttiin ja käyttöasteeseen.

Taulukko 9. SKOL -pohjassa ei huomioitu toisen kertaluvun vaikutuksia mastopilarille.

Mastopilari	SKOL B3	Mitoitusmoduuli	Swecon sovellus
Mitoitusmomentti M_y	133,1 kNm	208,1 kNm	269,5 kNm
Mitoitusmomentti M_z	19,6 kNm	83,6 kNm	37,8 kNm
Käyttöaste	37,30 %	68,80 %	69,00 %

Eurokoodin mukaan mittaepätarkkuuksien huomiointi riittää rasitetummassa suunnassa. Ne voidaan kuitenkin ottaa huomioon myös molemmissa suunnissa, joka on varmemmalla puolella. Mitoitusmoduuli toimii tällä tavalla automaattisesti, kun taas SKOL-pohjassa tarkasteltavat suunnat valitaan itse. SKOL-pohjalla mitoitettaessa kaksikerrospilarin alemmaa sauvaa mitoitusmomentti M_y jäi pienemmäksi mitoitusmoduuliin verrattuna, koska siihen ei mittaepätarkkuuksia huomioitu. Mitoitusmomenttiin M_z molemmat sovellukset huomioivat mittaepätarkkuudet, mutta SKOL-pohjassa käytetty suurempi normaalivoima, sekä taipuma kasvattivat sitä.

Taulukko 10. Mittaepätarkkuuksien, normaalivoiman ja taipuman aiheuttamat erot.

2-krs. pilarin alempi sauva	SKOL B3	Mitoitusmoduuli
Mitoitusmomentti M_y	275,1 kNm	287,5 kNm
Mitoitusmomentti M_z	349,3 kNm	339,1 kNm
Käyttöaste	87,80 %	85,80 %

Sovellusten lähtötietojen pienet eroavaisuudet vaikuttivat myös mitoitustuloksiin. Betoni-
peitteenä käytettiin 30 mm paksuutta, mutta ne on osattava sovelluksissa asettaa oikein.

CONCRETE Columns -mitoitusmoduuli ei huomioi siihen reunahakoja toisin kuin SKOL-pohja. Kahdeksan millimetrin ero betonipeitteessä pienensi mitoitusmoduulin taipumaa muutamalla millimetrillä laskettaessa kaksikerrospilarin alemmaa sauvaa. Mitoitusmoduulissa käytetty alhaisempi betonipeite kasvatti myös taivutuskestävyyttä, joka taas pienensi käyttöastetta.

Kaksikerrospilarin alemman sauvan mitoituksessa mitoitusmoduuli ei huomioinut normaalivoimaan pilarin omaa painoa. SKOL-pohjassa se huomioitiin, joka kasvatti mitoitusmomenttia, kuten taulukosta 10 nähdään. Samasta syystä myös suhteellinen normaalivoima ja sitä hyödyntävät kaavat saivat eri arvoja.

Käyttörajatilan pitkäaikaisen momentin ja Murtorajatilan momenttien suhde oli mitoitusmoduulissa laskettu tarkasti, kun SKOL-pohjassa käytettiin valmiiksi syötettyä arvoa $1/1,35$. SKOL-pohjan käyttämä arvo on varmalla puolella ja se kasvatti hieman toisen kertaluvun momenttia vaikuttamalla teholliseen virumisasteeseen. Samasta syystä myös SKOL-pohjan rajahoikkuusluvut olivat hieman suurempia, mutta tämä ei vaikuttanut toisen kertaluvun momenttien huomiointiin laskennassa.

Sekä mitoitusmoduuli että SKOL-pohja laskivat käyttöasteet vinon taivutuksen yksinkertaistetulla mitoitusehdolla. Erona ohjelmien välillä on se että SKOL-pohja laskee käyttöasteen aina kyseisellä ehdolla, mutta mitoitusmoduuli tekee myös hoikkuuksien ja suhteellisten epäkeskisyyksien ehtojen tarkistukset. Mikäli ehdot eivät täyty, ei mitoitusmoduulin tarvitse yksinkertaistettua mitoitusehtoa käyttää. SKOL-pohjan menettelyllä käyttöaste on kuitenkin aina varmalla puolella.

SKOL-pohja ei huomioi sauvan pään momentteihin mittaepätarkkuuksia ekvivalentin vakiomomentin laskennassa. Se lasketaan vain sivusiirtymättömissä rakenteissa, mutta tällöin laskukaavan pienennyskertoimet eivät vaikuta mittaepätarkkuuksiin ja ne jäävät hieman suuremmiksi. Tämä on kuitenkin varmalla puolella.

Mitoitusmoduuli sopii hyvin työssä tutkittujen pilarien mitoitukseen, kun taas SKOL-laskentapohjan käyttö soveltuu vain alustavaan mitoitukseen sivusiirtyvyyden määrittelyn takia.

Kaksikerrospilarin ylemmän sauvan tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan SKOL-pohjan ja mitoitusmoduulin välillä. Marginaaliset erot johtuivat taivutuskestävyyksistä, jotka mitoitusmoduuli laski hieman tarkemmin.

Taulukko 11. Kaksikerrospilarin ylempi sauva SKOL -pohjassa ja mitoitusmoduulissa

2-krs. pilarin ylempi sauva	SKOL B3	Mitoitusmoduuli
Mitoitusmomentti My	228,8 kNm	227,7 kNm
Mitoitusmomentti Mz	108,6 kNm	107,7 kNm
Käyttöaste	81,80 %	80,70 %

Swecon omalla pohjalla kaksikerrospilari mitoitettiin kerralla ja sen kuormien ominaisarvot poikkesivat muilla sovelluksilla käytetyistä arvoista, koska sen sauvoilla oli eri kuormitustapaukset määräävinä. Alemman sauvan kuormitustapaus osoittautui määrääväksi tapaukseksi ja sen vaikutuksesta kuormitukset ja niiden osavarmuuskertoimet olivat erilaiset myös ylemmän sauvan kohdalla. Tarkempana menetelmänä yleinen menetelmä antoi käyttöasteeksi alhaisemman arvon. Mastopilarin käyttöaste pysyi lähes samana mitoitusmoduulin kanssa, mutta sen mitoitusmomenteissa rasiitetumpi suunta sai suurempia arvoja ja vähemmän rasiitettu suunta pienempiä arvoja. Tämä herättää kysymyksiä sovelluksen tarkkuudesta, koska yleisellä menetelmällä mitoitusmomenteista pitäisi tulla hieman pienempiä.

Taulukko 12. Kaksikerrospilarin mitoitusmomentit ja käyttöaste.

2-krs. pilari molemmat sauvat	Swecon sovellus
Mitoitusmomentti My	253,2 kNm
Mitoitusmomentti Mz	221,2 kNm
Käyttöaste	51,00 %

Swecon oman pohjan etuna on kuitenkin se, että monikerrospilari voidaan mitoittaa kerralla, joka taas nopeuttaa mitoitusprosessia huomattavasti. Alhaisemmat käyttöasteet mahdollistavat myös pienempien rauditusmäärien käytön, joka parantaa kustannustehokkuutta.

Lähteet

- 1 SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. 2015. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.
- 2 Nykyri, Pekka. 2013. BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
- 3 Nykyri, Pekka. 2014. BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
- 4 Kalliomäki, Jouni. 2018. Rakenteiden mekaniikan perusteet. Luentoaineisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 5 Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan, Osa 5. Pilarit. 2009. Verkkoaineisto. Betonteollisuus. <<https://www.eurocodes.fi/betonirakenteet/betonirakenteisiin-liittyva-sahkoinen-materiaali/>>. Luettu 12.12.2020.

Mastopilari: Mitoitusmoduulin ja SKOL-pohjan vertailu

Nurjahduskertoimet:

Member No.	A		B	C	D	E		F	G		H	I
	Node No.		Length L [m]	E-vector No.	Effective Length [m]		Effective Length Factor [-]		Critical Load N_{cr} [kN]			
	Start	End			$L_{cr,y}$	$L_{cr,z}$	$k_{cr,y}$	$k_{cr,z}$				
3	5	6	8.000	1	12.279	12.279	1.535	1.535	10135.100			
				2	11.319	11.319	1.415	1.415	11927.400			
				3	9.878	9.878	1.235	1.235	15662.200			
				4	5.571	5.571	0.696	0.696	49238.900			

Member No.	A	B	Cuckling About Axis y				Cuckling About Axis z						
	Length l [m]	Possible	Unbraced	Auto	β_y [-]	$l_{0,y}$ [m]	λ_y [-]	Possible	Unbraced	Auto	β_z [-]	$l_{0,z}$ [m]	λ_z [-]
3	8.000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.535	12.280	88.6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.415	11.320	81.7

Alapään momentit:

Member No.	A	B	C	D	E			F			G			H			I
	Node No.	Location x [m]		N	Forces [kN]			Moments [kNm]			M _T		M _y		M _z		
					V _y	V _z											
3	5	0.000	max N	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8							
			min N	-465.79	2.82	26.44	0.02	-42.25	22.58	CO 6							
			max V _y	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9							
			min V _y	-423.75	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 12							
			max V _z	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9							
			min V _z	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8							
			max M _T	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8							
			min M _T	-465.79	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	CO 7							
			max M _y	-325.39	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 8							
			min M _y	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9							
			max M _z	-325.41	4.71	44.07	0.03	-70.41	37.65	CO 9							
			min M _z	-423.75	-1.39	-43.11	2.79	123.86	-11.10	CO 12							

Virumaluvuksi excellin määrittämä arvo:

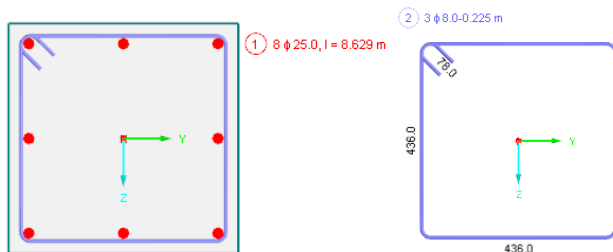
$$\varphi(t, t_0) = 1,963$$

Section No.	A	B	C	D
	Material No.	Cross-Section Description [mm]	Notes	Creep Coefficient
9	7	Rectangle 480/480		1.9630 ...

Käyttöaste RFEM:

Member No.	A	B	C		D	E
	Location x [m]	Governing Load Case	Design Ratio	Criteria		Design Comment
3	Cross-Section No. 9 - Rectangle 480/480					
	0.000	RC1 - max M _y	0.6878	≤ 1	100	Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8
	8.000	RC1 - max N	0.0365	≤ 1	201	Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (2) with (6.4)
	0.250	RC1 - min N	0.3926	≤ 1	202	Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (1)
	0.000	CO22 - min N	0.3251	≤ 1	100	Fire Resistance - Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8

Tulos: pääteräket 8T25 & haat T8 k375



Tulosten vertailu:

<input type="checkbox"/> Governing Load			
<input type="checkbox"/> Normal Force	N	-423.755	kN
<input type="checkbox"/> Moment About y-Axis	M_y	123.856	kNm
<input type="checkbox"/> Moment About z-Axis	M_z	-11.104	kNm
<input type="checkbox"/> Effective Length According to 5.8.3.2			
<input type="checkbox"/> Effective Length About Axis y			
<input type="checkbox"/> Column Length	l_y	8.000	m
<input type="checkbox"/> Buckling Coefficient	β_y	1.5350	
<input type="checkbox"/> Effective Length About Axis z			
<input type="checkbox"/> Column Length	l_z	8.000	m
<input type="checkbox"/> Buckling Coefficient	β_z	1.4150	
<input type="checkbox"/> Slenderness According to 5.8.3.2			
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis y			
<input type="checkbox"/> Effective Length	$l_{0,y}$	12.280	m
<input type="checkbox"/> Radius of Gyration	i_y	138.6	mm
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis z			
<input type="checkbox"/> Effective Length	$l_{0,z}$	11.320	m
<input type="checkbox"/> Radius of Gyration	i_z	138.6	mm

MRT - Murtorajatilan voimasuureet [kN] ja [kNm]				
Puristus = (+)	Yläpää (top)		Alapää (btm)	
Veto = (-)	$M_{0yy,top}$	$M_{0zz,top}$	$M_{0yy,btm}$	$M_{0zz,btm}$
N_{Ed} [kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
423,76	0	0	123,86	-11,1

$i_{yy} =$	138,6	$\lambda_{yy} =$	88,6	$L_{0,yy} =$	12280,0	mm
$i_{zz} =$	138,6	$\lambda_{zz} =$	81,7	$L_{0,zz} =$	11320,0	mm

Ylempänä mitoitusmoduulin tuloksia, alempana SKOL-pohjan tuloksia.

☐ Limiting Slenderness According to 5.8.3.1 (1)			
☐ Limiting Slenderness About Axis y	$\lambda_{lim,y}$	62.0070	
☐ Factor A	A_y	0.9810	
☐ Consider effects of creep?		Yes	
☐ Effective Creep Coefficient	$\varphi_{ef,y}$	0.0967	
Final value of creep coeff.	$\varphi(\infty,t_0)$	1.9630	
☐ Condition for neglecting creep fulfilled?		Failed	
Final value of creep coeff. is less than or equal to two?	$\varphi(\infty,t_0) \leq 2.0$	Passed	
Slenderness about y-axis less than or equal to 75?	$\lambda_y \leq 75$	Failed	
Eccentricity in ULS higher as thickness of cross-section	$M_{y,0Ed}/N_{Ed} \geq h$	Failed	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,y}$	6.552	kNm
Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-301.814	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c-quasi,1,z}$	21.7	mm
Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,z}$	0.0	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm
Load		RC4	
☐ Moment About Axis y (First Ord. Th)	$M_{c,1,y}$	133.055	kNm
Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c,1,z}$	314.0	mm
Intended Eccentricity	$e_{c,0,z}$	292.3	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm

$$A_{yy} = 1/(1+0.2*\varphi_{ef,yy})$$

Virumisaste: $\varphi_{ef,yy} = \varphi(t,t_0)*(M_{0Eqp,yy}/M_{0Ed,yy})$

KRT pitkäaikaisen ja MRT momentin suhde, RFEM laskee arvoksi:

$$M_{c-quasi,1} / M_{c,1} = 6,552\text{kNm} / 133,055\text{kNm} = \mathbf{0,049}$$

→ Kerrottuna virumaluvulla saadaan virumisaste: $0,049 * 1,963 = \mathbf{0,967}$

$M_{0Eqp,yy}/$	
$M_{0Ed,yy}$	$\varphi_{ef,yy}$
0,74	1,45

Excelissä momenttien suhteen oletuksena on $1 / 1,35 = \mathbf{0,74}$ → **Merkittävä ero**

☐ Factor B	B_y	1.2860	
☐ Mechanical Reinforcement Ratio	ω	0.3269	
Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$B = \boxed{1,29}$$

$$B = (1+2*\omega)^{0.5}$$

<input type="checkbox"/> Factor C	C_y	0.7000	
<input type="checkbox"/> Moment Ratio	$r_{m,y}$	1.0000	
Column is unbraced, $r_{m,y}$ is set to 1.0.			
<input type="checkbox"/> Relative Normal Force	n	0.0811	
Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$C_{yy} = 1.7 - r_{m,yy}$$

$$r_{m,yy} = \begin{cases} 1 & \text{jos rakenne on sivusiirtävä (mastopilari)} \\ 1 & \text{jos } M_{02,yy} + e_{i,zz} * N_{Ed} = 0 \\ (M_{01,yy} + e_{i,zz} * N_{Ed}) / (M_{02,yy} + e_{i,zz} * N_{Ed}) & \text{muussa tapauksessa} \end{cases}$$

Excelillä ei voi laskea pilaria sivusiirtävänä jos nurjahduskertoimet ovat alle 2. Tämä vaikuttaa sauvan **päiden momenttien suhteen** laskentaan.

N_{Ed} [kN]	n	A_{yy}	$r_{m,yy}$	C_{yy}	$\lambda_{lim,yy}$	λ_{yy}	$\lambda_{yy} > \lambda_{lim,yy}$
423,8	0,08	0,77	0,07	1,63	114,1	88,6	Ei-hoikka

RFEM laskee hoikaksi (rajahoikkuus 62), EXCEL ei (rajahoikkuus 114,1).

