



Jarkko Pietiläinen

TERÄKSISEN HI-HARJAPALKIN JA PUTKIRISTIKON MITOITUS JA KUSTANNUSVERTAILU

TERÄKSISEN HI-HARJAPALKIN JA PUTKIRISTIKON MITOITUS JA KUSTANNUSVERTAILU

Jarkko Pietiläinen
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, rakennesuunnittelu

Tekijä: Jarkko Pietiläinen

Opinnäytetyön nimi: Teräksisen HI-palkin ja putkiristikon mitoitus ja kustannusvertailu

Työn ohjaaja: Kai Kuula, Oamk

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2014 Sivumäärä: 42 + 6 liitettä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli teräksisten HI-harjapalkkien ja putkiristikoiden mitoitus ja kustannusvertailu. Työn tavoitteena oli selvittää hallirakennuksen vesikaton pääkannattajana toimivien HI-harjapalkkien ja putkiristikoiden keskinäistä kustannustehokkuutta eri jänneväleillä. Tulosten perusteella voidaan arvioida, kumman tyyppinen pääkannattaja on taloudellisesti tehokkaampi valinta kullekin jänneväleille. Työn tilaajana oli Pöyry Finland Oy.

Kustannustehokkuutta selvitettiin mitoittamalla erityyppiset kattokannattajat tavanomaista teollisuusrakennusta vastaavaan esimerkkikohteeseen. Työ suoritettiin mitoittamalla HI-harjapalkki- ja ristikkokattokannattajat 20 m:n, 30 m:n ja 40 m:n jänneväleille sekä 6 m:n ja 12 m:n kehäjaoilla. Mitoitetuille kannattajille laskettiin kustannukset, joiden perusteella pääteltiin kunkin kannattajatyypin taloudellinen käyttöalue. Kustannusten selvittämisessä käytettiin Pöyryn toteutuneiden projektien hintatietoja.

Työn tuloksena voidaan todeta, että kehäjaon ollessa 6 m taloudellisesti kannattavampaa on toteuttaa hallirakennuksen pääkannattajat putkiristikoilla kaikilla lasketuilla jänneväleillä. Kehäjaon ollessa 12 m ovat HI-harjapalkin ja putkiristikon kustannustehokkuuden erot selvästi pienemmät. HI-harjapalkki on hieman edullisempi vaihtoehto 20 m:n jänneväleillä, 30 m:n jänneväleillä kustannukset ovat likimain samat ja 40 m:n jänneväleillä ristikko on taloudellisempi vaihtoehto. Tuloksista nähdään, että ristikon kilpailukyky kasvaa sitä mukaa, mitä pidempi jänneväli on kyseessä. Tämän työn lopputuloksia ei voida suoraan verrata toisiin suunniteltaviin kohteisiin rakennusten yksilöllisyyden takia, mutta tulokset antavat kuitenkin suuntaa kannattajien taloudellisen käyttöalueen arvioimiseksi.

Asiasanat: HI-harjapalkki, putkiristikko, mitoitus, kustannusvertailu

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Structural Engineering

Author: Jarkko Pietiläinen

Title of thesis: Design and cost comparison of the steel trapezoidal WI-beam and tube truss

Supervisor: Kai Kuula

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2014 Pages: 42 + 6 appendices

The subject of this thesis was design and cost comparison of the steel WI-beams and tube trusses. The objective of the work was to analyze the mutual cost efficiency of WI-beams and tube trusses as a main supporter of the roof of an industrial hall building. On the basis of the received information can be estimated at the predesign phase which type of head supporter is preferred to different span width. The subscriber of the work was Pöyry Finland Oy.

The cost efficiency was analyzed by designing roof supporters to the project in question which corresponds to a usual industrial building. The work was performed by designing both type of roof supporters to the spans 20 m, 30 m and 40 m. The supporters were designed with a two frame division 6 m and 12 m. The cost efficiency of the designed WI-beams and tube trusses were calculated by using the cost information of Pöyry.

The obtained result shows that tube trusses are more cost-effective in every examined span when the frame spacing is 6 m. When the frame spacing is 12 m, the cost difference between WI-beam and tube truss are much more smaller. WI-beam is a little more advantageous alternative in span length of 20 m. On the span length of 30 m the costs are approximately at the same level and on the span length of 40 m the truss structure is more cost-effective. From the results can be seen that the longer span the more economical solution the truss structure is. When utilizing the final results of this work, must be remembered that results cannot be compared directly with the another project because of the individuality of the buildings. However, the results give the guidelines to estimate the cost efficiency of the supporters.

Keywords: Trapezoidal WI-beam, Tube truss, Design, Cost comparison

ALKULAUSE

Haluan kiittää työn tilaajalta Pöyry Finland Oy:ltä ohjaajana ollutta ryhmäpäällikkö Juha Vehkamäkeä haastavasta ja mielenkiintoisesta aiheesta. Aihe oli hyvä silmälläpitäen tulevaisuuden työtehtäviä rakennesuunnittelun parissa. Haluan esittää kiitokseni myös koulun puolesta sisällönohjaajana olleelle lehtori Kai Kuulalle sekä opinnäytetyön yhteistyökumppanille Rautaruukki Oyj:lle. Rautaruukki Oyj oli mukana lahjoittamalla aiheeseen liittyvää kirjallisuutta sekä antamalla mitoituksessa käytettyjen Ruukin ohjelmien lisenssit käyttöön. Tästä on hyvä jatkaa kohti työelämän haasteita.

Oulussa 4.5.2014

Jarkko Pietiläinen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	8
2 KANNATTAJATYYPIT	9
2.1 HI-palkki	9
2.2 Putkiristikko	12
3 RAKENTEIDEN MITOITUS	19
3.1 Rajatilamitoituksen periaatteet	19
3.1.1 Murtorajatila	19
3.1.2 Käyttörajatila	20
3.2 Kuormitusten määrittäminen	20
3.2.1 Kuormitustyytit	20
3.2.2 Omapaino	21
3.2.3 Hyötykuorma	21
3.2.4 Lumikuorma	22
3.2.5 Tuulikuorma	24
3.3 Kuormien yhdistely	26
3.3.1 Murtorajatila	26
3.3.2 Käyttörajatila	27
3.4 HI-harjapalkin mitoituksen kulku	28
3.5 Ristikon mitoituksen kulku	30
3.6 Käytetyt ohjelmat	32
3.6.1 Poimu	32
3.6.2 Mathcad	32
3.6.3 WinRami ja Section	32
3.6.4 Robot Structural Analysis Professional	33
4 KUSTANNUKSET	34
4.1 Kustannusten muodostuminen	34
4.2 Kannattajien kustannukset	35

4.3 Lämmitystilavuuden tuomat lisäkustannukset	36
5 TULOKSET	37
5.1 Kannattajien kustannukset	37
5.2 Lämmitystilavuuden tuomat lisäkustannukset	37
6 YHTEENVETO	39
LÄHTEET	40
LIITTEET	42

1 JOHDANTO

Teräsrakenteisissa teollisuushalleissa käytetään yleisesti vesikaton pääkannattajana joko hitsattua I-palkkia tai putkiristikkoa. Kummallakin kannattajatyypillä voidaan toteuttaa kattokannattajat 20 m:n - 40 m:n jännevälialueille. Rakennevaihtoehtojen taloudellisissa käyttöalueissa on kuitenkin eroja. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selkeyttää kattokannattajatyypin valintaa HI-palkin ja putkiristikon välillä eri jänneväleillä.

Työssä mitoitetaan kustannustehokkuuden selvittämiseksi opinnäytetyön tilaajan määrittelemään esimerkkikohteeseen HI-harjapalkit ja putkiristikot. Mitoituille kannattajille lasketaan asennus- ja valmistuskustannukset sekä välillisesti aiheutuvat kustannukset, kuten kannattajatyypin rakennekorkeuden vaikutus rakennuksen kokonaistilavuuteen. Kustannusten perusteella päätellään kummankin kannatintyyppin taloudellisuus eri jänneväleillä.

Työn tilaaja määritteli esimerkkikohteeksi rakennuksen, jonka rakenteet ja mitat vastaavat tavanomaista teollisuusrakennusta (liite 2). Rakennuksen kantava runko on kehärakenteinen pilari-palkkirunko, jossa kattokannattajat tukeutuvat nivelellisesti kehän suunnassa mastorakenteena toimiviin pilareihin (liite 3). Hallin pituus on 48 m, sisätilan vapaana korkeutena käytetään 15 m ja leveyttä varioidaan 20 m:n ja 40 m:n välillä. Työssä tarkastellaan kahta eri kehäjakoa (6 m ja 12 m). Rakennuksen katto on symmetrinen loiva (1:16) harjakatto ulkopuolisella vedenpoistolla.

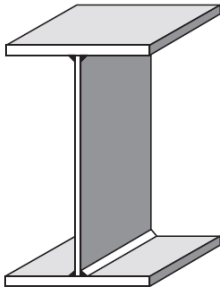
Rakennus suunnitellaan seuraamusluokkaan CC2, paloluokkaan 2 sekä maastoluokkaan 1. Rakennus on puolilämmin. Rakenteet mitoitetaan Eurokoodien mukaisesti ja suunnitellaan valmistettavaksi konepajalla.

Opinnäytetyöstä saatavaa tietoa voidaan hyödyntää rakennusten esisuunnitteluvaiheessa kattokannattajatyypin valinnassa. Tilaaja katsoi aiheelliseksi teettää tutkimuksen aiheesta, koska aiemmin tehdyt tarkastelut ovat osittain vanhentuneita sovellettavaksi käytäntöön. Opinnäytetyön tilaajana on Pöyry Finland Oy.

2 KANNATTAJATYYPIT

2.1 HI-palkki

HI-profiilit eli hitsatut I-profiilit ovat kuumavalssatuista levyistä hitsaamalla koottuja profiileja. I-profiili (kuva 1) on yleisin ja suositelluin profiilimuoto. Sitä käytetään tavallisimmin erilaisina kannattimina talonrakenteissa ja teollisuusrakentamisessa. I-profiili on taloudellisin profiilimuoto silloin, kun poikkileikkaukseen kohdistuu mahdollisen normaalivoiman lisäksi taivutusrasitus sen vahvemmassa suunnassa. Leveälaippainen HI-profiili soveltuu hyvin myös pilariksi. (1, s. 11.)



KUVA 1. Hitsatun I-profiilin poikkileikkaus (1, s. 11)

HI-profiilista voidaan valmistaa keveitä ja muunneltavia rakenteita. HI-profiilin suunnittelussa saadaan optimoitua käytettävän teräksen määrä siten, että haluttu kantokyky saavutetaan mahdollisimman pienellä ainemenekillä. HI-profiilin etuna kuumavalssattuun profiiliin nähden on myös se, että profiilia on mahdollista muotoilla vapaammin. Hitsattuun profiiliin on myös mahdollista tehdä esikoroitus, joka on pitkien jännevälien kannattajien suunnittelussa merkittävä etu. (1, s. 10.)

Hitsattujen profiilien kilpailukyky valssattuihin profiileihin nähden perustuu siis muun muassa optimoinnin perusteella saavutettuun painon säästöön. Hitsattu profiili on kilpailukykyisimmillään, kun rakennekorkeutta ei ole rajoitettu. Matalia profiileja ei yleensä kannata työkustannusten vuoksi valmistaa hitsattuna, vaikka profiilin rakennepaino jäisi kevyemmäksi valssattuun profiiliin nähden. Pienin taloudellinen valmistusraja hitsatun palkin korkeudelle on noin 300 - 400 mm. (1, s. 32.)

I-profiilin taivutuskestävyys paranee, mitä kauempana laipat ovat toisistaan. Sen vuoksi kattokannattajina toimivat HI-palkit suunnitellaan yleensä korkeiksi, mikäli rakenteen korkeutta ei ole erikseen rajoitettu. Korkeat palkit kannattaa suunnitella ohutuumaisina, koska muuten uuman paksuus kasvaa tarpeettomasti suhteessa tarvittavaan leikkauskestävyyteen. Ohutuumaiset palkit ovat taivutettuna optimaalisia kannattajia, mutta niitä ei suositella käytettäväksi väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa. (2, s. 20.)

Hitsattujen profiilien valmistusprosessissa kuumavalssatut teräslevyt suihkupuhdistetaan, jonka jälkeen ne polttoleikataan halutun profiilin uuman ja laippojen mittojen mukaan. Uuma- ja laippalevyt asetetaan automaattisesti toisiinsa nähden halutulla tavalla, ja ne hitsataan yhteen jauhekaarhitsauslaitteistolla. Hitsatut profiilit valmistetaan pääsääntöisesti konepajalla. Valmistusprosessissa käytetään nykyään paljon automatiikkaa. Suunnittelutoimistoissa käytettävillä ohjelmilla on mahdollista tuottaa työstökoneita ohjaavia tiedostoja, joiden avulla voidaan polttoleikata levyosat ja porata kiinnittimien reiät automaattisesti. (1, s. 10, 13.)

Ohutuumaista poikkileikkausta suunniteltaessa täytyy ottaa tavallisten rasitus suureiden lisäksi huomioon myös erilaiset stabiiliusilmiöt. Riittävä kiepahdustuenta on edellytyksenä käytettäessä ohutuumaista palkkia pitkillä jänneväleillä. Kiepahdustuenta järjestetään yleensä joko kannattajien päällä olevilla kattoorsilla tai poimulevyillä. Toinen huomioitava ilmiö on leikkauslommahdus. Käytettäessä ohutta uumaa saattaa se lommahtaa ennen plastisen leikkauskestävyyden saavuttamista. Leikkauslommahduskestävyyttä voidaan parantaa uuman jäykisteillä. Palkkien varustaminen jäykisteillä kuitenkin lisää valmistuskustannuksia, joten on syytä tarkastella, onko uuman paksuntaminen kannattavampaa. (1, s. 38, 41)

Jäykisteiden tarve on palkkikohtaista ja niitä tarvitaan pääasiallisesti kolmenlaiseen tehtävään:

- Pistekuormien kohdalla kuormitetun laipan tukemiseen sekä uuman paikallisen lommahtamisen estämiseen.
- Lommahduserhän rakenneosan tukemiseen.

- Rakenneosaan tehtyjen suurien aukkojen reunojen tukemiseen. (2, s. 24.)

