



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jarkko Mannersuo

LIITTOPIILARIN KÄYTTÖ KEHÄRA- KENTEEN OSANA

Ylempi AMK-tutkinto

Tekniikka ja liikenne

2011

ALKUSANAT

Olen rakennesuunnittelija.

Rakennesuunnittelun tehtäväkenttä on varsin laaja ja sen vuoksi myös vaikeasti hallittava yhdelle henkilölle. Onneksemme suunnittelutoimistoissa on tiettyyn osaamisalueeseen erikoistuneita henkilöitä, joilta voi tarpeen vaatiessa pyytää tukea ja neuvoja omien ajatusmaailmojen vahvistamiseen ja korjaamiseen. Tämä laaja tehtäväkenttä luo samalla työnkuvaan haasteellisuutta koko työuran ajaksi.

Toivon, että tämä työ tukee toimistossamme teollisuushallien suunnittelijoita, ja antaa heille varmuutta tekemäänsä työtä kohtaan.

Päättötyön ohjaajalleni Tapani Hahtokarille kiitokset työni ammattimaisesta ohjaamisesta omien kiireidensä ohessa.

Kiitokset työnantajalleni mahdollisuudesta työskennellä mieleisessäni työssä, sekä kiitos työkavereilleni keskusteluista aiheesta, ja varsinkin aiheen sivusta.

Kiitos myös perheelleni jaksamisesta isän ja aviomiehen istuessa ilta toisensa jälkeen tietokoneella päättötyön kimpussa omissa ajatuksissaan.

Seinäjoella 1.5.2011

Jarkko Mannersuo

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakentamisen koulutusohjelma
(ylempi AMK)

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jarkko Mannersuo
Opinnäytetyön nimi	Liittopilarin käyttö kehärakenteen osana
Vuosi	2011
Kieli	suomi
Sivumäärä	34 + 6 liitettä
Ohjaaja	Tapani Hahtokari

Työn tavoitteena oli laatia excel-taulukkolaskentaohjelma, joka tukee päivittäistä rakennesuunnittelijan työtä suunniteltaessa teollisuushallin runkorakenteita. Excel-pohja laskee varsinaista lopullista rungon mitoittamista varten tarvittavat alustavat profiilit pilarille ja ristikon paarteille, jäykistysjärjestelmän epätarkkuuksista aiheutuvat lisävoimat, rakenteen siirtymätilan vaikutukset, sekä sillä pystyy mitoittamaan lopuksi liittopilarin. Liittopilari koostuu putkiprofiilista, sisään tulevas- ta raudoitteesta ja betonoinnista. Liittopilarille huomioidaan normaalivoiman ja momentin aiheuttama yhteisvaikutus.

Aineistona on käytetty eurokoodeja, sekä muuta liittorakenteisiin liittyvää kirjalli- suutta ja muuta materiaalia.

Liittopilari lisää huomattavasti rakenteen kokonaisjäykkyyttä ja samalla pienentää kehärakenteen sivuttaista siirtymään. Kehärakenteesta tulee sivusiirtymätön ja näin mahdollistuu liittopilarin käyttö kehärakenteen osana.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Rakentamisen koulutusohjelma
(ylempi AMK)

ABSTRACT

Author	Jarkko Mannersuo
Title	Liittopilarin käyttö kehärakenteen osana
Year	2011
Language	Finnish
Pages	34 + 6 Appendices
Name of Supervisor	Tapani Hahtokari

The aim of this work was to create an Excel program that supports the daily work of a designer of industrial buildings. The program calculates the preliminary profiles for columns and bars of frameworks that are needed for designing the frame of the building. It also calculates the equivalent stabilizing forces that are due to inaccuracy in the bracing system as well as the effects of deformed of the structure, and finally, it gives the correct measurements for the composite column. The composite column consists of a hollow profile, reinforcing steel and concrete. The normal force and bending moment due to interaction are both taken into account.

The resources consist of Eurocodes and other studies and materials on composite structures.

Composite column significantly increases the overall stiffness of the structure and at the same time reduces horizontal displacement of frames. The frame becomes a non-sway structure and it gives a possibility to use a composite column as a part of the portal frame.

Keywords	Composite column, portal frame, steel, concrete, reinforcement
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	TYÖN TAUSTA.....	7
2	TEOLLISUUSHALLIN TERÄSRUNKO.....	8
	2.1 Asennusaikainen tilanne.....	9
	2.2 Normaalitilanne.....	10
	2.3 Palotilanne.....	11
3	TYÖN TAVOITTEET	12
4	TYÖN TEOREETTINEN TAUSTA	13
	4.1 Kulmamuutosmenetelmä.....	14
	4.2 Kehärakenne.....	15
	4.3 Liittopilari	15
	4.3.1 Liittopilarin toimintaperiaate.....	16
	4.3.2 Liittopilarin suunnitteluperusteet, rakenne ja materiaalit	18
	4.4 Rakenteen siirtymätilan vaikutukset	19
	4.5 Epätarkkuudet kehien kokonaisanalyysissä	19
	4.6 Jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet.....	19
5	EXCEL – TAULUKKOLASKENTAPOHJA	21
	5.1 Ohjeet	21
	5.2 Alustava mitoitus	21

5.3 Jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet.....	24
5.4 Rakenteen siirtymätilan vaikutukset, sivusiirtyvyys.....	27
5.5 Liittopilari	28
5.6 Profiilitaulukko	30
5.7 Materiaalit	31
6 YHTEENVETO	32

LÄHDELUETTELO

LIITE 1 ALUSTAVA MITOITUS

LIITE 2 JÄYKISTYSJÄRJESTELMÄN EPÄTARKKUUDET

LIITE 3 SIVUSIIRTYVYYS

LIITE 4 LIITTOPILARI

LIITE 5 PROFILITAULUKKO

LIITE 6 MATERIAALITAULUKKO

1 TYÖN TAUSTA

Idea tämän työn tekemiselle on syntynyt suunnittelupöydän ääressä samalla, kun olen alkanut perehtyä eurokoodien maailmaan. Tavoitteenani on kehittää ja tehostaa teollisuushallin teräsrungon laskemista. Eurokoodit tuovat omat haasteensa työhön, mutta tärkeämmäksi kuitenkin näen, että kaikki mahdolliset rakennuksen jäykistykseen liittyvät asiat tulevat huomioitua vaaditulla tavalla. Rakennusten jäykistystä esim. koulutustilaisuuksissa käsiteltynä on viitattu vain tiettyihin runkokaavioihin, kuinka vinositeitä voidaan rakennukseen sijoittaa. Kuitenkaan ei kerrota selkeästi, mitkä kaikki kuormat tulee siirtää perustusten kautta maaperään, ja kuinka luodaan laskentamallit.

Nykypäivänä on käytössä monenlaisia ja monentasoisia 3d-laskentaohjelmia, jotka auttavat laskennassa. Suunnittelijan on ymmärrettävä voimien kulkeutuminen perustuksille ilman ohjelmistojen laskentaa. Hänen on hahmotettava rungon käyttäytyminen, tukien määrät ja tyypit jne. Ja on pystyttävä tulkitsemaan laskelmien antamia tuloksia ja niiden todenperäisyyttä. Laskelmista saatuja voimasuureita pitää pystyä vertaamaan käsilaskennalla saatuihin tuloksiin.

Tämän työni tavoitteena oli saada aikaan aineisto, Excel-taulukkolaskentaohjelma, joka palvelee teräsrakenteisen teollisuushallin laskemista. Alustavasta mitoituksista saataisiin käyttöön varsinaista mitoitusta varten tarvittavat alustavat profiilikoot. Tämän lisäksi Excel-taulukko kertoo jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet, kehärakenteen sivusiirtyvyyden, ja lisäksi tämä taulukkolaskelma mitoittaa liittopilarin normaalitilanteessa normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutukselle.

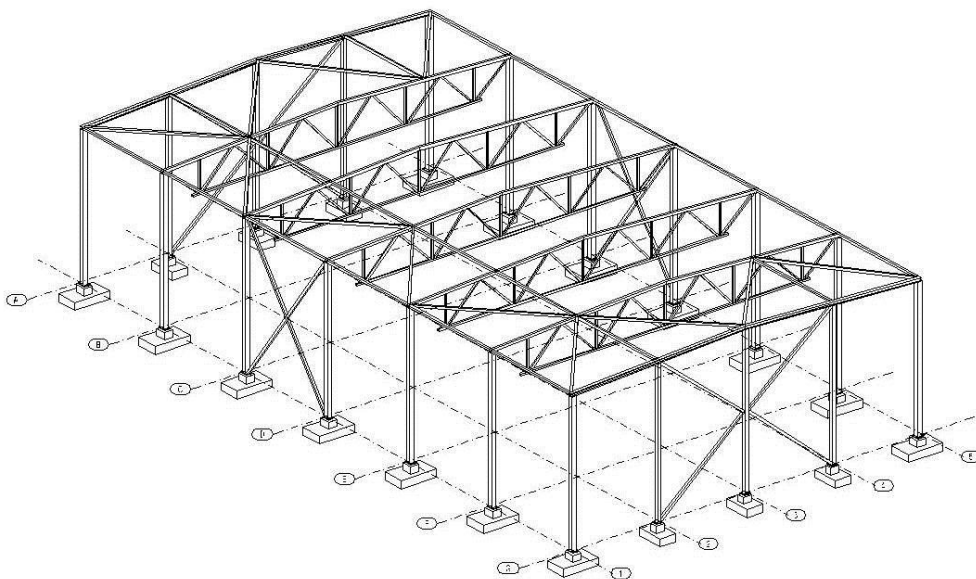
Alustava mitoitus antaa lopullista laskentaa varten verrattavat voimasuureet. Näitä vertaamalla voidaan todeta tulosten luotettavuutta.

2 TEOLLISUUSHALLIN TERÄSRUNKO

Teräsrakenteista voidaan toteuttaa monenlaisia joustavia ratkaisuja teollisuushallin rungon suhteen. Suomesta löytyy useita eri toimittajia, jotka ovat valmiita suunnittelijoiden avustuksella ideoimaan rakennuksiin teräsrunkovaihtoehtoja.

Suomessa yleisesti käytetään teollisuushallien ja myymälöiden rakenteena jäykänurkkaista pilari-ristikkokehärakennetta, kuten kuvassa 1 on esitetty. Palotilanteessa pilari palosuojataan joko palosuojamaalilla tai palosuojauksena käytetään pilarin sisään asennettavaa raudoitetta ja betonointia, eli pilari ei toimi rakenteellisesti pelkkänä teräspilarina, vaan liittopilarina. Kuitenkin liittopilaria ei ohjeiden mukaan saisi käyttää kehärakenteen osana, koska usein siirtymätilat ovat suurempia kuin toimistorungoissa, jotka on jäykistetty porrastornein ja teräsbetoniseinin. Suuret siirtymät aiheuttavat liittopilarin betoniosaan halkeamia, ja sen toiminta liittopilarina heikkenee oleellisesti.

Liittopilarin käyttö on mahdollista silloin, kun kehärakenne on sivusiirtymätön. Voimasuureet voidaan tällöin laskea I-kertaluvun teorian mukaisesti. Kehän sivusiirtyvyys/sivusiirtymättömyys voidaan todeta eurokoodin ohjeiden mukaan.



Kuva 1. 3D-havainnekuva teollisuushallin rungosta, joka on jäykistetty katto- ja seinäsitein.

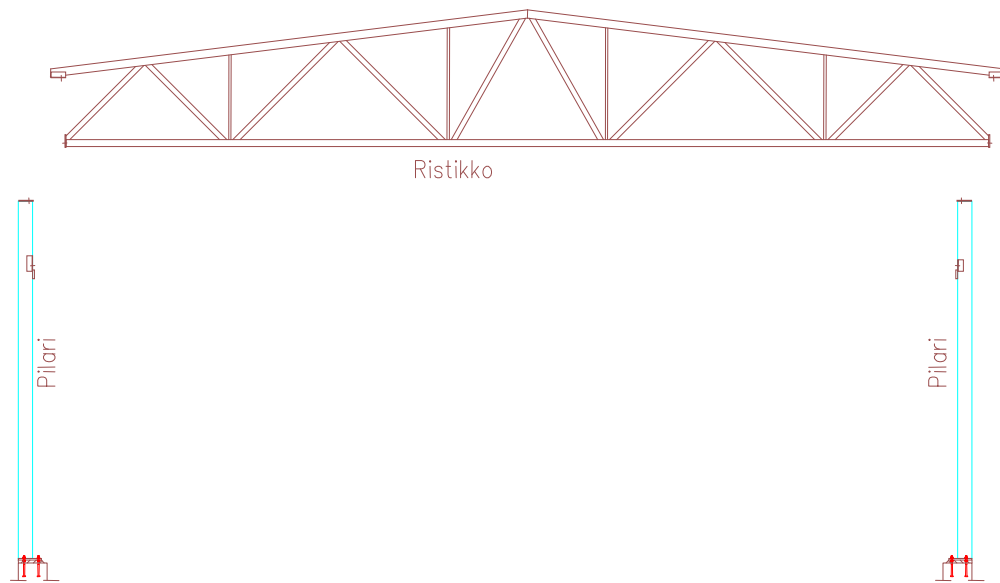
2.1 Asennusaikainen tilanne

Pilarit asennetaan suoraan, joko anturassa olevien tai esimerkiksi peruspilarissa olevien peruspulttien varaan. Peruspulttien mutterit asennetaan oikeaan korkoon ja myös näillä muttereilla saadaan säädettyä pilarin asennusaikainen suoruus. Kuvassa 2 kuvattuna asennusaikainen tilanne, jossa pilareiden väliin asennetaan konepajalla valmistettu teräsristikko pulttikiinnityksin. Työmaahitsejä tulisi välttää mahdollisuuksien mukaan, mutta pilari voidaan asentaa myös hitsaamalla perustuksissa valmiina olevaan pohjalevyyn. Käytännössä hitsaaminen tulee kysymykseen lähinnä monikerrosrunkojen pilarijatkoksissa. Tällöin pilarin jatkosliitosta on mahdoton toteuttaa pulttiliitoksena (esim. toimistorakennukset, missä välipohjana toimii ontelolaatasto ja ontelolaatastoa kannattaa teräspalkit).