<input type="checkbox"/> Limiting Slenderness About Axis z	$\lambda_{lim,z}$	56.3686	
<input type="checkbox"/> Factor A	A_z	0.8918	
Consider effects of creep?		Yes	
<input type="checkbox"/> Effective Creep Coefficient	$\varphi_{ef,z}$	0.6065	
Final value of creep coeff.	$\varphi(\infty, t_0)$	1.9630	
<input type="checkbox"/> Condition for neglecting creep fulfilled?		Failed	
Final value of creep coeff. is less than or equal to two?	$\varphi(\infty, t_0) \leq 2.0$	Passed	
Slenderness about z-axis less than or equal to 75?	$\lambda_z \leq 75$	Failed	
Eccentricity in ULS higher as thickness of cross-section	$M_{z,0Ed} / N_{Ed} \geq h_y$	Failed	
<input type="checkbox"/> Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,z}$	-6.050	kNm
Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-301.814	kN
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	$e_{c-quasi,1,y}$	-20.0	mm
Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,y}$	0.0	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-20.0	mm
Load		RC4	
<input type="checkbox"/> Moment About Axis z (First Ord. Th)	$M_{c,1,z}$	-19.584	kNm
Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	$e_{c,1,y}$	-46.2	mm
Intended Eccentricity	$e_{c,0,y}$	-26.2	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-20.0	mm

$$A_{zz} = 1 / (1 + 0.2 * \varphi_{ef,zz})$$

Virumisaste: $\varphi_{ef,zz} = \varphi(t, t_0) * (M_{0Eqp,zz} / M_{0Ed,zz})$

KRT pitkäaikaisen ja MRT momentin suhde, RFEM:n mukaan

$$M_{c-quasi,1} / M_{c,1} = -6,050\text{kNm} / -19,584\text{kNm} = \mathbf{0,309}$$

→ Kerrottuna virumaluvulla saadaan virumisaste: $0,309 * 1,963 = \mathbf{0,606}$

$M_{0Eqp,zz} / M_{0Ed,zz}$	$\Psi_{ef,zz}$
0,74	1,45

Excelissä momenttien suhteen oletuksena on $1 / 1,35 = 0,74 \rightarrow$ **Merkittävä ero**

<input type="checkbox"/> Factor B	B_z	1.2860	
<input type="checkbox"/> Mechanical Reinforcement Ratio	ω	0.3269	
<input type="checkbox"/> Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
<input type="checkbox"/> Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
<input type="checkbox"/> Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
<input type="checkbox"/> Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$B = \boxed{1,29}$$

$$B = (1+2*\omega)^{0.5}$$

Sama molemmissa suunnissa.

<input type="checkbox"/> Factor C	C_z	0.7000	
<input type="checkbox"/> Moment Ratio	$r_{m,z}$	1.0000	
<input type="checkbox"/> Column is unbraced, $r_{m,z}$ is set to 1.0.			
<input type="checkbox"/> Relative Normal Force	n	0.0811	
<input type="checkbox"/> Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
<input type="checkbox"/> Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
<input type="checkbox"/> Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$C_{zz} = 1.7 - r_{m,zz}$$

$$r_{m,zz} = \begin{cases} 1 & \text{jos rakenne on sivusiirtävä (mastopilari)} \\ 1 & \text{jos } M_{02,zz} + e_{i,yy} * N_{Ed} = 0 \\ (M_{01,zz} + e_{i,yy} * N_{Ed}) / (M_{02,zz} + e_{i,yy} * N_{Ed}) & \text{muussa tapauksessa} \end{cases}$$

Excelillä ei voi laskea pilaria sivusiirtävänä jos nurjahduskertoimet ovat alle 2. Tämä vaikuttaa sauvan **päiden momenttien suhteen** laskentaan.

N_{Ed} [kN]	n	A_{zz}	$r_{m,zz}$	C_{zz}	$\lambda_{lim,zz}$	λ_{zz}	$\lambda_{zz} > \lambda_{lim,zz}$
423,8	0,08	0,77	0,43	1,27	89	81,7	Ei-hoikka

RFEM laskee hoikaksi (rajahoikkuus 56,4), EXCEL ei (rajahoikkuus 89).

<input type="checkbox"/> Design Type			
<input type="checkbox"/> Conditions of standard design according to 5.8.3.1 (1)			
<input type="checkbox"/> Condition About Axis y	$\lambda_y \leq \lambda_{lim,y}$	Failed	
<input type="checkbox"/> Provided Slenderness	λ_y	88.6233	
<input type="checkbox"/> Limiting Slenderness About Axis y	$\lambda_{lim,y}$	62.0070	
<input type="checkbox"/> Condition About Axis z	$\lambda_z \leq \lambda_{lim,z}$	Failed	
<input type="checkbox"/> Provided Slenderness	λ_z	81.6951	
<input type="checkbox"/> Limiting Slenderness About Axis z	$\lambda_{lim,z}$	56.3686	
<input type="checkbox"/> Condition of standard design fulfilled?		Failed	

$\lambda_{lim,yy}$	λ_{yy}	$\lambda_{yy} > \lambda_{lim,yy}$
114,1	88,6	Ei-hoikka

$\lambda_{lim,zz}$	λ_{zz}	$\lambda_{zz} > \lambda_{lim,zz}$
89	81,7	Ei-hoikka

<input type="checkbox"/> Eccentricities			
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity According to 5.8.8.2			
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity in z-Direction	$e_{0,z}$	292.3	mm
<input type="checkbox"/> Moment Diagram Along the Support	Diagram M_y	Different	
<input type="checkbox"/> Moment About Axis y	M_y	123.856	kNm
<input type="checkbox"/> Absolute Normal Force	$ N $	423.755	kN
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity in y-Direction	$e_{0,y}$	-26.2	mm
<input type="checkbox"/> Moment Diagram Along the Support	Diagram M_z	Different	
<input type="checkbox"/> Moment About Axis z	M_z	-11.104	kNm
<input type="checkbox"/> Absolute Normal Force	$ N $	423.755	kN

<input type="checkbox"/> Eccentricity due to imperfection according to 5.2			
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection in z-Direction	$e_{i,z}$	21.7	mm
<input type="checkbox"/> Inclination	$\Theta_{i,z}$	0.0035	
<input type="checkbox"/> Basic Value of Inclination	Θ_0	0.0050	
<input type="checkbox"/> Reduction Factor for Column Height	$\alpha_{h,z}$	0.7071	
<input type="checkbox"/> Calculated Value of Reduction Coefficient	$\alpha_{h,z,calc}$	0.7071	
<input type="checkbox"/> Column Length	l_y	8.000	m
<input type="checkbox"/> Reduction Factor for Column Number	α_m	1.0000	
<input type="checkbox"/> According to user specification, the column will be designed as a single column.			
<input type="checkbox"/> Buckling Length	$l_{0,y}$	12.280	m
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection in y-Direction	$e_{i,y}$	-20.0	mm
<input type="checkbox"/> Inclination	$\Theta_{i,y}$	0.0035	
<input type="checkbox"/> Basic Value of Inclination	Θ_0	0.0050	
<input type="checkbox"/> Reduction Factor for Column Height	$\alpha_{h,y}$	0.7071	
<input type="checkbox"/> Calculated Value of Reduction Coefficient	$\alpha_{h,y,calc}$	0.7071	
<input type="checkbox"/> Column Length	l_z	8.000	m
<input type="checkbox"/> Reduction Factor for Column Number	α_m	1.0000	
<input type="checkbox"/> According to user specification, the column will be designed as a single column.			
<input type="checkbox"/> Buckling Length	$l_{0,z}$	11.320	m

$$\theta_0 = \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{283}$$

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_m * \alpha_h$$

$$m = 1$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\alpha_m = [0,5 * (1 + 1/m)]^{0,5}$$

$$L = 8,0 \text{ m}$$

$$\alpha_h = 0,707$$

$$\alpha_h = 2/(L)^{0,5}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1$$

$$e_{i,zz} = 21,7 \text{ mm}$$

$$e_{i,yy} = 20,0 \text{ mm}$$

$$e_{i,zz} = \theta_i * L_{0,yy} / 2$$

$$e_{i,yy} = \theta_i * L_{0,zz} / 2$$

☐ Minimum Eccentricity According to 6.1 (4)			
☐ Minimum Eccentricity in z-Direction	$e_{min,z}$	20.0	mm
☐ Thickness of Structural Member	$h_{w,z}$	480.0	mm
☐ Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20 \text{ mm},z}$	20.0	mm
☐ Minimum Eccentricity in y-Direction	$e_{min,y}$	-20.0	mm
☐ Thickness of Structural Member	$h_{w,y}$	480.0	mm
☐ Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20 \text{ mm},y}$	20.0	mm

$$e_{0,yy} = 20,00 \text{ mm}$$

$$e_{0,yy} = \text{MAX}(20\text{mm} ; B/30)$$

$$e_{0,zz} = 20,00 \text{ mm}$$

$$e_{0,zz} = \text{MAX}(20\text{mm} ; H/30)$$

☐ Moments According to First Order Theory			
☐ Moments According to First Order Theory			
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Moment About Axis y	$M_{Ed,1,y}$	133.055	kNm
☐ Calculated Total Eccentricity in z-Direction	$e_{calc,1,z}$	314.0	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	292.3	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm
☐ Moment About Axis z	$M_{Ed,1,z}$	-19.584	kNm
☐ Calculated Total Eccentricity in y-Direction	$e_{calc,1,y}$	-46.2	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	-26.2	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-20.0	mm

Mitoitusmoduuli laskee epäkeskisyydet e_0 ja e_i yhteen ja kertoo summan normaalivoimalla.

$$M_{Ed,1,y} = 0,314\text{m} * 423,755\text{kN} = \mathbf{133,05\text{kNm}}$$

$$M_{Ed,1,z} = -0,0462\text{m} * 423,755\text{kN} = \mathbf{-19,58\text{kNm}}$$

Excelissä eri menetelmä, koska sauvaa ei käsitellä sivusiirtävänä:

$$M_{01,yy} = \text{MIN} (IM_{0yy,top} ; IM_{0yy,btm})$$

$$M_{01,zz} = \text{MIN} (IM_{0zz,top} ; IM_{0zz,btm})$$

$$M_{02,yy} = \text{MAX} (IM_{0yy,top} ; IM_{0yy,btm})$$

$$M_{02,zz} = \text{MAX} (IM_{0zz,top} ; IM_{0zz,btm})$$

$$M_{0e,yy} = \text{MAX} \begin{cases} 0.6 * M_{02,yy} + 0.4 * M_{01,yy} \\ 0.4 * M_{02,yy} \end{cases}$$

$$M_{0e,zz} = \text{MAX} \begin{cases} 0.6 * M_{02,zz} + 0.4 * M_{01,zz} \\ 0.4 * M_{02,zz} \end{cases}$$

Y-Y akselin ympäri

Z-Z akselin ympäri

Ehto:

$M_{01,yy}$ [kNm]	$M_{02,yy}$ [kNm]	$M_{0e,yy}$ [kNm]	$M_{01,zz}$ [kNm]	$M_{02,zz}$ [kNm]	$M_{0e,zz}$ [kNm]
0,0	123,9	74,3	0,0	11,1	6,7

$IM_{02,yy} \geq IM_{01,yy}$
 $IM_{02,zz} \geq IM_{01,zz}$

Z-akselin ympäri:

$$M_{01} = \min(M_{ylä}; M_{ala}) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{ala}) = 11,104 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_{0e} = \max(0,6M_{02} + 0,4M_{01}; 0,4M_{02}) = 6,66 \text{ kNm}$$

$$+ \text{ epäkeskisyys } 0,020 \text{ m} \cdot 423,755 \text{ kN} = 8,48 \text{ kNm}$$

$$6,66 + 8,48 = \mathbf{15,1 \text{ kNm}}$$

Y-akselin ympäri:

$$M_{01} = \min(M_{ylä}; M_{ala}) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{ala}) = 123,856 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_{0e} = \max(0,6M_{02} + 0,4M_{01}; 0,4M_{02}) = 74,31 \text{ kNm}$$

$$+ \text{ epäkeskisyys } 0,0217 \text{ m} \cdot 423,755 \text{ kN} = 9,2 \text{ kNm}$$

$$74,3 + 9,2 = \mathbf{83,5 \text{ kNm}}$$

Nämä eivät kuitenkaan mitoitusmomentin ehdoissa jää määrääviksi, vaan siinä suurin mitoitusmomentti syntyy samalla ehdolla, kuin mitoitusmoduulissa ilman toisen kertaluvun vaikutuksia.

☐ Separate Design in Each Principal Direction According to 5.8.9			
☐ Condition 5.38a			Passed
☐ Slenderness Ratio		λ_y/λ_z	1.0848
☐	Slenderness About Axis y	λ_y	88.6233
☐	Slenderness About Axis z	λ_z	81.6951
☐ Slenderness Ratio		λ_z/λ_y	0.9218
☐	Slenderness About Axis y	λ_y	88.6233
☐	Slenderness About Axis z	λ_z	81.6951

<input type="checkbox"/> Condition 5.38b		Failed	
<input type="checkbox"/> Imperfections in secondary direction are omitted acc. to 5.8.9 (2)			
<input type="checkbox"/> Ratio of Relative Eccentricities	$(e_y/h_{eq})/(e_z/b)$	0.3609	
<input type="checkbox"/> Eccentricity in z-Direction	e_z	491.2	mm
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	292.3	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,z}$	177.2	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	e_y	-197.3	mm
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	-26.2	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	0.0	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,y}$	-151.1	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Height	h_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Width	b_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Ratio of Relative Eccentricities	$(e_z/b_{eq})/(e_y/h)$	2.7710	
<input type="checkbox"/> Eccentricity in z-Direction	e_z	491.2	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	e_y	-197.3	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Height	h_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Width	b_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Separate design in each principal direction possible?		Failed	

Excel ei näitä tarkasta, vaan käyttää käyttöasteen määrittämiseen lopuksi vinon taivutuksen kaavaa.

Excel ei toisen kertaluvun vaikutuksia huomioi mitoitusmomentteihin, koska rajahoikkuusarvot ei ylity kummassakaan suunnassa.