Palkin leikkauslommahduskestävyyttä voidaan parantaa uuman poikittais- ja pitkittäisjäykisteillä. Jäykisteet mitoitetaan toimivaksi joko jäykkinä tai ei-jäykkinä. Poikittaisjäykisteet toimivat lyhyinä vertikaalisauvoina uuman toimies- sa vetokenttäteorian mukaan. Ne ottavat vastaan vetokentästä tulevat vaaka- kuormat jäykän päätyjäykisteen tapauksessa. Poikittaisjäykisteiden käyttö on ensisijainen uuman jäykistystapa. Pitkittäisjäykistystä käytetään yleensä pal- keissa, joiden korkeus on yli 3 metriä, kuten esimerkiksi suurissa siltapalkeissa. (1, s. 31 - 32, 154.)

HI-harjapalkki

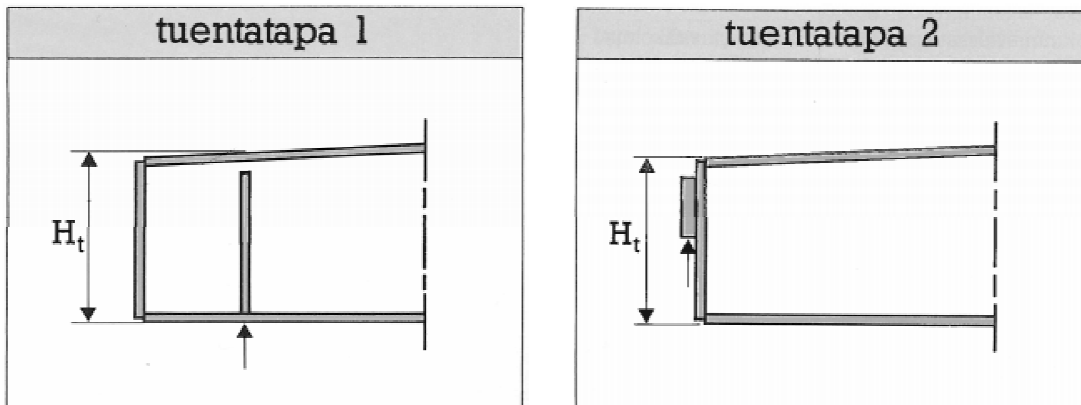
HI-harjapalkit ovat palkkeja, joiden korkeus muuttuu palkin pituussuunnassa muodostaen harjan (kuva 2). Harjapalkkien pääasiallinen käyttökohde on vesi- katon pääkannattajana. Harjapalkin etu suoraan palkkiin nähden on, että kat- toon saadaan kaltevuutta ja suurimman taivutusmomentin kohdalle lisää taivu- tuskestävyyttä. (3, s. 18.)



KUVA 2. HI-harjapalkin pituusleikkaus (4, s. 75)

Tavallisesti HI-harjapalkin poikkileikkauksen suunnittelussa laipan paksuus ja leveys valitaan siten, että laippa kuuluu vähintään poikkileikkausluokkaan 3. Korkeissa palkeissa uuma suunnitellaan yleensä poikkileikkausluokkaan 4. Uuman paksuuden valinnassa on syytä huomioida myös valmistustekniset sei- kat. Hitsatuissa profiileissa suositellaan käytettäväksi 6 mm:n uumaa, kun uu- man korkeus on alle 600 mm:n, ja 8 mm:n uumaa, kun profiilin korkeus on alle 1200 mm. Mittasuositusten poikkeamisesta seuraa profiilin hitsauksen vaikeu- tuminen. Harjapalkin tapauksessa, jossa uuman korkeus keskellä palkkia on korkeampi kuin tuella, voidaan palkin keskialueella käyttää tarvittaessa pak- sumpaa uumavahvuutta. (1, s. 32.)

Harjapalkkien tuentatapoina käytetään yleensä kahta nivelellisesti toimivaa standardiratkaisua, jotka on esitetty kuvassa 3.



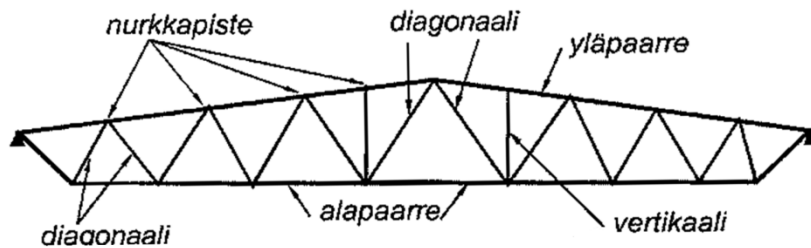
KUVA 3. Tuentatapojen standardiratkaisut (4, s. 8 - 9)

Tuentatavassa 1 palkki tukeutuu pilarin päälle, kun taas tuentavassa 2 se tukeutuu tukipalan välityksellä pilarin laippaan. Tässä työssä käytetään tuentatavaa 2, koska tällä tuentatavalla saavutetaan käytännössä paremmin toimiva nivellitys. (4, s. 8 - 9.)

Palkkien uumassa joudutaan käyttämään usein aukkoja läpi vietävien putkistojen vuoksi. Kattokannattajien tapauksessa uuman läpi viedään tavanomaisesti IV-putkia. Aukot ja reiät heikentävät aina poikkileikkauksen kestävyyttä. Aukkojen kokoa ja muotoa säätelemällä ja valitsemalla aukkojen sijoitus sopivasti voidaan vaikuttaa heikennyksen suuruuteen. Teräsrakenteiden Eurokoodi ei sisällä ohjeita aukko-kohtien kestävyystarkasteluihin, mutta sen esistandardissa on yksityiskohtaiset ohjeet, joita voidaan käyttää. (5, s. 69.)

2.2 Putkiristikko

Teräsrakenteinen ristikko koostuu ylä- ja alapaarteesta sekä niiden välissä olevista hitsaamalla liitetyistä uumasauvoista. Pystyasennossa olevia uumasauvoja kutsutaan vertikaalisauvoiksi ja vinossa olevia uumasauvoja diagonaalisauvoiksi (kuva 4). Ristikon kokonaispaino jakaantuu karkeasti siten, että puristetun paarteen paino on noin 50 prosenttia, vedetyn paarteen paino noin 30 prosenttia ja uumasauvojen paino noin 20 prosenttia ristikon kokonaispainosta. (6, s. 76; 6, s. 420.)

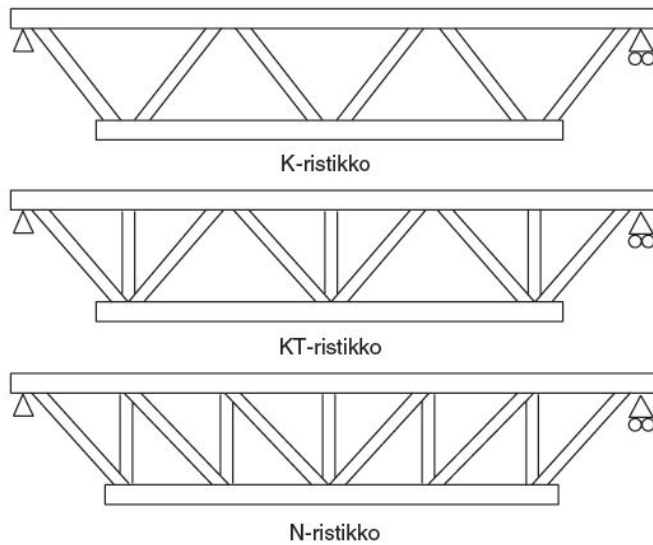


KUVA 4. Ristikon osien nimet (6, s. 76)

Ristikoiden suurin käyttökohte talonrakennuksessa on vesikaton pääkannattajat. Muita käyttökohteita ovat muun muassa rungon jäykisteet, pilarirakenteet ja sekundäärikannattajat. Talonrakennuksessa käytettävät ristikot voidaan jakaa karkeasti ryhmiin toimintatavan ja ulkonäön perusteella. Toimintatavan perusteella ristikot voidaan jakaa tasoristikoihin ja avaruusristikoihin sekä ulkonäön perusteella tasakorkuisiin, muuttuvakorkuisiin ja kaareviin ristikoihin. Tässä opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa muuttuvakorkuista tasoristikkoa. (3, s. 84.)

Ristikot tehdään pääasiallisesti rakenneputkista. Niiden etuna muihin muototeräsprofiileihin on suuri vääntö- ja taivutusjäykkyys kaikissa suunnissa. Koska ristikkorakenteen sauvoja kuormittavat enimmäkseen normaalivoimat, on edullisin profiilimuoto sellainen, jonka taivutusvastus on yhtä suuri kummankin pääakselin suhteen. Rakenneputkia on valmistustavasta riippuen kahta eri tyyppiä: saumattomia ja hitsaamalla valmistettuja. Putkiristikoiden käytetään yleisimmin saumattomia rakenneputkia. Saumattomien rakenneputkien valmistuksessa käytetään yleensä kylmämuokkausta ja materiaalina tavanomaisia rakenneteräsrautoja. (2, s. 66; 6, s. 23, 76.)

Ristikkorakenteissa on useita erilaisia tapoja sijoittaa uumasauvat. Uumasauvojen sijoituksella haetaan ristikolle kustannustehokkaassa mielessä optimaalista muotoa. Uumasauvojen sijoittelua ohjaa usein myös kattoristikoiden päällä oleva sekundäärikannattajajako. Kattoristikoiden yleisimpiä kuvan 5 mukaiset ristikotyypit. (6, s. 420.)



KUVA 5. Erilaiset ristikkotyypit (6, s. 423)

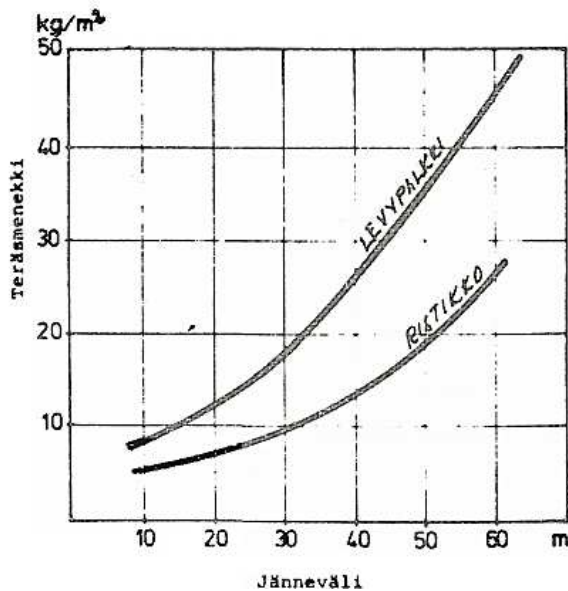
K-ristikko soveltuu hyvin pitkille jänneväleille, kun rakenteelle tulevat kuormat saadaan siirrettyä suoraan liitoskohtiin. K-ristikon hyviä puolia ovat pieni sauvojen määrä ja se, että liitokset ovat yksinkertaisia ja helppo toteuttaa, sekä se, että tilaa jää hyvin mahdollisille läpivienneille. Huonona puolena on yläpaarteen suuri nurjahduspituus, mikä voi johtaa sen vuoksi muihin ristikkotyyppeihin nähden raskaampaan yläpaarteeseen. (6, s. 423.)

KT-ristikko on K-ristikon kaltainen, mutta ylä- ja alapaarteen väliin, vedetyn paarteen liitoksen kohdalle, tulee vertikaalisauva. Tämä lisää yläpaarteen nurjahduskestävyyttä, mutta liitosten teko vaikeutuu. (6, s. 423.)

N-ristikoissa sauvojen lukumäärä lisääntyy K-ristikkoon verrattuna. N-ristikko tulee kannattavaksi toteuttaa, kun ristikko on korkea ja jänneväli lyhyt, koska uumasauvojen voimat ovat suuria parresauvoihin verrattuna. Tällöin puristetut uumasauvat ovat lyhyempiä kuin KT-ristikossa. (6, s. 423.)

Teräsrakenteiset ristikot ovat kilpailukykyisimmillään pitkillä jänneväleillä. Tällöin on oltava käytössä riittävästi rakennekorkeutta. HI-palkin ainemenekki kasvaa enemmän suhteessa ristikkokannattajaan jännevälin kasvaessa (kuva 6). Ristikon materiaalin säästö perustuu teräsrakenteiseen levypalkkiin nähden suurempaan rakennekorkeuteen, jolloin parrevoimat ovat pienemmät kuin vastavalla levypalkilla. Lisäksi ristikon uuman muodostavat uumasauvat, jotka voi-

daan mitoittaa lähellä 100 prosentin käyttöastetta. Uumasauvojen ainemenekki jää yleensä tämän vuoksi levypalkin uumalevyyn nähden pienemmäksi. Ristikon valmistuskustannukset ovat yleensä korkeammat kuin vastaavalla levypalkilla, koska levypalkkien valmistus on helpompi automatisoida. (2, s. 63; 3, s. 84.)



KUVA 6. Kattokannattajiksi mitoitettujen ristikoiden ja levypalkkien painovertailu eri jänneväleillä vuodelta 1985 (8, s. 212)

Talonrakennuksessa teräsrakenteinen ristikko on taloudellisimmillaan toteuttaa, kun rakennekorkeus on noin 1/9 - 1/12 jännevälistä. Mitä enemmän kuormitusta ristikolla on, sitä suurempi on optimikorkeus. Parresauvojen väliselle korkeudelle on johdettu likimääräinen kaava (2, s. 65; 6, s. 420):

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{2M}{t_{wekv} \cdot \sigma}}$$

KAAVA 1

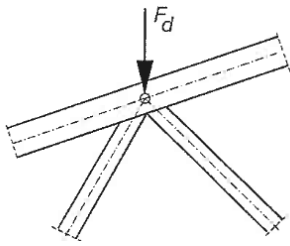
M = tasoristikon suurin taivutusmomentti

t_{wekv} = kannattimen koosta riippuvainen kokemusperäinen arvo 1...2 mm

σ = parresauvan mitoituksessa käytetty jännityksen arvo

Kattokannattajana olevaa ristikkoa kuormitetaan joko pistemäisesti sekundäärikannattajan kautta tai tasaisesti, esimerkiksi kantavan poimulevyn välityksellä. Ristikkoa on edullisin kuormittaa nurkkapisteistään eli liitosten kohdalta (kuva

7). Tällöin paarteeseen ei tule kuormituksesta johtuvaa taivutusrasitusta, joka jouduttaisiin huomioimaan mitoituksessa. (3, s. 85.)