Pilarin pohjalevyn alapuolelle tulee juotosvalu esim. Vetonit 600/3, jolloin pilarin normaalivoima siirtyy perustuksille betonin kautta ja peruspultit ottavat vastaan mahdolliset taivutus- ja leikkausrasitukset.

Pääsääntöisesti asennettava pilari on ilman betonointia asennustilanteessa. Täysin mahdollista on, että betonointi suoritetaan vasta siinä vaiheessa, kun rungon päälle on asennettu kuoret ja vesikattorakenteet ja rakennukseen on kytketty lämpö päälle. Tämän vuoksi rungon kestävyys tarkistetaan alustavassa mitoituksessa myös ko. asennusaikaisen tilanteen varalle. Asennusaikana, kun pilari on ilman betonointia, on myös kehärakenteen siirtymät suurempia, johtuen pilarin pienemmästä jäykkyydestä.

Asennusaikana isessa tilanteessa runkoa ei mitoiteta palotilanteen varalle.



Kuva 2. Kehän asennusaikainen tilanne

Asennusaikainen tilanne tulee tutkia tarkasti rungon mahdollisen tukemisen tarpeen vuoksi. Vaikka asennusaikana rakenteella ei vaikuta mahdollisesti suurin rasitustilanne on kuitenkin esimerkiksi ristikon yläpaarten tukeminen tutkittava mahdollisen kiepahdusvaaran vuoksi.

Suunnittelijan on mm. edellä mainittujen syiden vuoksi määrättävä asennusjärjestys tarkasti ennen asennuksen aloitusta. Suunnitelmissa pitää kertoa, mistä asennus alkaa, mihin suuntaan edetään, mitä jäykistäviä rakenteita pitää olla asennettuna ennen kuorirakenteiden asentamisen aloitusta. Jos lisätuentaa tarvitaan, pitää näyttää suunnitelmissa selkeästi lisätuennan sijoittaminen runkoon nähden, sekä asennusaikaisten tuentojen poistoajankohta.

2.2 Normaalitilanne

Normaalitilanteessa pilarit on betonoitu ja niihin on konepajalla asennettu rakenesuunnittelijan määräämä raudoite. Liittopilari on betonoituna selkeästi jäykempi rakenneosana kuin vastaavasti ilman betonointia oleva pelkkä teräspilari. Tämä saa aikaan kehäkanteelle pienemmät siirtymät ja rakenteesta saattaa tulla sivusiirtymätön rakenne.

Sivusiirtymättömällä rakenteella saadaan myös pilarin nurjahduspituutta pienennettyä.

2.3 Palotilanne

Palotilanteessa liittopilari toimii oikeastaan pelkkänä betonipilarina. Teräskuoresa lämpötila nousee palon aikana niin korkeaksi, että teräspilarin lujuus putoaa murto-osaan normaalitilanteen myötölujuudesta.

Teräsristikko on suojattu paloa vastaan maalaamalla palosuojamaalilla. Palosuojamaali rajoittaa ristikon paarteiden ja uumasauvojen lämpötilan nousun siihen lämpötilaan, missä rakenne vielä kestää sille tulevat rasitukset.

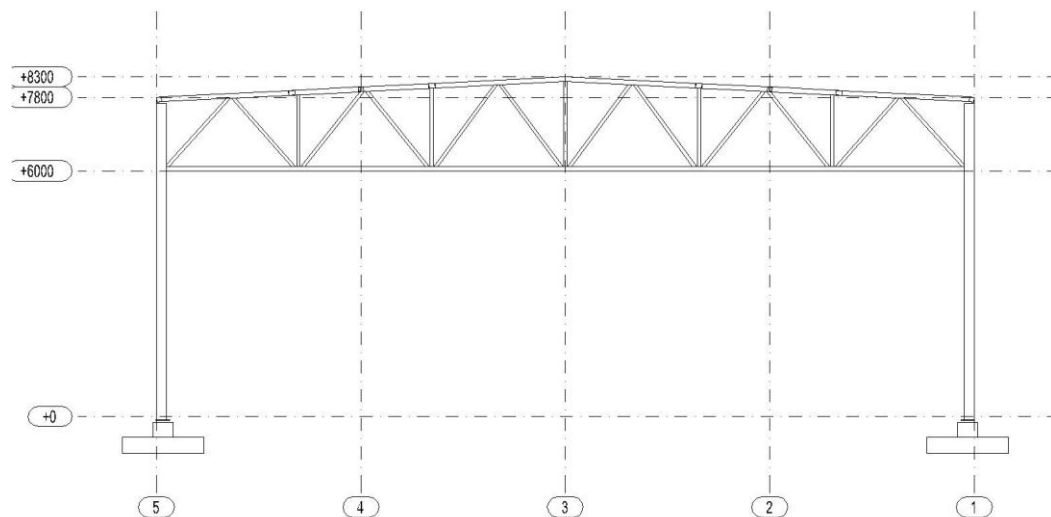
Kriittisiksi asioiksi kehärakenteen palotilanteessa tulevat itse liittopilarin toiminnan lisäksi liittopilarin raudoitteen ankkurointi perustuksiin, sekä pilarin ja ristikon välisten liitosten kestävyys.

Tässä työssä en kuitenkaan käsittele palotilanteen osuutta, vaan olen rajoittanut työni normaalitilanteen mitoitukseen.

3 TYÖN TAVOITTEET

Työn päätarkoitus on tutkia sitä, milloin liittopilaria voi käyttää kehärakenteen osana.

Tarkoituksena olisi aikaansaada selvä ohje, kuinka menetellään ko. tapauksessa suunnittelun aikana, ja tehdä selvät laskentakaavat esimerkiksi Excel-ohjelmaan, joilla todistetaan liittopilarin käytön mahdollisuus kehärakenteen osana. Kuvassa 3 on kuvattu pilari-ristikkorakenteisen jäykkänurkkaisen kehän muoto.



Kuva 3. Jäykkänurkkainen kehä.

4 TYÖN TEOREETTINEN TAUSTA

Jäykistysjärjestelmän päätehtävä on ottaa vastaan vaakakuormia. Tämän lisäksi se myös estää palkkien tai puristettujen rakenteiden poikittaisen stabiilisuuden menetyksen.

Vanhan nyrkkisäännön mukaan teollisuushallin runko jäykistetään mastopilarein, kun pilarit ovat alle kuusi (6) metriä pitkiä. Kun taas rungon pilarit ovat 6-12 metriin, jäykistetään hallin runko jäykkänurkkaisella kehärakenteella. Näissä pilaripituuksissa liikuttaessa on jo hyvä miettiä myös kattorakenteiden hyväksikäyttöä jäykistykseen apuna. Ja kun pilarit ovat yli 12 metriä pitkiä, jäykistykseen käytetään hyväksi kattoa esim. mitoittamalla kattoon jäykistysidekentät läpi rakennuksen.

Tämä nyrkkisääntö toimii vain osittaisena ohjeena suunnitteluun. Lopullisen vallin tekee kuitenkin aina kohteen vastuullinen rakennesuunnittelija.

Kun hallirakenteessa käytetään katossa ja seinillä olevia siteitä jäykistykseen hallin molempiin suuntiin, voidaan rungon osalta pilarina käyttää liittopilaria, koska se on tuettu alapäästään perustuksiin ja yläpäästään levymäiseen jäykistysjärjestelmään. Tässä tilanteessa kuitenkin asennettavien rakenneosien määrä samalla kasvaa, kuten myös runkoon menevän teräksen määrä, jolloin myös kustannukset nousevat. Nykypäivän kustannuspaineiden vuoksi tutkitaan vaihtoehtoinen tapa toteuttaa rungon jäykistys.

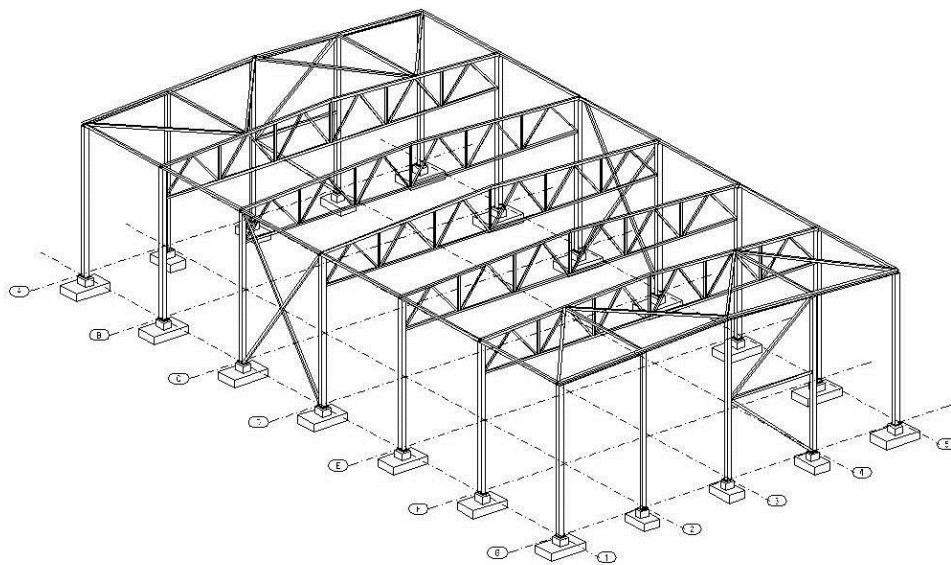
Pilari siirtää kuormitukset perustuksille. Ristikko kantaa sille tulevat kuormat ja siirtää ne pilarille. Yhdessä pilari ja ristikko voivat toimia kehänä eli yhtenäisenä rakenteena, mikä ei tarvitse erillistä jäykistysjärjestelmää pilareiden tukemiseen taivutustasossa. Kehärakenteena toimimiseen pilarin ja ristikon välinen liitos tulee suunnitella jäykäksi rakenteeksi.

Tutkittavassa tapauksessa pilarina käytetään putkiprofiilia esim. CFRHS250X250X6, ja kun pilarin sisään suunnitellaan raudoite ja betonointi, tulee pilarista liittopilari, ja sen jäykkyys kasvaa merkittävästi. Jäykyyden kasvaes-

sa rakenteen siirtymät pienenevät ja kantokyky kasvaa. Tästä johtuen lähdetään tutkimaan liittopilarin käyttöä kehärakenteen osana.

Käytettäessä laskelmien tekemiseen 3d-laskentaohjelmia saadaan tutkittua rakenteen siirtymät huomattavasti tarkemmin kuin pelkästään tasokehäohjelmilla. Tällöin päästään lähemmäksi todellista tilannetta, mikä oikeasti vallitsee luonnonvoimien jyllätessä.

Alla olevassa kuvassa 4 halli on jäykistetty rungon poikkisuuntaan pilarin ja ristikon muodostaman kehän avulla ja toiseen suuntaan katto- ja seinäsitein. Päätyseinät on erikseen jäykistetty seinäsitein tuulta vastaan.



Kuva 4. Hallin jäykistysjärjestelmä.

4.1 Kulmamuu- tosmenetelmä

Alustavan kehämitoituksen olen tehnyt excel-
taulukkoon käyttämällä kulmamuu-
tosmenetelmää.

Kulmamuutosmenetelmä on siirtymämenetelmän mukainen rakenteiden ratkaisutapa, jossa siirtymävapausasteena on sauvanpään kiertymä, jolloin ratkaisuna saadaan sauvan pään kiertymästä ja ulkoisesta kuormasta aiheutuvat voimasuureet, sauvanpäämomentit.

4.2 Kehärakenne

Vaaka- ja pystykuormien hallitsemiseksi, voidaan käyttää hallirakenteessa jäykkänurkkaista kehärakennetta, joka koostuu pilareista ja tässä tutkittavassa tapauksessa ristikkorakenteesta. Ristikon ylä- ja alapaarteiden ja pilarin välisten liitosten kautta saadaan nurkasta momenttijäykkä, jolloin rakenne toimii jäykkänurkkaisena kehänä.