☐ Moments According to Second Order Theory			
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th. According to 5.8.8.2(3)			
☐ Eccentricity Through Second Order Theory in z-Direction	$e_{2,z}$	177.2	mm
☐ Curvature in z-plane	$1/r_z$	0.012	1/m
☐ Selected Factor (Normal Force)	sel $K_{r,z}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Normal Force)	$K_{r,z}$	1.3440	
☐ Max. Ultimate Limit State	η_u	1.3269	
☐ Ratio	ω	0.3269	
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	8	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Relative Normal Force	n	0.0811	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Resistant Concrete Normal Force (Bending)	n_{bal}	0.4000	
☐ Selected Factor (Creep)	sel $K_{\phi,z}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Creep)	$K_{\phi,z}$	0.9961	
☐ Factor	β_y	-0.041	
☐ Char. Concrete Compressive Strength	f_{ck}	40.00	N/mm ²
☐ Slenderness About Axis y	λ_y	88.6233	
☐ Effective Creep Coefficient	$\phi_{ef,y}$	0.0967	
☐ Final value of creep coeff.	$\phi(\infty,t_0)$	1.9630	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,y}$	6.552	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-301.814	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c-quasi,1,z}$	21.7	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,z}$	0.0	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis y (First Ord. Th)	$M_{c,1,y}$	133.055	kNm
☐ Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c,1,z}$	314.0	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{c,0,z}$	292.3	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm
☐ Curvature in z-plane	$1/r_{0,z}$	0.012	1/m
☐ Strain (Yield Stress)	ϵ_{yd}	2.17	‰
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Modulus of Elasticity	E_s	200000.00	N/mm ²
☐ Effective Depth	d_z	411.2	mm
☐ Buckling Length	$l_{0,y}$	12.280	m
☐ Factor (Curvature Distribution)	c	9.8696	

☐ Eccentricity Through Second Order Theory in y-Direction	$e_{2,y}$	-151.1	mm
☐ Curvature in y-plane	$1/r_y$	0.012	1/m
☐ Selected Factor (Normal Force)	sel $K_{r,y}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Normal Force)	$K_{r,y}$	1.3440	
☐ Max. Ultimate Limit State	n_u	1.3269	
☐ Ratio	ω	0.3269	
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	8	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Relative Normal Force	n	0.0811	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Resistant Concrete Normal Force (Bending)	n_{bal}	0.4000	
☐ Selected Factor (Creep)	sel $K_{\phi,y}$	1.0033	
☐ Calculated Factor (Creep)	$K_{\phi,y}$	1.0033	
☐ Factor	β_z	0.005	
☐ Char. Concrete Compressive Strength	f_{ck}	40.00	N/mm ²
☐ Slenderness About Axis z	λ_z	81.6951	
☐ Effective Creep Coefficient	$\phi_{ef,z}$	0.6065	
☐ Final value of creep coeff.	$\phi(\infty,t_0)$	1.9630	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,z}$	-6.050	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-301.814	kN
☐ Eccentricity in y-Direction	$e_{c-quasi,1,y}$	-20.0	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,y}$	0.0	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-20.0	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis z (First Ord. Th)	$M_{c,1,z}$	-19.584	kNm
☐ Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Eccentricity in y-Direction	$e_{c,1,y}$	-46.2	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{c,0,y}$	-26.2	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-20.0	mm
☐ Curvature in y-plane	$1/r_{0,y}$	0.012	1/m
☐ Strain (Yield Stress)	ϵ_{yd}	2.17	‰
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Modulus of Elasticity	E_s	200000.00	N/mm ²
☐ Effective Depth	d_y	411.2	mm
☐ Buckling Length	$l_{0,z}$	11.320	m
☐ Factor (Curvature Distribution)	c	9.8696	

☐ Moments According to Second Order Theory			
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Moment About Axis y	$M_{Ed,y2}$	208.137	kNm
☐ Total Eccentricity in z-Direction	$e_{2,tot,z}$	491.2	mm
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,z}$	177.2	mm
☐ Eccentricity (First Ord. Th.) in z-Direction	$e_{1,z}$	314.0	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	292.3	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	21.7	mm
☐ Minimum Eccentricity in z-Direction	$e_{min,z}$	20.0	mm
☐ Thickness of Structural Member	$h_{w,z}$	480.0	mm
☐ Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20\text{ mm},z}$	20.0	mm
☐ Moment About Axis z	$M_{Ed,z2}$	-83.593	kNm
☐ Total Eccentricity in y-Direction	$e_{2,tot,y}$	-197.3	mm
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,y}$	-151.1	mm
☐ Eccentricity (First Ord. Th.) in y-Direction	$e_{1,y}$	-46.2	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	-26.2	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-20.0	mm
☐ Minimum Eccentricity in y-Direction	$e_{min,y}$	-20.0	mm

$M_{Ed,yy}$	$M_{Ed,zz}$
[kNm]	[kNm]
133,1	19,6

Excelissä merkittävä ero, koska 1. kertaluvun momentit ovat pienempiä ja 2. kertaluvun momentteja se ei huomioi.

☐ Provided Reinforcement			
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	8	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²

☐ State of Strain			
☐ State of Strain for Moment About y-Axis			
☐ Design Internal Forces			
☐ Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Moment About y-Axis According to Second Order Theory (($M_{Ed,y2}$	208.137	kNm
☐ Curvatures			
☐ Curvature in Plane z	$1/r_z$	0.004	1/m
☐ Curvature in Plane y	$1/r_y$	0.000	1/m
☐ Points of Cross-Section			
☐ Rebars			

[-] State of Strain for Moment About z-Axis			
[-] Design Internal Forces			
[-] Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
[-] Moment About z-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,z2}$	-83.593	kNm
[-] Curvatures			
[-] Curvature in Plane z	$1/r_z$	0.000	1/m
[-] Curvature in Plane y	$1/r_y$	0.001	1/m
[-] Points of Cross-Section			
[-] Rebars			
[-] Ultimate State			
[-] Ultimate State for Moment About y-Axis			
[-] Ultimate Internal Forces			
[-] Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-424.380	kN
[-] Ultimate Moment About y-Axis	$M_{y,Rd}$	424.287	kNm
[-] Ultimate Curvatures			
[-] Ultimate Curvature in Plane z	$1/r_{z,Rd}$	0.030	1/m
[-] Ultimate Curvature in Plane y	$1/r_{y,Rd}$	0.000	1/m
[-] Points of Cross-Section			
[-] Rebars			
[-] Ultimate State for Moment About z-Axis			
[-] Ultimate Internal Forces			
[-] Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-422.127	kN
[-] Ultimate Moment About z-Axis	$M_{z,Rd}$	-423.891	kNm
[-] Ultimate Curvatures			
[-] Ultimate Curvature in Plane z	$1/r_{z,Rd}$	0.000	1/m
[-] Ultimate Curvature in Plane y	$1/r_{y,Rd}$	0.030	1/m
[-] Points of Cross-Section			
[-] Rebars			

☐ Verification			
Required Safety of Ultimate State	req γ	1.0	
☐ Provided Safety of Ultimate State	prov γ	1.4540	
☐ Design Internal Forces			
Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
Moment About y-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,y2}$	208.137	kNm
Moment About z-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,z2}$	-83.593	kNm
☐ Ultimate Internal Forces			
Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-422.127	kN
Ultimate Moment About y-Axis	$M_{y,Rd}$	424.287	kNm
Ultimate Moment About z-Axis	$M_{z,Rd}$	-423.891	kNm
☐ Criterion 5.39			
Moment Resistance About y-Axis	$M_{Rd,y}$	424.287	kNm
Moment Resistance About z-Axis	$M_{Rd,z}$	-423.891	kNm
Moment About y-Axis	$M_{Ed,y}$	208.137	kNm
Moment About z-Axis	$M_{Ed,z}$	-83.593	kNm
☐ Exponent			
Type of Cross-Section		Rectangle	
Design Normal Force	N_{Ed}	-423.755	kN
☐ Design Axial Resistance of Section			
	N_{Rd}	6929.790	kN
☐ Provided Reinforcement			
☐ From Item			
Item Statically Effective	No.	1	
Rebar Diameter	d_s	0.025	m
Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
Number	n_s	8	
Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
Design Criterion (req γ / prov γ)	Criterion	0.6878	

$M_{Rd,yy}$	$M_{Rd,zz}$
[kNm]	[kNm]
409,8	409,8

Taivutuskestävyydetkin hieman pienempiä excelissä, mutta tämä vain kasvattaa käyttöastetta, joka on jo muutenkin huomattavasti alhaisempi (37,3%).

$$N_{Rd,comp.} = \frac{6929,8}{1707,4} \text{ kN} \quad N_{Rd,comp.} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd,tens.} = 1707,4 \text{ kN} \quad N_{Rd,tens.} = A_s \cdot f_{yd}$$

Eksponentti a suorakaidepoikkileikkaukselle (väliarvot interpoloidaan lineaarisesti)

$N_{Ed} / N_{Rd} =$	≤ 0.1	0,7	≥ 1
a =	1,0	1,5	2,0

$$\text{Kaava (5.39)} = (M_{Edyy}/M_{Rdyy})^a + (M_{Edzz}/M_{Rdzz})^a \leq 1.0$$

Tapaus	N_{Ed} [kN]	N_{Ed}/N_{Rd}	a	$(M_{Ed}/M_{Rd})_{yy}$	$(M_{Ed}/M_{Rd})_{zz}$	Kaava 5.39 tulos	Ehto: (5.39) ≤ 1
1	423,8	0,061	1,000	0,325	0,048	0,373	OK

Kaksikerrosmastopilari, alempi sauva: Mitoitusmoduulin ja SKOL-pohjan vertailu

Nurjahduskertoimet: (RF-STABILITY)

Member No.	A		B	C	D	E	F	G	H	I
	Node No.		Length L [m]	E-vector No.	Effective Length [m]		Effective Length Factor [-]		Critical Load N_{cr} [kN]	
	Start	End			$L_{cr,y}$	$L_{cr,z}$	$k_{cr,y}$	$k_{cr,z}$		
5	9	10	4.000	1	11.497	16.288	2.874	4.072	16376.200	
				2	10.598	15.015	2.650	3.754	19272.200	
				3	9.249	13.103	2.312	3.276	25306.800	
				4	5.216	7.390	1.304	1.847	79559.800	

Member No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Length l [m]	Possible	Unbraced	Auto	β_y [-]	$l_{0,y}$ [m]	λ_y [-]	Possible	Unbraced	Auto	β_z [-]	$l_{0,z}$ [m]	λ_z [-]
5	4.000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.874	11.496	83.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3.754	15.016	76.5

Alapään momentit:

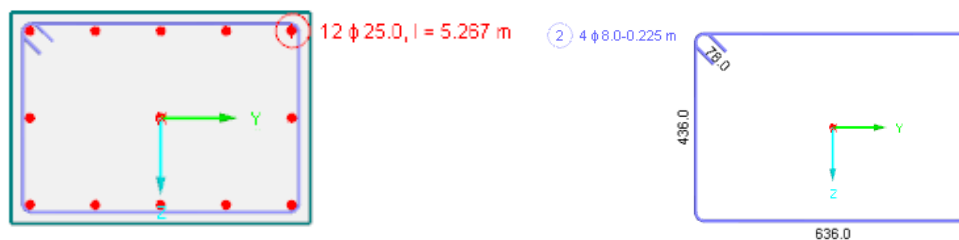
Member No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
	Node No.	Location x [m]		N	Forces [kN]	V_y	V_z	M_T	Moments [kNm]	M_y
5	9	0.000	max N	-494.13	-12.32	1.56	11.77	65.86	-25.11	CO 8
			min N	-758.45	-23.54	90.45	9.49	-109.50	16.70	CO 6
			max V_y	-501.30	-4.32	59.99	1.28	-68.58	72.36	CO 9
			min V_y	-758.45	-32.23	81.34	13.03	-102.10	-41.09	CO 7
			max V_z	-716.30	-17.75	96.52	7.13	-114.43	55.22	CO 13
			min V_z	-494.13	-12.32	1.56	11.77	65.86	-25.11	CO 8
			max M_T	-709.13	-25.75	38.08	17.62	20.01	-42.24	CO 12
			min M_T	-501.30	-4.32	59.99	1.28	-68.58	72.36	CO 9
			max M_y	-494.13	-12.32	1.56	11.77	65.86	-25.11	CO 8
			min M_y	-716.30	-17.75	96.52	7.13	-114.43	55.22	CO 13
			max M_z	-501.30	-4.32	59.99	1.28	-68.58	72.36	CO 9
			min M_z	-709.13	-25.75	38.08	17.62	20.01	-42.24	CO 12

Yläpään momentit:

Member No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
	Node No.	Location x [m]		N	Forces [kN]	V_y	V_z	M_T	Moments [kNm]	M_y
5	10	4.000	max N	-456.59	-12.32	25.46	11.77	127.34	24.16	CO 8
			min N	-720.91	-23.54	75.63	9.49	219.23	110.87	CO 6
			max V_y	-463.76	-4.32	35.29	1.28	116.28	89.64	CO 9
			min V_y	-720.91	-32.23	81.34	13.03	223.27	87.83	CO 7
			max V_z	-720.91	-32.23	81.34	13.03	223.27	87.83	CO 7
			min V_z	-456.59	-12.32	25.46	11.77	127.34	24.16	CO 8
			max M_T	-671.59	-25.75	61.99	17.62	227.60	60.75	CO 12
			min M_T	-463.76	-4.32	35.29	1.28	116.28	89.64	CO 9
			max M_y	-671.59	-25.75	61.99	17.62	227.60	60.75	CO 12
			min M_y	-463.76	-4.32	35.29	1.28	116.28	89.64	CO 9
			max M_z	-678.77	-17.75	71.82	7.13	216.54	126.23	CO 13
			min M_z	-456.59	-12.32	25.46	11.77	127.34	24.16	CO 8

Päiden momentit valitaan kuormitustapauksista CO6, CO9, CO12 ja CO13. RFEM las-
kenut CO13 määrääväksi tapaukseksi.

Tulos: pääteräkset = 12 T25 & haat = T8 k375



Käyttöaste RFEM:

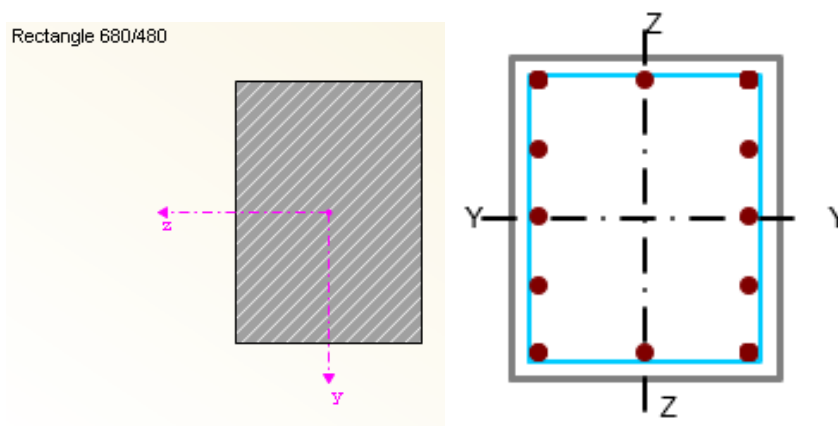
Member No.	A Location x [m]	B Governing Load Case	C Design Ratio	D Criteri	E Design Comment
5	Cross-Section No. 10 - Rectangle 680/480				
	4.000	RC1 - max M _z	0.8575	≤ 1	100) Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8
	0.000	RC1 - min M _z	0.0835	≤ 1	201) Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (2) with (6.4)
	0.000	RC1 - min M _y	0.4198	≤ 1	202) Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (1)
	4.000	CO22 - max M _y	0.5354	≤ 1	100) Fire Resistance - Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8

Virumaluvuksi mitoitusmoduuliin syötettiin excelillä laskettu arvo:

Section No.	A Material No.	B Cross-Section Description [mm]	C Notes	D Creep Coefficient
10	6	Rectangle 680/480		1.9180 ...

Tulosten vertailu

RFEM ja Excelin poikkileikkauksen akselit ovat päinvastaiset, koska excelii ei ole mahdollista asettaa sivua B pidemmäksi sivuksi.



$$M_{y,RFEM} \text{ (momentti y-akselin ympäri)} = M_{zz,EXCEL} \text{ (momentti z-akselin ympäri)}$$

$$M_{z,RFEM} \text{ (momentti z-akselin ympäri)} = M_{yy,EXCEL} \text{ (momentti y-akselin ympäri)}$$

CO 13: RFEM ei huomioi pilarin omaa painoa normaalivoimaksi, EXCELISSÄ tämä huomioitu.

<input type="checkbox"/> Governing Load			
<input type="checkbox"/> Normal Force	N	-678.768	kN
<input type="checkbox"/> Moment About y-Axis	M_y	216.542	kNm
<input type="checkbox"/> Moment About z-Axis	M_z	126.232	kNm
<input type="checkbox"/> Effective Length According to 5.8.3.2			
<input type="checkbox"/> Effective Length About Axis y	$l_{0,y}$	11.496	m
<input type="checkbox"/> Column Length	l_y	4.000	m
<input type="checkbox"/> Buckling Coefficient	β_y	2.8740	
<input type="checkbox"/> Effective Length About Axis z	$l_{0,z}$	15.016	m
<input type="checkbox"/> Column Length	l_z	4.000	m
<input type="checkbox"/> Buckling Coefficient	β_z	3.7540	
<input type="checkbox"/> Slenderness According to 5.8.3.2			
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis y	λ_y	82.9652	
<input type="checkbox"/> Effective Length	$l_{0,y}$	11.496	m
<input type="checkbox"/> Radius of Gyration	i_y	138.6	mm
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis z	λ_z	76.4955	
<input type="checkbox"/> Effective Length	$l_{0,z}$	15.016	m
<input type="checkbox"/> Radius of Gyration	i_z	196.3	mm

MRT - Murtorajatilan voimasuureet [kN] ja [kNm]				
Puristus = (+)	Yläpää (top)		Alapää (btm)	
Veto = (-)	$M_{0yy,top}$	$M_{0zz,top}$	$M_{0yy,btm}$	$M_{0zz,btm}$
N_{Ed} [kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
716,3	126,2	216,5	55,2	-114,4
709,1	60,8	227,6	-42,2	20
501,3	89,6	116,3	72,4	-68,58
758,5	110,9	219,2	16,7	-109,5

Ylin kuormitustapaus on CO13. Excelissä normaalivoimaan huomioitu myös pilarin oma paino eli saman kuormitustapauksen normaalivoima otettu pilarin alapäästä RFEM-laskennasta.

$$\begin{array}{l}
 i_{yy} = 196,3 \quad \lambda_{yy} = 76,5 \quad L_{0,yy} = 15016,0 \text{ mm} \\
 i_{zz} = 138,6 \quad \lambda_{zz} = 83,0 \quad L_{0,zz} = 11496,0 \text{ mm}
 \end{array}$$

Taivutusmomentit ovat siis päinvastoin.