KUVA 7. Ristikon kuormitus nurkkapisteestä (3, s. 77)

Ristikon mitoituksessa tulee huomioida taipuma, joka on yleensä suuri. Taipumaa voidaan arvioida käsinlaskukaavalla (kaava 2). Käsinlaskukaavaa käytetään yleensä esisuunnitteluvaiheessa, ja tarkempi ristikön taipuma saadaan tietokoneohjelmista (7, s. 438).

$$I = A_1 * H^2 \left(\frac{\frac{A_2}{A_1}}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right)^2 + A_2 * H^2 \left(\frac{1}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right)^2 \quad \text{KAAVA 2}$$

H = ristikön korkeus

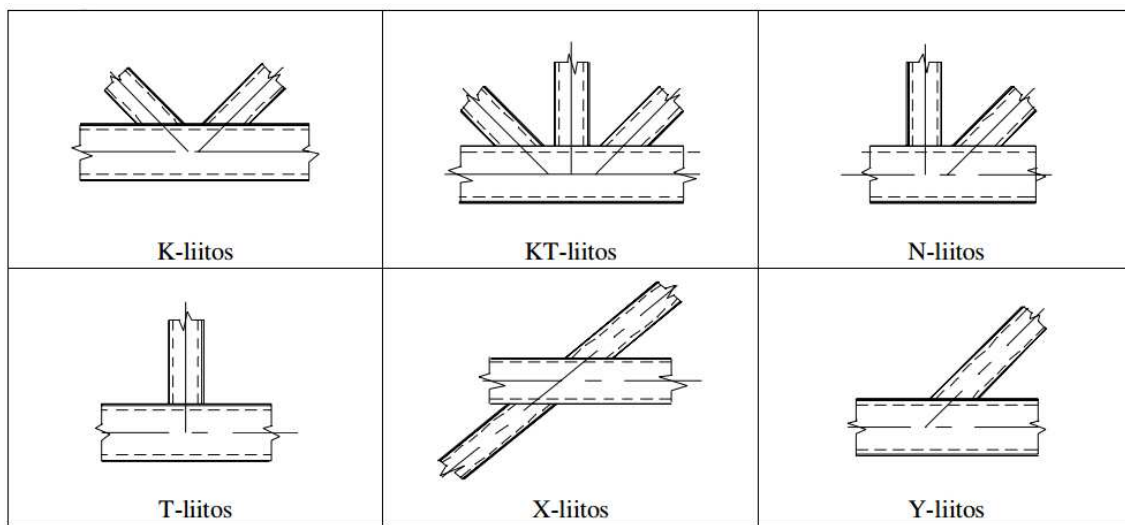
A_1 ja A_2 = paarteiden poikkileikkauspinta-alat

Ristikön mitoituksessa käytetään yleisesti yksinkertaistettua ajattelutapaa, jossa ristikkoa käsitellään ideaaliristikkona. Ideaaliristikolla tarkoitetaan sitä, että ristikko koostuu kolmion muotoon liitetystä nivelnurkkaisista sauvoista, joissa välitsee puhdas aksiaalinen voima. Aksiaalinen voima on joko vetävää tai puristavaa. Ideaaliristikossa sauvat liittyvät toisiinsa vain sauvojen päätepisteissä ja ristikkoa kuormitetaan vain nurkkapisteistä. Ideaaliristikön mekaaninen käyttäytyminen on helppo analysoida ilman laskentaohjelmia. Käytännön syistä ristikön nurkkia ei kuitenkaan tehdä nivelellisiksi, eli niissä on aina tietty kiertymäjäykkyys. Muun muassa tämän vuoksi ristikossa voi esiintyä taivutus- ja leikkausrasituksia. Laskentaohjelmissa ristikot mallinnetaan usein siten, että paarteet ovat jatkuvia ja uumasauvat ovat kiinnitettyinä nivelellisesti paarteeseen. (6, s. 76 - 77; 7, s. 438.)

Ristikkoliitokset

Ristikoiden sauvat liitetään toisiinsa konepajalla pääsääntöisesti hitsaamalla. Ruuviliitoksia käytetään asennusliitoksina koottaessa osissa toimitettua ristikkoa työmaalla. Ristikko joudutaan tekemään osissa, mikäli kuljetus tai konepaja asettaa rajoitteen ristikon koolle. (3, s. 90.)

Ristikkoliitokset voidaan tehdä joko vapaavälisinä tai limitettyinä. Vapaavälinen liitos on konepajateknisesti helpompi ja halvempi toteuttaa. Kuvassa 8 on esitetty yleisiä vapaavälisiä liitostyypppejä. (7, s. 161.)



KUVA 8. Yleisiä vapaavälisiä putkiristikkoliitostyypppejä (9, s. 111)

Ristikkorakenteiden liitokset oletetaan yleensä nivelellisiksi ja uumasauvat mitoitetaan pelkän aksiaalisen voiman suhteen. Paarteisiin voi aiheutua myös taivutusrasitusta liitosten epäkeskisyydestä, joten niiden mitoituksessa pitää huomioida taivutuksen ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutus. Ohutseinäinen putkipalkki on edullisin puristuskestävyyden kannalta, mutta liitosten kestävyys kannalta paksuseinäinen ja kapea parre on optimaalisin. (7, s. 159.)

Putkipalkkien liitosten laskennallinen tarkastelu on haastavaa. Eurokoodi antaa kuitenkin ristikkoliitosten mitoitukselle selvät ohjeet. Eurokoodiin on taulukoitu hitsausliitosten pätevyysrajat ja lisäehdot, joiden täytyessä tarvitsee tarkastaa ainoastaan vain kyseessä olevan taulukon mitoitus ehdot. Jotta liitosten pätevyysrajat toteutuvat, valitaan ristikon profiileiksi ainoastaan poikkileikkausluokan

1 - 2 kuuluvia profiileja ja sovitetaan uumasauvojen ja paarteen leveyksien suhteeksi noin 0,7-0,8. (8, s. 127 - 128; 7, s. 421.)

Ristikkoliitoksen mitoitusehto tarkastelu pitää tehdä joka sauvan osalta erikseen. Mitoitusehto voidaan esittää yleisessä muodossa seuraavasti (7, s. 159):

$$N_{i,Rd} \geq N_{i,Ed} \quad \text{KAAVA 3}$$

$N_{i,Rd}$ = uumasauvan i kestävyysmitoitussarvo

$N_{i,Ed}$ = uumasauvassa i vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

Eurokoodin mukaisessa liitosten mitoitus ehdossa voidaan yleensä pitää pelkkien uumasauvojen kestävyys tarkastelussa, sillä liitosten kestävyystaulukoissa myös paarteen kestävyys on ilmaistu uumasauvojen kestävyysnä. (7, s. 159.)

3 RAKENTEIDEN MITOITUS

3.1 Rajatilamitoituksen periaatteet

Rakenne tulee suunnitella ja toteuttaa siten, että se kestää kaikki kuormat ja niiden vaikutukset sekä pysyy vaadittuun käyttötarkoitukseensa käyttökelpoisena koko suunnitellun käyttöikänsä ajan. Rakenteelle asetettuja vaatimuksia ovat siis riittävä kestävyys, käyttökelpoisuus sekä säilyvyys. (6, s. 3.)

Rajatiloiksi kutsutaan tiloja, joiden ylittyessä rakenne ei enää täytä suunniteltuja toimivuusvaatimuksia. Rajatilat jaetaan murtorajatilaan ja käyttörajatilaan. Rakenteiden ja rakenneosien suunnittelussa tulee osoittaa, että mitään kyseeseen tulevaa rajatilaa ei ylitetä. (6, s. 3.)

3.1.1 Murtorajatila

Murtorajatila liittyy sortumiseen tai muuhun vastaavaan vaurioitumistapaan. Se vastaa tavallisesti rakenteen tai rakenneosan suurinta kestävyyttä. Teräsrakenteen murtorajatiloja voi olla esimerkiksi materiaalin murtuminen kestävyuden kannalta kriittisessä kohdassa, rakenteen stabiiliuden menetys tai rakenteen muuttuminen mekanismiksi. Eurokoodin EN 1990 mukaan pitää tarkastaa seuraavat murtorajatilat niiden tullessa kyseeseen (12, s. 76, 78):

- a) EQU [= equilibrium]: Jäykkänä kappaleena tarkasteltavan rakenteen tai sen minkä tahansa osan staattisen tasapainon menetys, kun
 - samasta syystä aiheutuvien pysyvien kuormien arvojen tai jakautumisalueen vähäiset vaihtelut aiheuttavat merkittävän vaikutuksen
 - rakennusmateriaalien tai maaperän lujuusarvot eivät yleensä ole määrääviä.
- a) STR [= strength]: Rakenteen tai rakenneosien sisäinen vaurioituminen tai liian suuri siirtymätila, kun rakenteen rakennusmateriaalien lujuus on määräävä; tarkasteltavia rakenneosia ovat myös anturat, paalut, kellarin seinät jne.

- b) GEO [= geotechnical]: Maan pettäminen tai liian suuri siirtymätila, kun maakerroksen tai kallion lujuus on merkittävä kestävyysnäkökulmasta.
- c) FAT [= fatigue]: Rakenteen tai rakenneosien väsymismurtuminen.

3.1.2 Käyttörajatila

Käyttörajan ylittyessä rakenne tai rakenneosa ei enää täytä sille asetettuja käyttökelpoisuusvaatimuksia. Käyttörajatiloja tarkasteltaessa käytetään kriteerejä, jotka liittyvät siirtymiin, värähtelyihin sekä vaurioihin. Näitä kriteerejä tarkastellaan muun muassa ulkonäön, käyttäjien mukavuuden ja säilyvyyden kannalta. Teräsrakenteiden käyttörajatiloina tulevat yleensä kysymykseen taipumien ja siirtymien rajatilat. Värähtelyrajatilat tulevat kysymykseen vain hoikissa rakenteissa tai erittäin kevyissä välipohjissa. (6, s. 3.)

3.2 Kuormitusten määrittäminen

3.2.1 Kuormitustyypit

Rakenteiden kuormat määritetään Eurokoodin EN 1991 mukaisesti. Standardi on jaettu useaan osaan. Tärkein osa talonrakennuksen teräsrakenteiden mitoituksessa on osa 1. Tässä opinnäytetyössä käytetään kuormien määrittämisessä seuraavia osia (liite 4):

- osa 1-1 (tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat)
- osa 1-3 (lumikuormat)
- osa 1-4 (tuulikuormat) (6, s. 4).

Kuormat luokitellaan niiden ajallisen vaihtelun mukaan

- pysyviin kuormiin (G), esim. rakenteiden omapaino
- muuttuviin kuormiin (Q), esim. hyötykuormat, tuulikuormat sekä lumikuormat
- onnettomuuskuormiin (A), räjähdykset ja ajoneuvojen törmäykset (10, s. 29).

Kuorman ominaisarvo F_k on sen edustava arvo. Pysyvän kuorman ominaisarvo G_k määritellään tilastollisesti. Jos pysyvän kuorman vaihteluväli on pieni, arvona voidaan käyttää keskiarvoa. Jos taas arvon vaihtelu ei ole pieni tai rakenne on hyvin herkkä pienillekin kuorman muutoksille, käytetään kahta arvoa, $G_{k,sup}$ ja $G_{k,inf}$. Muuttuvan kuorman ominaisarvo Q_k vastaa määritellyn ajanjakson yläraja-arvoa, jota ei todennäköisesti ylitetä, tai ala-arvoa, joka tietyllä todennäköisyydellä saavutetaan. Ellei edellä mainittuja muuttuvan kuorman tilastollisia arvoja voida määrittää, asetetaan muuttuvan kuorman arvoksi nimellisarvo. (10, s. 29.)

Muuttuvan kuorman edustavaa arvoa käytetään kuormitusten yhdistelyssä. Edustava arvo saadaan kertomalla muuttuvan kuorman arvo yhdistelykertoimella ψ . (10, s. 29 - 30.)

3.2.2 Omapaino

Rakenneseosan omapaino lasketaan sen nimellismittojen ja tilavuuspainojen perusteella. Omaan painoon lasketaan mukaan kantavat ja ei-kantavat rakenneseosat, kiinteät laitteet sekä maakerrosten paino. Eri materiaalien tilavuuspainoja esitetään Eurokoodissa EN 1991-1-1. (10, s. 63.)

3.2.3 Hyötykuorma

Hyötykuormat aiheutuvat tilojen käytöstä. Hyötykuormia ovat esimerkiksi henkilökuorma, kalusteet, ajoneuvot ja siirrettävät väliseinät. Hyötykuormien ominaisarvoja esitetään Eurokoodissa EN 1991-1-1 sekä sen kansallisessa liitteessä. (10, s. 63.)

Vesikatot määritellään hyötykuorman osalta katolle pääsyn mahdollisuuden perusteella kolmeen luokkaan (taulukko 1). (10, s. 42.)

TAULUKKO 1. Vesikaton kuormitusalueen luokat (10, s. 42)

Kuormitusalueen luokka	Käyttötarkoitus
H	Vesikatot, joille on pääsy vain normaalia kunnossapitoa ja korjaamista varten.
I	[AC] Vesikatot, joille on pääsy luokkien A...G mukaisesti. <AC]
K	Erityistoimintoja varten olevat vesikatot, kuten helikoptereiden laskeutumisalueet.

Suomen kansallinen liite antaa H-luokan katolle kuorman arvoksi $q_k = 0,40$ kN/m² ja $Q_k = 1$ kN. Kuorman arvo q_k lasketaan pinta-alalle, jonka suuruus on enintään 10 m². (11, s. 4.)

I-luokan katoille sovelletaan teollisuusrakennuksissa Eurokoodin EN1991-1-1 taulukon 6.3 kohtaa E2. Pistekuorman arvona käytetään arvoa $Q_k = 1$ kN, ja tasan jakaantuneen kuorman (q_k) arvo määräytyy hankekohtaisesti suunnittelijan arvioiman epäedullisimman tilanteen mukaan. (12, s. 34.)

Vesikatot tulee tarkastella erikseen pistekuormalle ja tasan jakaantuneelle kuormalle. Näiden kuormien ei oleteta vaikuttavan samanaikaisesti. Tavallisesti katon hyötykuorma ei tule kuitenkaan määrääväksi muuttuvaksi kuormaksi esimerkiksi kattokannattajia mitoitettaessa. Sitä ei myöskään tarvitse huomioida kuormituksia yhdisteltäessä, koska sen yhdistelykerroin on nolla. Mikäli vesikatolla on esimerkiksi IV-konehuone, täytyy sen hyötykuorman osuus ottaa huomioon. (10, s. 73; 13, s. 86.)