Jäykkänurkkainen kehä sitoo rakenteen sivusiirtymiä huomattavasti paremmin kuin esimerkiksi mastopilarein jäykistetty rakennejärjestelmä. Kehärakenteen sivusiirtymän suuruus yhdessä vaaka- ja pystykuormien kanssa määrää onko kehärakenne sivusiirtyvä vai sivusiirtymätön. Sivusiirtyvyyden laskenta on toteutettu tässä työssä excel-pohjaan.

Kehärakenteessa tulee normaalivoimien ja momenttien yhteisvaikutus määrääväksi mitoitusyhdistelmäksi.

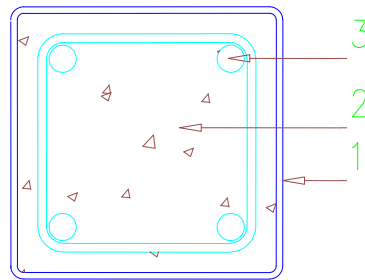
4.3 Liittopilari

Liittopilari koostuu rakenneteräksestä, raudoituksesta ja betonista, kuten kuvassa 5 on esitetty. Liittopilariksi luokitellaan pilari, jossa teräsosakerroin täyttää seuraavan ehdon:

$$0,2 \geq \delta \geq 0,9 \quad (1)$$

missä

$$\delta = A_a * f_{yd} / N_{PL,Rd} \quad (2)$$



Kuva 5. Tyypillinen liittopilarirakenne Suomessa. Osa 1: teräsputki esim. CFRHS250X250X6, osa2: betoni esim. C30/37 ja osa 3: raudoite esim 4T25 + haat T8k300.

Liittopilarilla pystytään toteuttamaan suhteellisen pieni pystyrakenne rakennuksen rungoksi. Kun liittopilarin teräsosana käytetään putkipilaria, saadaan samalla betoniytimen muotti hyödynnettyä pilarin kapasiteetissä. Kyseinen pilari on kevyt asennustyömaalla, sillä betonointi suoritetaan yleensä vasta työmaaolosuhteissa esimerkiksi pumppaamalla pilari alakautta täyteen betonia. Pilarissa on konepajalla muun varustelun yhteydessä asennettu raudoitus putkiprofiilin sisälle.

Vastaava liittopilariratkaisu on erittäin hyvä myös monikerrosrunkorakenteen osana. Tällöin pilari voidaan valmistaa n. 3 kerrosta korkeana rakenteena, johon liittyvät esim. WQ-palkit. En käsittele monikerrosrunkorakennetta tässä työssäni.

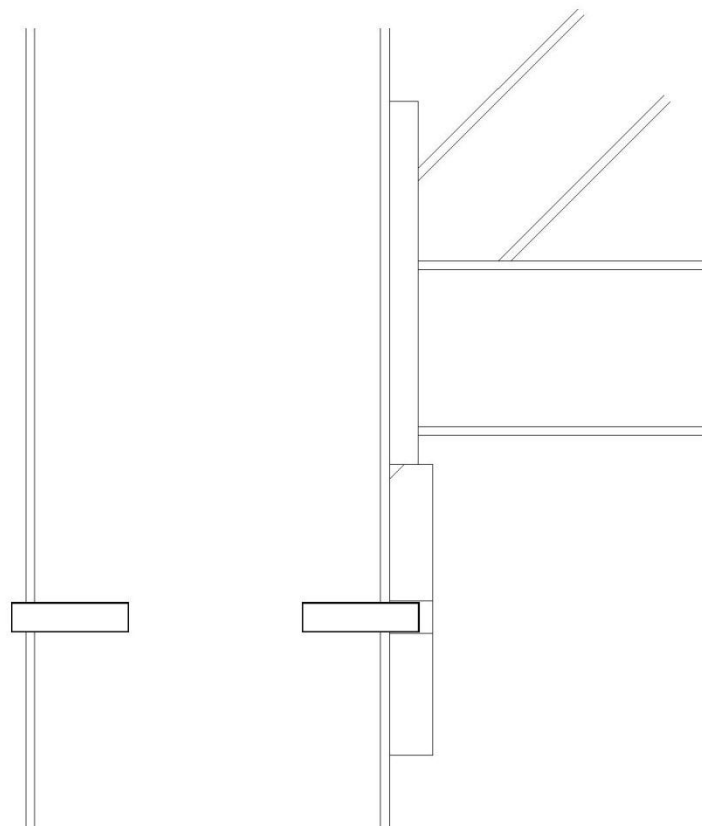
4.3.1 Liittopilarin toimintaperiaate

Yleisesti jäykkäkantaiset kehärakenteet, joissa pilari toimii liittorakenteena, voidaan laskea ensimmäisen kertaluvun teorian mukaisesti. Rakenteen sivusiirtyvyyden olen tehnyt tässä työssä excel-taulukkolaskennan, joka näyttää kehärakenteen kuulumisen, joko sivusiirtyvään tai sivusiirtymättömään rakennejärjestelmään. Sivusiirtymättömyys tarkoittaa, että rakenne voidaan laskea I-kertaluvun teorian mukaan ja sivusiirtävä rakenne ratkaistaan II-kertaluvun teorian mukaan. Toisen kertaluvun teoriassa rakenne käyttäytyy geometrisesti epälinearisesti, jolloin rakenteen siirtymisestä aiheutuvat lisärasitukset huomioidaan rakenteen ratkaisussa. Rakennusten tasokehät voidaan suunnitella sivusiirtymisen suhteen I-kertaluvun teorian mukaan, jos seuraavan kaavan mukainen ehto on voimassa

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) \geq 10. \quad (3)$$

Kaavassa H_{Ed} on kerroksessa pilarin yläpäihin tuleva vaakakuormien mitoitusarvo, V_{Ed} on kerroksessa pilarin alapäihin tuleva pystykuormien mitoitusarvo, $\delta_{H,Ed}$ on pilarin ylä- ja alapään vaakasiirtymien ero ja h on kerroskorkeus. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 30-31)

Liittopilarin teräskuori ja betoniydin toimivat molemmat rakenteen kantavana osana. Kuormat siirtyvät betoniytimelle kuoren ja betonipoikkileikkauksen kautta, sekä pilarin päätylevyn kautta ja tämän lisäksi pilarin kuoreen voidaan hitsata erilisiä leikkausliitostappeja, jotka siirtävät kuorelta kuormat betoniytimelle. (Teräs-rakenneyhdistys ry, 2004, 38-46)



Kuva 6. Detalji leikkaustappin sijainnista.

4.3.2 Liittopilarin suunnitteluperusteet, rakenne ja materiaalit

Liittopilari tulee suunnitella EN 1990 esitettyjen yleisten sääntöjen mukaan, sekä SFS-EN 1994-1-1 standardissa esitettyjen lisäsääntöjen mukaan.

Liittopilarin mitoituksessa tulee käyttää rajatilamitoitusta yhdessä osavarmuuslukumenetelmän kanssa EN 1990 standardin mukaan. Lisäksi tulee käyttää EN 1991 mukaisia kuormia, sekä kuormayhdistelyt tulee tehdä EN 1990 mukaisesti.

Materiaalina rakenneteräkselle voidaan käyttää maksimissaan rakenneterästä, jonka myötölujuus on enintään 460 N/mm². Tarkemmin teräksen materiaalit löytyvät SFS-EN 1993-1-1 kohdasta 3.1 ja 3.2.

Betonin lujuusluokan pitää olla suurempi kuin C20/25 tai LC20/22 ja pienempi kuin C60/75 tai LC60/66.

Betoniterästen ominaisuudet saadaan SFS-EN 1992-1-1 standardin kohdasta 3.2. Betoniteräksen materiaalin tulee olla EN 10080 mukainen, myötölujuusvälillä $f_{yk} = 400 \dots 600 \text{ N/mm}^2$

Liittopilarin rakenneputken materiaalin tulee olla standardien EN 10210-1 tai EN10219-1 mukaisia.

Pilarissa voi olla betoniraudoitusta korkeintaan 6% betonin pinta-alasta.

Liittopilarin poikkileikkauksen korkeuden suhde leveyteen tulee olla rajojen 0,2 ja 5,0 välissä.

Liittopilarin käyttöä kehärakenteen osana rajoittaa pilarin suhteellinen hoikkuus. Liittopilarin suhteellinen hoikkuus tulee olla alle $\lambda \leq 2,0$. Suhteellinen hoikkuus λ tarkasteltavassa taivutussuunnassa lasketaan kaavasta

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr}}} \quad (4)$$

Suure N_{cr} lasketaan Eulerin kaavalla

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}, \quad (5)$$

jolloin jakajaksi tulee pilarin nurjahduspituus toiseen potenssiin. Plastisuusteorian mukainen liittopoikkileikkauksen puristuskestävyys $N_{pl,Rd}$ lasketaan laskemalla yhteen plastisuusteorian mukaiset komponenttien kestävyudet :

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + 0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}. \quad (6)$$

4.4 Rakenteen siirtymätilan vaikutukset

Sisäiset voimat ja momentit voidaan määritellä yleensä joko ensimmäisen kertaluvun mukaan tai toisen kertaluvun mukaan.

Toisen kertaluvun vaikutukset (siirtymätila) otetaan huomioon, jos ne kasvattavat merkittävästi rasitusten vaikutuksia tai muuttavat merkittävästi rakenteen käyttäytymistä. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 30)

Ensimmäisen kertaluvun teoriaa voidaan käyttää, jos kimmoteorian mukaisessa analyysissä $\alpha_{cr} \geq 10$ tai plastisuusteorian mukaisessa analyysissä $\alpha_{cr} \geq 15$. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 30)

4.5 Epätarkkuudet kehien kokonaisanalyysissä

Epätarkkuuksien vaikutukset sivusiirtyvien kehärakenteiden sauvojen nurjahduksessa otetaan huomioon kehän rakenneanalyysissä käyttämällä ekvivalenttia sivusiirtymää ja yksittäisten sauvojen alkukaarevuuden muodossa olevia epätarkkuuksia. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 33)

4.6 Jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet

Epätarkkuuksien vaikutukset otetaan huomioon jäykistysjärjestelmien analyysissä, kun jäykistysjärjestelmä stabiloi palkkeja tai puristettuja sauvoja poikittaissuunnassa. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 38)

Jäykistysjärjestelmien tukemien sauvojen alkukaarevuuden muodossa olevien alkuepä tarkkuuksien vaikutukset voidaan korvata käyttämällä ekvivalenttia stabiloivaa voimaa, joka lasketaan kaavasti:

$$qd = \sum NEd * 8 * \frac{e_0 + \delta_q}{l^2}. \quad (7)$$

(SFS-EN 1993-1-1, 2005, 38). Kaavassa N_{Ed} on ristikon yläpaarteessa vaikuttava puristusvoima ($N_{Ed} = M_{Ed} / h$),

$$e_0 = \alpha_m L / 500, \quad (8)$$

missä L on jäykistysjärjestelmän jänneväli.

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}, \quad (9)$$

missä m on tuettavien sauvojen lukumäärä. δ_q on jäykistysjärjestelmän taipuma tasossaan, joka aiheutuu ensimmäisen kertaluvun teorian mukaisista ulkoisista kuormista.

Palkkien ja puristettujen sauvojen jatkoskohdissa jäykistysjärjestelmä mitoitetaan myös jokaisen tuettavan palkin tai puristetun sauvan jatkoskohdassa syntyvälle paikalliselle voimalle

$$\alpha_m N_{Ed} / 100. \quad (10)$$

(SFS-EN 1993-1-1, 2005, 38)

5 EXCEL – TAULUKKOLASKENTAPOHJA

Laaditaan alustava mitoitustaulukko-ohjelma excel-ohjelmalla. Alustavaa mitoitusta käytetään pohjana varsinaiselle mitoitukselle. Ohjelma laskee profiilit, joita voidaan käyttää varsinaisessa mitoituksessa, mikä suoritetaan mahdollisesti FEM-ohjelmistolla tai muulla vastaavalla laskentaohjelmalla. Samalla voidaan voimasuureet tarkistaa kehän osalta karkealla tasolla, jolloin vältetään suurilta mahdollisilta virheiltä kuormien tai muiden vastaavien suhteen.

Lähdetään tutkimaan, mitkä ovat rajoitukset liittopilarin käytölle kehärakenteen osana. Rajoituksena voi olla esimerkiksi pilarin pituuden suhde nurjahduspituuteen, suhteessa pilarin jäykkyyteen.

Selvitetään eurokoodin mukaisen mitoituksen vaatimukset liittopilarille ja laaditaan laskentapohja esim. excel-ohjelmalla.

Excel-taulukko sisältää seitsemän (7) eri taulukkoa, joissa on ohjeet, alustava mitoitus, jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet, sivusiirtyvyys, liittopilari, profiilitaulukko ja materiaalitaulukko.