☐ Limiting Slenderness According to 5.8.3.1 (1)			
☐ Limiting Slenderness About Axis y	$\lambda_{lim,y}$	46.8532	
☐ Factor A	A_y	0.7792	
Consider effects of creep?		Yes	
☐ Effective Creep Coefficient	$\varphi_{ef,y}$	1.4167	
Final value of creep coeff.	$\varphi(\infty,t_0)$	1.9180	
☐ Condition for neglecting creep fulfilled?		Failed	
Final value of creep coeff. is less than or equal to two?	$\varphi(\infty,t_0) \leq 2.0$	Passed	
Slenderness about y-axis less than or equal to 75?	$\lambda_y \leq 75$	Failed	
Eccentricity in ULS higher as thickness of cross-section	$M_{y,0Ed}/N_{Ed} \geq h$	Passed	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,y}$	174.352	kNm
Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-484.228	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c-quasi,1,z}$	360.1	mm
Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,z}$	331.3	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	28.7	mm
Load		RC4	
☐ Moment About Axis y (First Ord. Th)	$M_{c,1,y}$	236.049	kNm
Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c,1,z}$	347.8	mm
Intended Eccentricity	$e_{c,0,z}$	319.0	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	28.7	mm

$$A_{zz} = 1/(1+0.2*\varphi_{ef,zz})$$

$$\varphi_{ef,zz} = \varphi(t,t_0)*(M_{0Eqp,zz}/M_{0Ed,zz})$$

KRT pitkäaikaisen ja MRT momentin suhde, RFEM:n mukaan

$$M_{c-quasi,1} / M_{c,1} = 174,352\text{kNm} / 236,049\text{kNm} = \mathbf{0,739}$$

→ Kerrottuna virumaluvulla saadaan virumisaste: $0,739 * 1,918 = \mathbf{1,417}$

$M_{0Eqp,zz}/$	
$M_{0Ed,zz}$	$\varphi_{ef,zz}$
0,74	1,45

Excelissä oletuksena on $1 / 1,35 = \mathbf{0,74} \rightarrow$ **Lähes sama**

☐ Factor B	B_y	1.3009	
☐ Mechanical Reinforcement Ratio	ω	0.3462	
Provided Reinforcement	prov A_s	58.90	cm ²
Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$B = \boxed{1,30}$$

$$B = (1+2*\omega)^{0.5}$$

<input type="checkbox"/> Factor C	C_y	0.7000	
<input type="checkbox"/> Moment Ratio	$r_{m,y}$	1.0000	
Column is unbraced, $r_{m,y}$ is set to 1.0.			
<input type="checkbox"/> Relative Normal Force	n	0.0917	
Design Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

Excelin hoikkuuskriteeri vastaavan akselin ympäri:

N_{Ed} [kN]	n	A_{zz}	$r_{m,zz}$	C_{zz}	$\lambda_{lim,zz}$	λ_{zz}	$\lambda_{zz} > \lambda_{lim,zz}$
716,3	0,10	0,78	1,00	0,70	42	83,0	Hoikka

$$n = N_{Ed} / (A_c * f_{cd})$$

Parametri "n": eron aiheuttaa se, että Excelissä ilmoitettu normaalivoima on pilarin alapäässä oleva (huomioi siis pilarin oman painon) ja RFEM laskenut yläpäähän normaalivoimalla.

Rajahoikkuus eroaa siis momenttien suhteesta, sekä normaalivoimasta.

<input type="checkbox"/> Limiting Slenderness About Axis z	$\lambda_{lim,z}$	49.7769	
<input type="checkbox"/> Factor A	A_z	0.8278	
Consider effects of creep?		Yes	
<input type="checkbox"/> Effective Creep Coefficient	$\varphi_{ef,z}$	1.0398	
Final value of creep coeff.	$\varphi(\infty, t_0)$	1.9180	
<input type="checkbox"/> Condition for neglecting creep fulfilled?		Failed	
Final value of creep coeff. is less than or equal to two?	$\varphi(\infty, t_0) \leq 2.0$	Passed	
Slenderness about z-axis less than or equal to 75?	$\lambda_{z} \leq 75$	Failed	
Eccentricity in ULS higher as thickness of cross-section	$M_{z,0Ed} / N_{Ed} \geq h_y$	Failed	
<input type="checkbox"/> Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,z}$	82.247	kNm
Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-484.228	kN
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	$e_{c-quasi,1,y}$	169.9	mm
Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,y}$	132.3	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-37.5	mm
Load		RC4	
<input type="checkbox"/> Moment About Axis z (First Ord. Th)	$M_{c,1,z}$	100.751	kNm
Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	$e_{c,1,y}$	148.4	mm
Intended Eccentricity	$e_{c,0,y}$	186.0	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-37.5	mm

$$A_{yy} = 1 / (1 + 0.2 * \varphi_{ef,yy})$$

$$\varphi_{ef,yy} = \varphi(t, t_0) * (M_{0Eqp,yy} / M_{0Ed,yy})$$

KRT pitkäaikaisen ja MRT momentin suhde, RFEM laskee arvoksi:

$$M_{c-quasi,1} / M_{c,1} = 82,247 \text{ kNm} / 100,751 \text{ kNm} = \mathbf{0,816}$$

→ Kerrottuna virumaluvulla saadaan virumisaste: $0,816 * 1,918 = \mathbf{1,566}$

→ EI TÄSMÄÄ.

$M_{0Eqp,yy}/$	
$M_{0Ed,yy}$	$\Phi_{ef,yy}$
0,74	1,45

Excelissä oletuksena on $1 / 1,35 = 0,74$ → **Merkittävä ero**

<input type="checkbox"/> Factor B	B_z	1.3009	
<input type="checkbox"/> Mechanical Reinforcement Ratio	ω	0.3462	
Provided Reinforcement	prov A_s	58.90	cm ²
Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$B =$ $\quad B = (1+2*\omega)^{0.5}$

<input type="checkbox"/> Factor C	C_z	0.7000	
<input type="checkbox"/> Moment Ratio	$r_{m,z}$	1.0000	
Column is unbraced, $r_{m,z}$ is set to 1.0.			
<input type="checkbox"/> Relative Normal Force	n	0.0917	
Design Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

Excelin hoikkuuskriteeri vastaavan akselin ympäri:

N_{Ed} [kN]	n	A_{yy}	$r_{m,yy}$	C_{yy}	$\lambda_{lim,yy}$	λ_{yy}	$\lambda_{yy} > \lambda_{lim,yy}$
716,3	0,10	0,78	1,00	0,70	42,4	76,5	Hoikka

Suhteellisen normaalivoiman (n) eron aiheuttaa se, että excelissä ilmoitettu normaali-voima on pilarin alapäässä oleva (huomioi siis pilarin oman painon) ja RFEM laskenut yläpäähän normaalivoimalla.

Suurimman eron aiheuttaa parametri A, jossa KRT MRT momenttien suhde ei ole sama.

<input type="checkbox"/> Design Type			
<input type="checkbox"/> Conditions of standard design according to 5.8.3.1 (1)			
<input type="checkbox"/> Condition About Axis y	$\lambda_y \leq \lambda_{lim,y}$	Failed	
Provided Slenderness	λ_y	82.9652	
Limiting Slenderness About Axis y	$\lambda_{lim,y}$	46.8532	
<input type="checkbox"/> Condition About Axis z	$\lambda_z \leq \lambda_{lim,z}$	Failed	
Provided Slenderness	λ_z	76.4955	
Limiting Slenderness About Axis z	$\lambda_{lim,z}$	49.7769	
Condition of standard design fulfilled?		Failed	

$\lambda_{lim,y}$	λ_{yy}	$\lambda_{yy} > \lambda_{lim,y}$	$\lambda_{lim,z}$	λ_{zz}	$\lambda_{zz} > \lambda_{lim,z}$
45,6	76,5	Hoikka	46	83,0	Hoikka

Taas akselit päinvastoin. Hoikkuusluvut samoja, rajahoikkeudet eroavat hieman, merkittävämmän RFEM:n z-akselin ympäri. Molemmissa sovelluksissa kuitenkin molemmat suunnat hoikkia, joten ei vaikutusta laskennan etenemiseen.

Eccentricities			
Intended Eccentricity According to 5.8.8.2			
Intended Eccentricity in z-Direction		$e_{0,z}$	319.0 mm
Moment Diagram Along the Support		Diagram M_y	Different
Moment About Axis y		M_y	216.542 kNm
Absolute Normal Force		$ N $	678.768 kN
Intended Eccentricity in y-Direction		$e_{0,y}$	186.0 mm
Moment Diagram Along the Support		Diagram M_z	Different
Moment About Axis z		M_z	126.232 kNm
Absolute Normal Force		$ N $	678.768 kN

Mitoitusmoduuli muuttaa taivutusmomentin epäkeskisyydeksi e_0 , joka lisätään mitta-epätarkkuuksiin. Niiden summa kerrotaan normaalivoimalla, josta saadaan ensimmäisen kertaluvun momentti.

Eccentricity due to imperfection according to 5.2			
Eccentricity Due to Imperfection in z-Direction		$e_{i,z}$	28.7 mm
Inclination		$\theta_{i,z}$	0.0050
Basic Value of Inclination		θ_0	0.0050
Reduction Factor for Column Height		$\alpha_{h,z}$	1.0000
Calculated Value of Reduction Coefficient		$\alpha_{h,z,calc}$	1.0000
Column Length		l_y	4.000 m
Reduction Factor for Column Number		α_m	1.0000
According to user specification, the column will be designed as a single column.			
Buckling Length		$l_{0,y}$	11.496 m
Eccentricity Due to Imperfection in y-Direction		$e_{i,y}$	37.5 mm
Inclination		$\theta_{i,y}$	0.0050
Basic Value of Inclination		θ_0	0.0050
Reduction Factor for Column Height		$\alpha_{h,y}$	1.0000
Calculated Value of Reduction Coefficient		$\alpha_{h,y,calc}$	1.0000
Column Length		l_z	4.000 m
Reduction Factor for Column Number		α_m	1.0000
According to user specification, the column will be designed as a single column.			
Buckling Length		$l_{0,z}$	15.016 m

9. Mittaepätarkkuuksien aiheuttaman taivutusmomentin laskenta (EC2 kohta 5.2, menetelmä a))

$$\theta_0 = \frac{1}{200} \quad m = 1 \quad L = 4,0 \text{ m}$$

$$\theta_i = \frac{1}{200} \quad \alpha_m = 1 \quad \alpha_h = 1,000$$

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_m * \alpha_h \quad \alpha_m = [0,5 * (1 + 1/m)]^{0,5} \quad \alpha_h = 2/(L)^{0,5}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1$$

	N _{Ed} [kN]	M _{i,yy} [kNm]	M _{i,zz} [kNm]
1	716,3	0,0	20,6
2	709,1	0,0	20,4
3	501,3	0,0	14,4
4	758,5	0,0	21,8

Huomioi epätarkkuus(e_i): Y-Y suunnassa

$$e_{i,zz} = 37,5 \text{ mm} \quad e_{i,zz} = \theta_i * L_{0,yy} / 2$$

$$e_{i,yy} = 28,7 \text{ mm} \quad e_{i,yy} = \theta_i * L_{0,zz} / 2$$

$$M_{i,yy} = e_{i,zz} * N_{Ed}$$

$$M_{i,zz} = e_{i,yy} * N_{Ed}$$

Eurokoodin mukaan mittaepätarkkuuksien huomiointi riittää rasitetummissa suunnassa. mitoitusmoduuli huomioi molemmissa. Vertailun vuoksi tässä sauvassa SKOL-pohjan laskennassa mittaepätarkkuudet on huomioitu vain rasitetummissa suunnassa.

Minimum Eccentricity According to 6.1 (4)			
Minimum Eccentricity in z-Direction		e _{min,z}	20.0 mm
Thickness of Structural Member		h _{w,z}	480.0 mm
Minimum Value of Minimum Eccentricity		e _{20 mm,z}	20.0 mm
Minimum Eccentricity in y-Direction		e _{min,y}	22.7 mm
Thickness of Structural Member		h _{w,y}	680.0 mm
Minimum Value of Minimum Eccentricity		e _{20 mm,y}	20.0 mm

$$e_{0,yy} = 20,00 \text{ mm} \quad e_{0,yy} = \text{MAX}(20\text{mm} ; B/30)$$

$$e_{0,zz} = 22,67 \text{ mm} \quad e_{0,zz} = \text{MAX}(20\text{mm} ; H/30)$$

(akselit päinvastoin sovellusten välillä)

Moments According to First Order Theory			
Moments According to First Order Theory			
Design Normal Force	N _{Ed}	-678.768	kN
Moment About Axis y	M _{Ed,1,y}	236.049	kNm
Calculated Total Eccentricity in z-Direction			
Intended Eccentricity	e _{0,z}	319.0	mm
Eccentricity Due to Imperfection	e _{i,z}	28.7	mm
Moment About Axis z	M _{Ed,1,z}	151.713	kNm
Calculated Total Eccentricity in y-Direction			
Intended Eccentricity	e _{0,y}	186.0	mm
Eccentricity Due to Imperfection	e _{i,y}	37.5	mm

Mitoitusmoduuli laskee epäkeskisyydet e₀ ja e_i yhteen ja kertoo summan normaalivoimalla.

$$M_{Ed,1,y} = 0,3478\text{m} * 678,768\text{kN} = \mathbf{236,0\text{kNm}}$$

$$M_{Ed,1,z} = 0,2235\text{m} * 678,768\text{kN} = \mathbf{151,7\text{kNm}}$$

Jäykistämättömälle pilarille mitoitusmomentti on

$$M_{0Ed} = M_{02}$$

Y-akselin ympäri (vastaa RFEM Z-akselin ympäri)

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{alä}) = 126.2 \text{ kNm}$$

$$+ \text{ epäkeskisyys } 0 \text{ mm: } 126.2 + 0 = \mathbf{126.2 \text{ kNm}}$$

Z-akselin ympäri (vastaa RFEM Y-akselin ympäri)

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{alä}) = 216.5 \text{ kNm}$$

$$+ \text{ epäkeskisyys } 28.7 \text{ mm: } 216.5 + 0.0287 \text{ m} * 716.3 \text{ kN} = \mathbf{237,1 \text{ kNm}}$$

Excelissä siis $e_i N_{Ed}$ on $M_{i,zz,yy}$

Ja tässä huomioitu vain rasitetummassa suunnassa, joten Y-akselin ympäri $e_i N_{Ed} = 0$.

Myös normaalivoiman valinta pilarin alapäässä kasvattaa momenttia hieman.

Eli eroavaisuudet johtuvat siitä, että valitseeko normaalivoiman ylä- vai alapään mukaan ja huomioiko mittaepätarkkuudet molemmissa suunnissa, kuten RFEM.

<input type="checkbox"/> Separate Design in Each Principal Direction According to 5.8.9			
<input type="checkbox"/> Condition 5.38a			Passed
<input type="checkbox"/> Slenderness Ratio	λ_y/λ_z		1.0846
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis y	λ_y		82.9652
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis z	λ_z		76.4955
<input type="checkbox"/> Slenderness Ratio	λ_z/λ_y		0.9220
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis y	λ_y		82.9652
<input type="checkbox"/> Slenderness About Axis z	λ_z		76.4955
<input type="checkbox"/> Condition 5.38b			Failed
<input type="checkbox"/> Imperfections in secondary direction are omitted acc. to 5.8.9 (2)			
<input type="checkbox"/> Ratio of Relative Eccentricities	$(e_y/h_{eq})/(e_z/b)$		0.5453
<input type="checkbox"/> Eccentricity in z-Direction	e_z		499.6 mm
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity	$e_{0,z}$		319.0 mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$		28.7 mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,z}$		151.9 mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	e_y		423.5 mm
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity	$e_{0,y}$		186.0 mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$		0.0 mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,y}$		200.0 mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Height	h_{eq}		680.0 mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Width	b_{eq}		480.0 mm
<input type="checkbox"/> Ratio of Relative Eccentricities	$(e_z/b_{eq})/(e_y/h)$		1.8338
<input type="checkbox"/> Eccentricity in z-Direction	e_z		499.6 mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	e_y		423.5 mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Height	h_{eq}		680.0 mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Width	b_{eq}		480.0 mm
<input type="checkbox"/> Separate design in each principal direction possible?			Failed

Excel huomioi joka tapauksessa vinon taivutuksen tarkistuskaavan mukaan. RFEM tekee tässä myös niin, koska ehto 5.38b ei toteudu.