3.2.4 Lumikuorma

Lumikuorma luokitellaan muuttuvaksi staattiseksi kiinteäksi kuormaksi. Lumikuormaa ei käsitellä suomessa onnettomuuskuormana. (10, s. 90.)

Katon lumikuorma lasketaan kaavan 4 mukaisesti (10, s. 94):

$$s = \mu_i C_e C_t s_k$$

KAAVA 4

μ_i = lumikuorman muotokerroin

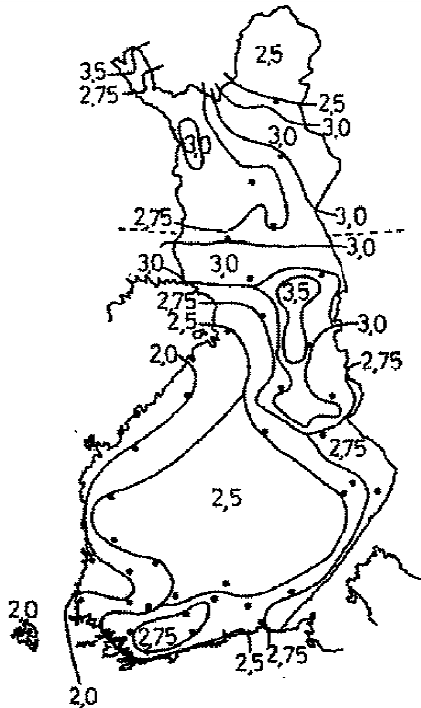
s_k = maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [kN/m²]

C_e = tuulensuojaisuuskerroin (1,0 tai 0,8)

C_t = lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti on 1,0

Lumikuorman muotokerroin määräytyy katon kaltevuuskulman mukaan. Yleisessä tapauksessa katon kaltevuuskulman ollessa 0° - 30° muotokerroin (μ_i) arvoksi tulee 0,8. Tuulen suojaisuus kertoimena voidaan käyttää arvoa 0,8, jos rakennus sijaitsee alueella, jossa maastotyyppi on tuulinen. Kuitenkin tavallisesti käytetään arvoa 1,0. Mikäli rakennuksen yläpohjan lämmöneristys on vähäi-

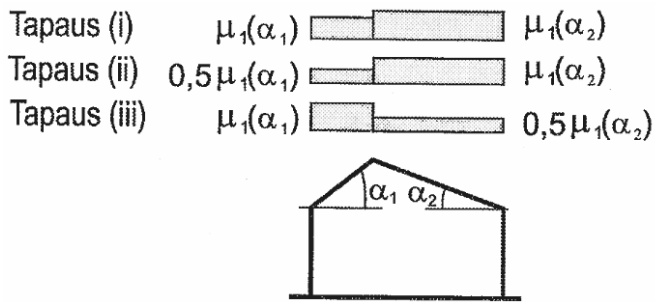
nen, voidaan C_t -kerrointa pienentää. Lumikuorman arvona tulee kuitenkin käyttää vähintään $0,5 \text{ kN/m}^2$. Suomessa lumikuorman ominaisarvo määritetään tilastoitujen tietojen perusteella (kuva 9). (10, s. 94 - 95.)



KUVA 9. Suomen ominaislumikuormat maassa alueittain (10, s. 92)

Katon lumikuorman perusarvon laskeminen ei aina riitä. Suunnittelussa täytyy huomioida myös, että lumi voi kinostua katolla erilaisiin muotoihin. Tämä huomioidaan tekemällä sekä kinostuneen että kinostumattoman lumen aiheuttamat kuormakaaviot. (10, s. 94.)

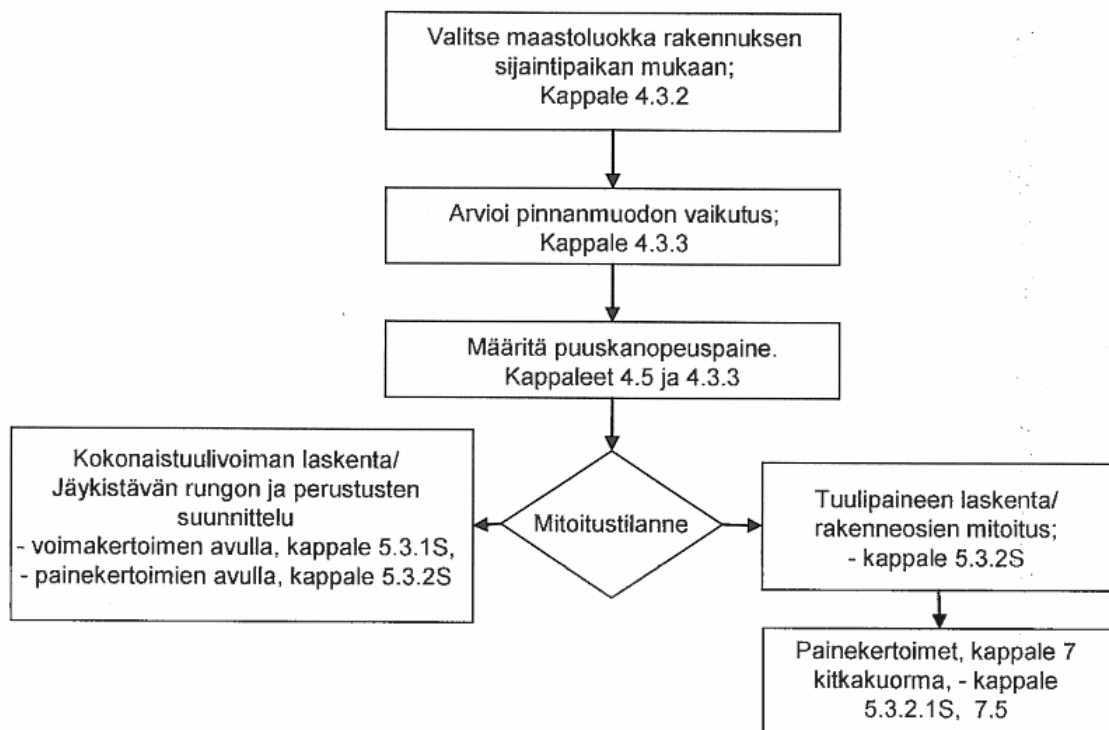
Tämän opinnäytetyön puitteissa käsitellään vain harjakaton lumikuorman kinostumista (kuva 10). Vapaasti tuetun symmetrisen ristikon mitoituksessa on tarpeen tutkia vähintään kaksi kuormitustapausta. Ensimmäisessä kuormitustapauksessa kummallakin kattolappeella on täysi lumikuorma. Toisessa tapauksessa toisella lappeella on täysi lumikuorma ja toisella on puolet täydestä lumikuormasta. (2, s. 66.)



KUVA 10. Harjakaton lumikuorman kuormituskaaviot (10, s. 96)

3.2.5 Tuulikuorma

Tuulikuormat määritellään muuttuviksi kiinteiksi kuormiksi. Ne vaihtelevat ajan mukana ja aiheuttavat painetta umpinaisten seinien ulko- ja sisäpintoihin. Painet vaikuttavat pinnan alueisiin aiheuttaen rakenteeseen pääsääntöisesti pintaa vastaan kohtisuoria voimia. Tuulikuorma esitetään yksinkertaistuksen vuoksi paineiden tai voimien joukkona, joiden vaikutukset on määritetty käyttäen tuulenpuuskien suurimpia vaikutuksia. Tuulikuormat voidaan määrittellä seuraamalla kuvan 11 mukaista kaaviota. (10, s. 125.)



KUVA 11. Tuulikuorman mitoituksessa käytettävä mitoituskaavio (10, s. 124)

Tuulikuorman määrittäminen alkaa rakennuksen sijaintipaikan mukaan määräytyvällä maastoluokan valinnalla. Tuulen voimakkuus vaihtelee rakennuspaikkaa ympäröivän maaston rosoisuuden mukaan. Eurokoodi luokittelee maastolosuhteet viiteen eri luokkaan (0 - IV). Suurimman tuulikuorman antavan maastoluokka 0 määritelmän mukainen ympäristöolosuhde on avoimen meren äärellä oleva rannikkoalue. Pienimmän tuulikuorman antava maastoluokka on tiheästi rakennettu korkeiden rakennusten alue. Eurokoodi antaa mahdollisuuden tarkentaa maastoluokkien määrittystä kansallisessa liitteessä. (10, s. 126 - 128.)

Seuraavassa vaiheessa arvioidaan maaston pinnan vaikutus nopeuspaineeseen. Yksittäinen mäki tai harjanne voi aiheuttaa tuulen nopeuspaineeseen lisäyksen, jota maastoluokka ei huomioi. Lisäys otetaan huomioon korotuskerrotoimella. Korotuskerrointa tarvitaan, mikäli maaston kaltevuus ylittää arvon 0,05 (1:20). Eurokoodi antaa ohjeen myös viereisten huomattavan korkeiden rakennusten sekä lähemmäs sijaitsevien rakennusten ja esteiden vaikutusten huomiointiin. (10, s. 129 - 131.)

Tämän jälkeen määritetään tuulen nopeuspaineen ominaisarvo eli puuskanopeuspaine. Tuulen puuskanopeuspaine määritetään rakennuksen korkeuden ja maastoluokan perusteella. Puuskanopeuspaineen määrittäminen voidaan tehdä joko käyrästä tai taulukon avulla. (10, s. 132 - 133.)

Viimeiseksi suoritetaan varsinainen mitoitus. Tässä opinnäytetyössä lasketaan vain katolle kohdistuva tuulenpaine, joka otetaan huomioon kattokannattajien mitoituksessa. Rakenteen ulkopintoihin vaikuttava paine saadaan kaavasta 5. (10, s. 134.)

$$W_e = q_p(z_e) * c_{pe}$$

KAAVA 5

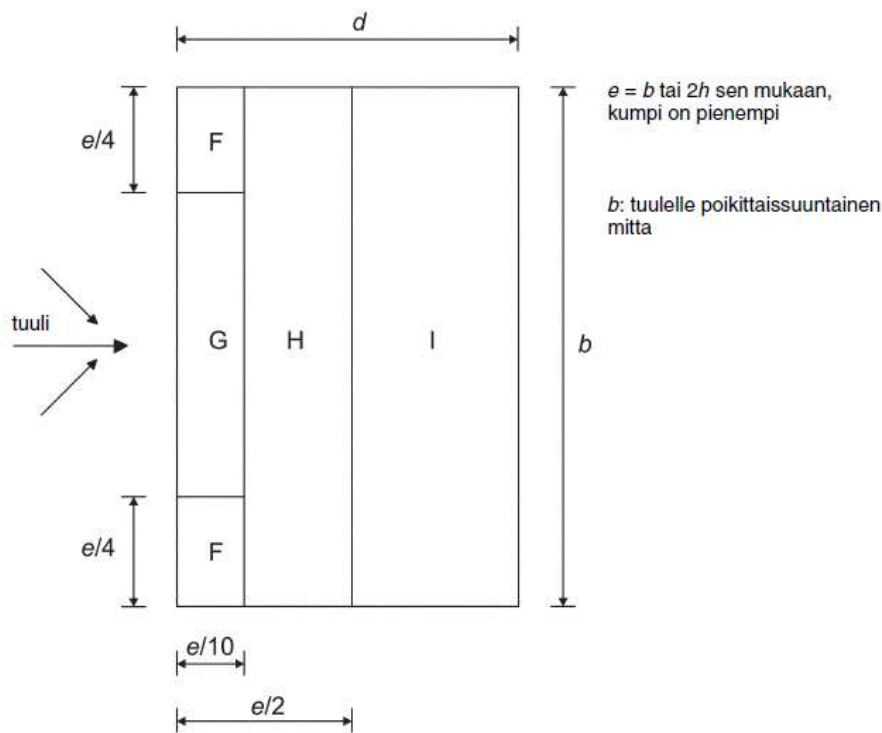
W_e = yksittäiseen pintaan korkeudella z_e vaikuttava ulkopuolinen paine

$q_p(z_e)$ = puuskanopeuspaine

c_{pe} = ulkoisen paineen painekerroin

z_e = ulkoisen paineen nopeuspaine korkeus

Katon ulkopuoliset paineet on jaettu Eurokoodissa vyöhykkeisiin (kuva 12). Ulkopuolisen paineen kertoimet (kattorakenteilla F - I) saadaan Eurokoodin määrittelemien taulukkoarvojen perusteella. Loivat katot, joiden kaltevuus on välillä $\pm 5^\circ$, luokitellaan tuulikuormia määrittäessä tasakatoiksi. Tuolloin käytetään tasakaton vyöhykekaaviota. (10, s. 147.)



KUVA 12. Tasakaton vyöhykekaavio (14, s. 66)

Sisäpuoliset paineen kertoimet määräytyvät rakennuksen vaipassa olevien aukkojen koon ja jakauman mukaan. Mikäli rakennuksen aukkosuhdetta ei voida määrittää kuten tämän opinnäytetyön tapauksessa, käytetään Eurokoodin EN-1991-1-4 varmallalla puolella olevia arvoja 0,2 ja -0,3. (10, s. 159.)

3.3 Kuormien yhdistely

3.3.1 Murtorajatila

Murtorajatilan kuormien mitoitusarvot saadaan kaavoista 6 ja 7. Kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisemmän tuloksen antavaa kaavaa. Kaava 6 sisältää vain pysyvien kuormien osuuden, kun taas kaava 7 sisältää pysyvien

kuormien lisäksi myös muuttuvan kuorman osuuden. Kaavat ovat Suomen kansallisen liitteen mukaisia. (6, s. 35.)

$$1,35K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} \quad \text{KAAVA 6}$$

$$1,15K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,j}Q_{k,j} \quad \text{KAAVA 7}$$

$G_{k,j}$ = pysyvän kuorman j ominaisarvo

$Q_{k,1}$ = määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ = muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo

K_{FI} = seuraamusluokan mukaan tuleva kerroin

ψ = kuorman yhdistelykerroin

3.3.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmiä on kolme (kaavat 8 – 10). Tavallinen yhdistelmä on yleisin kuormitusyhdistelmä teräsrakenteiden mitoituksessa. Ominaisyhdistelmää käytetään ainoastaan palautumattomille rajatiloille, joten sen käyttö teräsrakenteissa on harvinaista. Pitkäaikaista yhdistelmää käytetään pitkäaikaisvaikutuksien arviointiin sekä tutkittaessa rakennetta sen ulkonäön kannalta. (6, s. 36.)

Ominaisyhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{j>1} \psi_{0,i}Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 8}$$

Tavallinen yhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1}Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} + Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 9}$$

Pitkäaikainen yhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i}Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 10}$$

$G_{k,j}$ = pysyvän kuorman j ominaisarvo

$Q_{k,1}$ = määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ = muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo

ψ = kuorman yhdistelykerroin

3.4 HI-harjapalkin mitoituksen kulku

Seuraavassa esitetään tässä opinnäytetyössä mitoitettavien HI-harjapalkkien mitoituksen kulku, kun käytetään laskentapohjaa. Tässä työssä varsinainen mitoitus suoritettiin Mathcad-laskentapohjalla ja vertailulaskelmat tehtiin Robot Structural Analysis Professional -ohjelmistolla. Vertailulaskelmat perustuivat jännitystarkasteluun.

HI-harjapalkin suunnittelu alkaa kuormitusten selvittämällä ja niiden suuruuksien määrittämällä. Kattokannattajia suunniteltaessa tärkeimmät kuormitukset ovat lumikuorma, kattorakenteen omapaino ja tuulikuorma. Kuormitusten määrittämisen jälkeen etsitään rakenteen kestävyuden kannalta vaarallisimmat kuormitusyhdistelmät.

Kuormitusten laskemisen ja valitsemisen jälkeen syötetään laskentapohjaan palkille poikkileikkausmitat. Alustavan profiilin valinnassa voi käyttää apuna tuotevalmistajien käyrästöjä. Poikkileikkauksen mitat valitaan siten, että uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 4 ja laipat kuuluvat vähintään poikkileikkausluokkaan 3.

Alkutoimien jälkeen alkaa varsinainen laskenta. Ohutuumaisen harjapalkin mitoituksessa lasketaan seuraavien rasitusuureiden mukaiset kestävyudet: taivutus-, leikkaus-, yhteisvaikutus-, kiepahdus- ja pistekuormakestävyys. Laskentapohja suorittaa kestävyystarkastelut ennalta syötettyjen kaavojen perusteella. Laskennan päätyttyä arvioidaan käyttöasteiden perusteella tarvetta muuttaa poikkileikkausmittoja.

Palkin taipumaa voidaan kompensoida esikorotuksella. Esikorotuksen enimmäisarvona käytetään taipuman arvoa, joka aiheutuu pysyvästä kuormasta. Taipuman arvoa voidaan pienentää tehokkaimmin kasvattamalla palkin uuman korkeutta.

Tässä työssä mitoitettujen palkkien uumassa on neljä noin 350 mm:n - 400 mm:n suuruista reikää läpivienneille. Reikien vaikutusta ei oteta huomioon varsinaisessa palkin mitoituksessa, vaan niiden vaikutus kestävyteen tarkastellaan erikseen detaljimitoituksena Eurokoodin esistandardin laskentakaavoilla.

Reikien sijoituksella on suuri merkitys kestävyys. Optimaalinen paikka rei'ille palkin poikkileikkauksessa on uuman keskiosa ja pituusleikkauksessa uuman keskialue, jossa leikkausrasitus on pieni. Mikäli palkin käyttöaste ylittää reikien vaikutusta laskettaessa sallitun arvon, voidaan kestävyttä lisätä esimerkiksi lisäämällä aukkojen reunoille jäykistelevyt.

Seuraavaksi tarkistetaan palkin asennusaikainen stabiliteetti kiepahduksen suhteen. Asennusaikaiselle kiepahdukselle käytetään kuormana palkin omaa painoa ja kiepahdustuennan välinä palkin tukematonta pituutta. Asennusaikainen kiepahdus tulee kyseeseen asennusvaiheessa, ennen kuin sekundäärikanattajia on asennettu. Mikäli palkki ei läpäise kiepahdustarkastelua voidaan kasvattaa profiilin mittoja siten, että palkki ei pääse kiepahtamaan asennuksen aikana. Vaihtoehtoisesti suunnitelmissa voidaan määrittää vaadittava palkin asennusaikainen tuenta ennen asennuksessa käytettävän nosturin koukun irrottamista. Asennusaikaiseksi tuennaksi voidaan määrittellä esimerkiksi palkin tuenta kolmasosapisteistä kattositeillä.

Lopuksi suunnitellaan tarvittavat asennusliitokset. Pitkien jännevälien palkit voidaan jakaa kuljetusteknisistä syistä osiin. Harjapalkeissa kuljetuksen kannalta määräävin tekijä on yleensä palkin pituus. Tässä työssä 40 m:n jänneväleillä olevat palkit ja ristikot on jaettu harjalle tehtävän asennusliitoksen avulla kahden osaan.

HI-harjapalkin optimointi

Rakennetta optimoitaessa pyritään saamaan käyttöasteet mahdollisimman suuriksi Eurokoodin sallimissa rajoissa. Tuolloin käytettävää materiaalia menee mahdollisimman vähän. Suunnittelijan on tunnettava mitoitusperusteet hyvin, jotta päästään kustannustehokkaaseen ratkaisuun. Mitoitettaessa hoikkia palkkeja pitkille jänneväleille tulee määräävimäksi rasitussuureksi usein kiepahdus. Kiepahduskestävyyden kannalta palkin rakenne on optimaalinen, kun taivutusvastus on mahdollisimman suuri heikommissa suunnassa. Taivutuskestävyyden kannalta vastaavasti optimitilanteessa taivutusvastus on mahdollisimman suuri sen vahvemmassa suunnassa. Leikkauskestävyyttä voidaan lisätä

helpoiten kasvattamalla palkin uuman pinta-alaa eli palkin korkeutta. Edellisten lisäksi on myös huomioitava, että palkin taipuma pysyy sallituissa rajoissa.

3.5 Ristikön mitoituksen kulku

Seuraavassa esitetään tässä opinnäytetyössä mitoitettavien kattoristikoiden mitoituksen kulku. Mitoitus suoritettiin sekä Robot Structural Analysis Professional että Winrami-laskentaohjelmilla.

Ristikön suunnittelu alkaa, kuten HI-harjapalkin suunnittelukin, kuormitusten selvittämisellä ja laskemisella. Kuormitusten selvittämisen jälkeen etsitään rakenteen kestävyuden kannalta vaarallisimmat kuormitusyhdistelmät. Ristikön tapauksessa huomioidaan lumen epäsymmetriset kuormitustapaukset. Epäsymmetrinen kuormitus täytyy huomioida, koska osa ristikön sauvoista saattaa muuttua vedetystä puristetuksi, jolloin täytyy huomioida myös nurjahduksen vaikutus kestävyYTEEN.

Kuormitusten selvittämisen jälkeen suunnitellaan ristikolle alustava geometria. Mikäli ristikön korkeudelle ei aseteta vaatimuksia, voidaan valita harjakorkeus lujusopillisen optimikorkeuden $L/9 - L/12$ mukaan. Ristikön tukikorkeus määrätty valitun kattokaltevuuden mukaan. Seuraavaksi valitaan ristikoiden uumasauvojen sijoittelutapa sekä sijainti. Näiden tietojen pohjalta muodostetaan ristikön staattinen rakennemalli. Ristikön uumasauvojen sijoittelua ohjaa useimmiten katon sekundaarikannattajajako.

Geometrian suunnittelun jälkeen alkaa ristikön sauvojen alustava mitoitus. Parresauvoille tulevat voimat arvioidaan olettamalla ristikko palkiksi ja laske-
malla momentti symmetrisen harjaristikön tapauksessa jänteen keskelle. Momentin maksimiarvo jaetaan ristikön korkeudella, jolloin saadaan alkuarvo parrevoimille. Uumasauvojen kuorman alkuarvo saadaan vastaavan palkin leikkausvoiman avulla. Yläpaarten alustava profiili valitaan tarvittavan nurjahduskestävyyden mukaan ja alaparre vetävän normaalivoiman mukaan. Uumasauvojen alustava profiilikoko lasketaan nurjahduskestävyyden mukaan ristikön reunimmaiselle diagonaalille, vaikkakin se on yleensä vetorasitettu. Uumasauvojen valinnassa on syytä muistaa, että valitaan paarteeseen nähden riittävän leveä

sauva, jotta liitosten mitoituksen pätevyysrajat täyttyvät. Tässä työssä käytettiin Ruukin suositussarjojen mukaisia CFRHS-putkiprofiileja.

Kun kuormitukset, geometria ja sauvojen alustava mitoitus on suoritettu, voidaan ristikosta muodostaa laskentamalli suunnitteluohjelmalla. Laskentamallin luonti alkaa alkutietojen määrittelyllä, joka sisältää muun muassa mitoituksessa käytettävien normien valinnan sekä materiaalien perustiedot. Suunnitteluohjelmissa on yleensä mahdollista valita Eurokoodien mukainen, kansallisen liitteen huomioiva mitoitus. Seuraavaksi muodostetaan ristikon geometria laskentamalliin. Kun geometria on luotu, asetetaan sauvoille nurjahduspituudet, sauvojen päiden vapausasteet ja alustavat profiilit. Sen jälkeen asetetaan aiemmin määritetyt kuormitukset malliin ja luodaan tarvittavat kuormitustapaukset.

Laskentamallin luonnin jälkeen alkaa varsinainen mitoitus laskentaohjelmalla. Laskentaohjelma laskee sauvoille tulevat rasitukset ja tarkastaa määriteltujen sauvojen kestävyudet valitun normin mukaan. Ristikon sauvojen optimointi on laskentaohjelmalla nopeaa, koska mallin laskemiseen ei kulu juurikaan aikaa ja profiilikoon muuttaminen laskentamalliin on yksinkertaista.

Sauvojen optimoinnin jälkeen tarkastetaan sauvojen liitosten pätevyysrajat ja kestävyudet. Laskentaohjelmat tunnistavat automaattisesti kyseessä olevat liittostyyppit. Liitosparametrien määrittelysten jälkeen ohjelma laskee valitun normin mukaisesti kyseessä olevan liitoksen pätevyysrajat ja kestävyuden. Jos liitos ei läpäise tarkastusta, voidaan ohjelmasta lukea, mistä syystä normin ehdot eivät täyty. Tuloksen perusteella voidaan esimerkiksi lisätä liitokseen vahvistelevy tai kasvattaa vapaavälin suuruutta. Tämän jälkeen tarkastetaan ristikon taipuma ja verrataan sitä sallittuun arvoon.

Lopuksi suunnitellaan ristikon asennusliitokset. Pitkien jännevälien ristikot jaetaan yleensä kahteen osaan harjan kohdalta. Ristikon kuljetusta suunniteltaessa tulee huomioida ristikon pituuden lisäksi ristikon korkeus.

3.6 Käytetyt ohjelmat

3.6.1 Poimu

Ruukin Poimu -ohjelma on kantavien profiililevyjen mitoitusohjelma. Ohjelman avulla voidaan tarkastella Ruukin profiililevyjen Eurokoodin mukaiset murto- ja käyttörajatilatarkastelut sekä kiinnikkeiden mitoitus.

Ohjelmassa määritellään ensin käytettävä standardi sekä rakenteen perustiedot ja jännevälit. Sen jälkeen syötetään rakenteelle tulevat kuormitukset. Kuormitustietojen jälkeen ohjelma ilmoittaa syötettyjen tietojen mukaiset käyttöasteet valitulle profiililevyille.

Poimu-ohjelmaa käytettiin opinnäytetyössä kattorakenteen kantavan profiililevyn mitoitukseen. Käytännössä ohjelman avulla selvitettiin valitun profiililevyn suurin sallittu jänneväli mitoituksen mukaisille kuormille. Hallien kattorakenteen sekundaarikannattajako valittiin tämän mukaisesti.

3.6.2 Mathcad

Mathcad on sovellus tietokoneella tehtävään laskentaan. Se on yleinen rakennesuunnittelussa käytettävä ohjelmisto. Mathcad-ohjelmalla voidaan helpottaa suunnittelua käyttämällä etukäteen luotuja laskentapohjia. Laskentapohjaan voidaan esisyöttää esimerkiksi tietyn rakenneosan mitoitukseen käytettävät kaavat.

Käytin työssä Sami Jokitalon Pöyry Finland Oy:lle vuonna 2012 opinnäytetyönä tekemää laskentapohjaa HI-harjapalkkien mitoitukseen.

3.6.3 WinRami ja Section

Ruukin WinRami ja Section-ohjelmilla voidaan suorittaa ristikko- ja kehärakenteiden rakennetekninen analysointi sekä rakenteiden mitoitus Eurokoodin mukaisesti. Mitoitus voidaan suorittaa kylmämuovatuille rakenneputkille sekä hitsatuille että kuumavalssatuille I-profiileille. Ohjelmia käytetään rinnakkain. Voimasuureet ja kestävyudet ratkaistaan WinRamilla, ja sauvojen profiilien perustiedot linkitetään WinRamiin siihen kytketyllä Sectionilla. Section sisältää taulu-

koituna Ruukin valmistamien profiilien tiedot. Winrami sisältää myös erillisen ohjelmakomponentin liitosten mitoitukseen. Winrami- ja Section-ohjelmia käytettiin tässä opinnäytetyössä putkiristikoiden mitoitukseen.

3.6.4 Robot Structural Analysis Professional

Robot structural analysis Professional (RSAP) on elementtimenetelmään perustuva suunnitteluohjelmisto, jota käytetään rakenteiden lujuusanalyysiin ja mitoitukseen. Peruseriaatteeltaan RSAP:n toiminta on samanlainen kuin muissakin rakennesuunnitteluohjelmissa. Ensin luodaan rakennemalli, asetetaan kuormat, määritellään muun muassa käytettävät standardit ja suoritetaan varsinainen laskenta. Verrattuna ristikoiden mitoituksessa käytettyyn WinRami- ja Section-ohjelmiin on RSAP paljon monipuolisempi suunnitteluohjelmisto. RSAP:ta käytettiin tässä työssä putkiristikoiden mitoitukseen sekä HI-harjapalkkien vertailulaskelmien tekemiseen.