5.1 Ohjeet

Ohjeet-taulukkoon olen koonnut muiden taulukoiden käyttöohjeita ja opastusta.

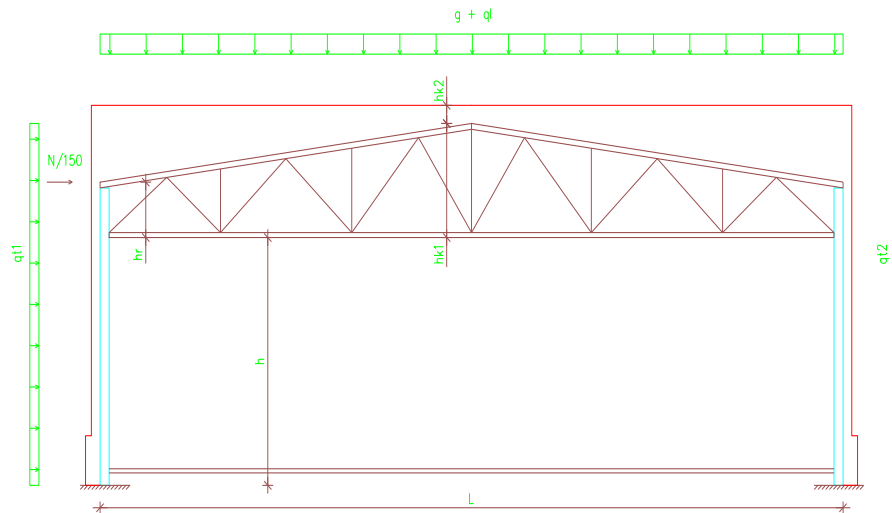
5.2 Alustava mitoitus

Alustava mitoitus on tehty käyttäen kulmamuuutosmenetelmää. Taulukko laskee momentit eri nurkille, joilla voidaan alustavasti hakea profiilit lopullista mitoitusta varten.

Lähtötietokenttään syötetään värillisiin soluihin kysytyt arvot, jotka on esitty kuvassa 7:

- Mittoina kehän pituus (L), pilarin pituus ristikon alapaarteeseen asti (h), ristikon reuna- ja keskikorkeus (hr ja hk1), räystäsnosto ristikon harjalta ylöspäin (hk2) sekä kehäjako (k/k).

- Kuormina pysyvä kuorma (g), lumikuorma (ql) sekä tuulikuorma (qt).
- Tuulen paine- ja imukertoimet (μ_1 ja μ_2).
- Kattorakenteen jatkuvuuden huomioiva kerroin (μ_j).



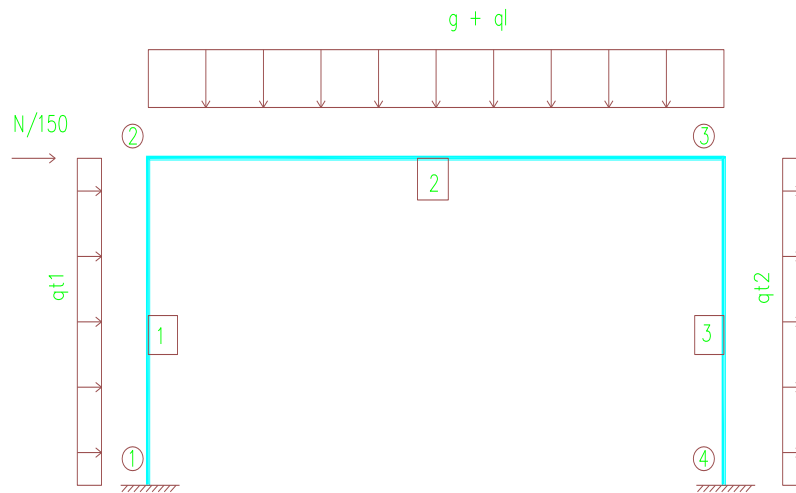
Kuva 7. Kehän mitat ja kuormien sijoittuminen.

Taulukko-ohjelma laskee seuraavaksi kehrä rakenteelle tulevat kuormitukset määritettyjen lähtötietojen mukaan käyttörajatilassa ilman varmuuskertoimia:

- Pysyvä kuorma (kN/m) ja lisävaakavoima $N/150$ (kN), joka vaikuttaa pilarin yläpäässä.
- Lumikuorman (kN/m) ja lisävaakavoima $N/150$ (kN), joka vaikuttaa pilarin yläpäässä.
- Tuulikuorma (kN/m) sekä paine- että imupuolelle.

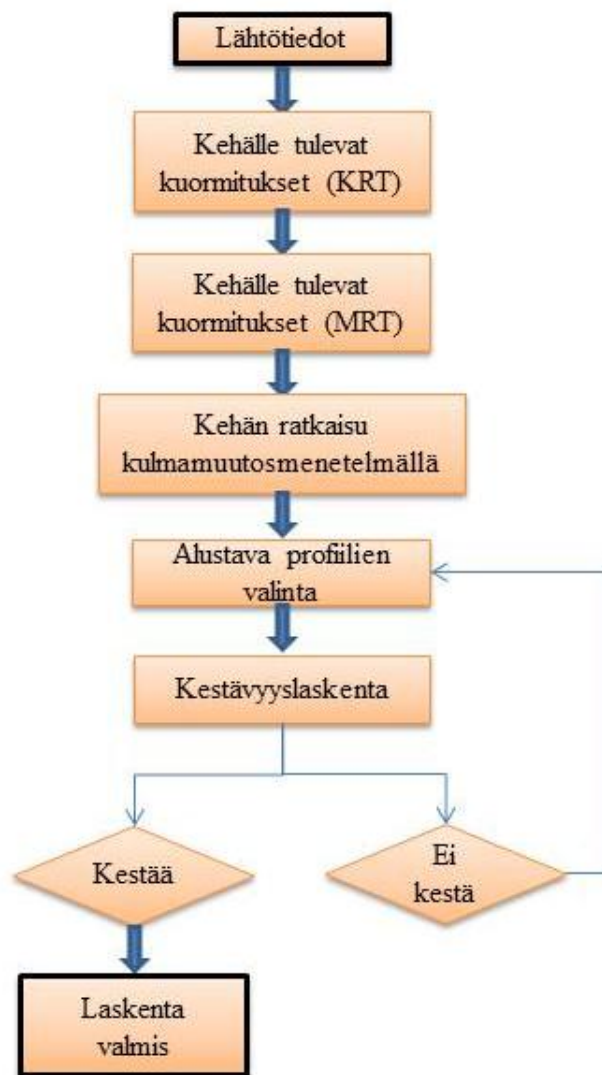
Käyttörajatilan kuormien perusteella lasketaan murtorajatilan kuormitukset kahden eri kuormitusyhdistelyn mukaan. Murtorajatilassa ensimmäinen yhdistely lasketaan käyttämällä luea määräävänä muuttuvana kuormana, toinen yhdistely käyttää määräävänä muuttuvana kuormana tuulikuormaa. Kuormitusyhdistelyt on tehty SFS-EN 1990 suunnitteluperusteet mukaan.

Edellisten määrittysten perusteella taulukko ratkaisee kulmamuutosmenetelmällä kehän nurkkien 1, 2, 3 ja 4 momentit, nurkkapisteet on esitetty kuvassa 8. Näihin momentteihin perustuu rakenneosien alustava mitoitus.



Kuva 8. Kulmamuutosmenetelmän numerointi.

Taulukkoon syötetään vielä ennen lopullista profiileiden mitoittamista alustavat profiilikoot pilarille, ala- ja yläpaartelle. Profiilivalintojen perusteella lasketaan nurkkamomentit. Lopullinen profiilimitoitus ratkaisee em. profiilien koot, eli ohjelman laskennassa täytyy suorittaa profiilivalintaa niin kauan, että kyseiset profiilit kestävät mitoituksessa.



Kaavio 1. Vuokaavio, alustava mitoitus.

Liitteessä 1 esitetty alustavan mitoituksen excel-taulukko.

5.3 Jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet

Taulukko laskee eurokoodin mukaan lisävaakavoimat, mitkä on huomioitava rakenteiden mitoituksessa. Nämä syntyneet lisävaakavoimat tulee viedä perustuksille asti.

Taulukkoon syötetään värillisiin soluihin lähtöarvot, joiden perusteella ratkaistaan epätarkkuuksista syntyvät lisävaakavoimat. Jäykistävä vaakavoimien laskenta perustuu SFS-EN 1993-1-1 kohtaan 5.3.3.

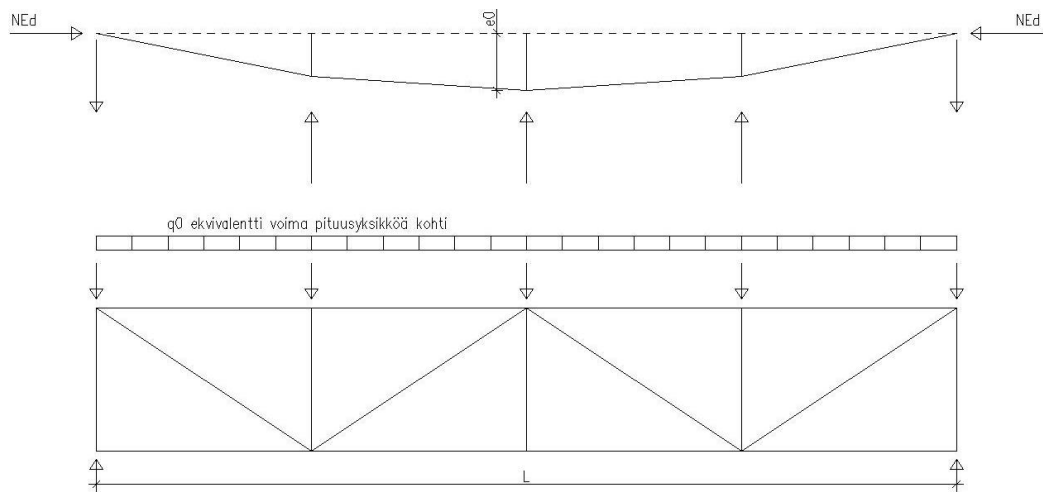
Lisävaakavoimien laskenta perustuu jäykistysjärjestelmän pituuteen ja tuettavien sauvojen määrään. Syötettävät kuormat (N_{gk} , N_{q1k} ja N_{q2k}) ovat ristikon yläpaarteeseen tuleva puristava kuorma ilman varmuuskertoimia. Näiden lisäksi taulukkoon tulee syöttää jäykistysjärjestelmän siirtymän arvo (δ_q).

Siirtymän arvoa pitää interpoloida. Aluksi lähdetään pelkästään ulkoisista kuormista syntyvästä siirtymästä liikkeelle ja tämän jälkeen laskentaan syötetään syntyvät lisävaakavoimat ja muutetaan siirtymän arvoa tarpeen mukaan, kunnes jäykistysjärjestelmän siirtymä ei kasva enää suurissa määrissä.

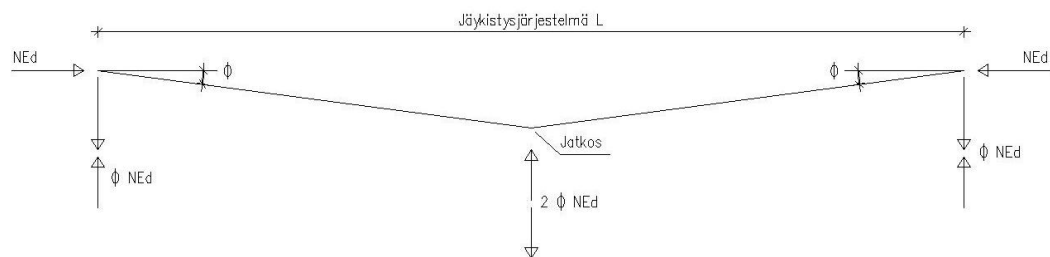
Mitä suurempi siirtymä, sen suuremmaksi lisävaakavoima kasvaa.

Toisen kertaluvun teoriaa käytettäessä δ_q :lle annetaan arvoksi 0.

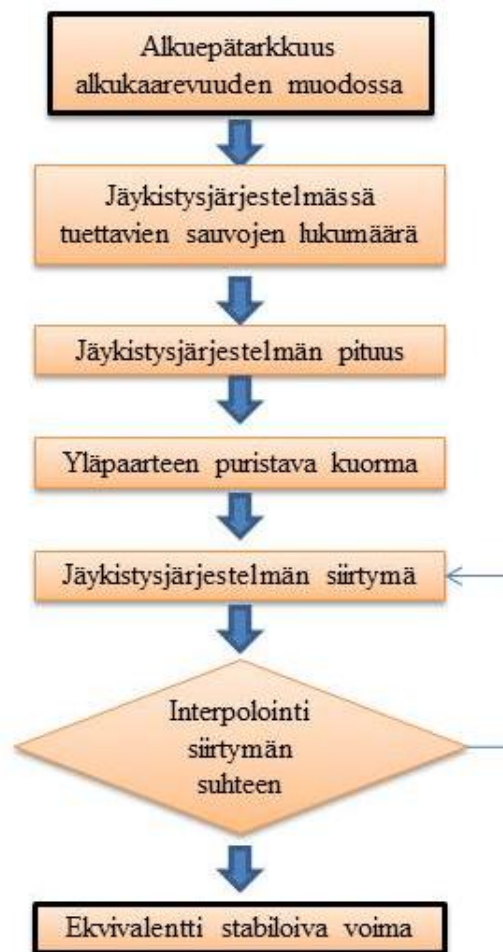
Lopuksi taulukko ratkaisee jäykistysjärjestelmän epätarkkuuksista tulevat lisävaakavoimat (kN/m) kuvan 10 mukaan ja jäykistysjärjestelmän jatkoskohtiin tulevat paikalliset lisävaakavoimat (kN) kuvan 11 mukaan. Nämä kuormat annetaan ilman varmuuskertoimia, että ne voidaan syöttää helposti laskentaohjelmiin omina kuormituksinaan.