2. Kertaluvun momentit RFEM z-suunnassa, eli y-y akselin ympäri, eli excelissä z-z akselin ympäri:

☐ Moments According to Second Order Theory			
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th. According to 5.8.8.2(3)			
☐ Eccentricity Through Second Order Theory in z-Direction	e _{2,z}	151.9	mm
☐ Curvature in z-plane	1/r _z	0.011	1/m
☐ Selected Factor (Normal Force)	sel K _{r,z}	1.0000	
☐ Calculated Factor (Normal Force)	K _{r,z}	1.3258	
☐ Max. Ultimate Limit State	ν _u	1.3462	
☐ Ratio	ω	0.3462	
☐ Provided Reinforcement	prov A _s	58.90	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d _s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a _s	4.91	cm ²
☐ Number	n _s	12	
☐ Total Reinforcement Area	prov A _s	58.90	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f _{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A _c	3264.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f _{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Relative Normal Force	n	0.0917	
☐ Design Normal Force	N _{Ed}	-678.768	kN
☐ Area of Cross-Section	A _c	3264.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f _{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Resistant Concrete Normal Force (Bending)	n _{bal}	0.4000	
☐ Selected Factor (Creep)	sel K _{φ,z}	1.0000	
☐ Calculated Factor (Creep)	K _{φ,z}	0.9956	
☐ Factor	β _y	-0.003	
☐ Char. Concrete Compressive Strength	f _{ck}	40.00	N/mm ²
☐ Slenderness About Axis y	λ _y	82.9652	
☐ Effective Creep Coefficient	φ _{ef,y}	1.4167	
☐ Final value of creep coeff.	φ(∞,t ₀)	1.9180	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	M _{c-quasi,1,y}	174.352	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	N _{Ed-quasi}	-484.228	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	e _{c-quasi,1,z}	360.1	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	e _{c-quasi,0,z}	331.3	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	e _{i,z}	28.7	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis y (First Ord. Th)	M _{c,1,y}	236.049	kNm
☐ Normal Force	N _{Ed}	-678.768	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	e _{c,1,z}	347.8	mm
☐ Intended Eccentricity	e _{c,0,z}	319.0	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	e _{i,z}	28.7	mm
☐ Curvature in z-plane	1/r _{0,z}	0.011	1/m
☐ Strain (Yield Stress)	ε _{yd}	2.17	‰
☐ Design Value of Yield Stress	f _{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Modulus of Elasticity	E _s	200000.00	N/mm ²
☐ Effective Depth	d _z	420.4	mm
☐ Buckling Length	l _{0,y}	11.496	m
☐ Factor (Curvature Distribution)	c	9.8696	

$n_u =$	1,35
$n_{bal,yy} =$	0,484
$n_{bal,zz} =$	0,443

$$n_u = 1 + \omega$$

$$n_{bal,yy} = N_{Rd,bal,yy} / (A_c * f_{cd})$$

$$n_{bal,zz} = N_{Rd,bal,zz} / (A_c * f_{cd})$$

$n_{bal,zz}$ (Excel) = 0,436

n_{bal} (RFEM) = 0,400 (eurokoodin suositusarvo)

Suhteellinen normaalivoima n eroaa normaalivoimasta eron takia.

$\beta_{zz} =$	-0,003	
$i_{s,zz} =$	173,1	mm
$d_{zz} =$	413,1	mm

$$\beta_{zz} = 0.35 + f_{ck}/200 - \lambda_{zz}/150$$

$$d_{zz} = B/2 + i_{s,zz}$$

$$(1/r_0)_{zz} = 0,000012 \text{ 1/mm}$$

$$(1/r_0)_{zz} = \varepsilon_{yd} / (0.45 * d_{zz})$$

Normaalivoiman korjauskerroin:

$$K_{r,zz} = (n_u - n) / (n_u - n_{bal,zz}) \leq 1$$

Viruman korjauskerroin:

$$K_{\varphi,zz} = 1 + \beta_{zz} * \varphi_{ef,zz} \geq 1$$

Kaarevuus:

$$(1/r)_{zz} = K_{r,zz} * K_{\varphi,zz} * (1/r_0)_{zz}$$

Taipuma:

$$e_{2,yy} = (1/r)_{zz} * L_{0zz}^2 / c_{zz}$$

Toisen kertaluvun momentti:

$$M_{2,zz} = \begin{cases} e_{2,yy} * N_{Ed} & , \text{jos } \lambda_{zz} > \lambda_{lim,zz} \\ 0 & , \text{jos } \lambda_{zz} \leq \lambda_{lim,zz} \\ 0 & , \text{jos } M_{2,zz} < 0.1 * (M_{0e,zz} + M_{i,zz}) \end{cases}$$

	N_{Ed} [kN]	n	$K_{r,zz}$	$\varphi_{ef,zz}$	$K_{\varphi,zz}$	$(1/r)_{zz}$ [1/mm]	c_{zz}	$e_{2,yy}$ [mm]	$M_{2,yy}$ [kNm]
1	716,3	0,10	1,000	1,42	1,000	0,000012	9,87	156,6	112,2

Taipuman ero aiheutuu betonipeitevalinnasta, joka tulisi olla RFEM:ssä 38 mm, jos se Excelissä on 30 mm. (reunahaat = 8 mm) Raudoitusten tehollinen korkeus ei siis ole näissä sama.

Normaalivoiman ja viruman korjauskertoimien laskukaavojen parametrit osittain eroavat, mutta näiden minimi ja maksimiarvot ovat 1.0, joita molemmat sovellukset käyttävät. Näin ei siis niistä eroa tähän laskentaan synny. Jos korjauskertoimien tulosten arvot olisivat ehtojen päinvastaisilla puolilla, niin tilanne voisi olla toinen.

Suhteellinen normaalivoima on laskettu sovellusten välillä eri normaalivoimilla, joten siinä tulee pieni heitto.

Taipuma on SKOL:ssa 4,7 mm suurempi.

☐ Eccentricity Through Second Order Theory in y-Direction	$e_{2,y}$	200.0	mm
☐ Curvature in y-plane	$1/r_y$	0.009	1/m
☐ Selected Factor (Normal Force)	sel $K_{r,y}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Normal Force)	$K_{r,y}$	1.3258	
☐ Max. Ultimate Limit State	n_u	1.3462	
☐ Ratio	ω	0.3462	
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	58.90	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	12	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	58.90	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Relative Normal Force	n	0.0917	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
☐ Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Resistant Concrete Normal Force (Bending)	n_{bal}	0.4000	
☐ Selected Factor (Creep)	sel $K_{\phi,y}$	1.0416	
☐ Calculated Factor (Creep)	$K_{\phi,y}$	1.0416	
☐ Factor	β_z	0.040	
☐ Char. Concrete Compressive Strength	f_{ck}	40.00	N/mm ²
☐ Slenderness About Axis z	λ_z	76.4955	
☐ Effective Creep Coefficient	$\phi_{ef,z}$	1.0398	
☐ Final value of creep coeff.	$\phi(\infty,t_0)$	1.9180	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,z}$	82.247	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-484.228	kN
☐ Eccentricity in y-Direction	$e_{c-quasi,1,y}$	169.9	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,y}$	132.3	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-37.5	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis z (First Ord. Th)	$M_{c,1,z}$	100.751	kNm
☐ Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
☐ Eccentricity in y-Direction	$e_{c,1,y}$	148.4	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{c,0,y}$	186.0	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-37.5	mm
☐ Curvature in y-plane	$1/r_{0,y}$	0.009	1/m
☐ Strain (Yield Stress)	ϵ_{yd}	2.17	‰
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Modulus of Elasticity	E_s	200000.00	N/mm ²
☐ Effective Depth	d_y	567.3	mm
☐ Buckling Length	$l_{0,z}$	15.016	m
☐ Factor (Curvature Distribution)	c	9.8696	

$$\beta_{yy} = 0,040$$

$$i_{s,yy} = 221,2 \text{ mm}$$

$$d_{yy} = 561,2 \text{ mm}$$

$$\beta_{yy} = 0.35 + f_{ck}/200 - \lambda_{yy}/150$$

$$d_{yy} = H/2 + i_{s,yy}$$

$$(1/r_0)_{yy} = 0,000009 \text{ 1/mm}$$

$$(1/r_0)_{yy} = \varepsilon_{yd}/(0.45*d_{yy})$$

Normaalivoiman korjauskerroin:

$$K_{r,yy} = (n_u - n)/(n_u - n_{bal,yy}) \leq 1$$

Viruman korjauskerroin

$$K_{\varphi,yy} = 1 + \beta_{yy} * \Phi_{ef,yy} \geq 1$$

Kaarevuus:

$$(1/r)_{yy} = K_{r,yy} * K_{\varphi,yy} * (1/r_0)_{yy}$$

Taipuma:

$$e_{2,zz} = (1/r)_{yy} * L_{0yy}^2 / c_{yy}$$

Toisen kertaluvun momentti:

$$M_{2,yy} = \begin{cases} e_{2,zz} * N_{Ed} & , \text{ jos } \lambda_{yy} > \lambda_{lim,yy} \\ 0 & , \text{ jos } \lambda_{yy} \leq \lambda_{lim,yy} \\ 0 & , \text{ jos } M_{2,yy} < 0.1 * (M_{0e,yy} + M_{i,yy}) \end{cases}$$

	N_{Ed} [kN]	n	$K_{r,yy}$	$\Phi_{ef,yy}$	$K_{\varphi,yy}$	$(1/r)_{yy}$ [1/mm]	c_{yy}	$e_{2,zz}$ [mm]	$M_{2,yy}$ [kNm]
1	716,3	0,10	1,000	1,4	1,057	0,000009	9,87	207,8	148,9

Tässä suunnassa myös viruman korjauskerroin eroaa, johtuen KRT ja MRT momenttien suhteesta.

Betonipeitteen paksuudet aiheuttavat tässäkin suunnassa eroa taipumiin.

Suhteellinen normaalivoima on laskettu sovellusten välillä eri normaalivoimilla, joten siinä tulee pieni heitto.

Taipuma on SKOL:ssa 7,8 mm suurempi.

Erot kuitenkin marginaalisia molemmissa suunnissa.

☐ Moments According to Second Order Theory			
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
☐ Moment About Axis y	$M_{Ed,y2}$	339.131	kNm
☐ Total Eccentricity in z-Direction	$e_{2,tot,z}$	499.6	mm
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,z}$	151.9	mm
☐ Eccentricity (First Ord. Th.) in z-Direction	$e_{1,z}$	347.8	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	319.0	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	28.7	mm
☐ Minimum Eccentricity in z-Direction	$e_{min,z}$	20.0	mm
☐ Thickness of Structural Member	$h_{w,z}$	680.0	mm
☐ Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20\text{ mm},z}$	20.0	mm
☐ Moment About Axis z	$M_{Ed,z2}$	287.467	kNm
☐ Total Eccentricity in y-Direction	$e_{2,tot,y}$	423.5	mm
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,y}$	200.0	mm
☐ Eccentricity (First Ord. Th.) in y-Direction	$e_{1,y}$	223.5	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	186.0	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	37.5	mm
☐ Minimum Eccentricity in y-Direction	$e_{min,y}$	22.7	mm

RFEM laskee epäkeskisyydet yhteensä, jonka jälkeen kertoo sen normaalivoimalla.

$(e_1 + e_2) \times N_{Ed}$ = mitoitusmomentti

e_{min} (rfem) = e_0 (Excel), parametreilla eri merkityksiä

EXCEL laskee ensin sauvanpään momentin ja lisää siihen mittaepätarkkuuksista johtuvan momentin ja lopuksi toisen kertaluvun momentin.

Sivusiirtyvälle rakenteelle:

$$M_{Ed,y} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} e_{0,zz} * N_{Ed} \\ M_{02,y} + M_{2,y} + M_{i,y} \end{array} \right. \rightarrow \text{alempi}$$

N_{Ed} [kN]	$M_{02,y}$ [kNm]	$M_{0e,y}$ [kNm]	$M_{2,y}$ [kNm]	$M_{i,y}$ [kNm]	$e_{0,zz} * N_{Ed}$ [kNm]	$M_{Ed,y}$ [kNm]
716,3	126,2	97,8	148,9	0,0	16,2	275,1

Mitoitusmoduuli: 287.5kNm (z-akselin ympäri). Tässä Excel saa pienemmän mitoitusmomentin, koska se ei huomioi mittaepätarkkuuksia heikommassa suunnassa, vaikka sen toisen kertaluvun momentti on suurempi.

Sivusiirtyvälle rakenteelle:

$$M_{Ed,zz} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} e_{0,yy} * N_{Ed} \\ M_{02,zz} + M_{2,zz} + M_{i,zz} \end{array} \right. \rightarrow \text{alempi}$$

N_{Ed} [kN]	$M_{02,zz}$ [kNm]	$M_{0e,zz}$ [kNm]	$M_{2,zz}$ [kNm]	$M_{i,zz}$ [kNm]	$e_{0,y} * N_{Ed}$ [kNm]	$M_{Ed,zz}$ [kNm]
716,3	216,5	86,6	112,2	20,6	14,3	349,3

Mitoitusmoduuli: 339.1 kNm (y-akselin ympäri). Tässä Excel saa suuremman mitoitusmomentin, koska sen normaalivoima ja taipuma ovat hieman suurempia.

Provided Reinforcement			
<input type="checkbox"/> From Item	No.	1	
<input type="checkbox"/> Item Statically Effective		Yes	
<input type="checkbox"/> Rebar Diameter	d_s	0.025	m
<input type="checkbox"/> Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
<input type="checkbox"/> Number	n_s	12	
<input type="checkbox"/> Total Reinforcement Area	prov A_s	58.90	cm ²
<input type="checkbox"/> Provided Reinforcement	prov A_s	58.90	cm ²

State of Strain			
State of Strain for Moment About y-Axis			
Design Internal Forces			
<input type="checkbox"/> Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
<input type="checkbox"/> Moment About y-Axis According to Second Order Theory (ζ)	$M_{Ed,y2}$	339.131	kNm
Curvatures			
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane z	$1/r_z$	0.004	1/m
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane y	$1/r_y$	0.000	1/m
<input checked="" type="checkbox"/> Points of Cross-Section			
<input checked="" type="checkbox"/> Rebars			

State of Strain for Moment About z-Axis			
Design Internal Forces			
<input type="checkbox"/> Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
<input type="checkbox"/> Moment About z-Axis According to Second Order Theory (ζ)	$M_{Ed,z2}$	287.467	kNm
Curvatures			
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane z	$1/r_z$	0.000	1/m
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane y	$1/r_y$	-0.002	1/m
<input checked="" type="checkbox"/> Points of Cross-Section			
<input checked="" type="checkbox"/> Rebars			

Ultimate State			
Ultimate State for Moment About y-Axis			
Ultimate Internal Forces			
<input type="checkbox"/> Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-679.660	kN
<input type="checkbox"/> Ultimate Moment About y-Axis	$M_{y,Rd}$	647.221	kNm
Ultimate Curvatures			
<input type="checkbox"/> Ultimate Curvature in Plane z	$1/r_{z,Rd}$	0.030	1/m
<input type="checkbox"/> Ultimate Curvature in Plane y	$1/r_{y,Rd}$	0.000	1/m
<input checked="" type="checkbox"/> Points of Cross-Section			
<input checked="" type="checkbox"/> Rebars			

☐ Ultimate State for Moment About z-Axis			
☐ Ultimate Internal Forces			
☐ Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-680.627	kN
☐ Ultimate Moment About z-Axis	$M_{z,Rd}$	861.864	kNm
☐ Ultimate Curvatures			
☐ Ultimate Curvature in Plane z	$1/r_{z,Rd}$	0.000	1/m
☐ Ultimate Curvature in Plane y	$1/r_{y,Rd}$	-0.019	1/m
☒ Points of Cross-Section			
☒ Rebars			

☐ Verification			
☐ Required Safety of Ultimate State	req γ	1.0	
☐ Provided Safety of Ultimate State	prov γ	1.1662	
☐ Design Internal Forces			
☐ Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
☐ Moment About y-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,y2}$	339.131	kNm
☐ Moment About z-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,z2}$	287.467	kNm
☐ Ultimate Internal Forces			
☐ Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-679.660	kN
☐ Ultimate Moment About y-Axis	$M_{y,Rd}$	647.221	kNm
☐ Ultimate Moment About z-Axis	$M_{z,Rd}$	861.864	kNm
☐ Criterion 5.39			
☐ Moment Resistance About y-Axis	$M_{Rd,y}$	647.221	kNm
☐ Moment Resistance About z-Axis	$M_{Rd,z}$	861.864	kNm
☐ Moment About y-Axis	$M_{Ed,y}$	339.131	kNm
☐ Moment About z-Axis	$M_{Ed,z}$	287.467	kNm
☐ Exponent			
☐ Type of Cross-Section		Rectangle	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-678.768	kN
☐ Design Axial Resistance of Section			
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	58.90	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	12	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	58.90	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	3264.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Design Criterion (req γ / prov γ)	Criterion	0.8575	

$M_{Ed,yy}$ [kNm]	$M_{Rd,yy}$ [kNm]	$M_{Ed,zz}$ [kNm]	$M_{Rd,zz}$ [kNm]
275,1	851,1	349,3	629,9

Taivutuskestävyyksissäkin pieni heitto, johtuen betonipeitteestä.