4 KUSTANNUKSET

4.1 Kustannusten muodostuminen

Teräsrakenteissa kustannukset muodostuvat muun muassa suunnittelusta, käytetyn materiaalin määrästä, konepajavalmistuksesta sekä pintakäsittely- ja asennuskustannuksista. Rakenteiden suunnittelun perustana on, että rakenne kestää koko suunnitellun elinkaaren stabiiliteettia menettämättä. Usein lähtökohdina on myös se, että rakenteet ovat mahdollisimman edullisia. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että suunnittelija pyrkii käyttämään mahdollisimman vähän valittua materiaalia ja että rakenne on edullinen valmistaa. Tässä työssä tarkasteltavien kannattajien mitoituksessa pyritään mahdollisimman edulliseen lopputulokseen Eurokoodien mukaisten kestävyyksien rajoissa.

Teräsrakenteen kustannukset jakaantuvat likimääräisesti seuraavasti:

- materiaalit 38 %
- konepajavalmistus 27 %
- suunnittelu 13 %
- asennus 12 %
- pintakäsittelyt 10 % (1, s. 32).

Kannattimen optimaalinen koko määräytyy materiaalin hankintakustannuksista ja konepajavalmistuksen kustannuksista, joiden yhteenlaskettu osuus on noin 65 prosenttia koko rakenteen kustannuksista. Tässä työssä käsiteltävien katto-kannattajien välisiä kustannuksia vertaillaan materiaali-, valmistus- ja asennuskustannusten sekä välillisesti aiheutuvien kustannusten perusteella. (1, s. 32.)

Välillisesti aiheutuvat kustannukset aiheutuvat lähinnä ristikkorakenteiden suu-remmasta rakennekorkeudesta harjapalkkiin verrattuna. Koska yksi rakennuksen suunnittelun lähtökohdista on sisätilan vapaa käyttökorkeus, johtaa katto-kannattajien välinen korkeusero rakennuksen kokonaiskorkeuden muuttumiseen. Ristikkorakenteisesta rakennuksesta tulee täten korkeampi. Rakennuksen kokonaiskorkeuden kasvu tarkoittaa käytännössä sitä, että korkeammassa rakennuksessa joudutaan käyttämään pidempiä pilareita, jolloin seinärakentei-

den menekki ja rakennuksen sisätilavuus kasvavat. Nämä seikat lisäävät rakentamiskustannuksia sekä mahdollisesti rakennuksen käyttökustannuksia. Suuremmat käyttökustannukset aiheutuvat lämmitettävistä lisäkuutioista (2, s. 64).

HI-harjapalkin työkustannukset ovat vastaavaan ristikkokannattajaan verrattuna pienemmät, mutta materiaalikustannukset ovat sen sijaan suuremmat. HI-palkin poikkileikkauksen suunnittelussa kannattaa huomioida valmistustekniset seikat, kuten uuman paksuuden ja korkeuden suhde, jotka vaikuttavat suoraan kustannuksiin. Kaikkia profiileja ei välttämättä kannata optimoida kyseessä olevaan tilanteeseen, koska konepajavalmistus on nopeampaa ja taloudellisempaan, kun valmistuksessa päästään pidempiin valmistussarjoihin. Tämä pätee myös ristikkokannattajien valmistuksessa. Pidempien valmistussarjojen etuja ovat muun muassa:

- voidaan tilata isoja määriä samankokoisia levyjä tai valmiita rainoja
- rainojen leikkaus on nopeampaa
- yhdestä pitkästä profiiliihiosta voidaan valmistaa useampi profiili
- profiiliihioiden hitsaus on nopeampaa
- ei tarvitse siirtää monia aihioita
- vähemmän laitteiden asetusten muuttamista (pienemmät asetusajat). (1, s. 31; 3. s. 84.)

4.2 Kannattajien kustannukset

Kustannukset määritettiin kolmen toteutuneen teollisuusprojektin kustannusten perusteella. Projektit olivat vuosilta 2007- 2013. Kyseisten projektien hintatiedot oli ilmoitettu kilohintoina rakennusosakohtaisesti. Hintatiedoissa oli eriteltyinä kustannukset profiileille, varusteluosille sekä asennukselle. Hinnat sisälsivät kuljetuksen rakennuspaikalle.

Ristikolle tulevissa lisäkustannuksissa huomioitiin pilareiden ja rungon jäykisteiden korkeuden muutos sekä ulkoseinäpaneelin lisäneliöt. Lisäkustannuksissa ei huomioitu mahdollista lämmityksestä aiheutuvaa kustannusta, vaan se on eritelty tuloksissa erilleen.

Hintatiedot muokattiin vastaamaan tämän hetkisiä hintoja käyttämällä rakennuskustannusindeksin mukaista hinnan nousua. Hintojen korjausten jälkeen projektien välisistä hinnoista otettiin keskiarvo, jota käytettiin lopullisten kustannusten määrittämisessä.

Kustannusten määrittämisessä käytetyt toteutuneiden projektien rakenteet vastasivat hyvin tässä työssä mitoitettuja kannattajia. HI-harjapalkkien jännevälit olivat välillä 23 m - 29 m, ja palkkien varustelutaso oli samaa luokkaa kuin tässä työssä. Ristikkokannattajien tyyppinä oli K-ristikoita sekä KT-ristikoita, joiden jänneväli alue oli välillä 15 m - 42 m.

4.3 Lämmitystilavuuden tuomat lisäkustannukset

Lämmitystilavuuden lisäkustannukset määritettiin olettaen, että rakennusta pidetään lämpimänä ympäri vuoden ulkopuolisella lämmityksellä. Tulokset antavat vain viitteellisen kuvan lisääntyvistä lämmityskuluista, koska puolilämpimiksi suunnitelluissa teollisuusrakennuksissa teollisuusprosesseista voi vapautua niin paljon lämpöä, ettei erillistä lämmitystä tarvita.

Lämmitystilavuuden tuomat lisäkustannukset laskettiin vertailemalla eri kannattintyyppien vaikutusta rakennuksen tilavuuteen. Tilavuuksien erotus kerrottiin energian hinnalla ja arvioidulla energian kulutuksella. Energian hintana käytettiin Raahen energian kotisivuilta 21.3.2014 haettua hintaa (45,37 €/MWh). Lämmitykseen menevän energian kulutuksen arvona käytettiin Motivan tekemään tutkimukseen perustuvaa arvoa (24 kWh/m³), joka vastaa tutkimuksessa olleiden varistorakennusten mediaani energiankulutusta. Rakennusten lämmitysmuotona käytettiin laskelmissa kaukolämpöä.

5 TULOKSET

5.1 Kannattajien kustannukset

Pöyryn hintatiedoilla määritellyt kustannukset on esitetty liitteessä 5. Tuloksissa on eriteltynä HI-harjapalkkien ja putkiristikoiden kustannukset ilman lisäkustannuksia sekä ne huomioon ottaen. Euromääräinen ero on ilmoitettu siten, että kalliimman kannattajan kustannuksista on vähennetty halvemman kannattajan kustannukset. Prosentuaalinen ero ilmoittaa, kuinka paljon pienempi edullisemmän kannattajan kustannukset ovat kalliimpaan verrattuna.

Kehäjaon ollessa 6 metriä ristikoilla toteutetut hallit ovat kaikilla tarkastelluilla jänneväleillä edullisempia toteuttaa, vaikka hinnoissa huomioidaan lisäkustannukset. 20 metrin jännevälillä kustannukset ovat lähellä toisiaan. Tällöin ristikolla toteutettu halli on 8 prosenttia edullisempi toteuttaa. 30 metrin jännevälillä etu on putkiristikon hyväksi 17 prosenttia ja 40 metrin jännevälillä 32 prosenttia.

Kehäjaon ollessa 12 metriä erot ovat selkeästi pienemmät. 20 metrin jännevälillä HI-harjapalkki on 11 prosenttia edullisempi vaihtoehto. 30 metrin jännevälillä kustannukset ovat likimain samat. 40 metrin jännevälillä ristikkokannattaja on 7 prosenttia edullisempi toteuttaa.

5.2 Lämmitystilavuuden tuomat lisäkustannukset

Lämmitystilavuuden tuomat lisäkustannukset on esitetty liitteestä 6. Tuloksissa on eriteltynä euromääräinen sekä prosentuaalinen lisäkustannus vuotta kohden, kun käytetään ristikkokannattajaa. Esimerkiksi kehäjaon ollessa kuusi metriä ja jännevälin ollessa 20 metriä on ristikkokannattajaa käytettäessä vuotuinen lämmityksestä aiheutuva lisäkustannus 873 euroa. Tämä on prosentuaalisesti ilmaistuna 5 prosenttia enemmän harjapalkkiin verrattuna. Prosentuaalinen osuus ilmaisee, kuinka paljon pienempi lämmityskustannus HI-palkkihallissa on ristikkohalliin verrattuna.

Vuotuiset kokonaislämmityskustannukset ovat kannatintyyppistä ja jännevälistä riippuen 16500 - 35200 euroa. Vuotuinen lämmityskustannussäästö HI-

harjapalkeilla toteutetussa hallissa ristikkokannattajilla toteutettuun halliin verrattuna on 5 - 9 prosenttia (737 €/a - 3753 €/a).

6 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli vertailla HI-harjapalkin ja putkiristikon kustannustehokkuutta eri jänneväleillä. Työssä mitoitettiin HI-harjapalkki- ja ristikkokatto-kannattajat 20 m:n, 30 m:n ja 40 m:n jänneväleille sekä 6 m:n ja 12 m:n kehäja-oilla. Mitoitetuille kannattajille laskettiin kustannukset, ja sen perusteella päätel-tiin kunkin kannattajatyypin taloudellinen käyttöalue.

Tulokseksi saatiin, että putkiristikko on taloudellisempi vaihtoehto kuuden metrin kehäjaolla kaikilla tarkasteluväleillä. Jos käytetään 12 metrin kehäjakoja, HI-harjapalkki on taloudellisempi vaihtoehto 20 metrin jännevälillä, 30 metrin jän-nevälillä kustannukset ovat likimain samat ja 40 metrin jännevälillä putkiristikko on edullisempi.

Työn tulokset ovat johdonmukaisia, ja ne antavat suuntaa kannattajatyypin va-litsemiseksi. Tulosten luotettavuutta lisää se, että työssä mitoitetuille kannattajil-le tehtiin myös vertailulaskelmat. Vertailulaskelmien tulokset olivat varsinaisten laskelmien kanssa yhdenmukaisia.

Tulosten epätarkkuutta aiheuttaa se, että nurkka- ja kehäpilareita eikä rungon jäykisteitä mitoitettu esimerkkikohteeseen. Nurkka- ja kehäpilarien painoa tarvit-tiin ristikolle tulevien lisäkustannusten määrittämiseen. Käytettyjen profiilien poikkileikkausmitat perustuivat arvioon. Työssä saatuja tuloksia ei voida verrata kehäjakojen puolesta keskenään, koska ne eivät sisällä katon sekundäärikan-nattajien osuutta kattorakenteen hinnassa. Myöskään kehäjaon vaikutusta pila-riprofiileiden kokoon ei ole tarkasteltu.

Työntulokset antavat suuntaa kannatintyyppin valitsemiseksi. On kuitenkin muis-tettava, että tuloksia ei voida soveltaa suoraan toisiin kohteisiin rakennusten yksilöllisyyden vuoksi.

LÄHTEET

1. HITSATUT PROFIIILIT EN 1993 –käsikirja. 2010. Ruukki. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.
2. RIL 167-2 Teräsrakenteet II. 1992. Helsinki: Suomen rakennusinsinööri- en liitto RIL ry.
3. Teräsrakenteiden suunnittelu. 2001. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
4. Hitsatut palkit -tuotekansio. 1984. Ylivieska: Rautaruukki Oyj.
5. SFS-ENV 1993-1-1. 1999. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Ylei- set säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Liite N: Uumissa olevat aukot. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
6. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. 2010. Eurocode 3-oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
7. RAKENNEPUTKET EN 1993 –käsikirja. 2012. Ruukki. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.
8. RIL K54-1985. Teräsrakenteiden suunnittelu. 1985. Helsinki: Suomen ra- kennusinsinöörien liitto RIL ry.
9. SFS-EN 1993-1-8. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitos- ten mitoitus. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
10. RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL Oy.
11. SFS-EN 1991-1-1. 2010. Rakenteiden kuormat. Osa 1-1. Kansallinenliite. Suomi: Ympäristöministeriö. Saatavana: <http://www.eurocodes.fi/1990/1990/NA%20SFS-EN1990-YM.pdf>. Haku- päivä 7.1.2014.

12. SFS-EN 1991-1-1. 2002. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-1: Tilavuuspainot, omapaino ja rakennusten hyötykuormat. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
13. SFS-EN 1990. 2006. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
14. SFS-EN1991-1-4. 2011. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: Tuulikuormat. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

LIITTEET

Liite 1 Lähtötietomuistio

Liite 2 Kannattajien suunnittelussa käytetyt lähtötiedot

Liite 3 Periaatteellinen leikkaus hallista



Liite 4 Kuormitusten määrittäminen

Liite 5 Kustannukset Pöyryn hintatiedoilla

Liite 6 Lämmityskustannukset



LÄHTÖTIETOMUISTIO

Työn tiedot	Tekijä ¹ Jarkko Pietiläinen 050-3005650 t0pija00@students.oamk.fi	Tilaja ² Pöyry Finland Oy
Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot ³ Juha Vehkamäki Pöyry Finland Oy Tutkijantie 2D 90590 Oulu juha.vehkamaki@poyry.com		
Työn nimi ⁴ Teräksisen HI-harjapalkin ja putkiristikon kustannusvertailu		
Työn kuvaus ⁵ Teräsrakenteisissa teollisuushalleissa pitkällä jänneväleille kattokannattajina toimii usein joko HI-palkit tai putkiristikot. Kumpaakin kattokannattajatyyppeä voidaan käyttää 20 m - 40 m jännevälialueella. Eri jänneväleillä joudutaan tutkimaan kumpi vaihtoehdoista on kustannustehokkaampi ratkaisu. Työssä mitoitetaan HI-harjapalkki ja putkiristikko kattokannattajat kolmella jännevälillä (20 m, 30 m ja 40 m) sekä kahdella kehäjaolla (6 m ja 12 m). Mitoitettujen kattokannattajien perusteella lasketaan materiaali- ja valmistuskustannukset kullekin kannattajalle ja kannattajien kokonaiskustannuksia vertaillaan keskenään. Harjapalkit mitoitetaan Pöyry Finland Oy:n laskentapohjalla ja putkiristikot Autodesk Robot Structural Analysis Professional -suunnitteluohjelmalla. Vertailulaskelmat tehdään HI-palkeille Autodesk Robot Structural Analysis Professional -suunnitteluohjelmalla ja putkiristikoiden Ruukin Winrami mitoitushjelmalla.		
Työn tavoitteet ⁶ Työn tavoitteena on löytää kustannustehokkaat käyttöalueet kummallekin kannattajatyypille.		
Tavoiteaikataulu ⁷ Työ valmistuu 15.4.2014 mennessä		
Päiväys ja allekirjoitukset ⁸ 03/10/2013 Oulu Tekijän allekirjoitus 		
03/10/2013 Oulu Tilaaajan allekirjoitus 		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite. 2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi. 3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta. 4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan. 5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat. 6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet. 7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa. 8. Lähtötietomuistio päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaaajan yhdyshenkilö 		

Perustiedot

Rakennuksen sijainti: Raahe

Kantavan rungon rakennusmateriaali: teräs

Rakennustapa : konepajavalmistus, asennus työmaalla

Seuraamusluokka: CC2

Paloluokka: P2

Maastoluokka: 1

Hallin mitat

Jännevälit: 20 m, 30 m ja 40 m

Kehäjaot: 6 m ja 12 m

Pituus: 48 m

Leveys: määräytyy mitoitetavan palkin pituuden mukaan

Sisätilan vapaakorkeus: 15 m

Kattokaltevuus: 1:16

Kuormat

Kattokannattajille tulevat kuormat koostuvat kattorakenteen omasta painosta, lumikuormasta sekä tuulikuormasta.