Kuva 9. Jäykistysjärjestelmä.



Kuva 10. Tukivoimat puristettujen sauvojen jatkoksissa.



Kaavio 2. Vuokaavio alkuepäätarkkuudet.

Liitteessä 2 on esitetty jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet Excel-taulukko.

5.4 Rakenteen siirtymätilan vaikutukset, sivusiirtyvyys

Laskenta osoittaa kehärakenteen kuuluvan, joko sivusiirtyvään rakenteeseen tai **mahdollisesti** sivusiirtymättömään rakenteeseen.

Alkuepäätarkkuudet lasketaan kaavalla

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m. \quad (11)$$

Kaavassa Φ_0 on perusarvo 1/200, α_h on pilareihin sovellettava korkeuden h pienennystekijä ja α_m on pienennystekijä, joka ottaa huomioon rivissä olevien pilarien lukumäärän. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 33, 34)

Alkuepäätarkkuuden perusteella lasketaan taulukossa em. aiheutuvat vinousvoimat

$$\Delta H_{Ed} = \Phi \cdot N_{Ed}, \quad (12)$$

missä N_{Ed} on pilariin vaikuttava normaalivoima.

Laskenta tutkii kolmelle (3) eri kuormitustapaukselle rakenteen sivusiirtyvyyden.

Kuormitustapaukset ovat:

- pysyvät + lumi määräävä + pienennetty tuuli
- pysyvät + tuuli määräävä + pienennetty lumi
- pysyvät + tuuli määräävä

Jokaiselle kuormitustapaukselle syötetään erikseen kyseisen tapauksen sivusiirtymä millimetreinä ja tämän jälkeen taulukko laskee α_{cr} :n. Jos α_{cr} :n on suurempi kuin 10, käsitellään kehä sivusiirtymättömänä rakenteena eli rakenne ratkaistaan I-kertaluvun teorian mukaan käyttäen rakenteen alkuperäistä geometriaa. Jos taas α_{cr} :n on pienempi kuin 10, käsitellään kehää sivusiirtyvänä rakenteena, jolloin rakenne ratkaistaan II-kertaluvun teorian mukaan ja tällöin liittopilarin käyttö kehärakenteen osana on mahdotonta.

Jos rakenne on sivusiirtyvä ($\alpha_{cr} > 10$) laskee ohjelma vertikaalikuormien suurenuskertoimen, jolla huomioidaan toisen kertaluvun vaikutukset kehärakenteeseen.



Kaavio 3. Vuokaavio, siirtymätilan vaikutukset.

Liitteessä 3 esitetty sivusiirtyvyys excel-taulukko.

5.5 Liittopilari

Taulukko laskee liittopilarin kestävyysmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutukselle ja näyttää tuloksen kaaviona.

Laskelmaan syötetään lähtötietoina:

- Pilarin pituus ja nurjahduspituus
- Pilarille tulevat kuorman N_{Ed} ja M_{Ed}
- Teräsputken koko, jonka perusteella haetaan profiilitaulukosta poikkileikkaussuureet, sekä putken materiaali, jonka perusteella haetaan materiaali-
taulukosta tarvittavat materiaalisuureet
- Betonin lujuus, jonka perusteella haetaan materiaali-
taulukosta f_{cd} betonille
- Raudoitteen tiedot materiaaleineen ja suojabetonikerros

Annettujen lähtötietojen perusteella taulukko laskee aluksi teräsosakertoimen

$$\delta = \frac{A_a * f_{yd}}{N_{pl,Rd}}, \quad (13)$$

joka määrittää onko valittu pilariprofiili liittopilari.

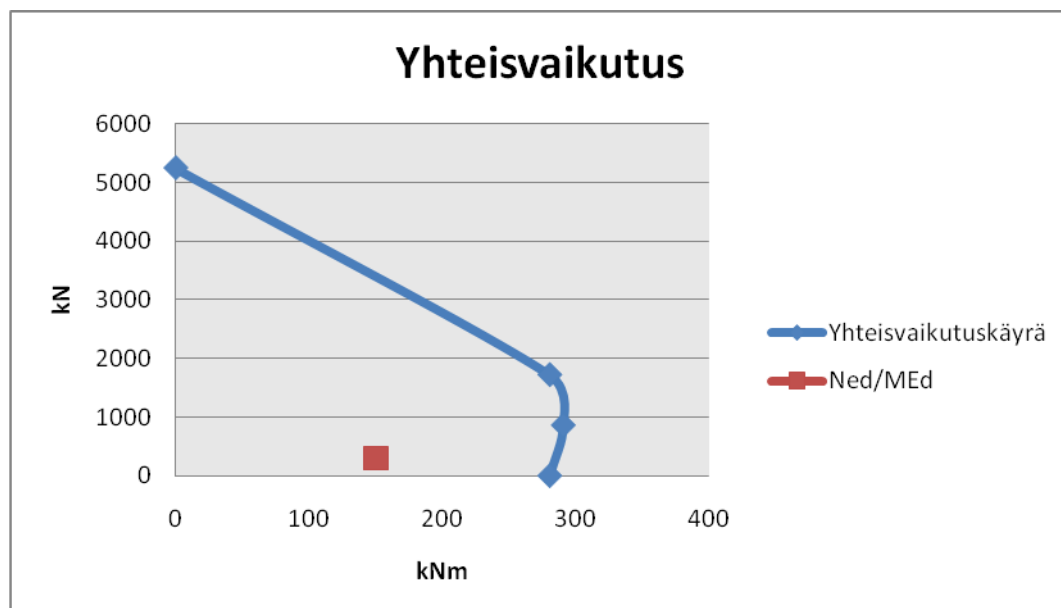
Seuraavaksi taulukko laskee pilarin tuentaa ja taivutussuuntaa vastaavan kimmo-teorian mukaisen tehollisen taivutusjäykkyyden

$$EI_{(eff)} = E_a * I_a + E_s * I_s + K_e * E_{c,eff} * I_c. \quad (14)$$

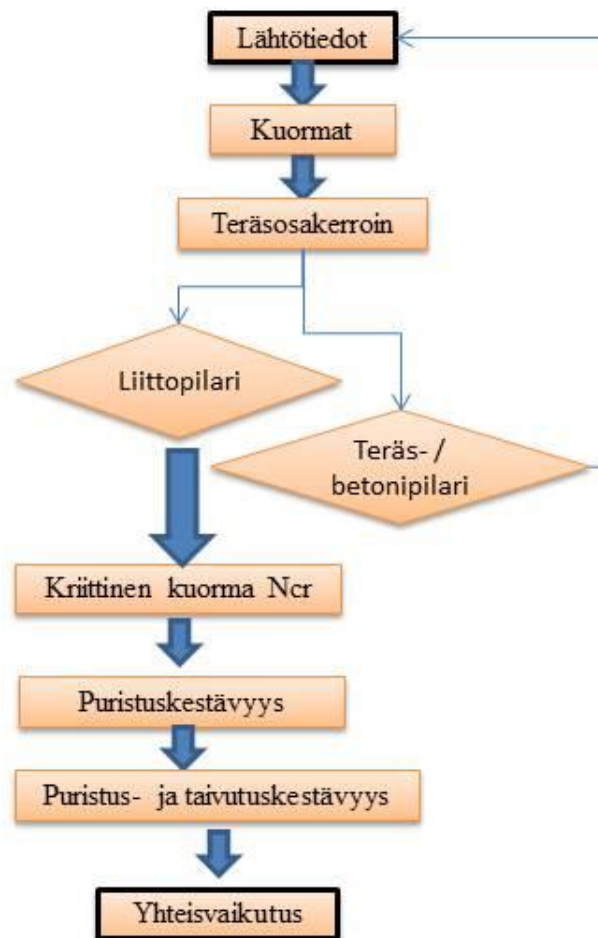
Rakenneosan puristuskestävyys lasketaan SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.5 mukaan,

$$\frac{N_{Ed}}{\chi * N_{pl,Rd}} < 1,0. \quad (15)$$

Viimeisenä taulukkolaskenta määrittää SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.6 mukaan rakenneosien kestävyyden, kun kuormana on puristus ja taivutus yhden akselin suhteen. Taulukko laskee neljä (4) pistettä kuvaajaa varten, joka määrittää pilarin poikkileikkauksen kestävyysrajat. Pilarissa vaikuttavan normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormat kuvaaja näyttää pisteinä, kuvan 14 mukaisesti. Jos piste pysyy kuvaajan sisäpuolella kestää pilari annetut rasitukset.



Kuva 11. Pilarin normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskuvaaja.



Kaavio 4. Vuokaavio, liittopilari.

Liitteessä 4 esitetty liittopilari excel-taulukko.

5.6 Profiilitaulukko

Profiilitaulukkoon on kerätty putkiprofiilit, joita käytetään laskennassa apuna. Taulukosta haetaan automaattisesti kyseiseen profiiliin liittyvät poikkileikkaussuureet.

Liitteessä 5 esitetty ote profiilien excel-taulukosta.

5.7 Materiaalit

Materiaalitalukko sisältää eri materiaalien ominaisuudet, jotka haetaan taulukkolaskelmiin mukaan.

Liitteessä 6 esitetty ote materiaali excel-taulukosta.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tekeminen oli pitkän ajanjakson, useiden vuosien ajatustyön tulos. Suunnittelutöiden jatkuvan kiireen vuoksi toteuttamiseen meni paljon aikaa, mutta lopputulos palvelee omaa suunnittelutyötäni mainiosti. Haaveissani on jatkaa kyseistä työtä edelleen, ja joskus tulevaisuudessa aikaansaada teollisuushallien mitoittamiseen tulevan ohjeen, joka antaa hyvät työkalut nopeaan ja tehokkaiseen suunnitteluun, ja joka ottaa huomioon kaiken tarvittavan, voimasuureista liitosdetaljeihin, sekä palotilanteen mitoituksen.

Raudoittamalla putkiprofiili, sekä täyttämällä se betonilla saadaan rakenteelle lisää jäykkyyttä. Tämä aikaansaa sen, että kehärakenteen sivuttainen siirtymä pienenee, jolloin on mahdollista, että rakenteesta tulee sivusiirtymätön rakenne.

Sivusiirtymätön rakenne myös antaa käyttää pilarille pienempiä nurjahduskertoimia, jolloin pilarin kestävyyskin kasvaa tarkasteltaessa normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta.

Pilarin pelkkä normaalivoimakestävyys on suuri, mutta pilarille tuleva taivutusmomentti pudottaa pilarin kestävyyttä nopeasti normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuksen seurauksena.

Mielestäni minkäänlaiset ohjelmat eivät koskaan tule korvaamaan ihmismieltä suunnittelijana! On erittäin tärkeää sisäistää se asia, että ohjelmat vain laskevat sinne ohjelmoituja kaavoja, ohjelmiin syötettyjen lähtötietojen mukaan. Kaikki ohjelmat voivat sisältää jonkinlaisia virheitä ja sen vuoksi suunnittelijan tulee olla valveutunut. Käytännössä esimieheni, pitkän linjan rakennesuunnittelija Risto Vuorenmaa on kiteyttänyt tämän asian yhteen lauseeseen: ”Suunnittelijalla tulee olla sydämessä palo suunnitteluun.”.