N_{Ed} [kN]	N_{Ed}/N_{Rd}	a	$(M_{Ed}/M_{Rd})_{yy}$	$(M_{Ed}/M_{Rd})_{zz}$	Kaava 5.39 tulos
716,3	0,072	1,000	0,323	0,554	0,878

$$\text{Kaava (5.39)} = (M_{Edyy}/M_{Rdyy})^a + (M_{Edzz}/M_{Rdzz})^a \leq 1.0$$

Käyttöasteet hyvin lähellä toisiaan. Marginaaliset erot johtuvat mitoitusmomenttien ja taivutuskestävyyksien pienistä eroista. Excel suorittaa aina vinon taivutuksen tarkistuksen, RFEM tarkistaa ensin onko "aidosti vino taivutus".

Käyttöasteet:

Mitoitusmoduuli 85,8%

SKOL: 87,8

Kaksikerrosmastopilari, ylempi sauva: Mitoitusmoduulin ja SKOL-pohjan vertailu

Nurjahduskertoimet: (RF-STABILITY)

Member No.	A		B	C	D	E	F	G	H	I
	Node No.		Length	Length	E-vector	Effective Length [m]		Effective Length Factor [-]		Critical Load
	Start	End	L [m]	L [m]	No.	L _{cr,y}	L _{cr,z}	k _{cr,y}	k _{cr,z}	N _{cr} [kN]
6	10	11	4.000	4.000	1	12.569	12.569	3.142	3.142	9672.490
					2	11.586	11.586	2.897	2.897	11383.000
					3	10.111	10.111	2.528	2.528	4947.200
					4	5.703	5.703	1.426	1.426	46991.400

Member No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Length	Possible	Unbraced	Auto	Buckling About Axis y	Buckling About Axis z	Possible	Unbraced	Auto				
	l [m]				β_y [-]	$l_{0,y}$ [m]	λ_y [-]				β_z [-]	$l_{0,z}$ [m]	λ_z [-]
6	4.000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3.142	12.568	90.7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.897	11.588	83.6

Alapään momentit: (RFEM)

Member No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
	Node No.	Location x [m]		Forces [kN]	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
				N						
6	10	0.000	max N	-298.50	3.47	45.56	-3.42	-138.55	13.88	CO 15
			min N	-439.32	-7.21	4.08	-1.69	-40.52	-28.83	CO 3
			max V _y	-298.83	6.02	30.85	-0.54	-79.70	24.09	CO 9
			min V _y	-396.86	-12.18	9.48	-3.33	-78.27	-48.72	CO 12
			max V _z	-396.83	3.47	45.56	-3.42	-138.55	13.88	CO 13
			min V _z	-298.85	-9.63	-5.23	-0.46	-19.42	-38.51	CO 8
			max M _T	-298.85	-9.63	-5.23	-0.46	-19.42	-38.51	CO 8
			min M _T	-438.98	-6.13	32.76	-6.40	-131.03	-24.53	CO 7
			max M _y	-298.85	-9.63	-5.23	-0.46	-19.42	-38.51	CO 8
			min M _y	-396.83	3.47	45.56	-3.42	-138.55	13.88	CO 13
			max M _z	-298.83	6.02	30.85	-0.54	-79.70	24.09	CO 9
			min M _z	-396.86	-12.18	9.48	-3.33	-78.27	-48.72	CO 12

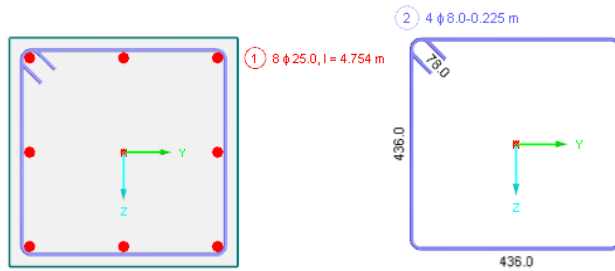
Virumaluvuksi Excelin laskema arvo:

Section No.	A	B	C	D
	Material No.	Cross-Section Description [mm]	Notes	Creep Coefficient
8	6	Rectangle 480/480		1.9630 ...

Käyttöaste RFEM: 77,96%

Member No.	A	B	C	D	E
	Location x [m]	Governing Load Case	Design Ratio	Criteri	Design Comment
6	Cross-Section No. 8 - Rectangle 480/480				
	0.000	RC1 - interaction	0.7796	≤ 1	100) Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8
	4.000	RC1 - max M _y	0.0632	≤ 1	201) Shear check (V _{Ed} / V _{Rd,c} ≤ 1) acc. to 6.2.2 (2) with (6.4)
	0.000	RC1 - min M _y	0.2056	≤ 1	202) Shear check (V _{Ed} / V _{Rd,c} ≤ 1) acc. to 6.2.2 (1)
	0.000	CO22 - min N	0.5264	≤ 1	100) Fire Resistance - Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8

Tulos: pääteräkset = 8T25 & haat = T8 k375



Tulosten vertailu

☐ Governing Load			
☐ Normal Force	N	-438.977	kN
☐ Moment About y-Axis	M_y	-131.034	kNm
☐ Moment About z-Axis	M_z	-24.528	kNm
☐ Effective Length According to 5.8.3.2			
☐ Effective Length About Axis y	$l_{0,y}$	12.568	m
☐ Column Length	l_y	4.000	m
☐ Buckling Coefficient	β_y	3.1420	
☐ Effective Length About Axis z	$l_{0,z}$	11.588	m
☐ Column Length	l_z	4.000	m
☐ Buckling Coefficient	β_z	2.8970	
☐ Slenderness According to 5.8.3.2			
☐ Slenderness About Axis y	λ_y	90.7017	
☐ Effective Length	$l_{0,y}$	12.568	m
☐ Radius of Gyration	i_y	138.6	mm
☐ Slenderness About Axis z	λ_z	83.6292	
☐ Effective Length	$l_{0,z}$	11.588	m
☐ Radius of Gyration	i_z	138.6	mm

Kuormitustapaus: CO 7

MRT - Murtorajatilan voimasuureet [kN] ja [kNm]				
Puristus = (+)	Yläpää (top)		Alapää (btm)	
Veto = (-)	$M_{Oyy,top}$	$M_{Ozz,top}$	$M_{Oyy,btm}$	$M_{Ozz,btm}$
N_{Ed} [kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
438,98	0	0	-131,03	-24,53

$i_{yy} =$	138,6	$\lambda_{yy} =$	90,7	$L_{0,yy} =$	12568,0	mm
$i_{zz} =$	138,6	$\lambda_{zz} =$	83,6	$L_{0,zz} =$	11588,0	mm

☐ Limiting Slenderness According to 5.8.3.1 (1)			
☐ Limiting Slenderness About Axis y	$\lambda_{lim,y}$	48.5556	
☐ Factor A	A_y	0.7819	
☐ Consider effects of creep?		Yes	
☐ Effective Creep Coefficient	$\varphi_{ef,y}$	1.3948	
☐ Final value of creep coeff.	$\varphi(\infty,t_0)$	1.9630	
☐ Condition for neglecting creep fulfilled?		Failed	
☐ Final value of creep coeff. is less than or equal to two?	$\varphi(\infty,t_0) \leq 2.0$	Passed	
☐ Slenderness about y-axis less than or equal to 75?	$\lambda_y \leq 75$	Failed	
☐ Eccentricity in ULS higher as thickness of cross-section	$M_{y,0Ed}/N_{Ed} \geq h$	Passed	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,y}$	-102.903	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-278.408	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c-quasi,1,z}$	-369.6	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,z}$	-338.2	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis y (First Ord. Th)	$M_{c,1,y}$	-144.827	kNm
☐ Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c,1,z}$	-329.9	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{c,0,z}$	-298.5	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm

$$A_{yy} = 1/(1+0.2*\varphi_{ef,yy})$$

$$\varphi_{ef,yy} = \varphi(t,t_0)*(M_{0Eqp,yy}/M_{0Ed,yy})$$

KRT pitkääkaisen ja MRT momentin suhde, RFEM laskee arvoksi:

$$M_{c-quasi,1} / M_{c,1} = 102,903\text{kNm} / 144,827\text{kNm} = \mathbf{0,7105}$$

→ Kerrottuna virumaluvulla saadaan virumisaste: $0,7105 * 1,963 = \mathbf{1,39}$

$M_{0Eqp,yy}/$	
$M_{0Ed,yy}$	$\varphi_{ef,yy}$
0,74	1,45

Excelissä oletuksena on $1 / 1,35 = \mathbf{0,74} \rightarrow$ **Pieni ero**

☐ Factor B	B_y	1.2860	
☐ Mechanical Reinforcement Ratio	ω	0.3269	
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$B = \boxed{1,29}$$

$$B = (1+2*\omega)^{0.5}$$

<input type="checkbox"/> Factor C	C_y	0.7000	
<input type="checkbox"/> Moment Ratio	$r_{m,y}$	1.0000	
Column is unbraced, $r_{m,y}$ is set to 1.0.			
<input type="checkbox"/> Relative Normal Force	n	0.0841	
Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$$C_{yy} = 1.7 - r_{m,yy}$$

$$r_{m,yy} = \begin{cases} 1 & \text{jos rakenne on sivusiirtävä (mastopilari)} \\ 1 & \text{jos } M_{02,yy} + e_{i,zz} * N_{Ed} = 0 \\ (M_{01,yy} + e_{i,zz} * N_{Ed}) / (M_{02,yy} + e_{i,zz} * N_{Ed}) & \text{muussa tapauksessa} \end{cases}$$

N_{Ed} [kN]	n	A_{yy}	$r_{m,yy}$	C_{yy}	$\lambda_{lim,yy}$	λ_{yy}	$\lambda_{yy} > \lambda_{lim,yy}$
439,0	0,08	0,77	1,00	0,70	48,1	90,7	Hoikka

Rajajoikkuus lähes sama (48,56 ja 48,1), ero johtuu KRT/MRT momenttien suhteesta, joka tekee mitoitusmoduulin rajajoikkuudet hieman suuremmiksi.

<input type="checkbox"/> Limiting Slenderness About Axis z	$\lambda_{lim,z}$	48.7578	
<input type="checkbox"/> Factor A	A_z	0.7851	
Consider effects of creep?		Yes	
<input type="checkbox"/> Effective Creep Coefficient	$\varphi_{ef,z}$	1.3682	
Final value of creep coeff.	$\varphi(\infty, t_0)$	1.9630	
<input type="checkbox"/> Condition for neglecting creep fulfilled?		Failed	
Final value of creep coeff. is less than or equal to two?	$\varphi(\infty, t_0) \leq 2.0$	Passed	
Slenderness about z-axis less than or equal to 75?	$\lambda_z \leq 75$	Failed	
Eccentricity in ULS higher as thickness of cross-section	$M_{z,0Ed} / N_{Ed} \geq h_y$	Failed	
<input type="checkbox"/> Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,z}$	-25.960	kNm
Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-278.408	kN
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	$e_{c-quasi,1,y}$	-93.2	mm
Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,y}$	-64.3	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-29.0	mm
Load		RC4	
<input type="checkbox"/> Moment About Axis z (First Ord. Th)	$M_{c,1,z}$	-37.245	kNm
Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	$e_{c,1,y}$	-84.8	mm
Intended Eccentricity	$e_{c,0,y}$	-55.9	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-29.0	mm

$$A_{zz} = 1 / (1 + 0.2 * \varphi_{ef,zz})$$

$$\varphi_{ef,zz} = \varphi(t, t_0) * (M_{0Eqp,zz} / M_{0Ed,zz})$$

KRT pitkäaikaisen ja MRT momentin suhde, RFEM:n mukaan

$$M_{c-quasi,1} / M_{c,1} = -25,960 \text{ kNm} / -37,245 \text{ kNm} = \mathbf{0,697}$$

→ Kerrottuna virumaluvulla saadaan virumisaste: $0,697 * 1,963 = 1,3682$

$M_{0Eqp,zz}/$ $M_{0Ed,zz}$	$\Psi_{ef,zz}$
0,74	1,45

Excelissä oletuksena on $1 / 1,35 = 0,74 \rightarrow$ Pieni ero

<input type="checkbox"/> Factor B	B_z	1.2860	
<input type="checkbox"/> Mechanical Reinforcement Ratio	ω	0.3269	
Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$B =$ $\quad B = (1+2*\omega)^{0.5}$

<input type="checkbox"/> Factor C	C_z	0.7000	
<input type="checkbox"/> Moment Ratio	$r_{m,z}$	1.0000	
Column is unbraced, $r_{m,z}$ is set to 1.0.			
<input type="checkbox"/> Relative Normal Force	n	0.0841	
Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²

$C_{zz} = 1.7 - r_{m,zz}$

$$r_{m,zz} = \begin{cases} 1 & \text{jos rakenne on sivusiirtävä (mastopilari)} \\ 1 & \text{jos } M_{02,zz} + e_{i,yy} * N_{Ed} = 0 \\ (M_{01,zz} + e_{i,yy} * N_{Ed}) / (M_{02,zz} + e_{i,yy} * N_{Ed}) & \text{muussa tapauksessa} \end{cases}$$

N_{Ed} [kN]	n	A_{zz}	$r_{m,zz}$	C_{zz}	$\lambda_{lim,zz}$	λ_{zz}	$\lambda_{zz} > \lambda_{lim,zz}$
439,0	0,08	0,77	1,00	0,70	48	83,6	Hoikka

Rajahoikkuus lähes sama (48,75 ja 48), ero johtuu KRT/MRT momenttien suhteesta, joka tekee mitoitusmoduulin rajahoikkuudet hieman suuremmiksi.

<input type="checkbox"/> Design Type			
<input type="checkbox"/> Conditions of standard design according to 5.8.3.1 (1)			
<input type="checkbox"/> Condition About Axis y	$\lambda_y \leq \lambda_{lim,y}$	Failed	
Provided Slenderness	λ_y	90.7017	
Limiting Slenderness About Axis y	$\lambda_{lim,y}$	48.5556	
<input type="checkbox"/> Condition About Axis z	$\lambda_z \leq \lambda_{lim,z}$	Failed	
Provided Slenderness	λ_z	83.6292	
Limiting Slenderness About Axis z	$\lambda_{lim,z}$	48.7578	
Condition of standard design fulfilled?		Failed	

$\lambda_{lim,y}$	λ_{yy}	$\lambda_{yy} > \lambda_{lim,y}$	$\lambda_{lim,z}$	λ_{zz}	$\lambda_{zz} > \lambda_{lim,z}$
48,1	90,7	Hoikka	48	83,6	Hoikka

Tulokset hyvin lähellä toisiaan sovellusten välillä.