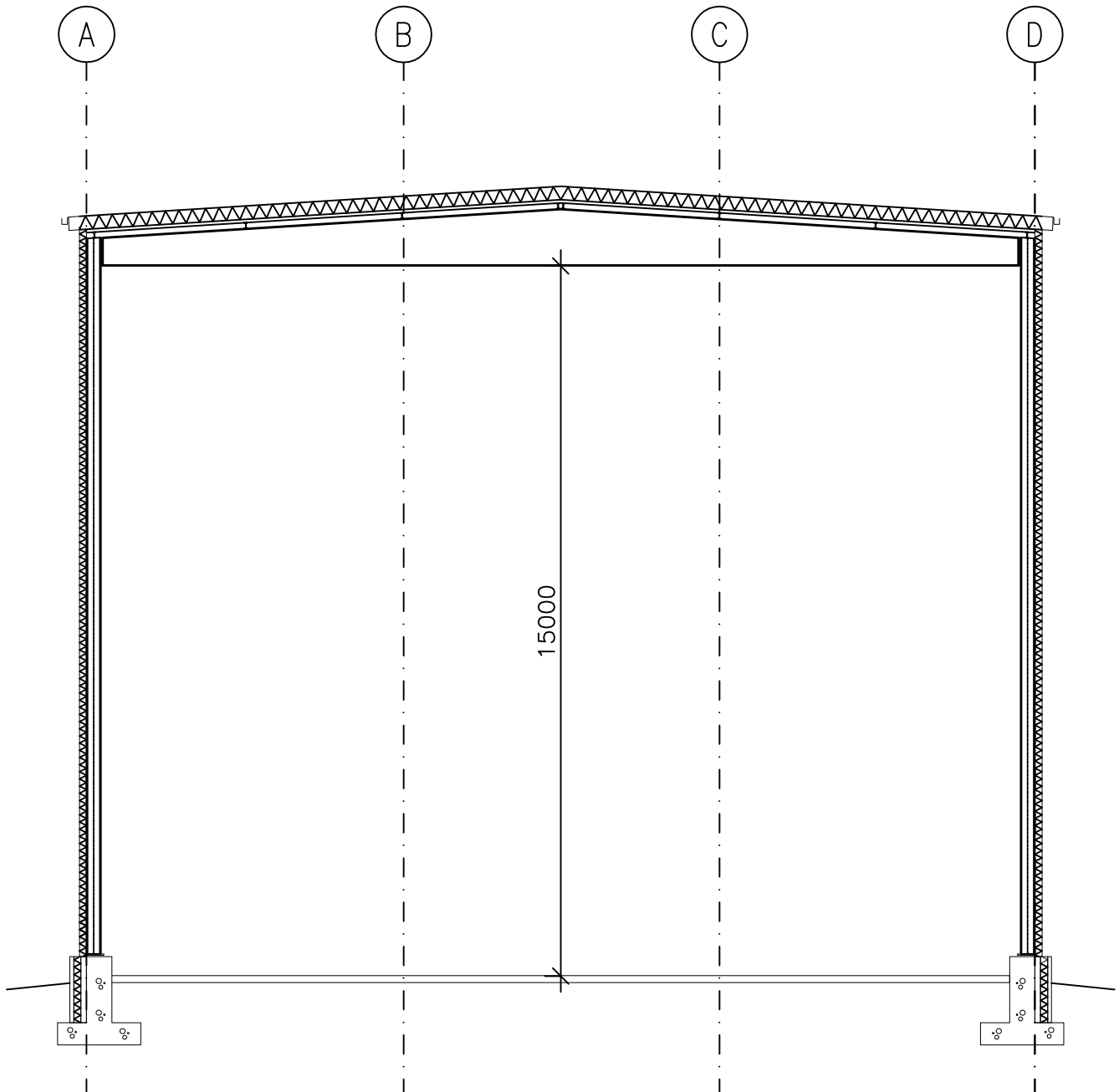
Lumikuorma: ominaisarvo maassa $s_k = 2,1 \text{ kN/m}^2$
katolla $s = \mu_i C_e C_t S_k = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 2,1 \text{ kN/m}^2 = 1,68 \text{ kN/m}^2$

Kattorakenteiden paino: $0,6 \text{ kN/m}^2$, liite 4

Tuulikuorma: $0,45 \text{ kN/m}^2$, liite 4

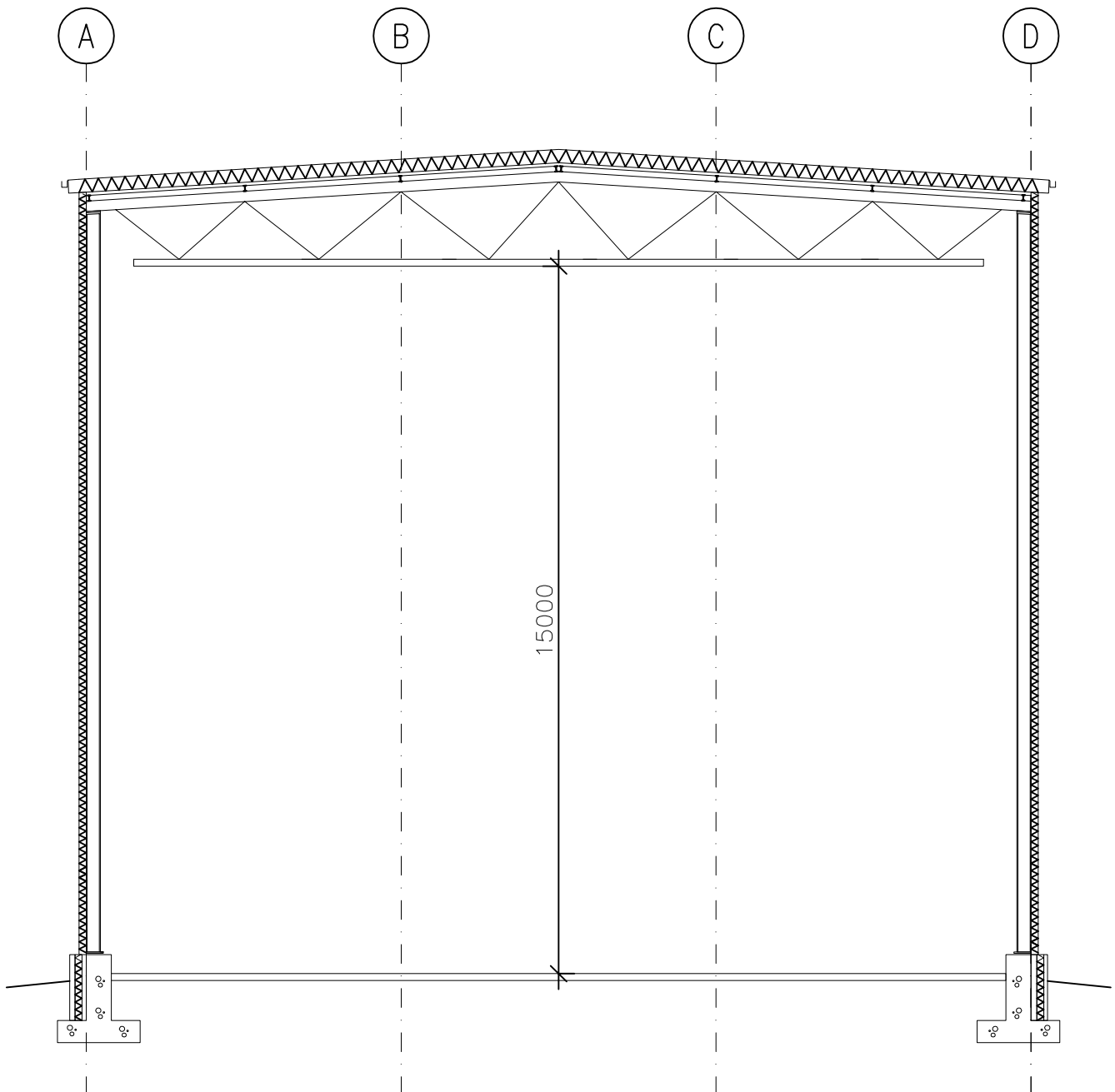
Rakennuskohde Esimerkkikohde Raahе	Piirustuksen sisältö Periaatteellinen leikkaus HI-harjapalkkihallista
Suunnittelija Jarkko Pietiläinen	Mittakaava 1:150

Halli 20x48, HI-harjapalkilla



Rakennuskohde Esimerkkikohde Raahе	Piirustuksen sisältö Periaatteellinen leikkaus ristikkohallista
Suunnittelija Jarkko Pietiläinen	Mittakaava 1:150

Halli 20x48, putkiristikkolla



Yläpohjan paino

paksuus [mm]	rakennekerros	paino [kN/m ³]	paino [kN/m ²]
20	kova mineraalivella rob 80t	2,0	0,040
100	kova mineraalivella ros 30g	1,0	0,100
110	kova mineraalivella rob 30	1,0	0,110
50	kova mineraalivella rob 50	1,3	0,065
70	kantava poimulevy	-	0,08
			0,40

Käytetään yläpohjan omanpainon arvona **0,6 kN/m²**, joka huomioi kattokannattajiin mm. valaisimista tulevaa ripustuskuormaa

Tuulikuormat

Lasketaan tuulikuorman arvot matalimmalle ja korkeimmalle hallille.
Tuulikuormat lasketaan vain katolle.

Hallien mitat:

leveys * pituus [m]	hallin arvioitu korkeus [m]	
	HI-harjapalkki	ristikko
20 * 48	17,0	17,5
30 * 48	17,3	18,5
40 * 48	17,6	19,5

Nopeuspaineen perusarvo:

$$\rho := 1.25 \quad V_b := 21$$

$$q_p := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 = 0.276 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Altistuserroin $C_e(z)$ ($Z_e = 17,0\text{m}$ ja $19,5\text{m}$)

$$C_{e17\text{m}} := 3.1$$

$$C_{e19.5\text{m}} := 3.2$$

Puuskanopeuspaine

$$q_{p.17\text{m}} := C_{e17\text{m}} \cdot q_p = 0.854 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

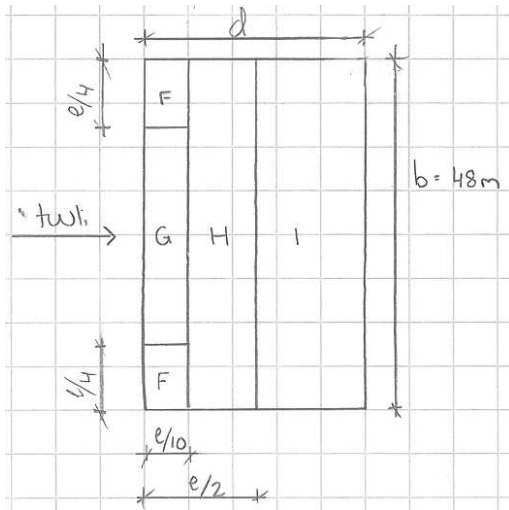
$$C_{e19.5\text{m}} := C_{e17\text{m}} \cdot q_p = 0.854 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Ulkopuoliset paineet:

Ulkopintaan vaikuttava tuulenpaine: (kattokaltevuus 1:16 -> määritellään painekertoimet tasakattoisena)

$$W_e := q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

tuuli pitkää sivua vastaan:



$$b := 48m \quad h = 17,0m \dots 19,5m$$

$$e = \min(b, 2h)$$

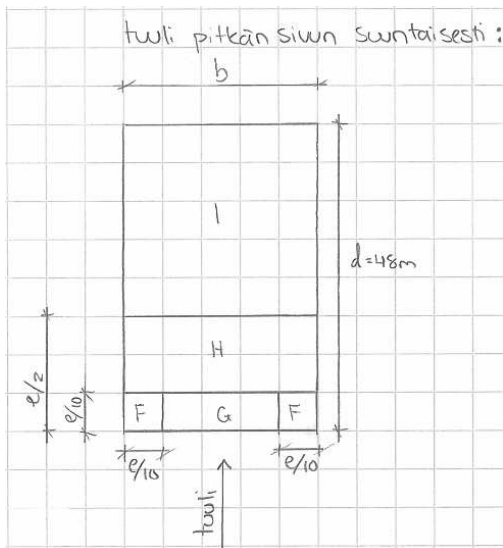
teräväreunainen räystäs, ulkopuoliset kertoimet

=>

	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
F	-1,8	-2,5
G	-1,2	-2
H	-0,7	-1,2
I	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$

=> Käytetään standardin SFS-EN-1994-1-4 kohdan 7.2.1 $C_{pe,10}$ arvoja, koska kyseessä rungon suunnittelu.