LÄHDELUETTELO

SFS-EN 1990, Suunnitteluperusteet, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991, Kuormitukset, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

EN1992-1-1: Eurocode 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

EN1992-1-2: Eurocode 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

EN1993-1-1: Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

EN1993-1-2: Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

EN1994-1-1: Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

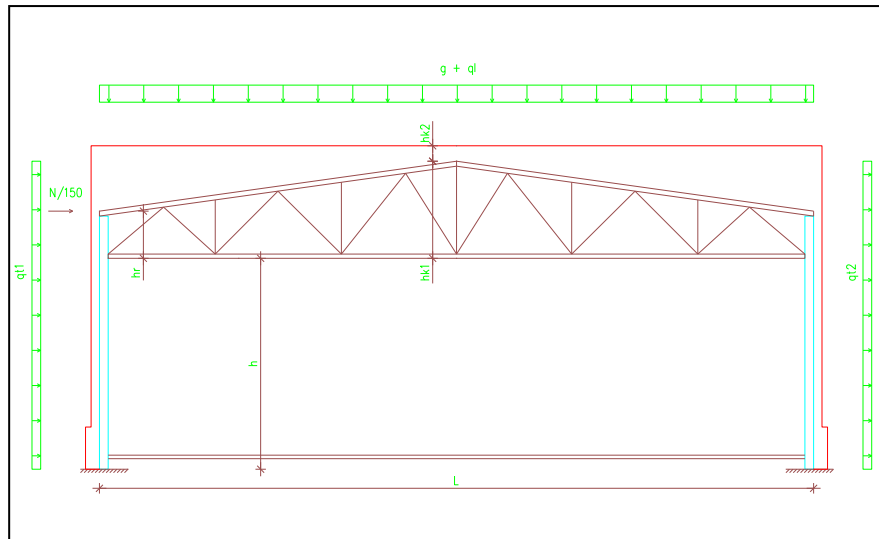
EN1994-1-2: Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

EN1994-2: Eurocode 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu. Osa 2: Yleiset säännöt ja siltoja koskevat säännöt, Rakennetuoteteollisuus RTT ry, Suomen standardisoimisliitto SFS.

Heinisuo, Markku 2005. Liittorakenteet, luennot PPTH:lla Tiistaina 15.3.2005 klo 9.00 – 12.00.

Rautaruukki Oyj , Liittopilari, Tuoteohje 23.3.2006.

Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, Betonitäyteen teräslittopilarin suunnitteluohje.

Pilari-ristikko kehärakenteen alustava mitoitusLähtötiedot

L	20 m	g	0,6 kN/m ²	pysyvä kuorma
h	6,2 m	ql	2 kN/m ²	lumikuorma
hr	1,2 m	qt	0,65 kN/m ²	tuulikuorma
hk1	2,4 m	m1	0,8	tuulen painekerroin
hk2	0,6 m	m2	-0,5	tuulen imukerroin
k/k	6 m	kehäjako		
mj	1,1	vesikattorakenteen jatkuvuuskerroin		

Kehälle tulevat kuormitukset (KRT)

pysyvä kuorma	g	4,0 kN/m
lisävaakavoima	Gk/150	0,5 kN
lumi kuorma	q1	13,2 kN/m
lisävaakavoima	Qk/150	1,76 kN
tuulikuorma	qt1	3,1 kN/m
tuulikuorma	qt2	2,0 kN/m

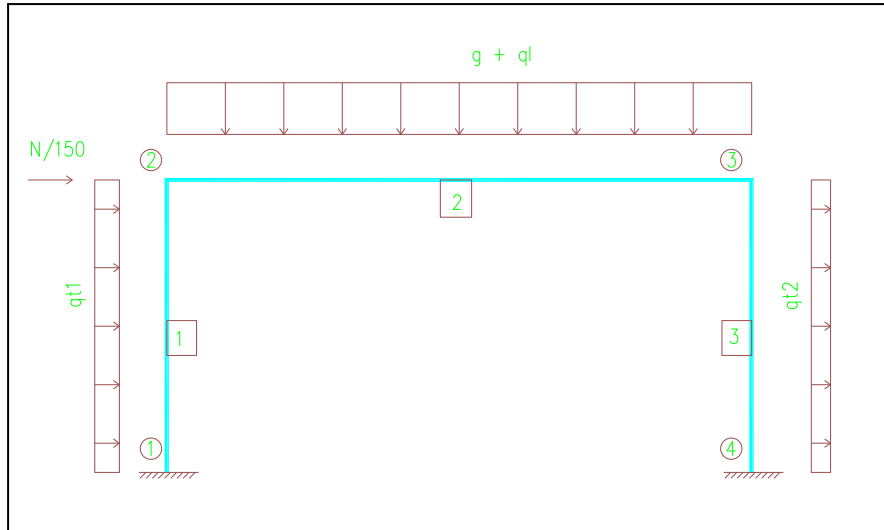
Kehälle tulevat kuormitukset (MRT)

K_{FI}	1	kuormakerroin		
	y0	y1	y2	
Lumikuorma	0,7	0,4	0,2	
Tuulikuorma	0,6	0,2	0	

Kuormien mitoituskaavat

$$1,15 * K_{FI} * \sum_{j \geq 1} G_{kj, sup} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

	Lumikuorma määräävä		Tuulikuorma määräävä	
pysyvä kuorma	g	4,6 kN/m	g	4,6 kN/m
lisävaakavoima	Gk/150	0,6 kN	Gk/150	0,6 kN
lumi kuorma	q1	19,8 kN/m	q1	13,9 kN/m
lisävaakavoima	Qk/150	2,6 kN	Qk/150	1,8 kN
tuulikuorma	qt1	2,8 kN/m	qt1	4,7 kN/m
tuulikuorma	qt2	1,8 kN/m	qt2	2,9 kN/m

Kehälle alustava ratkaisu kulmanmuutosmenetelmällä

$$\text{sauva 1} \quad \begin{cases} M_{12} = a_{12} * \varphi_{12} + b_{12} * \varphi_{21} - c_{12} \Delta_{12} + MK_{12} \\ M_{21} = a_{21} * \varphi_{21} + b_{21} * \varphi_{12} - c_{21} \Delta_{21} + MK_{21} \end{cases}$$

$$\text{sauva 2} \quad \begin{cases} M_{23} = a_{23} * \varphi_{23} + b_{23} * \varphi_{32} - c_{23} \Delta_{23} + MK_{23} \\ M_{32} = a_{32} * \varphi_{32} + b_{32} * \varphi_{23} - c_{32} \Delta_{32} + MK_{32} \end{cases}$$

$$\text{sauva 3} \quad \begin{cases} M_{34} = a_{34} * \varphi_{34} + b_{34} * \varphi_{43} - c_{34} \Delta_{34} + MK_{34} \\ M_{43} = a_{43} * \varphi_{43} + b_{43} * \varphi_{34} - c_{43} \Delta_{43} + MK_{43} \end{cases}$$

tasapainoehdot

tasapainoehto 1; nurkka 2: $M_{21} + M_{23} = 0$

tasapainoehto 1; nurkka 2: $M_{32} + M_{34} = 0$

yhteensopivuusehdot

nurkka 2: $j_{21} = j_{23} = j_2$

nurkka 3: $j_{32} = j_{34} = j_3$

kehärakenteen nurkissa 1 ja 4 kiertymä on 0, koska pilari on jäykästi kiinnitetty perustuksiin

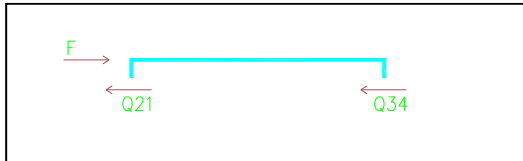
Sauvanpäämomentit

	Lumikuorma määräävä	Tuulikuorma määräävä
$MK_{12} = -\frac{ql^2}{12}$	= -13 kNm	= -21 kNm
$MK_{21} = \frac{ql^2}{12}$	= 13 kNm	= 21 kNm
$MK_{23} = -\frac{ql^2}{12}$	= -812 kNm	= -614 kNm
$MK_{32} = \frac{ql^2}{12}$	= 812 kNm	= 614 kNm

$$MK_{34} = -\frac{ql^2}{12} = 8 \text{ kNm} = 13 \text{ kNm}$$

$$MK_{43} = \frac{ql^2}{12} = -8 \text{ kNm} = -13 \text{ kNm}$$

Leikkausvoiman tasapaino



tasapainoehto 3:

$$F - Q_{21} - Q_{34} = 0$$

$$F = Q_{21} + Q_{34}$$

$$Q_{21} = -Q_{21}^0 - \frac{M_{12} + M_{21}}{l_{12}}$$

Lumikuorma määrävä

$$Q_{21}^0 = 10,4 \text{ kN}$$

$$Q_{21}^0 = \frac{q_{t1} * l}{2}$$

Tuulikuorma määrävä

$$17,3 \text{ kN}$$

$$Q_{34} = Q_{34}^0 - \frac{M_{34} + M_{43}}{l_{34}}$$

$$Q_{34}^0 = 6,5 \text{ kN}$$

$$Q_{34}^0 = \frac{q_{t2} * l}{2}$$

$$10,8 \text{ kN}$$

Edellisistä ratkaisemalla tasapainoehdot:

tasapainoehto 1:

$$(a_{21} + a_{23}) * \varphi_2 + b_{23} * \varphi_3 - c_{21} * \Delta = -MK_{21} - MK_{23}$$

tasapainoehto 2:

$$b_{32} * \varphi_2 + (a_{32} + a_{34}) * \varphi_3 - c_{34} * \Delta = -MK_{32} - MK_{34}$$

tasapainoehto 3:

$$-\frac{1}{l_{12}} * (b_{12} + a_{21}) * \varphi_2 - \frac{1}{l_{34}} * (a_{34} + b_{43}) * \varphi_3 + \frac{1}{l_{12}} * (c_{12} + c_{21}) + \frac{1}{l_{34}} * (c_{34} + c_{43}) = F + Q_{21}^0 - Q_{34}^0 + \frac{MK_{12} + MK_{21}}{l_{12}} + \frac{MK_{34} + MK_{43}}{l_{34}}$$

A * x = b

$$\begin{bmatrix} a_{21} + a_{23} & b_{23} & -c_{21} \\ b_{32} & a_{32} + a_{34} & -c_{34} \\ -\frac{1}{l_{12}} * (b_{12} + a_{21}) & -\frac{1}{l_{34}} * (a_{34} + b_{43}) & \frac{1}{l_{12}} * (c_{12} + c_{21}) + \frac{1}{l_{34}} * (c_{34} + c_{43}) \end{bmatrix}$$

$$* \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \Delta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -MK_{21} - MK_{23} \\ -MK_{32} - MK_{34} \\ F + Q_{21}^0 - Q_{34}^0 + \frac{MK_{12} + MK_{21}}{l_{12}} + \frac{MK_{34} + MK_{43}}{l_{34}} \end{bmatrix}$$

Valitaan alustavat profiilit ja kimmomodulit tuntemattomien ratkaisemiseksi

PILARI (sauva 1)

	CFRHS250X250X6	E	210000	N/mm ²	I	56720000	mm ⁴		
pilarin pituus L12	7400 mm								

RISTIKKO (sauva 2)

yp	CFRHS140X140X6				I	920430	mm ⁴	A	9204,3	mm ²	h paarre	140
ap	CFRHS120X120X5				I	485470	mm ⁴	A	4854,7	mm ²	h paarre	120
paarteiden keskiöväli 1/4 pisteessä					h	1800	mm					
painopiste paarteiden keskivälin keskipisteiden mukaan					yc	278,4	mm					
ristikon yhdistetty jäyhyys		E	210000	N/mm ²	Itot	10299189048	mm ⁴					
ristikon pituus L	20000 mm				yc2	1238,443702						
tarkistus					Itot	10299189048						

PILARI (sauva 3)

	CFRHS250X250X6	E	210000	N/mm ²	I	56720000	mm ⁴		
pilarin pituus L34	7400 mm								

$$a_{ij} = \frac{4EI}{L}, b_{ij} = \frac{2EI}{L}, c_{ij} = \frac{6EI}{L}, a_{ij}^0 = c_{ij}^0 = \frac{3EI}{L}$$

A * x = b

$$\begin{Bmatrix} 4,4E+11 & 2,2E+11 & -1E+10 \\ 2,2E+11 & 4,4E+11 & -1E+10 \\ -1E+06 & -1E+06 & 5220394 \end{Bmatrix}$$

$$* \begin{Bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \Delta \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{matrix} 798986160 \\ -819808650 \\ 20130 \end{matrix}$$

lumi määräävä

tuuli määräävä

$$\begin{matrix} 592443600 \\ -627147750 \\ 30594 \end{matrix}$$

Käänteismatriisi

$$\begin{matrix} 3E-12 & -1E-12 & 2,8E-09 \\ -1E-12 & 3E-12 & 2,8E-09 \\ 3,8E-13 & 3,8E-13 & 1,9E-07 \end{matrix} \rightarrow$$

$$\begin{Bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \Delta \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{matrix} 0,003675372 \\ -0,003593 \\ 0,003876712 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 0,002798266 \\ -0,002677593 \\ 0,005890587 \end{matrix}$$