Eccentricities			
Intended Eccentricity According to 5.8.8.2			
Intended Eccentricity in z-Direction		$e_{0,z}$	-298.5 mm
Moment Diagram Along the Support		Diagram M_y	Different
Moment About Axis y		M_y	-131.034 kNm
Absolute Normal Force		$ N $	438.977 kN
Intended Eccentricity in y-Direction		$e_{0,y}$	-55.9 mm
Moment Diagram Along the Support		Diagram M_z	Different
Moment About Axis z		M_z	-24.528 kNm
Absolute Normal Force		$ N $	438.977 kN

Mitoitusmoduuli muuttaa taivutusmomentin epäkeskisyydeksi e_0 , joka lisätään mitta-epätarkkuuksiin. Niiden summa kerrotaan normaalivoimalla, josta saadaan ensimmäisen kertaluvun momentti.

Eccentricity due to imperfection according to 5.2			
Eccentricity Due to Imperfection in z-Direction		$e_{i,z}$	-31.4 mm
Inclination		$\theta_{i,z}$	0.0050
Basic Value of Inclination		θ_0	0.0050
Reduction Factor for Column Height		$\alpha_{h,z}$	1.0000
Calculated Value of Reduction Coefficient		$\alpha_{h,z,calc}$	1.0000
Column Length		l_y	4.000 m
Reduction Factor for Column Number		α_m	1.0000
According to user specification, the column will be designed as a single column.			
Buckling Length		$l_{0,y}$	12.568 m
Eccentricity Due to Imperfection in y-Direction		$e_{i,y}$	-29.0 mm
Inclination		$\theta_{i,y}$	0.0050
Basic Value of Inclination		θ_0	0.0050
Reduction Factor for Column Height		$\alpha_{h,y}$	1.0000
Calculated Value of Reduction Coefficient		$\alpha_{h,y,calc}$	1.0000
Column Length		l_z	4.000 m
Reduction Factor for Column Number		α_m	1.0000
According to user specification, the column will be designed as a single column.			
Buckling Length		$l_{0,z}$	11.588 m

$$\theta_0 = \frac{1}{200}$$

$$\theta_i = \frac{1}{200}$$

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_m * \alpha_h$$

$$m = 1$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\alpha_m = [0,5 * (1 + 1/m)]^{0,5}$$

$$L = 4,0 \text{ m}$$

$$\alpha_h = \frac{1}{1,000}$$

$$\alpha_h = 2/(L)^{0,5}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1$$

$$e_{i,zz} = 31,4 \text{ mm} \quad e_{i,zz} = \theta_i * L_{0,yy} / 2$$

$$e_{i,yy} = 29,0 \text{ mm} \quad e_{i,yy} = \theta_i * L_{0,zz} / 2$$

☐ Minimum Eccentricity According to 6.1 (4)			
☐ Minimum Eccentricity in z-Direction	$e_{min,z}$	-20.0	mm
☐ Thickness of Structural Member	$h_{w,z}$	480.0	mm
☐ Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20 \text{ mm},z}$	20.0	mm
☐ Minimum Eccentricity in y-Direction	$e_{min,y}$	-20.0	mm
☐ Thickness of Structural Member	$h_{w,y}$	480.0	mm
☐ Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20 \text{ mm},y}$	20.0	mm

$$e_{0,zz} = 20,00 \text{ mm} \quad e_{0,zz} = \text{MAX}(20\text{mm} ; H/30)$$

$$e_{0,yy} = 20,00 \text{ mm} \quad e_{0,yy} = \text{MAX}(20\text{mm} ; B/30)$$

☐ Moments According to First Order Theory			
☐ Moments According to First Order Theory			
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Moment About Axis y	$M_{Ed,1,y}$	-144.827	kNm
☐ Calculated Total Eccentricity in z-Direction	$e_{calc,1,z}$	-329.9	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	-298.5	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm
☐ Moment About Axis z	$M_{Ed,1,z}$	-37.245	kNm
☐ Calculated Total Eccentricity in y-Direction	$e_{calc,1,y}$	-84.8	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	-55.9	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-29.0	mm

Mitoitusmoduuli laskee epäkeskisyydet e_0 ja e_i yhteen ja kertoo summan normaalivoimalla.

$$M_{Ed,1,y} = -0,3299\text{m} * 438,977\text{kN} = \mathbf{144,8\text{kNm}}$$

$$M_{Ed,1,z} = -0,0848\text{m} * 438,977\text{kN} = \mathbf{37,2\text{kNm}}$$

SKOL:

$$M_{01,yy} = \text{MIN} (|M_{0yy,top}| ; |M_{0yy,btm}|)$$

$$M_{01,zz} = \text{MIN} (|M_{0zz,top}| ; |M_{0zz,btm}|)$$

$$M_{02,yy} = \text{MAX} (|M_{0yy,top}| ; |M_{0yy,btm}|)$$

$$M_{02,zz} = \text{MAX} (|M_{0zz,top}| ; |M_{0zz,btm}|)$$

$$M_{0e,yy} = \text{MAX} \begin{cases} 0.6 * M_{02,yy} + 0.4 * M_{01,yy} \\ 0.4 * M_{02,yy} \end{cases}$$

$$M_{0e,zz} = \text{MAX} \begin{cases} 0.6 * M_{02,zz} + 0.4 * M_{01,zz} \\ 0.4 * M_{02,zz} \end{cases}$$

Y-Y akselin ympäri

Z-Z akselin ympäri

Ehto:

$M_{01,yy}$ [kNm]	$M_{02,yy}$ [kNm]	$M_{0e,yy}$ [kNm]	$M_{01,zz}$ [kNm]	$M_{02,zz}$ [kNm]	$M_{0e,zz}$ [kNm]	$ M_{02,yy} \geq M_{01,yy} $ $ M_{02,zz} \geq M_{01,zz} $
0,0	131,0	78,6	0,0	24,5	14,7	

y-y akselin ympäri:

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{ala}) = 131,0\text{kNm}, \text{mittaepätarkkuus myöhemmin}$$

z-z akselin ympäri:

$$M_{02} = \max(M_{ylä}; M_{ala}) = 24,5\text{kNm}, \text{mittaepätarkkuus myöhemmin}$$

$M_{0e,yy}$ ja $M_{0e,zz}$ on laskettu kaavojen mukaan SKOL-pohjassa, mutta niitä tarvitaan vain sivusiirtymättömissä rakenteissa.

Jäykistämättömälle pilarille mitoitusmomentti on $M_{0Ed} = M_{02}$

Mittaepätarkkuuksien huomiointi SKOL-pohjassa:

N_{Ed} [kN]	$M_{i,yy}$ [kNm]	$M_{i,zz}$ [kNm]
438,98	13,8	12,7
0	0,0	0,0
0	0,0	0,0
0	0,0	0,0

Huomioi epätarkkuus(e_i): Z-Z ja Y-Y suunnassa

$$e_{i,zz} = 31,4 \text{ mm}$$

$$e_{i,yy} = 29,0 \text{ mm}$$

$$e_{i,zz} = \theta_i * L_{0,yy} / 2$$

$$e_{i,yy} = \theta_i * L_{0,zz} / 2$$

$$M_{i,yy} = e_{i,zz} * N_{Ed}$$

$$M_{i,zz} = e_{i,yy} * N_{Ed}$$

y-y akselin ympäri: $M_{i,yy} = N_{Ed} * e_{i,zz} = 438,98\text{kN} * 0,0314\text{m} = 13,8\text{kNm}$

1. Kertaluvun momentti: $M_{02} + M_{i,yy} = 131,0\text{kNm} + 13,8\text{kNm} = \mathbf{144,8\text{kNm}}$

z-z akselin ympäri: $M_{i,zz} = N_{Ed} * e_{i,yy} = 438,98\text{kN} * 0,029\text{m} = 12,7\text{kNm}$

1. Kertaluvun momentti: $M_{02} + M_{i,zz} = 24,5\text{kNm} + 12,7\text{kNm} = \mathbf{37,2\text{kNm}}$

→ Eli vaikka mittaepätarkkuudet tarvitsee huomioida eurokoodin mukaan vain suunnassa, jossa niillä on epäedullisin vaikutus, RFEM huomioi ne molemmissa, joka on varmallalla puolella. Tässä vertailussa on huomioitu molemmissa suunnissa myös SKOL:ssa, mutta eroa tuloksissa tietysti syntyy, jos huomioidaan vain toisessa suunnassa.

<input type="checkbox"/> Separate Design in Each Principal Direction According to 5.8.9			
<input type="checkbox"/> Condition 5.38a			Passed
<input type="checkbox"/> Slenderness Ratio		λ_y/λ_z	1.0846
<input type="checkbox"/>	Slenderness About Axis y	λ_y	90.7017
<input type="checkbox"/>	Slenderness About Axis z	λ_z	83.6292
<input type="checkbox"/> Slenderness Ratio		λ_z/λ_y	0.9220
<input type="checkbox"/>	Slenderness About Axis y	λ_y	90.7017
<input type="checkbox"/>	Slenderness About Axis z	λ_z	83.6292

<input type="checkbox"/> Condition 5.38b		Failed	
<input type="checkbox"/> Imperfections in secondary direction are omitted acc. to 5.8.9 (2)			
<input type="checkbox"/> Ratio of Relative Eccentricities	$(e_y/h_{eq})/(e_z/b)$	0.4171	
<input type="checkbox"/> Eccentricity in z-Direction	e_z	-518.7	mm
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	-298.5	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,z}$	-188.8	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	e_y	-245.3	mm
<input type="checkbox"/> Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	-55.9	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	0.0	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,y}$	-160.5	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Height	h_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Width	b_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Ratio of Relative Eccentricities	$(e_z/b_{eq})/(e_y/h_{eq})$	2.3974	
<input type="checkbox"/> Eccentricity in z-Direction	e_z	-518.7	mm
<input type="checkbox"/> Eccentricity in y-Direction	e_y	-245.3	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Height	h_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Equivalent Width	b_{eq}	480.0	mm
<input type="checkbox"/> Separate design in each principal direction possible?		Failed	

Excel huomioi joka tapauksessa vinon taivutuksen tarkistuskaavan mukaan. RFEM tekee tässä myös niin, koska ehto 5.38b ei toteudu.

Toisen kertaluvun taivutusmomentti: "in z-direction" vastaa excelissä taivutusmomenttia y-y akselin ympäri. Käydään läpi eroavat parametrit:

☐ Moments According to Second Order Theory			
☐ Eccentricity Through Second Ord. Th. According to 5.8.8.2(3)			
☐ Eccentricity Through Second Order Theory in z-Direction	$e_{2,z}$	-188.8	mm
☐ Curvature in z-plane	$1/r_z$	0.012	1/m
☐ Selected Factor (Normal Force)	sel $K_{r,z}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Normal Force)	$K_{r,z}$	1.3408	
☐ Max. Ultimate Limit State	η_u	1.3269	
☐ Ratio	ω	0.3269	
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	8	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Relative Normal Force	n	0.0841	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Resistant Concrete Normal Force (Bending)	n_{bal}	0.4000	
☐ Selected Factor (Creep)	sel $K_{\phi,z}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Creep)	$K_{\phi,z}$	0.9237	
☐ Factor	β_y	-0.055	
☐ Char. Concrete Compressive Strength	f_{ck}	40.00	N/mm ²
☐ Slenderness About Axis y	λ_y	90.7017	
☐ Effective Creep Coefficient	$\phi_{ef,y}$	1.3948	
☐ Final value of creep coeff.	$\phi(\infty,t_0)$	1.9630	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,y}$	-102.903	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-278.408	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c-quasi,1,z}$	-369.6	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,z}$	-338.2	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis y (First Ord. Th)	$M_{c,1,y}$	-144.827	kNm
☐ Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Eccentricity in z-Direction	$e_{c,1,z}$	-329.9	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{c,0,z}$	-298.5	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm
☐ Curvature in z-plane	$1/r_{0,z}$	0.012	1/m
☐ Strain (Yield Stress)	ϵ_{yd}	2.17	%
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Modulus of Elasticity	E_s	200000.00	N/mm ²
☐ Effective Depth	d_z	404.2	mm
☐ Buckling Length	$l_{0,y}$	12.568	m
☐ Factor (Curvature Distribution)	c	9.8696	

N_{Ed} [kN]	n	$K_{r,yy}$	$\varphi_{ef,yy}$	$K_{\varphi,yy}$	$(1/r)_{yy}$ [1/mm]	c_{yy}	$e_{2,zz}$ [mm]	$M_{2,yy}$ [kNm]
438,98	0,08	1,000	1,5	1,000	0,000012	9,87	191,3	84,0

RFEM $e_2 = 188,8\text{mm}$ & EXCEL $e_2 = 191,3\text{mm}$, eroa 2,5mm

Normaalivoimasta riippuva korjauskerroin $K_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1$, jossa 1 on "maksimiarvo"

$$n_u = \frac{1,33}{0,448}$$

$$n_u = 1 + \omega$$

$$n_{bal,yy} = N_{Rd,bal,yy} / (A_c * f_{cd})$$

Tasapainotilaa vastaava suhteellinen normaalivoima n_{bal}

Eurokoodin mukaan voi käyttää arvoa 0.4, kuten RFEM tekee. Excel laskee kuitenkin

$$n_{bal,yy} = \frac{0,448}{0,448}$$

$$n_{bal,yy} = N_{Rd,bal,yy} / (A_c * f_{cd})$$

Tästä voi tietyissä tilanteissa syntyä eroa. Molemmista kuitenkin normaalivoiman ja vi-
ruman korjauskertoimet ovat 1, joten kaarevuudelle pitäisi syntyä sama arvo.

Taipuma:

$$e_{2,zz} = (1/r)_{yy} * L_{0yy}^2 / c_{yy}$$

Toisen kertaluvun momentti:

$$M_{2,yy} = \begin{cases} e_{2,zz} * N_{Ed} & , \text{jos } \lambda_{yy} > \lambda_{lim,yy} \end{cases}$$

Teholliset korkeudet ovat tässä vertailussa samat, koska mitoitusmoduulin betonipeit-
teeseen laskettiin 8mm paksut reunahaat mukaan.

Taipuman ero on hyvin pieni ja johtuu pyöristyksistä.

☐ Eccentricity Through Second Order Theory in y-Direction	$e_{2,y}$	-160.5	mm
☐ Curvature in y-plane	$1/r_y$	0.012	1/m
☐ Selected Factor (Normal Force)	sel $K_{r,y}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Normal Force)	$K_{r,y}$	1.3408	
☐ Max. Ultimate Limit State	n_u	1.3269	
☐ Ratio	ω	0.3269	
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
☐ From Item	No.	1	
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	8	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Relative Normal Force	n	0.0841	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Resistant Concrete Normal Force (Bending)	n_{bal}	0.4000	
☐ Selected Factor (Creep)	sel $K_{\phi,y}$	1.0000	
☐ Calculated Factor (Creep)	$K_{\phi,y}$	0.9897	
☐ Factor	β_z	-0.008	
☐ Char. Concrete Compressive Strength	f_{ck}	40.00	N/mm ²
☐ Slenderness About Axis z	λ_z	83.6292	
☐ Effective Creep Coefficient	$\phi_{ef,z}$	1.3682	
☐ Final value of creep coeff.	$\phi(\infty,t_0)$	1.9630	
☐ Moment (Quasi-permanent Action)	$M_{c-quasi,1,z}$	-25.960	kNm
☐ Normal Force (Quasi-permanent Action)	$N_{Ed-quasi}$	-278.408	kN
☐ Eccentricity in y-Direction	$e_{c-quasi,1,y}$	-93.2	mm
☐ Intended Unreduced Eccentricity	$e_{c-quasi,0,y}$	-64.3	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-29.0	mm
☐ Load		RC4	
☐ Moment About Axis z (First Ord. Th)	$M_{c,1,z}$	-37.245	kNm
☐ Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Eccentricity in y-Direction	$e_{c,1,y}$	-84.8	mm
☐ Intended Eccentricity	$e_{c,0,y}$	-55.9	mm
☐ Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-29.0	mm
☐ Curvature in y-plane	$1/r_{0,y}$	0.012	1/m
☐ Strain (Yield Stress)	ϵ_{yd}	2.17	‰
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Modulus of Elasticity	E_s	200000.00	N/mm ²
☐ Effective Depth	d_y	404.2	mm
☐ Buckling Length	$l_{0,z}$	11.588	m
☐ Factor (Curvature Distribution)	c	9.8696	

N_{Ed} [kN]	n	$K_{r,zz}$	$\varphi_{ef,zz}$	$K_{\varphi,zz}$	$(1/r)_{zz}$ [1/mm]	c_{zz}	$e_{2,y}$ [mm]	$M_{2,y}$ [kNm]
439,0	0,08	1,000	1,45	1,000	0,000012	9,87	162,6	71,4

Samat asiat, kuin toisessa suunnassa. Taipuma SKOL-pohjassa vain 2,1mm suurempi.