tuuli pitkän sivun suuntaisesti:



$$e = \min(b, 2h)$$

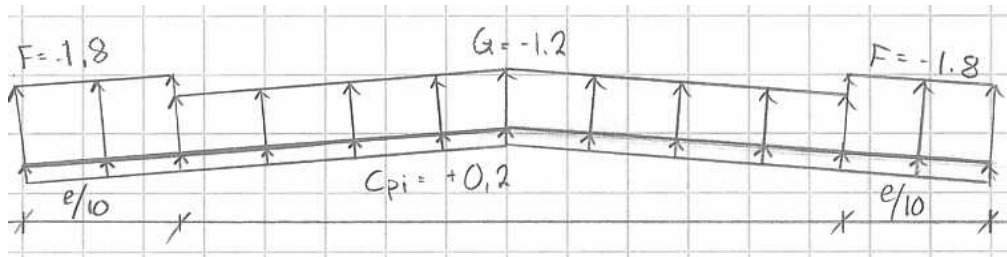
painekertoimet samat kuin edellä

Sisäpuoliset paineet:

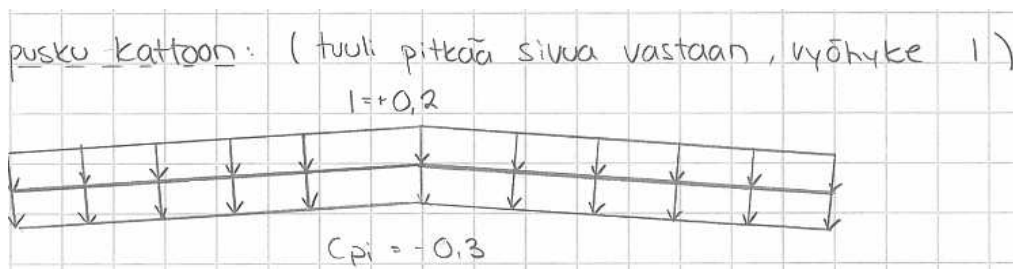
SFS-EN 1991-1-4 kohdan 7.2.9 huomautus 2:en mukaisesti, kun rakennuksen aukkosuhdetta ei voida määrittellä, niin voidaan sisäpuolisen painekertoimen arvona käyttää vaarallisemman vaikutuksen tuottavaa arvoa +0,2 tai -0,3

Vaarallisimmat tuulenpaineet

Imu kattoon: (tuuli pitkän sivun suuntaisesti, vyöhykkeet F, G F)



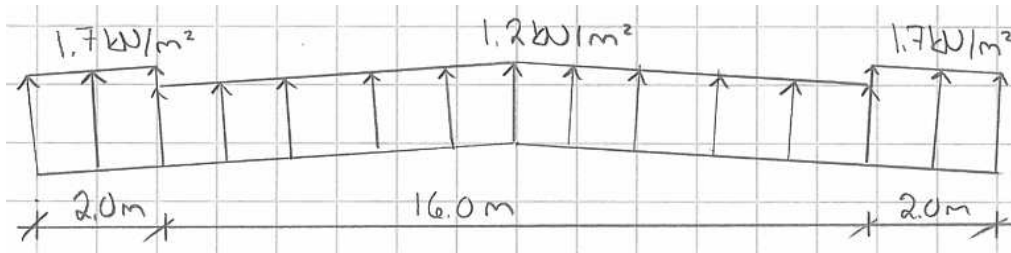
Pusku kattoon: (tuuli pitkää sivua vastaan, vyöhykke I)



Rakennuksen korkeus vaikuttaa tuulenpainevyöhykkeiden kokoon sekä nopeuspaineen perusarvoon. Korkeuden vaikutus lopulliseen kannattajien mitoituksessa käytettävään tuulikuormaan on pieni tässä tarkastelussa. Hallin 20*48 korkeus käytettäessä harjapalkkia on ~17 m ja hallin 40*48 korkeus käytettäessä putkiristikkoa on ~ 19,5 m. Seuraavassa esitetään kyseisille korkeuksille tuulikuormien arvot:

Imu kattoon:

Halli 20*48 HI-harjapalkilla



Imu kattoon:



Halli 40*48 Putkiristikolla

Imu kattoon:



Pusku
kattoon:



Yhteenveto tuulikuormista

Kattokannattajia mitoitettaessa määräävä tuulikuormitus on kattoon kohdistuva painekuorma. Matalimman ja korkeimman hallin ero on ~ 2,5 m ja sen vaikutus tuulikuorman arvoon on vain 0,02 kN/m². Koska ero on mitätön voidaan käyttää samaa arvoa **0,45 kN/m²** kaikille mitoitettaville kattokannattajille.

HI-harjapalkin kustannukset

kehäjako 6 m

jänneväli [m]	massa [kg]		hinta [€/kg]			kappalemäärä/halli	Kustannus / palkki[€]	Kustannus / halli [€]
	profiilit	varusteet	profiilit	varusteet	asennus			
20 m	2293	159	1,835	4,491	0,076	7	5104	35728
30 m	5012	212	1,835	4,491	0,076	7	10542	73791
40 m	9767	478	1,835	4,491	0,076	7	20840	145877

kehäjako 12 m

jänneväli [m]	massa [kg]		hinta [€/kg]			kappalemäärä/halli	Kustannus / palkki[€]	Kustannus / halli [k€]
	profiilit	varusteet	profiilit	varusteet	asennus			
20 m	3268	216	1,835	4,491	0,076	3	7229	21687
30 m	7842	376	1,835	4,491	0,076	3	16700	50100
40 m	14024	684	1,835	4,491	0,076	3	29913	89738

Ristikon kustannukset

kehäjako 6 m

jänneväli [m]	massa [kg]		hinta [€/kg]			kappalemäärä/halli	Kustannus / ristikko [€]	Kustannus / halli [€]
	profiilit	varusteet	profiilit	varusteet	asennus			
20 m	1161	60	2,035	5,119	0,132	7	2831	19814
30 m	2272	69	2,035	5,119	0,132	7	5285	36993
40 m	4582	114	2,035	5,119	0,132	7	10525	73678

kehäjako 12 m

jänneväli [m]	massa [kg]		hinta [€/kg]			kappalemäärä/halli	Kustannus / ristikko [€]	Kustannus / halli [€]
	profiilit	varusteet	profiilit	varusteet	asennus			
20 m	1951	73	2,035	5,119	0,132	3	4608	13824
30 m	3869	83	2,035	5,119	0,132	3	8818	26453
40 m	7823	184	2,035	5,119	0,132	3	17917	53751

Ristikolle tulevat lisäkustannukset

kehäjako 6 m

Jänneväli [m]	Kannattajan korkeus tuella [m]		Korkeuksien erotus [m]	pilarit + jäykisteet (€)	paneeli + listat [€]	Yht [€]
	HI-palkki	Ristikko				
20	0,540	1,375	0,835	4055	9085	13140
30	0,620	2,063	1,443	9463	18009	27471
40	0,830	2,625	1,795	13509	25274	38782

kehäjako 12 m

Jänneväli [m]	Kannattaja		Korkeuksien erotus [m]	pilarit + jäykisteet (€)	paneeli + listat [€]	Yht [€]
	HI-palkki	Ristikko				
20	0,670	1,375	0,705	2182	7670	9852
30	0,710	2,063	1,353	5448	16885	22333
40	1,020	2,625	1,605	8159	22598	30758

(Pilareiden ja rungon jäykisteiden korkeuden lisäys ja paneelin lisäneliöt)

Ristikolle tulevat lisäkustannukset (Pilareiden ja rungon jäykisteiden korkeuden lisäys ja paneelin lisäneliöt)

kehäjäko 6 m

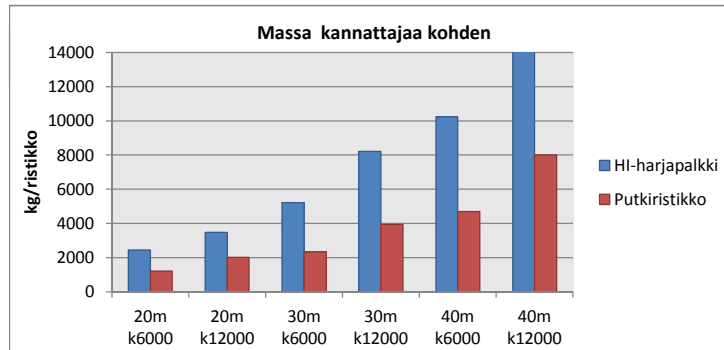
Jänneväli [m]	Kannattajan korkeus tuella [m]		Korkeuksien erotus [m]	pilarit + jäykisteet (€)	paneeli + listat [€]	Yht [€]
	HI-palkki	Ristikko				
20	0,540	1,375	0,835	4220	9085	13305
30	0,620	2,063	1,443	8151	18009	26160
40	0,830	2,625	1,795	11384	25274	36658

kehäjäko 12 m

Jänneväli [m]	Kannattajan korkeus tuella [m]		Korkeuksien erotus [m]	pilarit + jäykisteet (€)	paneeli + listat [€]	Yht [€]
	HI-palkki	Ristikko				
20	0,670	1,375	0,705	2498	7670	10168
30	0,710	2,063	1,353	5302	16885	22187
40	1,020	2,625	1,605	7328	22598	29927

Massavertailu

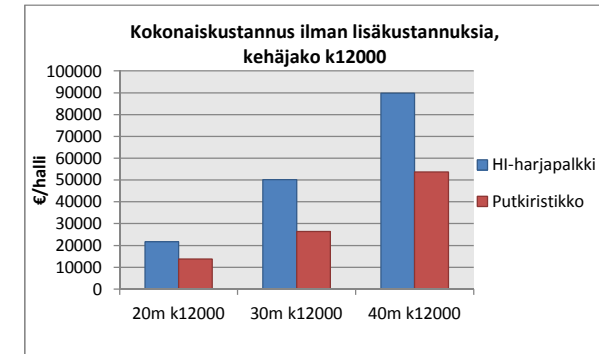
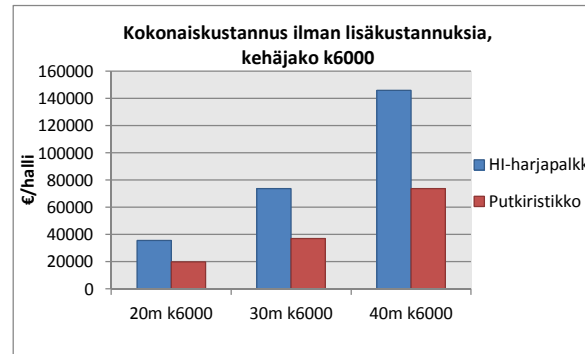
kannattajaväli	massa [kg/kannattaja]	
	HI-palkki	Ristikko
20m k6000	2451	1221
20m k12000	3484	2023
30m k6000	5223	2341
30m k12000	8218	3951
40m k6000	10244	4695
40m k12000	14707	8006



Kokonaiskustannus / halli

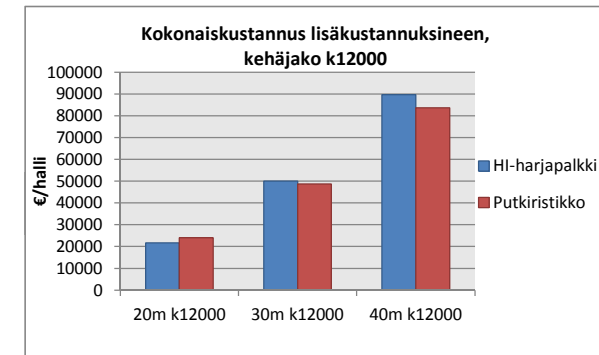
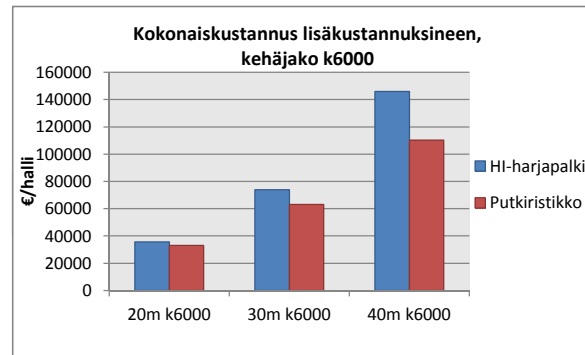
Kun ristikon hinnoissa ei huomioida
lisäkustannuksia

kannattajaväli	Kustannus [€/halli]		Kalliimman ja halvemman ero	
	HI-palkki	Ristikko	€	%
20m k6000	35728	19814	15914	80
30m k6000	73791	36993	36797	99
40m k6000	145877	73678	72199	98
20m k12000	21687	13824	7863	57
30m k12000	50100	26453	23646	89
40m k12000	89738	53751	35987	67



Kun ristikon hinnoissa huomioidaan
lisäkustannukset

kannattajaväli	Kustannus [€/halli]		Kalliimman ja halvemman ero	
	HI-palkki	Ristikko	€	%
20m k6000	35728	33119	2609	8
30m k6000	73791	63153	10638	17
40m k6000	145877	110336	35541	32
20m k12000	21687	23993	2305	11
30m k12000	50100	48641	1459	3
40m k12000	89738	83677	6060	7



Lämmityksestä aiheutuvat lisäkustannukset (€/a)

kehäjäko 6 m

Jänneväli [m]	Hallin tilavuus [m ³]		Tilavuuksen erotus [m ³]	Lisäkustannus [€/a]
	HI-palkki	Ristikko		
20	15518	16320	802	873
30	23393	25471	2078	2263
40	31594	35040	3446	3753

energian hinta [€/MWh]	ominaiskulutus [kWh/m ³]
45,37	24

kehäjäko 12 m

Jänneväli [m]	Hallin tilavuus [m ³]		Tilavuuksen erotus [m ³]	Lisäkustannus [€/a]
	HI-palkki	Ristikko		
20	15643	16320	677	737
30	23522	25471	1948	2121
40	31958	35040	3082	3355

Lämmityksestä aiheutuvat lisäkustannukset (%)

kehäjäko 6 m

Jänneväli [m]	Lämmityskustannus [€/a]		Lämmityskustan- nusten ero [%]
	HI-palkki	Ristikko	
20	16898	17771	4,9
30	25472	27735	8,2
40	34402	38154	9,8

kehäjäko 12 m

Jänneväli [m]	Lämmityskustannus [€/a]		Lämmityskustan- nusten ero [%]
	HI-palkki	Ristikko	
20	17034	17771	4,1
30	25613	27735	7,6
40	34799	38154	8,8