Momentit

	=				=			itseisarvot	
$M_{12} = a_{12} * \varphi_{12} + b_{12} * \varphi_{21} - c_{12} \Delta_{12} + MK_{12}$	=	0 +	11831915,19 -	4E+07 +	-12813840 =	-38,4 kNm	lumi määräävä	38,4	
	=	0 +	9008298,732 -	6E+07 +	-21356400 =	-69,2 kNm	tuuli määräävä	69,2	
	$M_{21} = a_{21} * \varphi_{21} + b_{21} * \varphi_{12} - c_{21} \Delta_{21} + MK_{21}$	=	2,4E+07 +	0 -	4E+07 +	12813840 =	-1,0 kNm	lumi määräävä	1,0
		=	1,8E+07 +	0 -	6E+07 +	21356400 =	-17,5 kNm	tuuli määräävä	17,5
$M_{23} = a_{23} * \varphi_{23} + b_{23} * \varphi_{32} - c_{23} \Delta_{23} + MK_{23}$	=	1,6E+09 +	-777078007,3 -	0 +	-811800000 =	1,0 kNm	lumi määräävä	1,0	
	=	1,2E+09 +	-579117835 -	0 +	-613800000 =	17,5 kNm	tuuli määräävä	17,5	
	$M_{32} = a_{32} * \varphi_{32} + b_{32} * \varphi_{23} - c_{32} \Delta_{32} + MK_{32}$	=	-2E+09 +	794920285,3 -	0 +	811800000 =	52,6 kNm	lumi määräävä	52,6
		=	-1E+09 +	605217269,2 -	0 +	613800000 =	60,8 kNm	tuuli määräävä	60,8
$M_{34} = a_{34} * \varphi_{34} + b_{34} * \varphi_{43} - c_{34} \Delta_{34} + MK_{34}$	=	-2E+07 +	0 -	4E+07 +	8008650 =	-52,6 kNm	lumi määräävä	52,6	
	=	-2E+07 +	0 -	6E+07 +	13347750 =	-60,8 kNm	tuuli määräävä	60,8	
	$M_{43} = a_{43} * \varphi_{43} + b_{43} * \varphi_{34} - c_{43} \Delta_{43} + MK_{43}$	=	0 +	-11566343,5 -	4E+07 +	-8008650 =	-57,0 kNm	lumi määräävä	57,0
		=	0 +	-8619824,192 -	6E+07 +	-13347750 =	-78,9 kNm	tuuli määräävä	78,9

PILARIN 1 MITOITUS

Kuormitusyhdistelu lumi määräävä

Nd	Mdx
[kN]	[kNm]
243,5	38,4

Kuormitusyhdistelu tuuli määräävä

Nd	Mdx
[kN]	[kNm]
184,1	69,2

Puristettu ja taivutettu pilari

gM0	1 gM1	1 gM2	1,25		
CFRHS250X250X6					
materiaaliarvot					
fy	355	N/mm ²	E	2E+05	N/mm ²
poikkileikkausarvot			nurjahduspituus		
A	5763	mm ²	L	7400	mm
Iy	56720000	mm ⁴	Lcy	7440	mm
Iz	56720000	mm ⁴	Lcz	7400	mm
Wy	453760	mm ³			
Wply	524450	mm ³			
Wz	453760	mm ³			
iy	99,2	mm	tw	6 mm	uuman paksuus
iz	99,2	mm	hi	238 mm	uuman korkeus

Puristuskestävyys

puristetun sauvan hoikkuus ly	75,0	ok, <250
puristetun sauvan hoikkuus lz	74,6	ok, <250

poikkileikkausluokka

c	226 mm				
t	6 mm	9*e	10*e		
c/t	37,67	7,323	8,136	->	PL2

bA	1	
nurjahduskäyrä c	a	0,49

	vahva suunta	heikko suunta
lk	0,98156	0,976
f	1,17321	1,167
k	0,55071	0,554

			lumi määrävä	tuuli määrävä	
Sauvan puristuskestävyys NRd	1127 kN	ka:	0,216	0,163	vahva suunta
Sauvan puristuskestävyys NRd	1133 kN	ka:	0,215	0,163	heikko suunta

Taivutuskestävyys

W _{ely}	453760	mm ³
W _{elz}	453760	mm ³
f _y	355 N/mm ²	
g _{M0}	1	

Sauvan taivutuskestävyys	MR _{dy}	161,1 kNm	ka:	0,239	0,430	vahva suunta
Sauvan taivutuskestävyys	MR _{dz}	161,1 kNm	ka:	0,239	0,430	heikko suunta

Yhdistettu puristus ja taivutuskestävyys

tarkastetaan yksinkertaistetulla menetelmällä

		puristus	taivutus		lumi määräävä	tuuli määräävä
vahva suunta	ka:	0,21616 +	0,239 =	ka:	0,45 < 1,0, ok	0,59 < 1,0, ok
heikko suunta	ka:	0,21494 +	0,239 =	ka:	0,45 < 1,0, ok	0,59 < 1,0, ok

PILARIN 3 MITOITUS**Kuormitusyhdistelu lumi määräävä**

N _d	M _{dx}
[kN]	[kNm]
243,5	57,0

Kuormitusyhdistelu tuuli määräävä

N _d	M _{dx}
[kN]	[kNm]
184,1	78,9

Puristettu ja taivutettu pilari

gM0	1 gM1	1 gM2	1,25		
CFRHS250X250X6					
materiaaliarvot					
fy	355	N/mm ²	E	210000	N/mm ²
poikkileikkausarvot			nurjahduspituus		
A	5763	mm ²	L	7400	mm
Iy	56720000	mm ⁴	Lcy	7440	mm
Iz	56720000	mm ⁴	Lcz	7400	mm
Wy	453760	mm ³			
Wply	524450	mm ³			
Wz	453760	mm ³			
iy	99,2	mm	tw	6	mm uuman paksuus
iz	99,2	mm	hi	238	mm uuman korkeus

Puristuskestävyys

puristetun sauvan hoikkuus ly	75,0	ok, <250
puristetun sauvan hoikkuus ly	74,6	ok, <250

poikkileikkausluokka

c	226	mm			
t	6	mm	9*e	10*e	
c/t	37,67		7,323	8,13617	-> PL2

bA	1	
nurjahduskäyrä c	a	0,49

	vahva suunta	heikko suunta
lk	0,98156	0,976
f	1,17321	1,167
k	0,55071	0,554

			lumi määrävä	tuuli määrävä	
Sauvan puristuskestävyys NRd	1127 kN	ka:	0,216	0,163	vahva suunta
Sauvan puristuskestävyys NRd	1133 kN	ka:	0,215	0,163	heikko suunta

Taivutuskestävyys

W _{ely}	453760	mm ³
W _{elz}	453760	mm ³
f _y	355 N/mm ²	
g _{M0}	1	

Sauvan taivutuskestävyys	MR _{dy}	161,1 kNm	ka:	0,354	0,490	vahva suunta
Sauvan taivutuskestävyys	MR _{dz}	161,1 kNm	ka:	0,354	0,490	heikko suunta

Yhdistettu puristus ja taivutuskestävyys

tarkastetaan yksinkertaistetulla menetelmällä

		puristus	taivutus		lumi määräävä	tuuli määräävä
vahva suunta	ka:	0,21616 +	0,354 =	ka:	0,57 < 1,0, ok	0,65 < 1,0, ok
heikko suunta	ka:	0,21494 +	0,354 =	ka:	0,57 < 1,0, ok	0,65 < 1,0, ok

RISTIKON YLÄPAARTEEN MITOITUS**Kuormitusyhdistelu lumi määräävä**

N _d	M _{dx}
[kN]	[kNm]
662,2	-1192

Kuormitusyhdistelu tuuli määräävä

N _d	M _{dx}
[kN]	[kNm]
499,5	-899

Puristettu ja taivutettu pilari

gM0	1 gM1	1 gM2	1,25		
CFRHS140X140X6					
materiaaliarvot					
fy	355	N/mm ²	E	210000	N/mm ²
poikkileikkausarvot			nurjahduspituus		
A	3123	mm ²	L	2000	mm
Iy	9204300	mm ⁴	Lcy	1800	mm
Iz	9204300	mm ⁴	Lcz	1800	mm
Wy	131490	mm ³			
Wply	155330	mm ³			
Wz	131490	mm ³			
iy	54,3	mm	tw	6	mm uuman paksuus
iz	54,3	mm	hi	128	mm uuman korkeus

Puristuskestävyys

puristetun sauvan hoikkuus ly	33,1	ok, <250
puristetun sauvan hoikkuus lz	33,1	ok, <250

poikkileikkausluokka

c	116	mm			
t	6	mm	9*e	10*e	
c/t	19,33		7,323	8,13617	-> PL2

bA	1	
nurjahduskäyrä c	a	0,49

	vahva suunta	heikko suunta
lk	0,43384	0,434
f	0,6514	0,651
k	0,87927	0,879

			lumi määrävä	tuuli määrävä	
Sauvan puristuskestävyys NRd	975	kN	ka: 0,679	0,512	vahva suunta
Sauvan puristuskestävyys NRd	975	kN	ka: 0,679	0,512	heikko suunta

Jäykistysjärjestelmän epätarkkuudet EN1993-1-1, 5.3.3

Alkuepäätarkkuus alkukaarevuuden muodossa

$$e_0 = \alpha m * L / 500 = 0,060 \text{ mm}$$

$$\alpha m = \sqrt{0,5 * (1 + 1/m)} = 0,84$$

m 2,5 kpl jäykistysjärjestelmässä tuettavien sauvojen lukumäärä

L 36 m jäykistysjärjestelmän pituus

Ekvivalentti stabiloiva voima

N_{kg} 675 kN pysyvistä kuormista HUOM! käyttörajatilan kuormat

N_{kql} 1037 kN lumikuormasta

N_{kqt} 136 kN tuulikuormasta

δ_q 0,004 mm jäykistysjärjestelmän taipuma tasossaan HUOM! Interpolointia

g_k 0,67 kN/m

q_{kl} 1,03 kN/m

q_{kt} 0,13 kN/m

Puristettujen sauvojen jatkoskohdissa jäykistysjärjestelmään tuleva poikittainen lisävoima

2Φ N_{kg} 5,6 kN

2Φ N_{kql} 8,7 kN

2Φ N_{kqt} 1,1 kN

Alkuepäätarkkuudet

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m = 0,01 * 0,69 * 0,87 = 0,003$$

ϕ on perusarvo

α_h 0,69

α_m 0,87

h 8,40 m

m 2,00 kpl

0,005

valitaan

0,69

rakenteen korkeus

rivissä olevien pilareiden lukumäärä, joiden N_{ed} on väh. 50 % keskimääräisestä pilarikuormasta

Alkuepäätarkkuuksista aiheutuvat vinousvoimat

$$\Delta H_{Ed} = \phi * N_{ed} = 0,003 * 477,36 = 1,4 \text{ kN} \quad \text{lumi määräävä + } \frac{1}{2} \text{ tuuli}$$

$$\Delta H_{Ed} = \phi * N_{ed} = 0,003 * 392,40 = 1,2 \text{ kN} \quad \text{tuuli määräävä + } \frac{1}{2} \text{ lumi}$$

$$\Delta H_{Ed} = \phi * N_{ed} = 0,003 * 140,40 = 0,4 \text{ kN} \quad \text{tuuli määräävä + } \frac{1}{2} \text{ lumi}$$

L 20 m

k/k 6 m

gk 0,6 kN/m²

qkl 2 kN/m²

qkt 0,32 kN/m²

N_{ed} 477 kN

lumi määräävä + $\frac{1}{2}$ tuuli

N_{ed} 392 kN

tuuli määräävä + $\frac{1}{2}$ lumi

N_{ed} 140 kN

pysyvät ja tuuli

Vaakakuormista syntyvä tukireaktio pilarin yläpäähän

h	8,40	m		
h _{pil}	8,10	m		
q _k	0,95	kN/m ²		kokonaistuulikuorma
H _{ed}	22,3	kN		lumi määräävä + ½ tuuli
H _{ed}	37,2	kN		tuuli määräävä + ½ lumi
H _{ed}	37,2	kN		pysyvät ja tuuli
H _{ed} TOT		23,7	kN	lumi määräävä + ½ tuuli
H _{ed} TOT		38,4	kN	tuuli määräävä + ½ lumi
H _{ed} TOT		37,6	kN	pysyvät ja tuuli

Rakenteen siirtymätilan vaikutukset

$$\alpha_{cr} = (H_{ed} / V_{ed}) * (h / \delta_{H,Ed}) \geq 10$$

siirtymät pilarin päässä kimmoteorian mukaan

δ _{H,Ed}	=	30	mm		lumi määräävä + ½ tuuli	
δ _{H,Ed}	=	62	mm		tuuli määräävä + ½ lumi	
δ _{H,Ed}	=	62	mm		pysyvät ja tuuli	
α _{cr}	=	0,05	*	270 =	13,43	lumi määräävä + ½ tuuli
α _{cr}	=	0,10	*	131 =	12,77	tuuli määräävä + ½ lumi
α _{cr}	=	0,27	*	131 =	35,00	pysyvät ja tuuli
α _{cr}	=	12,77				sivusiirtymätön rakenne

Toisen kertaluvun vaikutukset

sivusiirtymätön rakenne

Suorakaiteen muotoiset liittopilarit

Tehollinen taivutusjäykkyys, teräsosakerroin ja suhteellinen hoikkuus

Pilarin lähtötiedot

Pituus L 7200 mm Lcr 5760 mm

Kuormat

Ned 300 kN
 Med yp 150 kNm yläpään momentti
 Med ap -135 kNm alapään momentti

Teräsosakerroin $d = Aa \cdot f_{yd} / N_{pl,Rd}$

Profiilit

Teräsputki	CFRHS250X250X8	Aa	7524 mm ²	Putken pitää kuulua vähintään poikkileikkausluokkaan 2
Materiaali	S355	f_{yd}	355 N/mm ²	
Suhde (h/t)	suhteen enimmäisarvo			
h	250 mm	b	250 mm	t 8 mm
h/t	31,25	max (h/t)	42,31	suhte h/t < max (h/t), ok!

Betoni		Ac	54756 mm ²	Alassa ei huomioitu nurkkapyöristyksen vähennystä!
Materiaali	C30/37	f_{cd}	37 N/mm ²	

Raudoite	4T25	As	1960 mm ²	Asn 490
Materiaali	A500HW	f_{sd}	435 N/mm ²	
Haat	T 8	Suojabetoni	20 mm	

$$N_{pl,Rd} = Aa \cdot f_{yd} + 0,85 \cdot Ac \cdot f_{cd} + As \cdot f_{sd}$$

$$N_{pl,Rd} = 2671020 + 1722076,2 + 852173,913 = 5245270 \text{ N}$$

$$\text{Teräsosakerroin } d = Aa \cdot f_{yd} / N_{pl,Rd} = 0,51 \text{ liittopilari}$$

Ncr pilarin tuentaa ja taivutussuuntaa vastaava kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma

Teräsputki	Ea	210000 N/mm ²	Ia	72292000 mm ⁴	
	Ea*Ia	1,51813E+13			
Betoniosa	b	234	h	234	
	Ecm	33	Ic	249851628 mm ⁴	
	Ke	0,6 korjauskerroin			
	NG,Ed/Ned		0,234	1,15*pys/(1,15*pys+1,5*lumi)	
	j	3	h0	117 mm	EN 1992-1-1 3.1.4
	t0	3 kuormitumisikä päivinä			
	Ec,eff	19,4 pitkäaikaisvaikutuksen huomioonottaminen			
	Ke*Ec,eff*Ic	2906617059			
Raudoite	Es	210000 N/mm ²	Is	3243333,333	
	hs	90 mm pääterästen etäisyys keskiöön			
	Es*Is	6,811E+11			
El(eff) = Ea*Ia + Es*Is + Ke*Ec,eff*Ic =		1,58653E+13		tehollinen taivutusjäykkyys	

Suhteellinen hoikkuus I

käytetään materiaalien lujuuksien ominaisarvoja

toisen kertaluvun vaikutukset en1994-1-1 kohta 6.7.3.4

SFS-EN 1994-1-1, 6.7.3.5 Rakenneosien puristuskestävyysKeskeisesti puristettu pilari $N_{ed}/c \cdot N_{pl,Rd} < 1,0$

c lasketaan EN 1993-1-1 kohdan 6.3.1.2 mukaan

$$N_{cr} = p^2 EI / L_{cr}^2$$

täysin suoralle sauvalle, ei huomioitu kaarevuutta

L _{cr}	5760 m	N _{cr}	4516108 N
l	0,769		
As/A _c	3,6 %	nurjahduskäyrä	b SFS-EN 1994-1-1 taulukko 6.5 mukaan
a	0,34		
f	0,8924605		
c	0,743 valitaan c		0,743
N _{pl,Rd}	5245270 N		
N _{ed}	300000 N		
N _{ed} /(χ·N _{pl,Rd})	<1,0		0,077 < 1,0 ok!

SFS-EN 1994-1-1, 6.7.3.6 Rakenneosien kestävyys, kun kuormana on puristus ja taivutus yhden akselin suhteen

Plastisuusteorian mukainen liittopoikkileikkauksen taivutuskestävyys

$$M_{max,Rd} = M_{pl,a,Rd} + M_{pl,s,Rd} + 0,5 \cdot M_{pl,c,Rd}$$

$$M_{pl,a,Rd} = W_{pl,a} \cdot f_{yd} = 239898350 \text{ Nmm}$$

$$M_{pl,s,Rd} = W_{pl,s} \cdot f_{sd} =$$

$$M_{pl,c,Rd} = W_{pl,c} \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = 100741458 \text{ Nmm}$$

$$M_{max,Rd} = W_{pl,a} \cdot f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} \cdot 0,85 f_{cd} + W_{pl,s} \cdot f_{sd} = 290269079 \text{ Nmm}$$

$$N_{pm,Rd} = A_c \cdot 0,85 f_{cd} = 1722076 \text{ N}$$

$$h_n = 32,82 \text{ mm}$$

$$W_{pl,an} = 17238 \text{ Nmm}$$

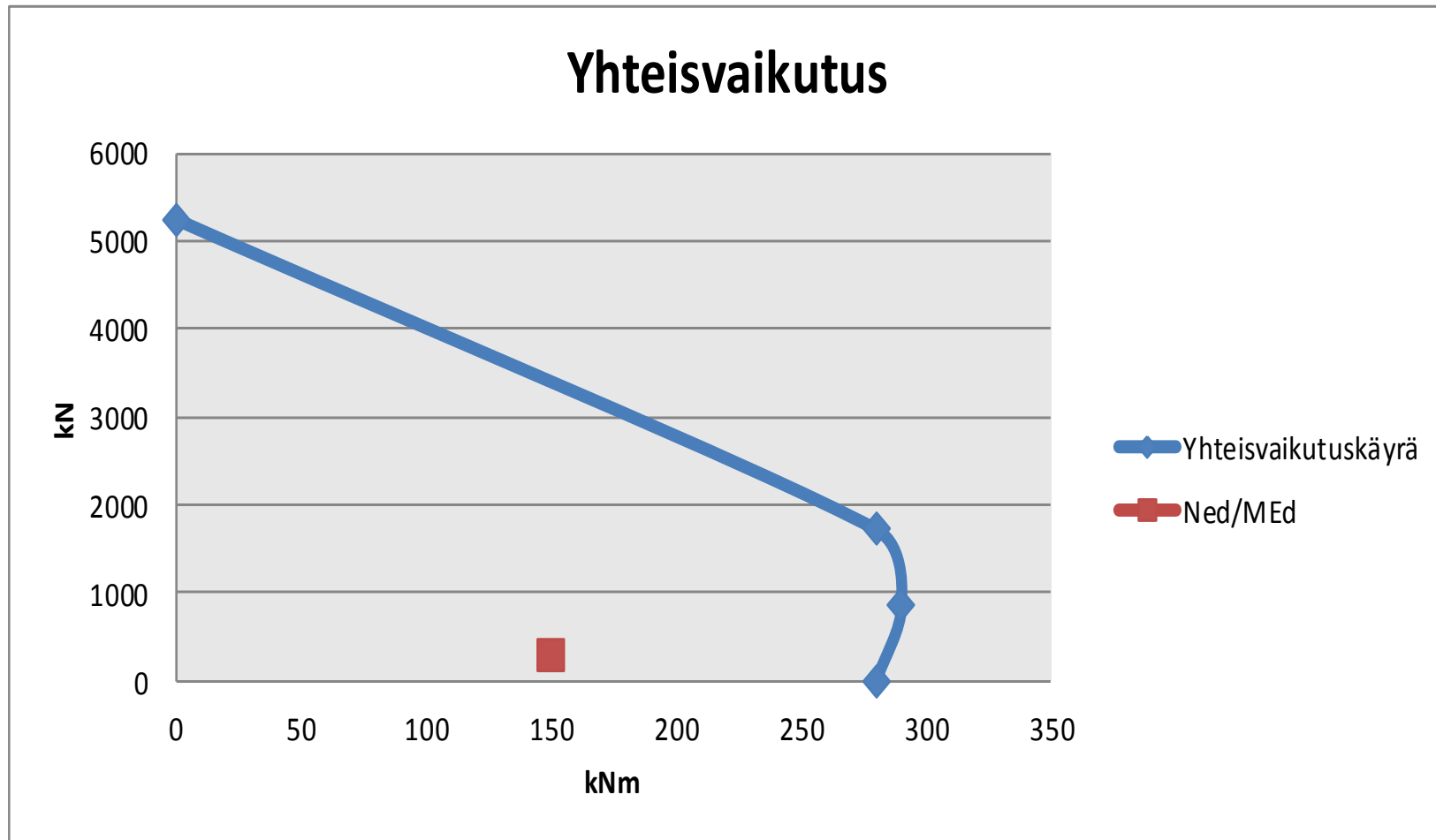
$$W_{pl,sn} = \text{Nmm}$$

$$W_{pl,cn} = 252107 \text{ Nmm}$$

$$M_{n,Rd} = W_{pl,an} \cdot f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} \cdot 0,85 \cdot f_{cd} + W_{pl,sn} \cdot f_{sd} = 10083883 \text{ Nmm}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} = 280185196 \text{ Nmm}$$

taulukko	kNm	kN
piste A	0	5245
piste C	280	1722
piste D	290	861
piste B	280	0



NELIÖPUTKET

	H	B	T	M	A	A _u	I _x = I _y	W _x = W _y	W _{px} = W _{py}	i _x = i _y	I _v	W _v
	mm	mm	mm	kg/m	mm ²	m ² /m	mm ⁴	mm ³	mm ³	mm	mm ⁴	mm ³
					x 10 ²		x 10 ⁴	x 10 ³	x 10 ³	x 10	x 10 ⁴	x 10 ³
CFRHS25X25X2	25	25	2	1,36	1,74	0,093	1,48	1,19	1,47	0,92	2,53	1,8
CFRHS25X25X2,5	25	25	2,5	1,64	2,09	0,091	1,69	1,35	1,71	0,9	2,97	2,07
CFRHS25X25X3	25	25	3	1,89	2,41	0,09	1,84	1,47	1,91	0,87	3,33	2,27
CFRHS30X30X2	30	30	2	1,68	2,14	0,113	2,72	1,81	2,21	1,13	4,54	2,75
CFRHS30X30X2,5	30	30	2,5	2,03	2,59	0,111	3,16	2,1	2,61	1,1	5,4	3,2
CFRHS30X30X3	30	30	3	2,36	3,01	0,11	3,5	2,34	2,96	1,08	6,15	3,58
CFRHS40X40X2	40	40	2	2,31	2,94	0,153	6,94	3,47	4,13	1,54	11,28	5,23
CFRHS40X40X2,5	40	40	2,5	2,82	3,59	0,151	8,22	4,11	4,97	1,51	13,61	6,21
CFRHS40X40X3	40	40	3	3,3	4,21	0,15	9,32	4,66	5,72	1,49	15,75	7,07
CFRHS40X40X4	40	40	4	4,2	5,35	0,146	11,07	5,54	7,01	1,44	19,44	8,48
CFRHS50X50X2	50	50	2	2,93	3,74	0,193	14,15	5,66	6,66	1,95	22,63	8,51
CFRHS50X50X2,5	50	50	2,5	3,6	4,59	0,191	16,94	6,78	8,07	1,92	27,53	10,22
CFRHS50X50X3	50	50	3	4,25	5,41	0,19	19,47	7,79	9,39	1,9	32,13	11,76
CFRHS50X50X4	50	50	4	5,45	6,95	0,186	23,74	9,49	11,73	1,85	40,42	14,43
CFRHS50X50X5	50	50	5	6,56	8,36	0,183	27,04	10,82	13,7	1,8	47,46	16,56
CFRHS60X60X2	60	60	2	3,56	4,54	0,233	25,14	8,38	9,79	2,35	39,79	12,59
CFRHS60X60X2,5	60	60	2,5	4,39	5,59	0,231	30,34	10,11	11,93	2,33	48,66	15,22
CFRHS60X60X3	60	60	3	5,19	6,61	0,23	35,13	11,71	13,95	2,31	57,09	17,65
CFRHS60X60X4	60	60	4	6,71	8,55	0,226	43,55	14,52	17,64	2,26	72,64	21,97
CFRHS60X60X5	60	60	5	8,13	10,36	0,223	50,49	16,83	20,88	2,21	86,42	25,61
CFRHS70X70X2,5	70	70	2,5	5,17	6,59	0,271	49,41	14,12	16,54	2,74	78,49	21,22

Teräs	fy	fu	Nurjahduskäyrä	
			alfa	
EN 10025-2				
S235	235	360	a0	0,13
S275	275	430	a	0,21
S355	355	510	b	0,34
S450	440	550	c	0,49
EN 10025-3			d	0,76
S275N/NL	275	390		
S355N/NL	355	490		
S420N/NL	420	520		
S460N/NL	460	540		

Betoni	fck	fck,cube	fcd	fcd,onn.	Ecm	
C20/25		20	25	13,3	16,7	30
C25/30		25	30	16,7	20,8	31
C30/37		30	37	20,0	25,0	33
C35/45		35	45	23,3	29,2	34
C40/50		40	50	26,7	33,3	35
C45/55		45	55	30,0	37,5	36
C50/60		50	60	33,3	41,7	37
C55/67		55	67	36,7	45,8	38
C60/75		60	75	40,0	50,0	39

Betoniteräs	fyd	fyd,onn	
A500HW	500	435	500