☐ Moments According to Second Order Theory			
Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Moment About Axis y	$M_{Ed,y2}$	-227.693	kNm
☐ Total Eccentricity in z-Direction	$e_{2,tot,z}$	-518.7	mm
Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,z}$	-188.8	mm
☐ Eccentricity (First Ord. Th.) in z-Direction	$e_{1,z}$	-329.9	mm
Intended Eccentricity	$e_{0,z}$	-298.5	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,z}$	-31.4	mm
☐ Minimum Eccentricity in z-Direction	$e_{min,z}$	-20.0	mm
Thickness of Structural Member	$h_{w,z}$	480.0	mm
Minimum Value of Minimum Eccentricity	$e_{20\text{ mm},z}$	20.0	mm
☐ Moment About Axis z	$M_{Ed,z2}$	-107.691	kNm
☐ Total Eccentricity in y-Direction	$e_{2,tot,y}$	-245.3	mm
Eccentricity Through Second Ord. Th.	$e_{2,y}$	-160.5	mm
☐ Eccentricity (First Ord. Th.) in y-Direction	$e_{1,y}$	-84.8	mm
Intended Eccentricity	$e_{0,y}$	-55.9	mm
Eccentricity Due to Imperfection	$e_{i,y}$	-29.0	mm
Minimum Eccentricity in y-Direction	$e_{min,y}$	-20.0	mm

RFEM laskee epäkeskisyydet yhteensä, jonka jälkeen kertoo sen normaalivoimalla.

$$e_1 + e_2 \times N_{Ed}$$

EXCEL laskee ensin sauvanpään momentin ja lisää siihen alkuepäkeskisyydestä johtuvan momentin ja lopuksi toisen kertaluvun momentin.

Sivusiirtyvälle rakenteelle:

$$M_{Ed,y} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} e_{0,zz} * N_{Ed} \\ M_{02,y} + M_{2,y} + M_{i,y} \end{array} \right. , \text{ näistä siis tässä tapauksessa alempi.}$$

N_{Ed} [kN]	$M_{02,y}$ [kNm]	$M_{0e,y}$ [kNm]	$M_{2,y}$ [kNm]	$M_{i,y}$ [kNm]	$e_{0,zz} * N_{Ed}$ [kNm]	$M_{Ed,y}$ [kNm]
439,0	131,0	78,6	84,0	13,8	8,8	228,8

Mitoitusmoduuli: 227,7kNm (y-akselin ympäri).

Sivusiirtyvälle rakenteelle:

$$M_{Ed,zz} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} e_{0,yy} * N_{Ed} \\ M_{02,zz} + M_{2,zz} + M_{i,zz} \end{array} \right. , \text{ alempi kaava.}$$

N_{Ed} [kN]	$M_{02,zz}$ [kNm]	$M_{0e,zz}$ [kNm]	$M_{2,zz}$ [kNm]	$M_{i,zz}$ [kNm]	$e_{0,y} * N_{Ed}$ [kNm]	$M_{Ed,zz}$ [kNm]
439,0	24,5	14,7	71,4	12,7	8,8	108,6

Mitoitusmoduuli: 107,7kNm (z-akselin ympäri).

Excelissä hieman suuremmat mitoitusmomentit. Johtuu muutaman millimetrin suuremmasta taipumasta molemmissa suunnissa.

Provided Reinforcement			
<input type="checkbox"/> From Item	No.		1
<input type="checkbox"/> Item Statically Effective			Yes
<input type="checkbox"/> Rebar Diameter	d_s	0.025	m
<input type="checkbox"/> Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
<input type="checkbox"/> Number	n_s	8	
<input type="checkbox"/> Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
<input type="checkbox"/> Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²

Vastaavat laitettiin excelin lähtötietoihin.

State of Strain			
<input type="checkbox"/> State of Strain for Moment About y-Axis			
<input type="checkbox"/> Design Internal Forces			
<input type="checkbox"/> Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
<input type="checkbox"/> Moment About y-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,y2}$	-227.693	kNm
<input type="checkbox"/> Curvatures			
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane z	$1/r_z$	-0.005	1/m
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane y	$1/r_y$	0.000	1/m
<input checked="" type="checkbox"/> Points of Cross-Section			
<input checked="" type="checkbox"/> Rebars			

State of Strain for Moment About z-Axis			
<input type="checkbox"/> Design Internal Forces			
<input type="checkbox"/> Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
<input type="checkbox"/> Moment About z-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,z2}$	-107.691	kNm
<input type="checkbox"/> Curvatures			
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane z	$1/r_z$	0.000	1/m
<input type="checkbox"/> Curvature in Plane y	$1/r_y$	0.002	1/m
<input checked="" type="checkbox"/> Points of Cross-Section			
<input checked="" type="checkbox"/> Rebars			

[-] Ultimate State			
[-] Ultimate State for Moment About y-Axis			
[-] Ultimate Internal Forces			
[-] Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-439.392	kN
[-] Ultimate Moment About y-Axis	$M_{y,Rd}$	-415.900	kNm
[-] Ultimate Curvatures			
[-] Ultimate Curvature in Plane z	$1/r_{z,Rd}$	-0.031	1/m
[-] Ultimate Curvature in Plane y	$1/r_{y,Rd}$	0.000	1/m
[-] Points of Cross-Section			
[-] Rebars			
[-] Ultimate State for Moment About z-Axis			
[-] Ultimate Internal Forces			
[-] Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-438.634	kN
[-] Ultimate Moment About z-Axis	$M_{z,Rd}$	-415.771	kNm
[-] Ultimate Curvatures			
[-] Ultimate Curvature in Plane z	$1/r_{z,Rd}$	0.000	1/m
[-] Ultimate Curvature in Plane y	$1/r_{y,Rd}$	0.031	1/m
[-] Points of Cross-Section			
[-] Rebars			

☐ Verification			
☐ Required Safety of Ultimate State	req γ	1.0	
☐ Provided Safety of Ultimate State	prov γ	1.2399	
☐ Design Internal Forces			
☐ Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Moment About y-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,y2}$	-227.693	kNm
☐ Moment About z-Axis According to Second Order Theory (C	$M_{Ed,z2}$	-107.691	kNm
☐ Ultimate Internal Forces			
☐ Ultimate Normal Force	N_{Rd}	-438.634	kN
☐ Ultimate Moment About y-Axis	$M_{y,Rd}$	-415.900	kNm
☐ Ultimate Moment About z-Axis	$M_{z,Rd}$	-415.771	kNm
☐ Criterion 5.39			
☐ Moment Resistance About y-Axis	$M_{Rd,y}$	-415.900	kNm
☐ Moment Resistance About z-Axis	$M_{Rd,z}$	-415.771	kNm
☐ Moment About y-Axis	$M_{Ed,y}$	-227.693	kNm
☐ Moment About z-Axis	$M_{Ed,z}$	-107.691	kNm
☐ Exponent			
☐ Type of Cross-Section		Rectangle	
☐ Design Normal Force	N_{Ed}	-438.977	kN
☐ Design Axial Resistance of Section			
☐ Provided Reinforcement	prov A_s	39.27	cm ²
☐ From Item			
☐ Item Statically Effective		Yes	
☐ Rebar Diameter	d_s	0.025	m
☐ Area of Cross-Section Per Rebar	a_s	4.91	cm ²
☐ Number	n_s	8	
☐ Total Reinforcement Area	prov A_s	39.27	cm ²
☐ Design Value of Yield Stress	f_{yd}	434.78	N/mm ²
☐ Area of Cross-Section	A_c	2304.00	cm ²
☐ Design Value of Concrete Compr. Strength	f_{cd}	22.67	N/mm ²
☐ Design Criterion (req γ / prov γ)	Criterion	0.8065	

$M_{Rd,yy}$	$M_{Rd,zz}$
[kNm]	[kNm]
412,3	412,3

Taivutuskestävyydet SKOL-pohjassa hieman pienempiä.

Käyttöasteet hyvin lähellä toisiaan. Marginaaliset erot johtuvat lähinnä taivutuskestävyyksien ja toisen kertaluvun momenttien pienistä eroista. Excel suorittaa aina vinon taivutuksen tarkistuksen, RFEM tarkistaa ensin onko "aidosti vino taivutus".

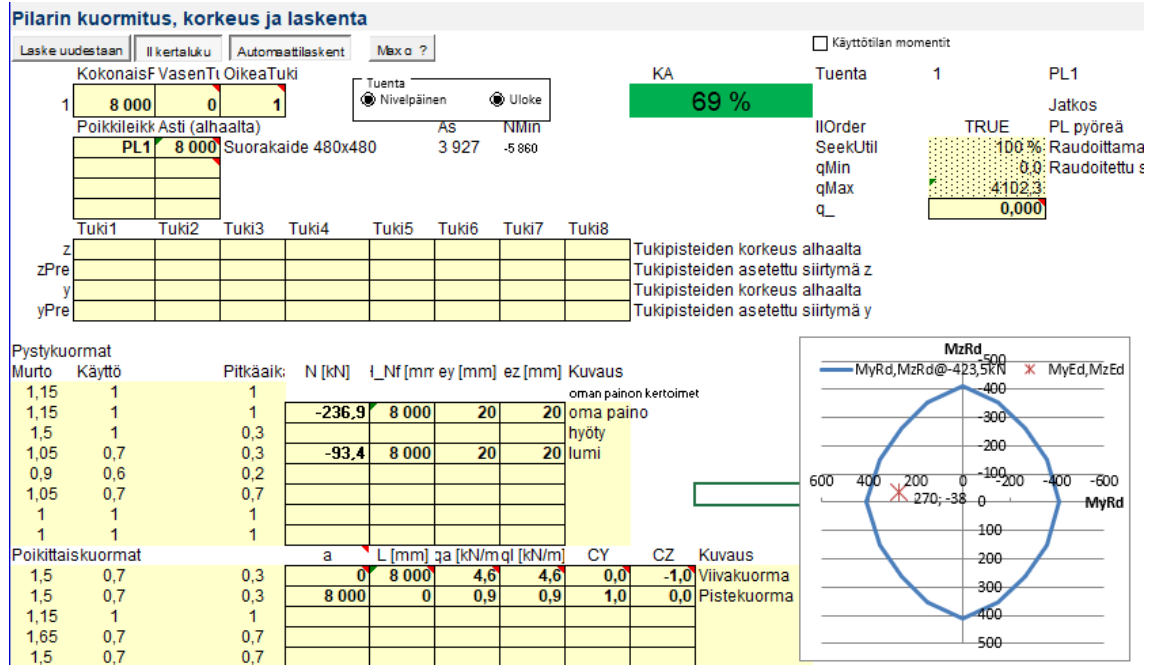
Käyttöasteet:

Mitoitusmoduuli 80,7%

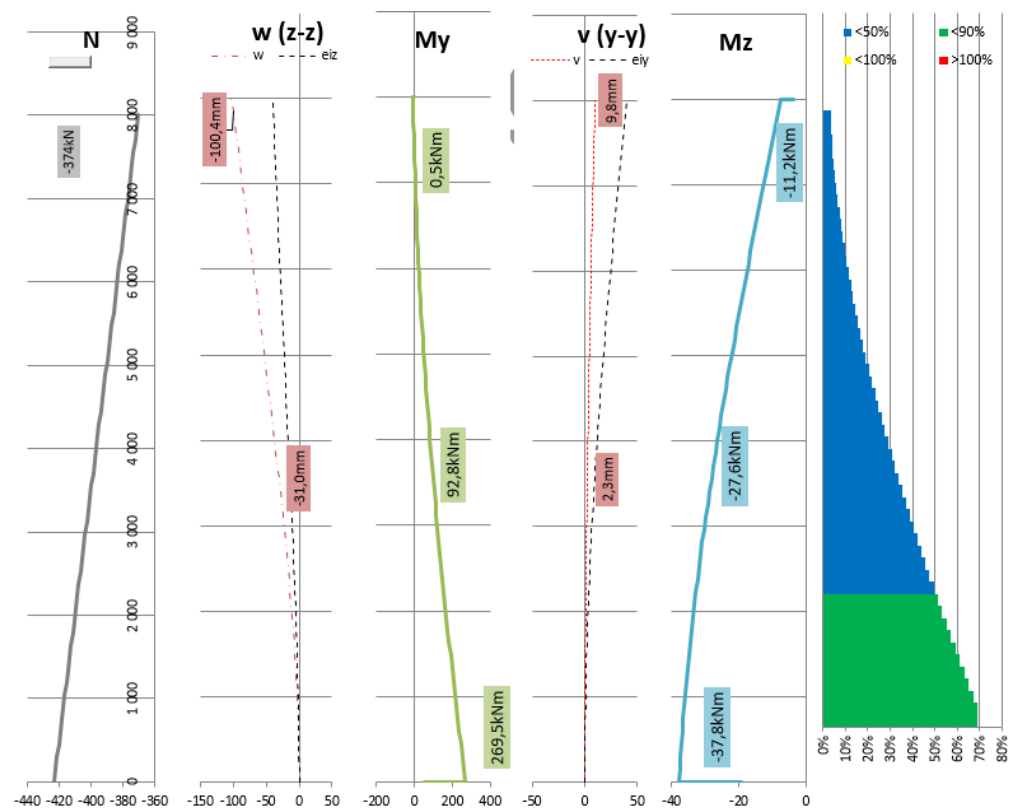
SKOL: 81,8%

Mastopilari: Swecon oman mitoitussovelluksen tulos

Kuormitustiedot ja käyttöaste:

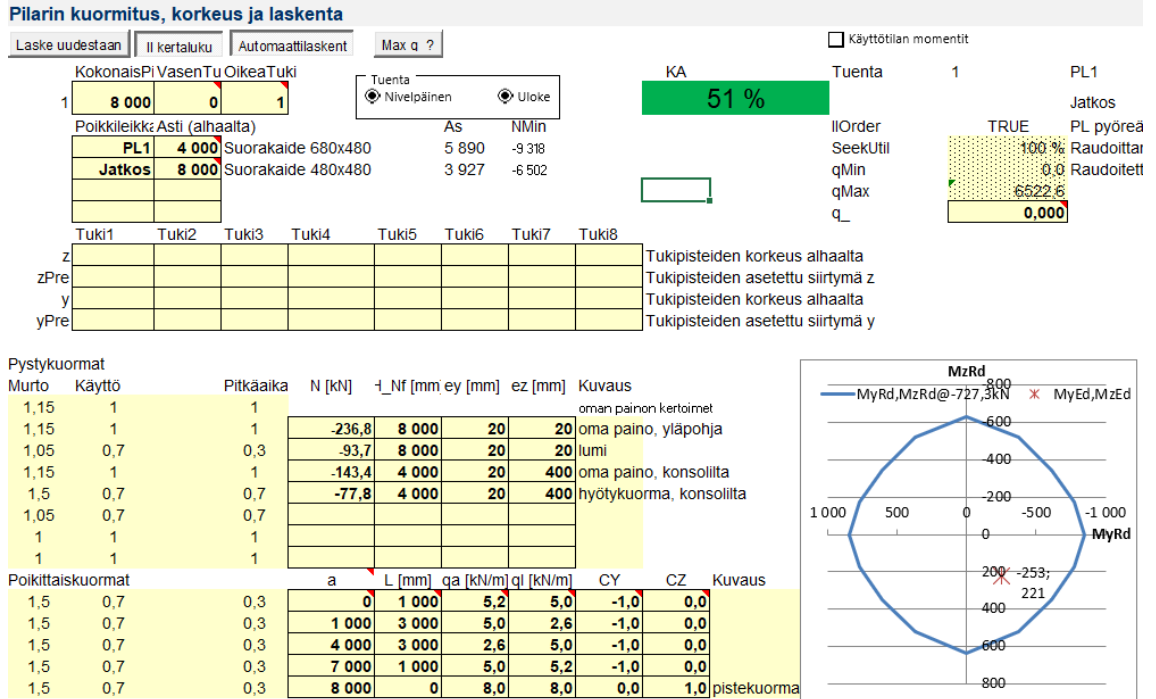


Mitoitusmomentit:



Kaksikerrosmastopilari: Swecon oman mitoitusovelluksen tulos

Kuormitustiedot ja käyttöaste:



Mitoitusmomentit:

