

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Rakennesuunnittelu

2020

Eero Suikki

KANTAVAN TERÄSRUNGON PÄÄOSIEN MITOITUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2020 | 50 sivua

Eero Suikki

KANTAVAN TERÄSRUNGON PÄÄOSIEN MITOITUS

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuotantohallin laajennuksen alustava rakennesuunnittelu. Hallin ulkomitat ovat 20,6 m leveä ja 44,3 m pitkä.

Opinnäytetyössä laskettiin kohteeseen käytettävät kuormat omapainosta, lumesta ja tuulesta voimakeroihin menetelmällä, jonka jälkeen mitoitettiin hallin kattoristikko ja pilarit. Suunnittelussa käytettiin apuna Autocad LT- ja Autodesk robot structural analysis-ohjelmaa rakenneosissa vaikuttavien voimien laskemiseksi.

Tämän opinnäytetyön tuloksena saatiin mitoitettua kantavan teräsrungon pääosat.

Opinnäytetyötä voi käyttää rakennuksen muiden kevyemmin kuormitettujen rakenneosien optimointiin, jos tilaaja niin haluaa.

ASIASANAT:

teräsrakenne, suunnittelu, tuotantorakennus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering

2020 | 50 pages

Eero Suikki

DIMENSIONING OF STEEL FRAME MAIN PARTS

The topic of the thesis is the preliminary structural design of the production hall extension. The external dimensions of the hall are width 20.6 m and length 44.3m.

In the thesis, the loads used on the site were calculated from the unladen weight, snow and wind, after which the roof struss structure and pillars of the hall were dimensioned. The design was aided by Autocad LT and Autodesk robot structural analysis to calculate the forces acting on the structural members.

The thesis can be used to optimize other lightly loaded structural parts of the building, if the client so wishes.

KEYWORDS:

Steel structure, designing, production building

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
2 SUUNNITTELUPERUSTEET	9
2.1 Rajatilamitoitus	10
2.1.1 Käyttörajatilat	10
2.1.2 Murtorajatilat	11
2.2 Rakenteista aiheutuvat omat kuormat	12
2.3 Lumikuorma	14
2.3.1 Lumikuorma katolla	15
2.3.2 Lumikuorma lipalla	16
2.4 Tuulikuorma	18
3 RAKENNEOSIEN MITOITUS	22
3.1 Teräs rakennusmateriaalina	22
3.2 Rungon jäykistys	22
3.3 Pilarien mitoitus	24
3.3.1 Pilarin rasitukset ja poikkileikkausluokka	25
3.3.2 Pilarin kestävyuden määrittäminen	30
3.4 Kattoristikon mitoitus	35
3.4.1 Kattoristikon kuormat	35
3.4.2 Yläpaarre	40
3.4.3 Alapaarre	42
3.4.4 Uumasauvat	42
3.4.5 Ristikon kuormitetuimmat liitokset	44
3.4.6 Ristikon taipuma	47
4 LOPUKSI	49
LÄHTEET	50

KUVAT

Kuva 1. Laajennusosan julkisivu kaakkoon.	6
Kuva 4. Laajennuksen tasopiirustus.	8
Kuva 6. Maastoluokkien kuvaukset	19
Kuva 7. Pilarin kuormitusala.	26
Kuva 8. Pilarien normaalivoimat murtorajatilamitoituksessa.	26
Kuva 9. Pilarien momentit murtorajatilamitoituksessa.	27
Kuva 10. Pilarien leikkausvoimat murtorajatilamitoituksessa.	27
Kuva 11. Ristikön kuormitukset.	37
Kuva 12. Ensimmäisen sauvan ja ylä- ja alapaarteen välinen geometria.	38
Kuva 13. Ristikön liitos tuella.	44

KUVIOT

Kuvio 1. Lumikuorman muotokerroin.	15
Kuvio 2. Korkeampaa rakennusta vasten olevien kattojen lumikuorman muotokertoimet. Tapaus (i) = kinostumaton lumi, tapaus (ii) = kinostunut lumi.	18
Kuvio 3. Hallin pituussuuntainen jäykistys.	23
Kuvio 4. Hallin poikkisuuntainen jäykistys.	24
Kuvio 5. Normaalivoimat murtorajatilamitoituksessa.	40
Kuvio 6. Leikkausvoimat murtorajatilamitoituksessa.	40
Kuvio 7. Leikkausvoimat murtorajatilamitoituksessa lumikuorma 100% / 50%.	40

TAULUKOT

Taulukko 1. Kuormien yhdistelykertoimet.	12
Taulukko 2. Kattoelementtien tekniset arvot.	13
Taulukko 4. Tuulensuojaisuskerroin.	16
Taulukko 5. Puuskanopeuspaineen ominaisarvo.	21
Taulukko 6 Voimakerroin c_f .	21
Taulukko 7. Poikkileikkausluokkien rajat.	29
Taulukko 8. Poikkileikkausluokkien rajat.	30
Taulukko 9. Ristikön rakenneosien nurjahduspituudet.	39

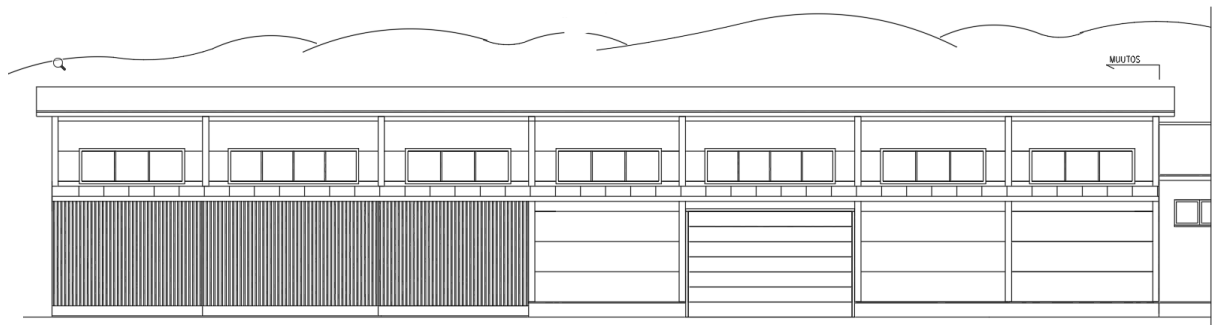
1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on mitoittaa Sastamalan Karkkuun rakennettavan Teräsrakenne Suikki Oy:n noin 880 neliömetrin suuruisen tuotantotilan laajennusosan teräsrungon pääosat. Mitoitus tehdään raskaimmin kuormitetun rakenneosan mukaan. Työssä mitoitetaan ristikon ylä- ja alapaarteet, ristikon ensimmäiset kaksi sauvaa tuelta päin ja pilari.

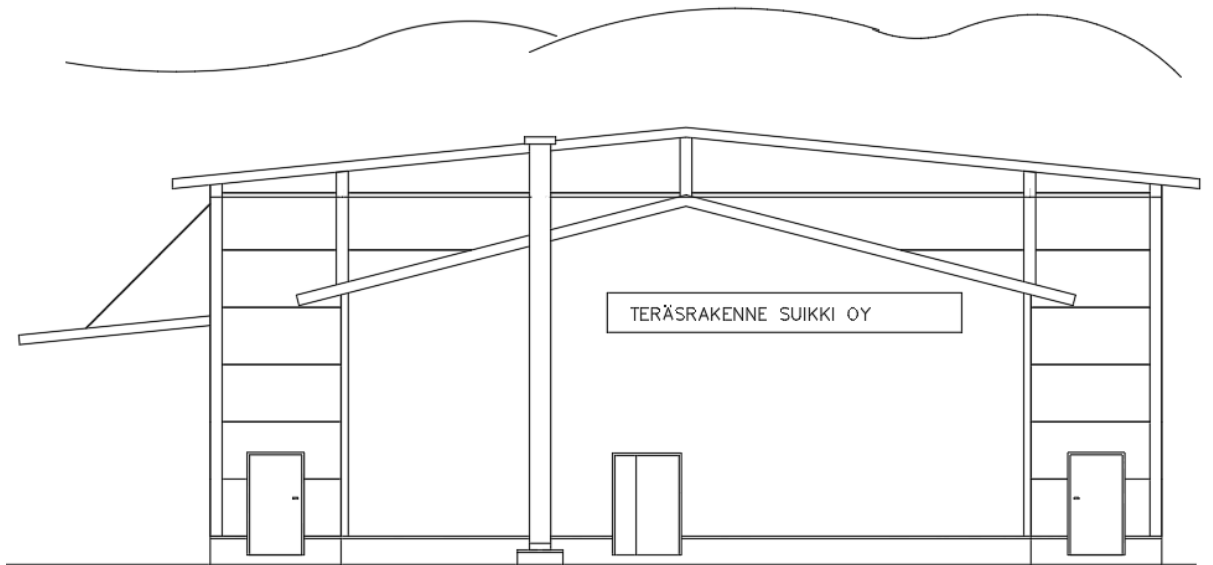
Teräsrakenne Suikki Oy on vuonna 2006 perustettu teräskomponentteja valmistava yritys. Yrityksessä työskentelee tällä hetkellä 6 henkilöä. Koska tilauskanta on jatkuvasti kasvanut ja levytöitä tehnyt alihankkija lopetti toimintansa, yrityksen on kasvatettava tilojansa, jotta se voi ryhtyä valmistamaan itse tarvitsemiaan levyosia. Lisäksi tarkoituksena on tehdä alihankintana levytöitä myös muille yrityksille ja yksityishenkilöille.

Opinnäytetyössä perehdytään rakenteiden mitoitukseen EN 1993 Eurokoodi 3:n mukaan ja kuormien mitoitukseen EN 1991 Eurokoodi 1:n mukaan käsinlaskien. Rakenteissa vaikuttavien voimien laskemiseksi käytetään apuna laskentaohjelmia.

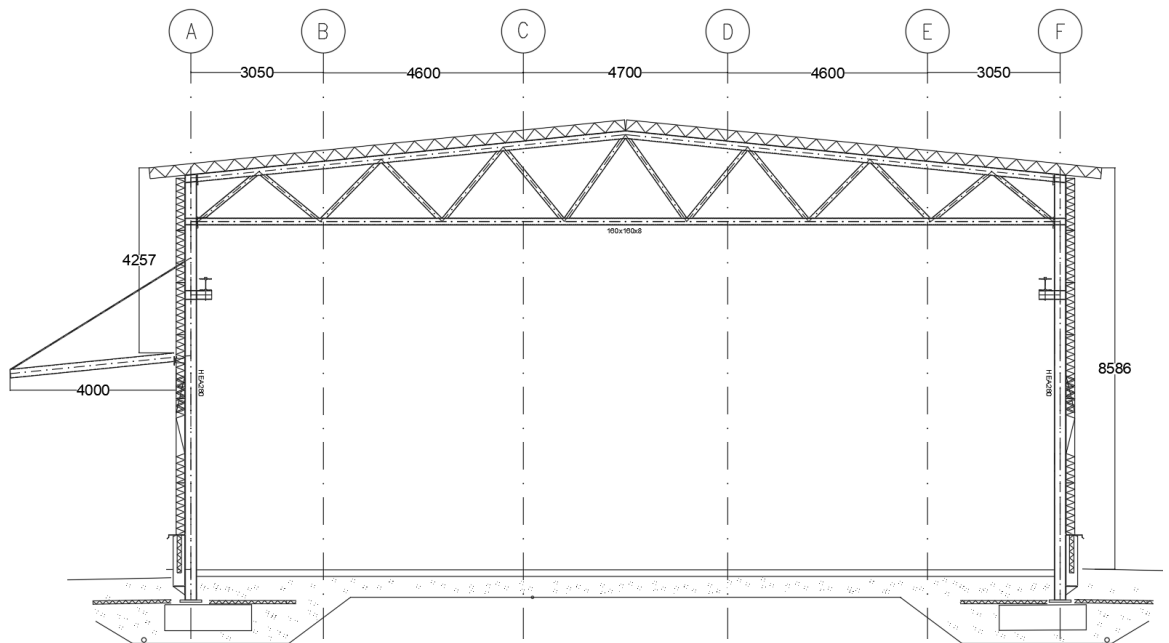
Rakennuksen rungon rakennusmateriaaliksi valittiin yrityksen toimenkuvasta johtuen teräs ja jäykistystavaksi ristikkojäykistys. Rakennus perustetaan pilarianturoiden päälle ja paalutustarve todetaan myöhemmin maaperätutkimuksilla. Rakennuksen seinämateriaaliksi valittiin kustannussyistä EPS-elementti. Kattotuolit tehdään teräksisistä putki-profiilikomponenteista, joiden päälle rakennuksen pituussuuntaan asennetaan Z-profiilit. Z-profiilien päälle asennetaan myös EPS-kattoelementti. Elementin ulkopuolella on tavallisen pellin sijasta käytetty konesaumattavaa kattopeltiä, jonka avulla valmiin katon rakennusprosessi on nopea ja helppo. Rakennuksen mitat ja ulkonäkö selviävät taso-, julkisivu- ja rakenneleikkauspiirustuksista (ks. kuvat 1–4).



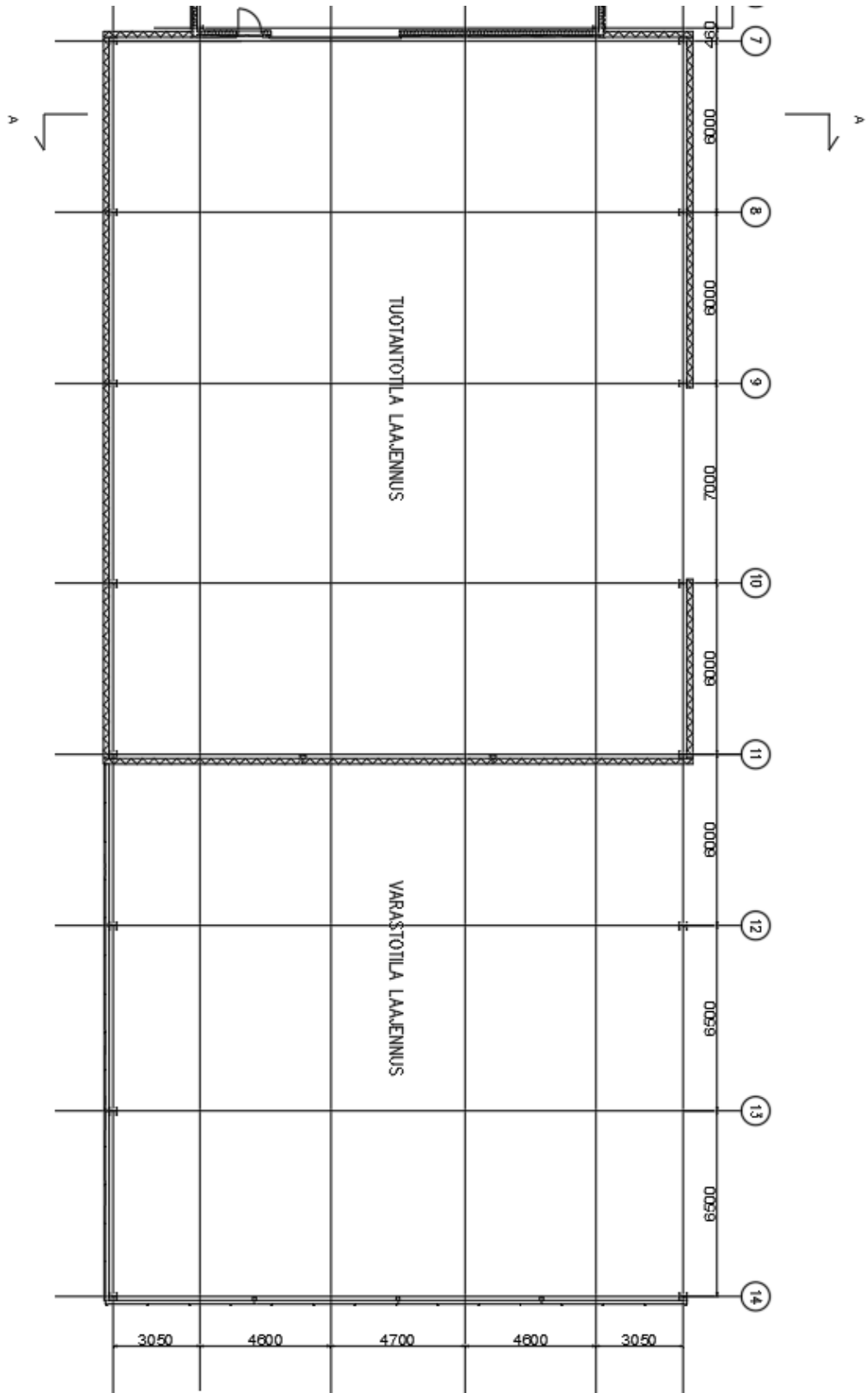
Kuva 1. Laajennusosan julkisivu kaakkoon.



Kuva 2. Rakennuksen julkisivu koilliseen.



Kuva 3. Laajennusosan A-A-leikkaus.



Kuva 2. Laajennuksen tasopiirustus.

2 SUUNNITTELUPERUSTEET

Suunnittelussa käytettävät kuormat saadaan standardista SFS-EN 1991 ja sen kansallisista liitteistä. Rakenteiden mitoitus tulee toteuttaa siten, että rakenne kestää asennukseen ja käyttöön liittyvät vaatimukset koko suunnitellun käyttöikänsä ajan. Lisäksi rakenteiden tulee kestää erilaisia onnettomuustilanteita, joita voivat olla esimerkiksi räjähdys, törmäys, inhimillinen erehdys ja tulipalo. Tässä hankkeessa paloluokka on P3, joten rakenteille ei ole asetettu vaatimuksia palonkestoajan osalta. Rakenteiden suunnittelua ohjaavat maankäyttö- ja rakennuslaki, ympäristöministeriön asetukset, ympäristöministeriön ohjeet, kunnan rakentamismääräykset sekä alan standardit ja ohjeet.

EN 1990 liitteessä B ja kansallisessa liitteessä määritetään erilaisia luotettavuustasoja soveltaen eri seuraamusluokkia. Luotettavuusluokalla kuvataan RC kuvataan rakenteen tai rakenneosan luotettavuutta. Seuraamusluokat ovat seuraavat:

- CC3: Rakenne sortuessaan aiheuttaisi suuria seuraamuksia ihmishenkien menetysten tai hyvin suuria seuraamuksia taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
- CC2: Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävät seuraamukset taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen osalta.
- CC1: Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.

Rakennusten rakenteiden tai rakenneosien luotettavuutta kohdennetaan luotettavuusluokalla RC. Luotettavuusluokka määritetään käyttämällä luotettavuusindeksiä β , joka kuvaa tilastollista vaurioitumistodennäköisyyttä valitun tarkastelujakson ajalla.

Rakenteiden suunniteltu käyttöikä määritellään luokittain seuraavasti:

- Taso 1: Tilapäisrakenteet, 10 vuotta
- Taso 2: Vaihdeettavissa olevat rakenteen osat kuten laakerit ja nosturiratapalkit, 10–25 vuotta
- Taso 3: Maatalous- tai vastaavat rakenteet, 15– 30 vuotta
- Taso 4: Tavanomaiset rakenteet ja talorakennukset, 50 vuotta
- Taso 5: Sillat, muut maa- ja vesirakennuskohteet ja monumentaaliset rakennukset, 100 vuotta

Kuormat määritellään kuorman ajallisen keston mukaan pysyviin, muuttuviin ja onnettomuuskuormiin. Pysyviä kuormia ovat esimerkiksi kiinteät laitteet ja rakenteet. Muuttuvia kuormia ovat esimerkiksi rakenteiden tuuli-, lumi- ja hyötykuormat. Onnettomuuskuormia ovat esimerkiksi laitteiden tai ajoneuvojen törmäyskuormat ja räjähdykset. (RIL 201-1-2017, 27.)

2.1 Rajatilamitoitus

Kaikille tarvittaville rakenne- ja kuormitusmalleille muodostetaan asianomainen rajatilamitoitus, joita ovat normaalioloissa vallitsevat kuormitustilanteet, tilapäiset kuormitustilanteet (esim. asennuskalustosta aiheutuva kuorma), onnettomuustilanteet ja maanjäristystilanteet. Näiden lisäksi mitoitetaan murto- ja käyttörajatilanteet, joilla on osoitettava, että

- murtorajatiloissa rakenteen kestävyys on yhtä suuri tai suurempi kuin rakennetta kuormittava kuorma
- murtorajatiloissa on rakenteen tasapainoa parantavien osien mitoitussarvo suurempi tai yhtäsuuri kuin rakenteella oleva kuormitus
- käyttörajatiloissa rakenteelle tulevien kuormien vaikutus on pienempi kuin rakenneosalle määrätty suurin poikkeama, kuten esimerkiksi taipuma. (RIL 201-1-2017, 29.)

2.1.1 Käyttörajatilat

Käyttörajatiloilla tarkoitetaan sellaisia rajatiloja, joilla on vaikutusta rakenteen tai rakenneosan ulkonäköön, ihmisten mukavuuteen tai toimintaan normaalioloissa. Käyttörajatilojen käsitteet tulee tapauskohtaisesti erotella. Ensimmäinen käsite on palautumaton käyttörajatila, jossa rakenne tai rakenneosa ei palaudu alkuperäiseen muotoonsa kuormien poiston jälkeen. Toinen käsite on palautuva käyttörajatila, jossa käyttökelpoisuusvaatimuksien ylittävä kuorma poistettaessa palauttaa tarkasteltavan rakenteen tai rakenneosan alkuperäiseen muotoonsa. (Kouhi 2015, 32.)

Käyttörajan kuormitusyhdistelmiä ovat seuraavat:

- tavallinen yhdistelmä, jota käytetään tavallisesti palautuville rajatiloille

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- ominaisyhdistelmä, jota käytetään tavallisesti palautumattomille rajatiloille

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- pitkäaikaisyhdistelmä, jota käytetään tavallisesti pitkäaikaisvaikutuksille ja rakenteen ulkonäön kannalta.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (\text{RIL 201-1-2017, 44.})$$

2.1.2 Murtorajatilat

Murtorajatila on tilanne, jossa rakenteeseen tai rakenneosaan kohdistuvat kuormat ylittävät näiden kestävyysrajojen. Tästä seuraa stabiliteetin menetys, vahingoittuminen tai väsymisestä johtuva vahingoittuminen.

Murtorajatila määritetään ensin selvittämällä määräävä muuttuva kuorma joko laskennallisesti tai päättelemällä. Tämän hankkeen määräävä kuorma on selvästi lumikuorma, joten sitä ei laskennallisesti tarvitse todistaa. Tämän jälkeen murtorajatila määritetään seuraavista kaavoista valitsemalla epäedullisin yksinkertaistettu kuormitusyhdistelmä

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

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * K_{FI} * G_{kj,inf}$$

missä K_{FI} = kuormakerroin

$G_{kj,sup}$ = epäedulliset pysyvät kuormat

$G_{kj,inf}$ = edulliset pysyvät kuormat

$Q_{k,1}$ = määräävä muuttuva kuorma

$Q_{k,i}$ = muut yhtäaikaan vaikuttavat muuttuvat kuormat

$\psi_{0,1}$ = muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

Taulukosta 1 selviää muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin.

Taulukko 1. Kuormien yhdistelykertoimet (RIL 201-1-2017, 38).

Kuorma	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6 ^{**})
Luokka G: liikennöitävät tilat, 30 kN < ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3 ^{**})
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3 ^{*)} , kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{***)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset	1,0	1,0	1,0
Tukien painumat	1,0	1,0	1,0

2.2 Rakenteista aiheutuvat omat kuormat

Kattorakenteiden aiheuttamat omapainot selviävät taulukoista 2 ja 3. Kattorakenteena käytetään Jackon Oy:n valmistamaa konesaumattavaa 250 millimetriä vahvaa pelti-eriste-pelti elementtiä, joka täyttää puolilämpimän tilan U-arvo vaatimuksen. Elementit asennetaan Ruukki Oy:n valmistamien LP-Z300-3 kevytorsien päälle. Kevytorret asennetaan kattotuolien väliin yksiaukkoisena rakenteena, jotta rakennuksen lämmitettävät hukkakuutiot pysyvät mahdollisimman vähäisinä. Kevytorret asennetaan ristikon sauvojen solmupisteisiin, jotta yläpaarteeseen ei synny turhaan momenttia vaan se pysyy puristettuna. Jackon Oy:n 250 mm vahvalla kattoelementillä lumikuorman ollessa katolla 2,0 kN/m² on maksimi jänneväli 3,2 m ja tässä hankkeessa jänneväli on 2,5 m. Kattotuolien omasta painosta aiheutuvat kuormat Autodesk robot structural analysis 2019 -ohjelma laski itse, mutta alustavassa suunnittelussa käytetään arvoa 0,75 kN/m.

Taulukko 2. Kattoelementtien tekniset arvot (Jackon 2020).

Jackon® Kattoelementtien tekniset arvot										
paksuus (mm)	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
pituus (m)	2,5–10 m, yli 8 m pitkien elementtien mitoitus tarkistettava erikseen									
hyötyleveys (m)	1,2									
paino (kg/m ²)	9,7	10,2	10,7	11,2	11,7	12,2	12,7	13,2	13,7	14,2
U-arvo (W/m ² K)	0,45	0,34	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12
Palokäyttötymisluokka	B-s1, d0									

Taulukko 3. Kevytorsien tekniset arvot (Ruukki).

Orsityyppi	Paksuus (mm)	H (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Paino (kg/m)
LP-Z300	1.5	300	89	81	>=22.50	5.95
	2		90	82	>=23.50	7.93
	2.5		91	83	>=24.50	9.91
	3		92	84	>=25.50	11.89

2.3.1 Lumikuorma katolla

Lumikuorman arvo katolla saadaan kaavasta

$$s = s_k \mu_i C_e C_t$$

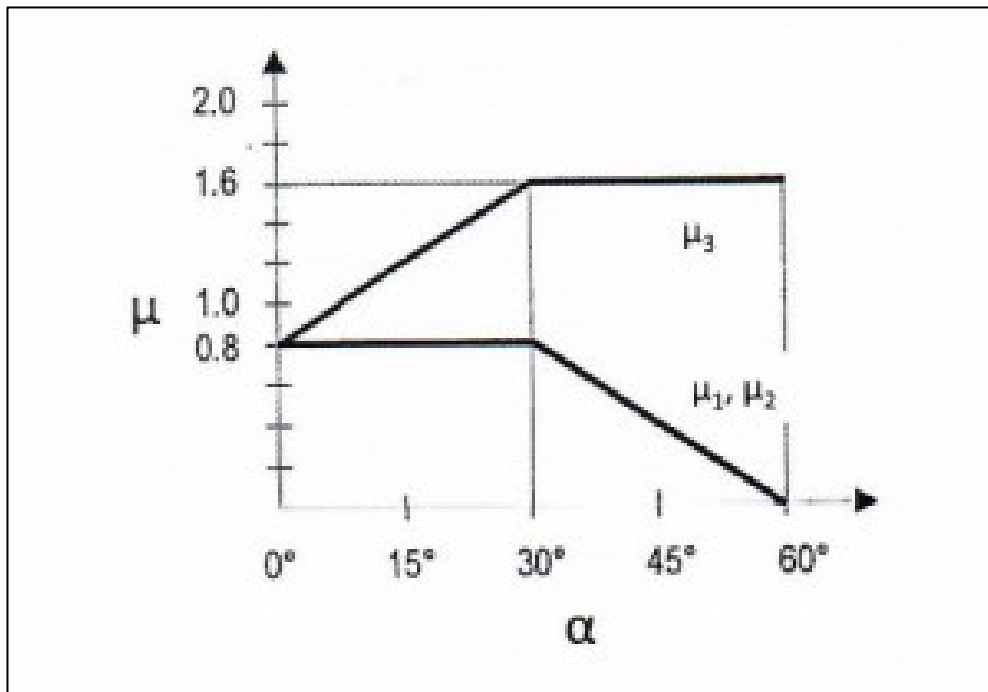
missä s_k = lumikuorman arvo maassa (kN/m²)

μ_i = lumikuorman muotokerroin

C_e = tuulensuojaiskerroin

C_t = lämpötilakerroin (käytetään arvoa 1,0)

Kuviossa 1 rakennuksen kattokulman ollessa 5,7° voidaan todeta, että lumikuorman muotokerroin on silloin 0,8 ja rakennuspaikka on suojaisessa paikassa metsän takana.



Kuvio 1. Lumikuorman muotokerroin (RIL 201-1-2017).

Vaikka puut ovat tuulen esteenä, ei voida olettaa rakennuksen olevan tuulelta suojassa aina, joten maastotyyppiä valitaan normaali ja sen myötä taulukosta 4 voidaan todeta,

että tuulensuojakertoimeksi tulee 1,0. Lumikuorman laskukaava saadaan siis sievennettyä muotoon $s = s_k \mu_i$

$$s = 2,25 \frac{kN}{m^2} \times 0,8 = 1,8 \frac{kN}{m^2}$$

Taulukko 3. Tuulensuojaisuuskerroin (RIL 201-1-2017, 102).

Maastotyyppi	C_e
Tuulinen	0,8 (1,0, mikäli lyhyempi sivumitta > 50 m)
Normaali	1,0
Suojainen	1,2

Tuulinen maasto: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän.
 Normaali maasto: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta.
 Suojainen maasto: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.

2.3.2 Lumikuorma lipalla

Pihan puolelle rakennusta tehdään nivelellisenä ulokerakenteena samassa 5,7° kulmassa oleva neljä metriä pitkä lippa, jonka lumikuorma on määritettävä erikseen. Lumikuorma korkeampaa rakennusta vasten olevalle rakenteelle määritetään kuormituskaavio (kuvio 2), sillä $b_2 < l_s = 4 \text{ m} < 6 \text{ m}$

$$s_{lape,nurkka} = s_k C_e C_t \mu_2$$

missä s_k = lumikuorman arvo maassa

C_e = tuulensuojaisuuskerroin (1,0)

C_t = lämpötilakerroin (1,0)

μ_2 = lumikuorman muotokerroin

(RIL 201-1-2017, 104–105.)

Lumikuorman muotokerroin μ_2 saadaan laskettua kaavasta

$$\mu_2 = \mu_s + \mu_w$$

missä μ_s = liukumisesta johtuva muotokerroin (0,0, kun $\alpha \leq 15^\circ$)

μ_w = tuulesta johtuvan lumikuorman muotokerroin $[(b_1 + b_2) / 2h < y_h / s_k]$

$$\mu_w = \frac{20 \text{ m} + 4 \text{ m}}{2 \cdot 4 \text{ m}} < \frac{2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 4 \text{ m}}{2,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} = 3,0 < 3,56$$

Alemman katon pinta-alan ollessa $\geq 6 \text{ m}^2$ on μ_w kertoimen vaihteluväli:

$$0,8 \leq \mu_w \leq 2,5, \text{ joten } \mu_w = 2,5$$

(RIL 201-1-2017, 105.)

Lumikuorma lappeen ja rakennuksen välisessä nurkkapisteessä saadaan laskettua kaavasta

$$s_{lape,nurkka} = s_k \times \mu_2$$

$$s_{lape,nurkka} = 2,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 2,5 = 5,63 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Lumikuorma lappeen päässä saadaan kaavasta

$$s_{lape,pää} = s_k C_e C_t \mu_1$$

missä s_k = lumikuorman arvo maassa

C_e = tuulensuojaisuuskerroin (1,0)

C_t = lämpötilakerroin (1,0)

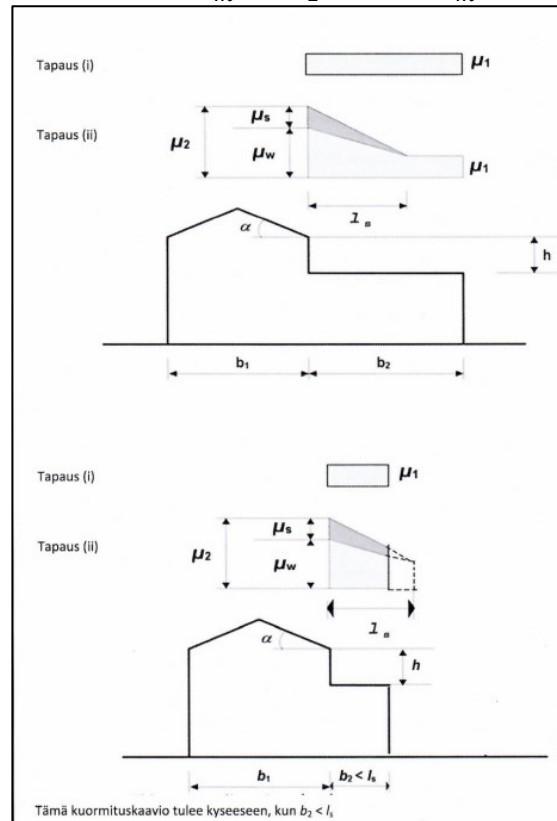
μ_1 = lumikuorman muotokerroin

(RIL 201-1-2017, 100.)

Kuviosta 2 todetaan, että lumikuorman muotokerroin lappeen päässä interpoloidaan kuormituskaavion mukaan eli lauseke saadaan sievennettyä muotoon:

$$s_{lape,pää} = s_k \times \frac{\mu_1 + \mu_w}{2}$$

$$s_{lape,pää} = 2,25 \frac{kN}{m^2} \times \frac{0,8+2,5}{2} = 3,71 \frac{kN}{m^2}$$



Kuvio 2. Korkeampaa rakennusta vasten olevien kattojen lumikuorman muotokertoimet. Tapaus (i) = kinostumaton lumi, tapaus (ii) = kinostunut lumi (RIL 201-1-2017, 106.)

2.4 Tuulikuorma

Tuulen aiheuttamat rasitukset rakenteelle ovat muuttuvia kiinteitä kuormia, jotka jaetaan maastoluokan mukaan viiteen eri ryhmään eli maastoluokkiin, jotka selviävät kuvassa 6. Tämän kohteen maastoluokka on 2.



Kuva 3. Maastoluokkien kuvaukset (RIL 201-1-2017, 131).

Tuulen aiheuttamat rasitukset rakenteelle voidaan laskea käyttäen painekerroin- tai voimakerroinmenetelmää. Tässä hankkeessa on päätetty käyttää näistä jälkimmäistä, voimakerroinmenetelmää. Voimakerroinmenetelmässä lasketaan tuulen aiheuttama voima ominaisarvoksi neliömetrille kaavasta

$$q_{w,k} = C_s C_d C_f q_p(z) A_{ref}$$

missä $q_{w,k}$ = kokonaistuulivoima

$C_s C_d$ = rakennekerroin

C_f = voimakerroin

$q_p(z)$ = maaston pinnan muodon mukaan modifioitu nopeuspaine

A_{ref} = tuulikuorman vaikutusala

Matalille rakennuksille ($h < 15$ m) voidaan käyttää rakennekertoimena $c_s c_d = 1,0$ sen ollessa varmalla puolella. (RIL 201-1-2017, 140.) Rakennettava rakennus kuuluu maastoluokkaan II, jonka määrittäminen selviää kuvasta 6 ja on tuulen vaikutusalueeltaan 8,5 metriä korkea eli nopeuspaineen arvona käytetään 0,74. Arvo selviää taulukosta 5. Taulukosta 6 löytyvät voimakerroimet. Voimakerroin c_f saadaan määritettyä puuskanopeuspaineen arvon ja erikseen lasketulla tehollisella hoikkuudella λ , joka lasketaan rakennuksen korkeuden ollessa < 15 m kaavasta

$$\lambda = \frac{2h}{b}$$

missä h = rakennuksen korkeus

b = rakennuksen kohtisuora leveys tuuleen nähden

(RIL 201-1-2017, 140.)

Kokonaistuulikuorman ominaisarvo rakennuksen pidemmän sivun mukaan

$$\lambda = \frac{2 * 8,5 \text{ m}}{44,6 \text{ m}} = 0,38$$

$$\frac{d}{b} = \frac{20,6 \text{ m}}{44,6 \text{ m}} = 0,42$$

Voimakerroin $c_f = 1,28$ (taulukko 6)

$$q_{w,k,pitkä} = 1,0 \times 1,28 \times 0,74 \frac{kN}{m^2} = 0,95 \frac{kN}{m^2}$$

Kokonaistuulikuorman ominaisarvo rakennuksen lyhyemmän sivun mukaan

$$\lambda = \frac{2 \times 8,5 \text{ m}}{20,6 \text{ m}} = 0,83$$

$$\frac{d}{b} = \frac{44,6 \text{ m}}{20,6 \text{ m}} = 2,17$$

Voimakerroin $c_f = 1,43$ (taulukko 6)

$$q_{w,k,lyhyt} = 1,0 \times 1,43 \times 0,74 \frac{kN}{m^2} = 1,06 \frac{kN}{m^2}$$

Taulukko 4. Puuskanopeuspaineen ominaisarvo (RIL 201-1-2017, 137).

z (m)	Maastoluokka				
	0	I	II	III	IV
0	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
1	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
2	0,78	0,52	0,39	0,35	0,32
5	0,96	0,65	0,53	0,35	0,32
8	1,05	0,73	0,61	0,43	0,32
10	1,09	0,76	0,65	0,47	0,32
15	1,18	0,83	0,72	0,55	0,40
20	1,24	0,88	0,77	0,60	0,45
25	1,29	0,92	0,82	0,65	0,50
30	1,33	0,95	0,85	0,68	0,54
35	1,37	0,98	0,88	0,72	0,57
40	1,40	1,01	0,91	0,74	0,60

Taulukko 5. Voimakerroin c_f (RIL 201-1-2017, 141).

λ	Sivusuhte d/b								
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
≤ 1	1,2	1,2	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58	0,58
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63

3 RAKENNEOSIEN MITOITUS

3.1 Teräs rakennusmateriaalina

Yksi suurimmista eroista teräksen ja muiden rakennusmateriaalien välillä on teräksen lujuus. Suuri lujuus mahdollistaa pienillä poikkileikkauksien pinta-aloilla toteutettavat hienosäätämiset käyttökohteen ja -tarpeen mukaan. Esimerkiksi matalilla poikkileikkauksilla on mahdollista täyttää suuri kantavuusvaatimus. Eri teräslajela on kehitetty jo tuhansia, mutta yleisimpiä näistä on lujuusluokkien S235 ja S355 alaluokat. Tämä luku kertoo teräksen myötölujuuden eli sen jännityksen, jonka rakenneosasta kestävä palautuen vielä takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Teräksen väsyminen tulee ottaa huomioon, jos rakenneosaan kohdistuu jatkuvia muuttuvia rasituksia, kuten esimerkiksi silloissa, mutta tavallisessa teräsrakenteisessa tuotantohallissa ei tätä tarvitse tehdä. Rakentamisessa käytetään myös S420 ja S700 luokkien teräksiä, mutta näitä käytetään harvemmin huonon hitsattavuuden takia. (Kouhi 2015b, 38.)

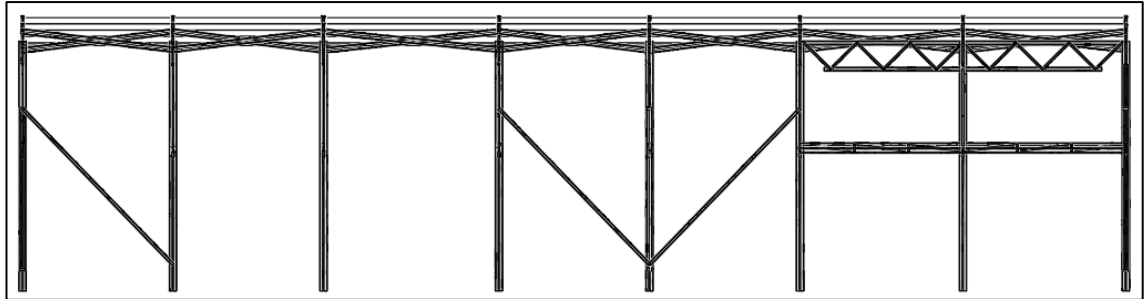
Muita etuja teräksen käyttämiseen rakennusmateriaalina on lujien ja momenttijäykkien liitoksien tekemisen helppous, suurten muutoksien teko rakennuksen käyttötarkoitukseen on helppoa, teräs on oikein pinnoitettuna pitkän käyttöiän rakennusmateriaali, sen palonsuojaus helppoa ja kustannustehokasta, mahdolliset mekaaniset vauriot helposti havaittavissa ja vähäisin kustannuksin korjattavissa. Teräsrunko on suhteessa kantokykyensä erittäin hento rakenteeltaan. Tämän johdosta perustuskustannukset ovat vähäiset. Komponentit tehdään yleensä jo konepajalla täysin valmiiksi ja asennettaviksi pulttiliitoksia suosien, jotta työmaalla muut työvaiheet pääsevät mahdollisimman nopeasti käynnistymään. (Teräsrakenneyhdistys.)

3.2 Rungon jäykistys

Rungon jäykistyksen tehtävä on siirtää hallin rungon x- ja y-suunnissa vaikuttavat ja syntyvät vaakavoimat perustuksiin. Teräsrakentamisessa yleisimpiä jäykistystapoja ovat ristikointi, mastopilarit ja kehäjäykistys. Tässä kohteessa vaakavoimia aiheuttaa tuuli ja rakennuksen pihan puolelle rakennettava 4 metriä pitkä lippa, joka haluttiin toteuttaa pilareilla ulokkeena rungosta.

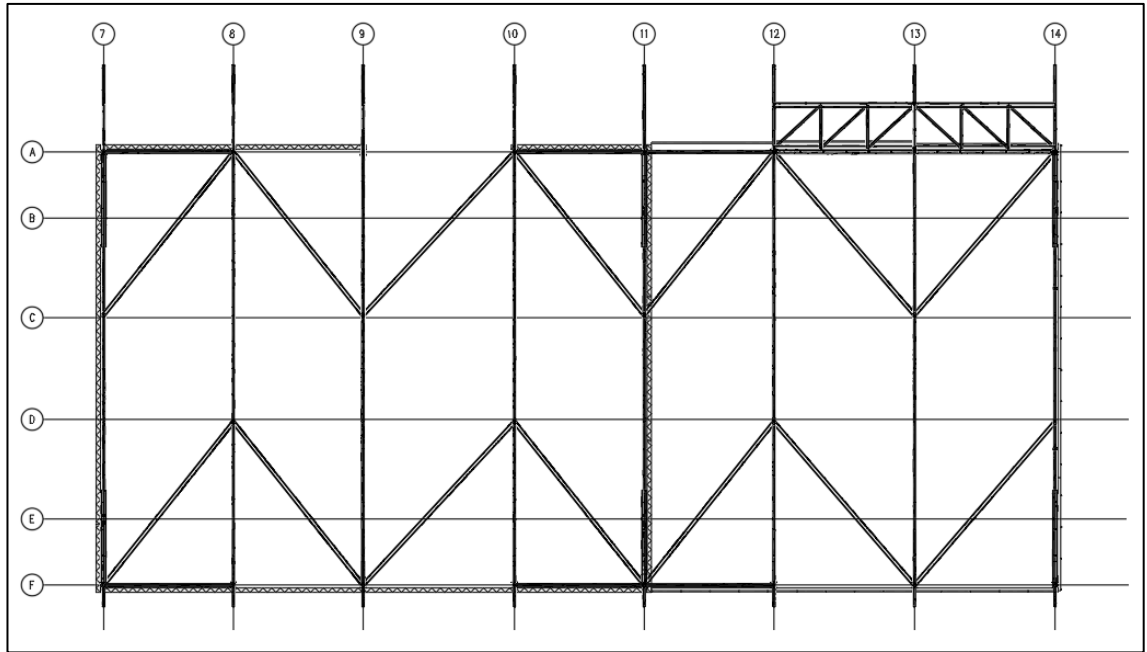
Hallin pitkän sivun suuntainen jäykistys ei ole ongelma, sillä se voidaan toteuttaa ristikko jäykistyskehyksenä kehien pilareiden väliin asennettavilla diagonaalisauvoilla, jotka toimivat

joko puristettuina tai vedettyinä rakenneosina. Kuviossa 3 esitetään hallin pitkän sivun suuntainen jäykistys. Kehät joihin ei tule pituussuuntaisia vinositeitä ovat silti jäykistetty kattotuolien väliin asennettavien z-orsien välityksellä.



Kuvio 3. Hallin pituussuuntainen jäykistys.

Kuviossa 4 esitetty hallin poikittaissuuntainen jäykistys toteutetaan myös ristikkojäykistykseenä. Perustuksiin asennettavat poikittaissuuntaiset vinositeet asennetaan molempiin päätyihin ulkoseinien viereen ja kylmän varasto- ja lämpimän tuotantotilan välissä olevan väliseinän viereen, jossa diagonaalit eivät haittaa tuotantoa tai rakennuksen muuta käyttötarkoitusta eli moduulilinjoilla 7, 11 ja 14. Pilarin yläpäästä kattotuolin yläpaarteeseen asennetaan diagonaalisauvat, jotka johtavat vaakakuormat sivusuunnassa reevattuihin pilareihin. Rungon jäykistyksessä käytettävien sauvojen lämpötilojen vaihtelu kylmällä puolella täytyy myös ottaa huomioon.



Kuvio 4. Hallin poikittaissuuntainen jäykistys.

3.3 Pilarien mitoitus

Aluksi mitoitetaan rakennukseen pilarit johtuen siitä, että rakennus pidetään 3M-mitoituksen mukaisena. Pilarien mitoitus vaikuttaa aina kattotuolin ensimmäisen sauvan geometriaan, jos pilaria ei kasvata vain ulospäin tai kattotuolin ensimmäisen sauvan ja pilarin vapaavälin jättää suureksi, jolloin ristikon kestävyys tuella huononee. Pilarin profiilivalinta tulee olemaan joko HEA- tai HEB-profiili sen helpon työstettävyyden ja modifiointi mahdollisuuksien vuoksi. Pilarit mitoitetaan 13 metrisen oviaukon viereisen pilarin mukaan, koska tämä on suurimmalla rasituksella oleva pilari. Pilarin kuormitusala on esitetty kuvassa 7.

3.3.1 Pilarin rasiutukset ja poikkileikkausluokka

Katolta pilari kerää kuormitusta seuraavasti

$$A_{ref,k} = 9,5 \text{ m} \times 11,1 \text{ m} = 105,45 \text{ m}^2$$

Pilarille tulevat kuormat katolla siis ovat

$$q_{k,katto,lumi} = s \times A_{ref,k}$$

$$q_{k,katto,lumi} = 1,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 105,45 \text{ m}^2 = 189,81 \text{ kN}$$

$$g_k = g_{k,elementti} + g_{k,zorsi}$$

$$g_k = 0,14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 105,45 \text{ m}^2 + 0,12 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 9,5 \text{ m} \times 6 = 21,60 \text{ kN}$$

Pilariin vaikuttavat voimat lipalta ovat

$$A_{ref,l} = 9,5 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 38 \text{ m}^2$$

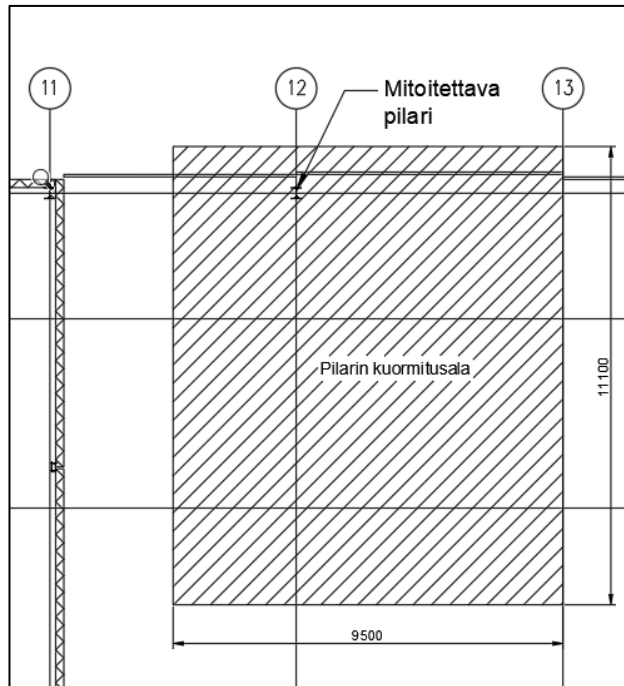
$$q_{k,lip,nurk,lumi} = 9,5 \text{ m} \times 5,63 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 53,49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{k,lip,pää,lumi} = 9,5 \text{ m} \times 3,71 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 35,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tuulikuorma pilarille asetetaan siten, että se aiheuttaa pilariin samansuuntaista momenttia lipan lumikuorman kanssa. Rakennus oletetaan toistaiseksi mastojäykistiseksi, eikä tutkita pilarin siirtymätiloja käyttörajatilassa ennen kuin koko malli on rakennettu ja rakennusta on mahdollista jäykistää muiden rakenneosien kesken. Tuulikuorman voidaan siis olettaa alustavassa mitoituksessa olevan

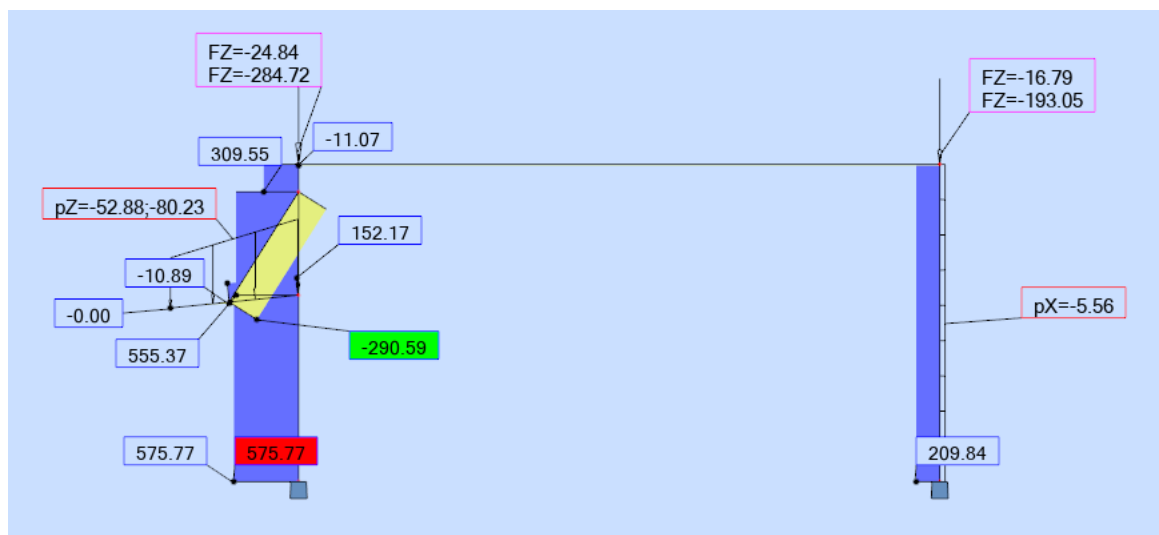
$$q_{w,k,pilari} = 6,25 \text{ m} \times 0,95 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 5,94 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Rakenteen tulisi kestää kaikki kuormitustapaukset, mutta käsinlaskussa suunnittelija joutuu päättämään itse mitoittavan kuormitustapauksen. Valitaan pääkannattijille määrääväksi kuormitustapaukseksi KY3 eli hetkellinen aikaluokka ja lumi määräävänä kuormana. Käytetään kehän voimien ratkaisemiseksi apuna Autodesk robot structural analysis -ohjelmaa. Kuvasta 7 selviää pilarin kuormitusala.

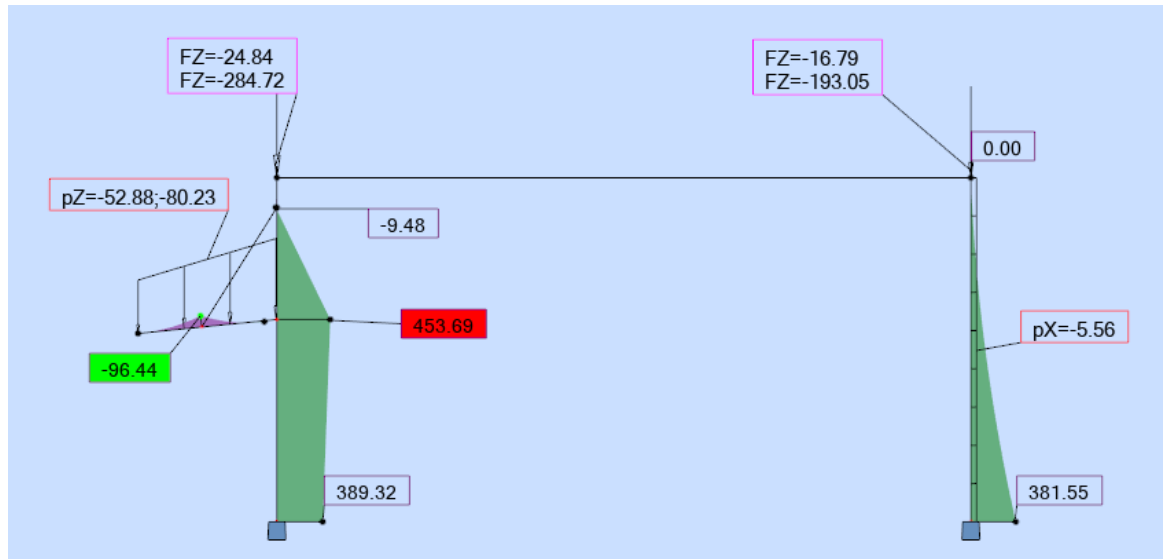


Kuva 4. Pilarin kuormitusala.

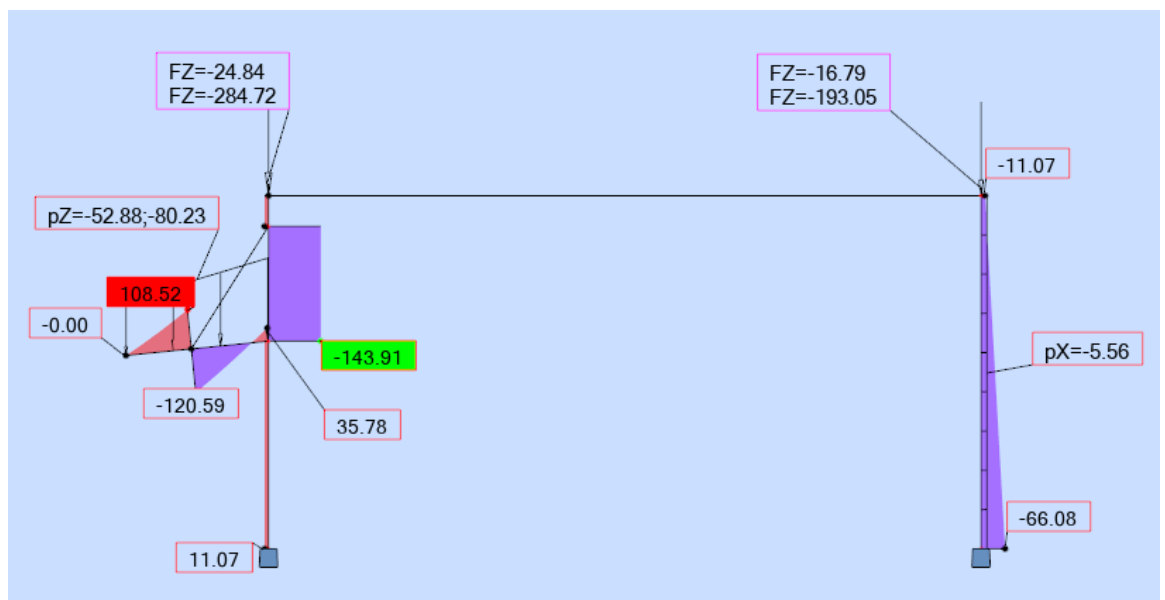
Kun pilarin kuormitusala ja siihen vaikuttavat voimat ovat laskettu ja selvitetty voidaan pilarissa vaikuttavat voimat selvittää joko käsinlaskien tai tietokoneohjelmia apuna käyttäen. Tässä opinnäytetyössä on käytetty Autodesk robot structural analysis -ohjelmaa. Ohjelman tuottamien laskelmien tulokset selviävät kuvista 8–10.



Kuva 5. Pilarien normaalivoimat murtorajatilamitoituksessa.



Kuva 6. Pilarien momentit murtorajatilamitoituksessa.



Kuva 7. Pilarien leikkausvoimat murtorajatilamitoituksessa.

Kokeillaan poikkileikkausta HEB320 pilariksi.

HEB320 poikkileikkausarvot:

$h = 320 \text{ mm}$

$I_y = 308,24 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

$b = 300 \text{ mm}$

$I_z = 92,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

$t_w = 11,5 \text{ mm}$

$I_t = 225,07 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

$t_f = 20,5 \text{ mm}$

$I_w = 2069 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$

$r = 27 \text{ mm}$

$W_{ply} = 2149 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$$A=16\,134\text{ mm}^2$$

$$f_y=355\text{ Mpa}$$

$$E=210\text{ GPa}$$

$$G=81\text{ GPa}$$

Profiili on puristettu ja taivutettu, mutta varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun määritetään poikkileikkausluokka puhtaan puristuksen mukaan. Lasketaan profiilin poikkileikkausluokka

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235\text{ MPa}}{f_y}} = \sqrt{\frac{235\text{ MPa}}{355\text{ MPa}}} = 0,814$$

Laipat

$$c_f = \frac{(b - t_w - 2r)}{2} = \frac{(300\text{ mm} - 11,5\text{ mm} - 2 \times 27\text{ mm})}{2} = 117,25\text{ mm}$$

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{117,5\text{ mm}}{20,5\text{ mm}} = 5,7 < 9 \times \varepsilon = 7,3 \quad \text{PL1}$$

Uuman puristus

$$c_w = h - 2t_f - 2r = 320\text{ mm} - 20,5\text{ mm} - 27\text{ mm} \times 2 = 245,5\text{ mm}$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{245,5\text{ mm}}{11,5\text{ mm}} = 21,3 < 33 \times \varepsilon = 26,8 \quad \text{PL1}$$

Uuman taivutus

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{245,5\text{ mm}}{11,5\text{ mm}} = 21,3 < 72 \times \varepsilon = 58,6 \quad \text{PL1}$$

Koko profiili on siis poikkileikkausluokaltaan 1 taulukoiden 7 ja 8 mukaan.

Taulukko 6. Poikkileikkausluokkien rajat (Rautaruukki 2012, 83).

Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat ^{a)}				
Taso-osan jännitysjaakauma (puristus positiivinen)							
1	$b/t \leq 72\epsilon$	$b/t \leq 33\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: b/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: b/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$				
2	$b/t \leq 83\epsilon$	$b/t \leq 38\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: b/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: b/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$				
Taso-osan jännitysjaakauma (puristus positiivinen)							
3	$b/t \leq 124\epsilon$ ^{c)}	$b/t \leq 42\epsilon$ ^{d)}	$kun \psi > -1: b/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ^{e)} $kun \psi \leq -1$ ^{f)} : $b/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	500
	ϵ	1,0000	0,9244	0,8136	0,7480	0,7148	0,6856
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	550	600	620	650	690	700
	ϵ	0,6537	0,6258	0,6157	0,6013	0,5836	0,5794

Taulukko 7. Poikkileikkausluokkien rajat (Rautaruukki 2012, 84).

Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat ^{a)}					
		Vapaa reuna on puristettu	Vapaa reuna on vedetty				
Taso-osan jännitys jakauma (puristus positiivinen)							
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$				
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$				
Taso-osan jännitys jakauma (puristus positiivinen)							
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ^{b)}	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_G}$ ^{c)}					
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	500
	ϵ	1,0000	0,9244	0,8136	0,7480	0,7148	0,6856
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	550	600	620	650	690	700
	ϵ	0,6537	0,6258	0,6157	0,6013	0,5836	0,5794

a) Varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun poikkileikkausluokka määritetään puhtaan puristuksen mukaan
b) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 13,96\epsilon$
c) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 21,29\epsilon\sqrt{k_G}$

3.3.2 Pilarin kestävyden määrittäminen

Kun poikkileikkausluokka on saatu selville, voidaan pilarin kestävyys määrittää käyttäen poikkileikkausluokka 1:sen kaavoja.

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ (Teräsrakenneyhdistys 2010, 14)}$$

Poikkileikkauksen puristuskestävyys

$$N_{c,Rd} = A \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 16134 \text{ mm}^2 \times \frac{355 \text{ MPa}}{1,0} = 5727,6 \text{ kN} > N_{Ed} = 575,77 \text{ kN}$$

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys:

$$M_{c,Rd} = W_{ply} \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2149 * 10^3 \text{ mm}^3 \times \frac{355 \text{ MPa}}{1,0} = 762,9 \text{ kNm}$$

Poikkileikkauksen uuman suuntainen leikkauskestävyys:

$$\eta = 1 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1, 6.2.6(3)})$$

$$h_w = h - 2t_f = 320 \text{ mm} - 20,5 \text{ mm} * 2 = 279 \text{ mm}$$

$$A_{v0} = \eta h_w t_w = 1 \times 279 \text{ mm} \times 11,5 \text{ mm} = 3208,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{v1} = A - 2b \times t_f + (t_w + 2r) \times t_f$$

$$A_{v1} = 16134 \text{ mm}^2 - 2 \times 300 \text{ mm} \times 20,5 \text{ mm} + (11,5 \text{ mm} + 2 \times 27 \text{ mm}) \times 20,5 \text{ mm} = 5176,8 \text{ mm}^2$$

$$A_v = \max(A_{v0}, A_{v1}) = 5176,8 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \times \frac{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = 5176,8 \text{ mm}^2 \times \frac{\left(\frac{355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}\right)}{1} = 1061,0 \text{ kN} > V_{Ed} = 143,91 \text{ kN}$$

Uuman lommahdusta ei tarvitse mitoitaa, koska profiili kuuluu poikkileikkausluokka 1:een. Tarkastetaan täytyykö poikkileikkaus mitoitaa taivutus-, normaali- ja leikkausvoimaa vastaan.

$$V_{Ed} = 143,91 \text{ kN} < 0,5 \times V_{pl,Rd} = 530,5 \text{ kN} \quad (\text{Teräsrakenneyhdistys 2010, 14})$$

Todetaan, että pilari tarkistetaan vain taivutukselle ja normaalivoimalle.

Pilarin nurjahduskestävyys voidaan nyt määrittää edellä laskettujen tietojen perusteella. Pilarin perustus oletetaan täysin jäykäksi ja pilarin yläpää rungon jäykistyksen ansiosta sivusiirtymättömäksi niveleksi, joten pilarin nurjahduspituuden kertoimeksi tulee poikkisuunnassa 0,7. Hallin pituussuunnassa pilarin heikompa suuntaa vasten, pilari on myös yläpäästään sivusiirtymätön nivel ja alapäästään momenttijäykkä, jolloin nurjahduskerroin on 0,7.

$$L = 10\,000 \text{ mm}$$

$$\gamma_{M1} = 1,0$$

$$L_{cr,y} = L * 0,7 = 10000 \text{ mm} * 0,7 = 7000 \text{ mm}$$

$$L_{cr,z} = L * 0,7 = 10000 \text{ mm} * 0,7 = 7000 \text{ mm}$$

$$N_{cr,y} = \pi^2 \times E \times \frac{I_y}{L_{cr,y}^2} = \pi^2 \times 210000 \text{ MPa} \times \frac{308,24 \times 10^6 \text{ mm}^4}{(7000 \text{ mm})^2} = 13038,0 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \pi^2 \times E \times \frac{I_z}{L_{cr,z}^2} = \pi^2 \times 210000 \text{ MPa} \times \frac{92,39 \times 10^6 \text{ mm}^4}{(7000 \text{ mm})^2} = 3907,0 \text{ kN}$$

Määritetään nurjahduskestävyys y- ja z-akselin suhteen määrittämällä ensin käytettävä nurjahduskäyrä.

$$\lambda_y = \sqrt{A \frac{f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{16134 \text{ mm}^2 \times \frac{355 \text{ MPa}}{13\,038\,000 \text{ N}}} = 0,66$$

Nurjahduskäyrä b $\alpha=0,34$ (Eriksson 2010, 34)

$$\Phi_y = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2] = 0,5[1 + 0,34 \times (0,66 - 0,2) + 0,66^2] = 0,79$$

$$\chi_y = \frac{1}{\left(\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}\right)} = \frac{1}{\left(0,79 + \sqrt{0,79^2 - 0,66^2}\right)} = 0,82$$

$$N_{yb,Rd} = \frac{\chi_y A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,82 \times 16134 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}}{1,0} = 4696,6 \text{ kN} > N_{Ed} = 575,77 \text{ kN}$$

Ehto toteutuu, joten poikkileikkaus kestää sitä rasittavan normaalivoiman murtorajatilassa. Seuraavaksi tarkastetaan pilarin heikompi suunta.

$$\lambda_z = \sqrt{A \frac{f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{16134 \text{ mm}^2 \times \frac{355 \text{ MPa}}{3907000 \text{ N}}} = 1,21$$

Nurjahduskäyrä c

$\alpha=0,49$ (Eriksson 2010, 34)

$$\Phi_z = 0,5[1 + \alpha \times (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2] = 0,5[1 + 0,49 \times (1,21 - 0,2) + 1,21^2] = 1,48$$

$$\chi_z = \frac{1}{\left(\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \lambda_z^2}\right)} = \frac{1}{\left(1,48 + \sqrt{1,48^2 - 1,21^2}\right)} = 0,43$$

$$N_{zb,Rd} = \frac{\chi_z A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,43 \times 16134 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}}{1,0} = 2462,9 \text{ kN} > N_{Ed} = 575,77 \text{ kN}$$

Pilarin kiepahduskestävyys.

Lasketaan poikkileikkauksen kriittinen momentti. Kun poikkileikkaus on kaksoissymmetrinen

$$M_{cr} = C1 \times \left[\frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr}^2} \right] \times \left[\left(\frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{cr}^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C2 \times zg)^2 \right)^{0,5} - (C2 \times zg) \right]$$

missä $L_{cr} = 7000 \text{ mm}$

$zg = h/2 = 160 \text{ mm}$

$C1, C2 =$ Kriittisen kiepahduksen kertoimet

Kertoimet saadaan taulukoista laskemalla ensin μ - ja ψ -arvo.

$$\mu = \frac{FL}{4M} = \frac{167,86 \times 10^3 \text{ N} \times 10000 \text{ mm}}{4 \times 389,32 \times 10^6 \text{ Nmm}} = 1,08$$

kun pilarin päässä momentti $0 \text{ kNm} \rightarrow \psi = 0$

$C1 = 1,28$ (Accesses Steel 2008, 10)

$C2 = 0,32$ (Accesses Steel 2008, 11)

$$M_{cr} = 1,28 \times \left[\frac{\pi^2 \times 210000 \text{ MPa} \times 92,39 \times 10^6 \text{ mm}^4}{(7000 \text{ mm})^2} \right] \times \left[\left(\frac{2069 \times 10^9 \text{ mm}^6}{92,39 \times 10^6 \text{ mm}^4} + \frac{(7000 \text{ mm})^2 \times 81000 \text{ MPa} \times 225,07 \times 10^4 \text{ mm}^4}{\pi^2 + 210000 \text{ MPa} \times 92,39 \times 10^6 \text{ mm}^4} + (0,32 \times 160 \text{ mm})^2 \right)^{0,5} - (0,32 \times 160 \text{ mm}) \right]$$

$$M_{cr} = 1083,0 \text{ kNm}$$

Kiepahdusta ei tarvitse tarkastaa, jos seuraavat ehdot täyttyvät

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ply} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2149 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ MPa}}{1083,0 \times 10^6 \text{ Nmm}}} = 0,84 \leq \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Toista ehtoa ei tarvitse tarkastaa, sillä ensimmäinen ehto ei täyty. Kiepahduskestävyys on tarkastettava.

Kiepahduskäyrä a $\alpha_{LT} = 0,21$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21 \times (0,84 - 0,2) + 0,84^2] = 0,92$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\left(\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2} \right)} = \frac{1}{\left(0,92 + \sqrt{0,92^2 - 0,84^2} \right)} = 0,78$$

Kiepahduskestävyys saadaan kaavasta

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_{ply} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,82 \times 2149 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ MPa}}{1,0} = 625,6 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{453,69 \text{ kNm}}{625,6 \text{ kNm}} = 0,73$$

Valittu pilari ei kiepahda murtorajatilamitoituksessa. Pilarin käyttöaste kiepahdukselle on 73 %.

Seuraavaksi varmistetaan pilarin nurjahduskestävyys yhdistetyssä taivutuksessa ja puristuksessa SFS-EN 1993-1-1 Liite B:n mukaisesti.

$$L = 10\,000 \text{ mm}$$

$$M_h = 389,32 \text{ kNm}$$

$$M_s = 453,69 \text{ kNm}$$

$$\alpha_s = \frac{M_h}{M_s} = \frac{389,32 \text{ kNm}}{453,69 \text{ kNm}} = 0,86$$

$$C_{m,LT} = 0,9 + 0,1 \times \alpha_s = 0,9 + 0,1 \times 0,86 = 0,986$$

Sivusiirtyvälle pilarille valitaan ekvivalentin momentin kerroin $c_{my} = 0,9$

$$N_{Rk} = N_{c;Rd} = 5727,6 \text{ kN}$$

$$k_{yy1} = c_{my} \left[1 + (\lambda_y - 0,2) \left(\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 0,9 \left[1 + (0,82 - 0,2) \left(\frac{575,77 \text{ kN}}{\frac{0,82 \times 5727,6 \text{ kN}}{1,0}} \right) \right] = 0,97$$

$$k_{yy2} = c_{my} \left(1 + \frac{0,8 N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,9 \left(1 + \frac{0,8 \times 575,77 \text{ kN}}{0,82 \times \frac{5727,6 \text{ kN}}{1,0}} \right) = 0,99$$

$$k_{yy} = \min(k_{yy1}, k_{yy2}) = 0,97$$

$$k_{zy1} = 1 - \left[\frac{0,1 \lambda_z N_{Ed}}{(C_{m,LT} - 0,25) \chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 1 - \left[\frac{0,1 \times 1,21 \times 575,77 \text{ kN}}{(0,986 - 0,25) \times 0,43 \times \frac{5727,6 \text{ kN}}{1,0}} \right] = 0,96$$

$$k_{zy2} = \left[1 - \left(\frac{0,1}{C_{m,LT} - 0,25} \right) \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = \left[1 - \left(\frac{0,1}{0,986 - 0,25} \right) \left(\frac{575,77 \text{ kN}}{1,21 \times \frac{5727,6 \text{ kN}}{1,0}} \right) \right] = 0,99$$

$$k_{zy} = \max(k_{zy1}, k_{zy2}) = 0,99$$

Jos seuraavat ehdot täyttyvät, niin valittu poikkileikkaus HEB320 kestää yhdistetyn taivutuksen ja puristuksen suunnittelijan valitseman kuormitustapauksen osalta.

$$M_{y,Rk} = M_{c,Rd} = 762,9 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed} = N_{Ed} = 575,77 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{0,Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{575,77 \text{ kN}}{0,82 \frac{5727,6 \text{ kN}}{1,0}} + 0,97 \times \frac{453,69 \text{ kNm}}{0,78 \frac{762,9 \text{ kNm}}{1,0}} = 0,86 < 1,0$$

$$\frac{N_{0,Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{575,77 \text{ kN}}{0,43 \frac{5727,6 \text{ kN}}{1,0}} + 0,99 \times \frac{453,69 \text{ kNm}}{0,78 \frac{762,9 \text{ kNm}}{1,0}} = 0,97 < 1,0$$

Pilari kestää sille tulevat kuormat murtorajatilassa 97% käyttöasteella.

Samalla mitoitustyyliä käydään läpi kaikki pilarit ja voidaan todetaan, että muut pilarit lipan puolella kestävät HEB280 profiililla ja toisella puolella rakennusta pilarit kestävät HEA280 profiililla. Pilareita ja muita rakenneosia ei kannata valmistuskustannuksista johtuen lähteä liikaa optimoimaan. Optimointi kannattaa suorittaa vain selvästi kevyemmin kuormitetuille rakenneosille.

3.4 Kattoristikon mitoitus

Kattoristikon mitoitus aloitetaan olettamalla ristikko palkiksi. Ristikon korkeuden voi määrittää itse, mutta tähän on olemassa lähtötiedot. Ristikon korkeus valitaan kaavasta: nyrkisääntöjä, joita käyttäen saa ristikon mallintamisen

$$h_{ristikko} = \frac{L}{10}$$

missä L = ristikon jänneväli

$$h_{ristikko} = \frac{19\,730 \text{ mm}}{10} = 1973 \text{ mm}$$

3.4.1 Kattoristikon kuormat

Mitoitetaan kattoristikko raskaiten kuormitetun ristikon mukaan. Ristikon k-jako 6,5 m ja jänneväli 19,73 m. Kattoristikoihin vaikuttavat kuormat ovat lumi, rakenteiden omat kuormat ja tuuli. Kattotuolien alustavassa mitoituksessa lasketaan todellisuudesta poiketen kuormat tasaisesti jakautuneeksi kuormaksi yläpaarteelle. Mitoituksessa tulee tarkastaa seuraavat kuormitusyhdistelmät

- KY1 (pysyvä aikaluokka)

$$KY1 = 1,35 \times g_k$$

missä g_k = rakenteista aiheutuvat omat kuormitukset

$$g_k = g_{k,elementti} + g_{k,zorsi} + g_{k,kattotuoli}$$

$$g_k = 0,14 \frac{kN}{m^2} \times 6,5 m + \frac{0,17 \frac{kN}{m} \times 6,5 m \times 9}{19,73 m} + 0,75 \frac{kN}{m} = 2,05 \frac{kN}{m}$$

$$KY1 = 1,35 \times 2,05 \frac{kN}{m} = 2,77 \frac{kN}{m}$$

- KY2 (keskipitkä aikaluokka)

$$KY2 = 1,15 \times g_k + 1,5 \times q_{k,lumi}$$

$$KY2 = 1,15 \times 2,05 \frac{kN}{m} + 1,5 \times 6,5 m \times 1,8 \frac{kN}{m^2} = 19,91 \frac{kN}{m}$$

- KY3 (hetkellinen aikaluokka)

$$KY3 = 1,15 \times g_k + 1,5 \times q_{k,lumi} + 1,5 \times \psi_{0,tuuli} \times q_{k,tuuli}$$

missä $\psi_{0,tuuli}$ = Tuulikuorman yhdistelykerroin (0,7)

$$KY3 = 1,15 \times 2,05 \frac{kN}{m} + 1,5 \times 11,7 \frac{kN}{m} + 1,5 \times 0,7 \times 6,5 m \times 0,95 \frac{kN}{m^2} = 26,39 \frac{kN}{m}$$

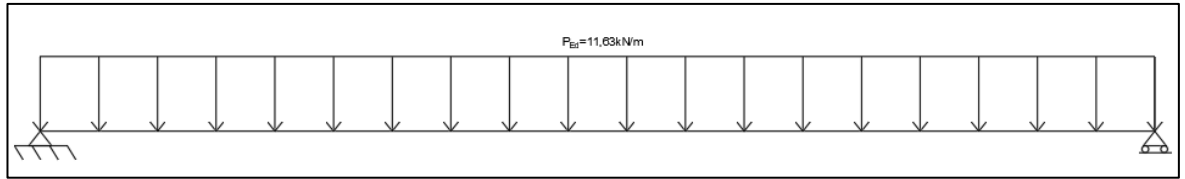
- KY4 (hetkellinen aikaluokka)

$$KY4 = 1,15 \times g_k + 1,5 \times q_{k,tuuli} + 1,5 \times \psi_{0,lumi} \times q_{k,lumi}$$

missä $\psi_{0,lumi}$ = lumikuorman yhdistelykerroin (0,6)

$$KY4 = 1,15 \times 2,05 \frac{kN}{m} + 1,5 \times 6,18 \frac{kN}{m} + 1,5 \times 0,6 \times 11,7 \frac{kN}{m} = 22,16 \frac{kN}{m}$$

Koko kehän mitoituksessa käytetään jo pilarien alustavassa mitoituksessa käytettyä kuormitusyhdistelmä 3:sta hetkellisessä aikaluokassa lumi mitoittavana kuormana. Riskin kuorman jakautuminen on esitetty kuvassa 11.



Kuva 8. Ristikon kuormitukset.

Ristikon yläpaarteen alustavan profiilivalinnan voi tehdä olettamalla ristikon palkiksi ja laskemalla momentin avulla ristikon yläpaartetta rasittavan puristuksen kaavasta

$$N_{0,Ed} = \frac{M_{max}}{h_{ristikko}}$$

missä M_{max} = maksimimomentti

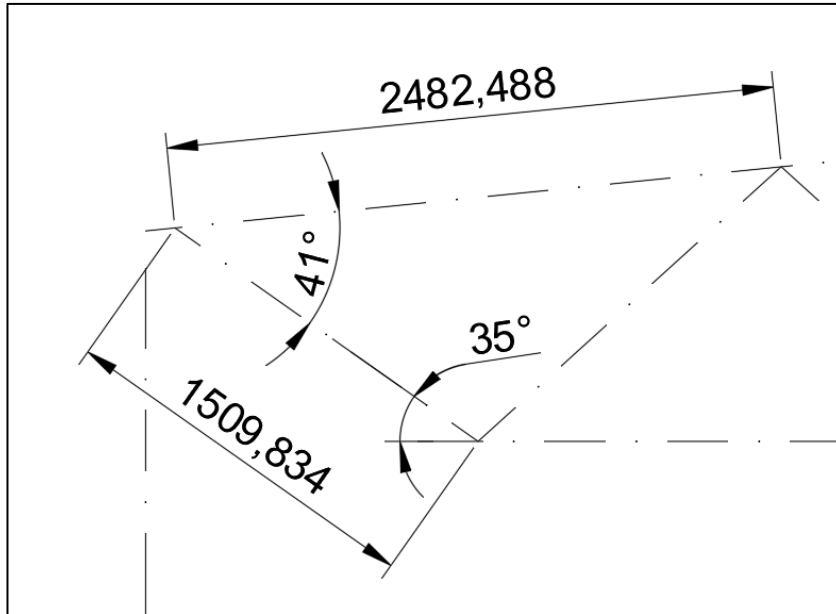
$$M_{max} = \frac{P_{Ed} \times L^2}{8} = \frac{11,63 \frac{kN}{m} \times (19,73 m)^2}{8} = 565,91 kNm$$

$$N_{0,Ed} = \frac{565,91 kNm}{2,0 m} = 282,96 kN$$

Kun yläpaarteen teoreettinen puristus on laskettu, lasketaan myös ristikon tuen viereiselle sauvalle alustava mitoitusarvo kaavasta

$$N_{i,Ed} = 0,5 \times P_{Ed} \times L \times \sqrt{2} = 164,47 kN$$

Ristikon korkeuden ollessa 1 973 mm ja sauvojen ohjeellinen kulmasuositus välillä 30° – 60° piirretään ristikon yksinkertainen geometria AutoCAD LT 2018 -ohjelmalla nurjahduspituuksien laskemiseksi. (SSAB 2016, 432.) Kuvassa 12 on esitetty ensimmäisen ja toisen sauvan geometria.



Kuva 9. Ensimmäisen sauvan ja ylä- ja alapaarteen välinen geometria.

Yläpaarteen ja ensimmäisen sauvan nurjahdus pituudet saadaan laskettua käyttäen taulukko 7:n nurjahduskertoimia ja kuvan 7 geometria tietoja. Sauvajako on jaettu ristikon paarteelle tasan, joten 2 482 mm on sama myös yläpaarteen puristetuimmalla osalla keskellä. Nurjahduspituudet saadaan kaavoista laskien taulukon 9 mukaan

$$L_{cr,yp} = 1,0 \times L_{yp}$$

$$L_{cr,yp} = 2482 \text{ mm}$$

$$L_{cr,s} = 0,9 \times L_s$$

$$L_{cr,s} = 0,9 \times 1510 \text{ mm} = 1359 \text{ mm}$$

Etsitään rakenneputkikäsikirjan taulukosta 11.1.2 yläpaarteeksi sopivat putkiprofiilit käyttäen nurjahduspituutta taulukosta 9. Valitaan yläpaarteen profiiliksi 150 x 100 x 8 ja sauvoiksi 70 x 70 x 5 (SSAB 2016).

Valitsemalla suorakaiteen muotoiset profiilit ylä- ja alapaarteiksi mahdollistaa se sauvojen geometrian sommittelun siten, että sauvojen ja yläpaarteen välinen leikkauspiste risteää paarteiden keskilinjalla. Näin tehtynä sauvoissa vaikuttavat veto- ja puristusvoimat

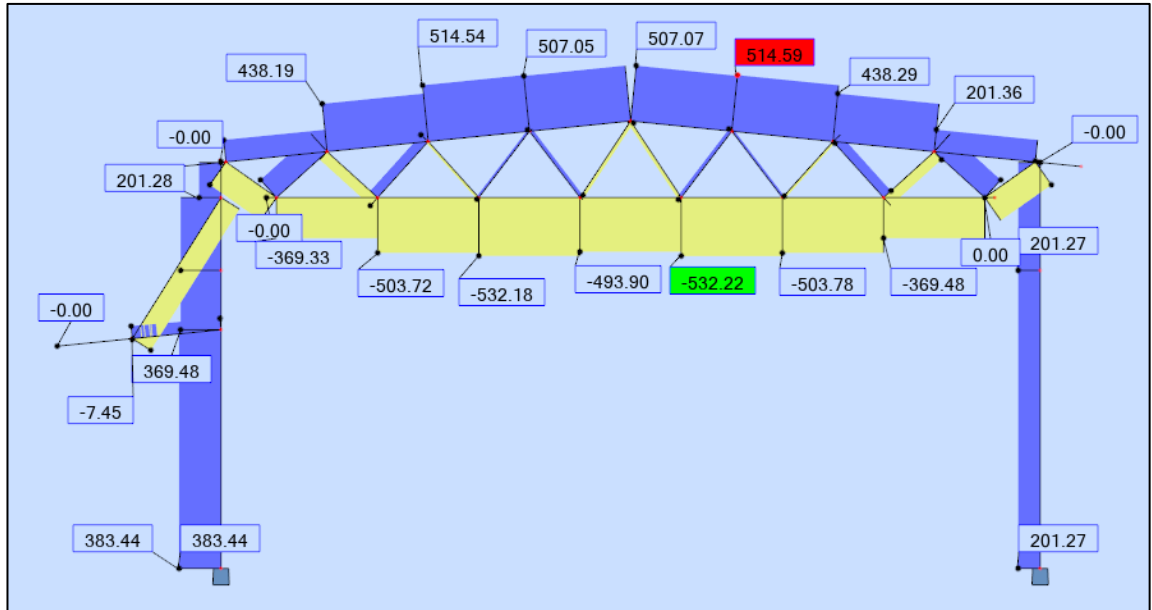
ei aiheuta momenttia yläpaarteeseen. Tämä onnistuu myös neliöprofiililla riippuen sauvojen kulmista, mutta usein sauvoja joutuu tätä optimaalista tilannetta tavoiteltaessa liittämään eli koloamaan. Tämä on konepajavalmistuksessa suuri kustannus, jota tulee yrittää välttää. Sauvat limittäessä alkavat myös puristamaan/vetämään toisiaan, mikä aiheuttaa sauvoihin momenttia, jonka jälkeen sauvojen mitoitus tulee tarkastaa $M + N$ -yhteisvaikutustekijän avulla. Sauvan ja paarteiden valinnan jälkeen on profiili myös hyvä tarkastaa terästukkureiden varastolistoista rakenneputkikäsikirjan erittäin kattavan profiilivalikoiman vuoksi.

Taulukko 8. Ristikon rakenneosien nurjahduspituudet (Kouhi 2015b, 187).

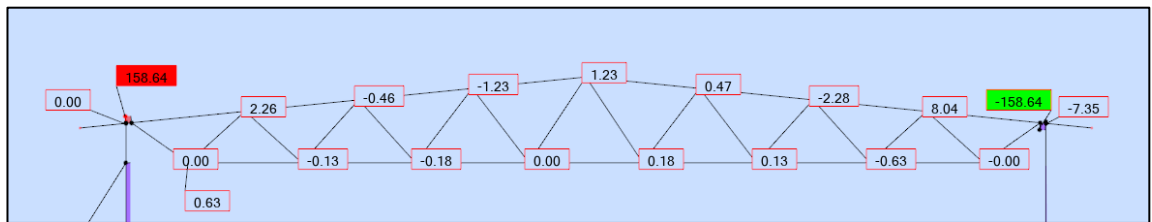
Tapaus	Nurjahduspituus
Paarresauva on I- tai H-profiili: - nurjahdus ristikon tasossa	$L_{cr} = 0,9L$ missä L on paarteiden systeemipituus tarkasteltavassa tasossa
Paarresauva on I- tai H-profiili: - nurjahdus ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa	$L_{cr} = 1,0L$ missä L on paarteiden systeemipituus tarkasteltavassa tasossa
Uumasauvat ristikon tasossa: - jos paarteet antavan riittävän tuennan ja uumasauvan liitos paarteeseen on riittävän jäykkä (vähintään kaksi ruuvia ruuviinnitystä käytettäessä).	$L_{cr} = 0,9L$ missä L on uumasauvan systeemipituus tarkasteltavassa tasossa
Uumasauvat ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa:	$L_{cr} = 1,0L$ missä L on uumasauvan systeemipituus tarkasteltavassa tasossa
Kulmateräkset ristikon uumasauvoina:	Ks. standardin SFS-EN 1993-1-1 kohta BB.1.2.
Muut tapaukset:	$L_{cr} = 1,0L$ missä L on systeemipituus (joko uumasauva tai paarre) tarkasteltavassa tasossa

Kun ristikossa käytettävät rakenneosat on määritetty alustavasti, ristikko piirretään valmiiksi ja mallinnetaan se Autodesk robot structural analysis -ohjelmalla, jotta käytettävät rakenneosat voidaan todeta rakenteelle määrätty vaatimukset täyttäväksi.

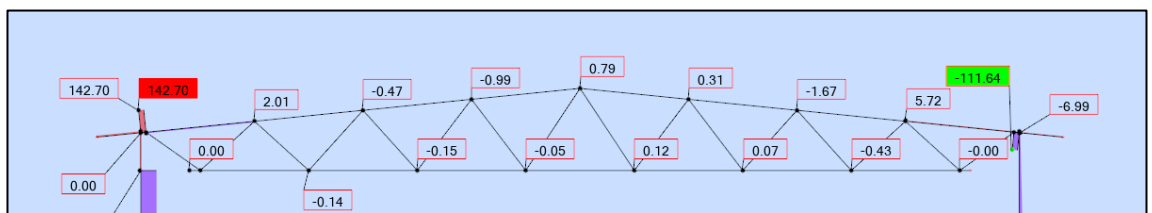
Kuormitusyhdistelmäksi valittiin hetkellinen aikaluokka lumi määrävänä ja tämän lisäksi ristikko täytyy tarkastaa vähentäen oikean lappen lumi kuormaa puolella. Vasemmalle lappeelle tätä ei tehdä, sillä lipan vuoksi lumen putoaminen katolta lipalle estetään lumiesteillä. Ristikossa vaikuttavat normaali- ja leikkausvoimat on esitetty kuvioissa 5–7.



Kuvio 5. Normaalivoimat murtorajatilamitoituksessa.



Kuvio 6. Leikkausvoimat murtorajatilamitoituksessa.



Kuvio 7. Leikkausvoimat murtorajatilamitoituksessa lumikuorma 100% / 50%.

3.4.2 Yläpaarre

Tarkastetaan ensin yläpaarten rakenneputken 150x100x8 kestävyys. Profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 1. Ristikön geometrian ansiosta yläpaarteessa vaikuttavat voimat keskellä ristikköä ovat pelkkää puristusta. Poikkileikkauksen lujuuteen perustuva kestävyys

$$N_{c,Rd} = \frac{A_0 \times f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{3524 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}}{1} = 1251,02 \text{ kN}$$

Siirrytään poikkileikkauksen nurjahdustarkasteluun. Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$$

missä E = teräksen kimmokerroin 210 GPa

I = jäyhyysmomentti $1008 \times 10^4 \text{ mm}^4$ (SSAB 2016.)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \times 210 \text{ 000 MPa} \times 1008 \times 10^4 \text{ mm}^4}{(2482 \text{ mm})^2} = 3391 \text{ kN}$$

Sauvan hoikkuusluku

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_0 f_{y,0}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3524 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}}{3391 \times 10^3 \text{ N}}} = 0,6074 > 0,2$$

Lasketaan nurjahduksen pienennystekijä

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

missä α = sovellettavan nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä (kylmämuovatut rakenneputket: $\alpha = 0,49$)

$$\Phi = 0,5 \times [1 + 0,49 \times (0,6074 - 0,2) + 0,6074^2] = 0,7843$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,7843 + \sqrt{0,7843^2 - 0,6074^2}} = 0,7809$$

Putken nurjahduskestävyys saadaan lasketuksi kaavasta

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A_0 \times f_{y,0}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,7809 \times 3524 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}}{1} = 976,92 \text{ kN}$$

Yläpaarteen käyttöaste on mitoittavassa kuormitusyhdistelmässä

$$\frac{N_{0,Ed}}{N_{b,Rd}} \times 100 = \frac{514,59 \text{ kN}}{976,92 \text{ kN}} \times 100 = 52,7\%$$

3.4.3 Alapaarre

Profiiliksi valitaan ristikon valmistamisen kustannuksien minimoimiseksi saman levyinen profiili kuin yläpaarre. Tämä mahdollistaa osien kokoonpanon siten, että osat voidaan ennen kokoonpanohitsausta asettaa toisiensa päälle ilman erikseen asetettavia korokke-paloja.

Alapaarteeseen kohdistuu pelkkää vetoa, joten alapaarteen kestävyys saadaan lasket-tua suoraan pinta-alan suhteen kaavasta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{ap} \times f_{y,ap}}{\gamma_{M0}}$$

missä A_{ap} = alapaarteen profiilin pinta-ala

$f_{y,ap}$ = alapaarteen profiilin myötölujuus

Kun alapaarteessa vaikuttava voima tiedetään, voidaan kaava muuttaa sellaiseen muo-toon mistä saadaan tietää poikkileikkauksen vähimmäisala:

$$A_{ap} = \frac{N_{t,Rd} \times \gamma_{M0}}{f_{y,ap}} = \frac{532220 \text{ N} \times 1}{355 \text{ MPa}} = 1499,21 \text{ mm}^2$$

Valitaan alapaarteeksi profiili 120 x 100 x 5, jonka käyttöaste saadaan lasketuksi pinta-alojen mukaan kaavasta:

$$\frac{A_{ap}}{A_{ap,val}}$$

missä $A_{ap,val}$ = 120 x 100 x 5 profiilin poikkileikkausala 0 (SSAB 2016.)

$$\frac{1499,21 \text{ mm}^2}{2036 \text{ mm}^2} = 0,74$$

Alapaarteen käyttöaste 120 x 100 x 5 rakenneputkella 74%.

3.4.4 Uumasauvat

Ristikon kaikki sauvat mitoitetaan puristetuinman sauvan mukaan joka tässä tapauk-sessa on toinen sauva vasemmalta ($N_{Ed} = 217,33 \text{ kN}$).

Puristetun sauvan mitoitusehto on

$$N_{Ed,2} \leq N_{b,Rd,2} \text{ (SSAB Rakenneputki käsikirja, 73)}$$

$$N_{b,Rd,2} = \frac{\chi A_2 f_{y,2}}{\gamma_{M2}}$$

missä χ = nurjahduskestävyyden pienennystekijä

A_2 = poikkileikkauksen pinta-ala

$f_{y,2}$ = materiaalin myötölujuus

$$\chi = 1,0 \quad \text{kun } \bar{\lambda} \leq 0,2$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad \text{kun } \bar{\lambda} > 0,2$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_2 f_{y,2}}{N_{cr,2}}}$$

missä $N_{cr,2}$ = kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma

$$N_{cr,2} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 * 210000 \text{ MPa} * 84,63 * 10^4 \text{ mm}^4}{(0,9 * 1665 \text{ mm})^2} = 781,14 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{1236 \text{ mm}^2 * 355 \text{ MPa}}{781140 \text{ N}}} = 0,7495$$

$$\Phi = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * [1 + 0,49(0,7495 - 0,2) + 0,7495^2]$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,49(0,7495 - 0,2) + 0,7495^2] = 0,9155$$

Ensimmäisen puristetun uumasauvan nurjahduskestävyys saadaan lasketuksi kaavasta

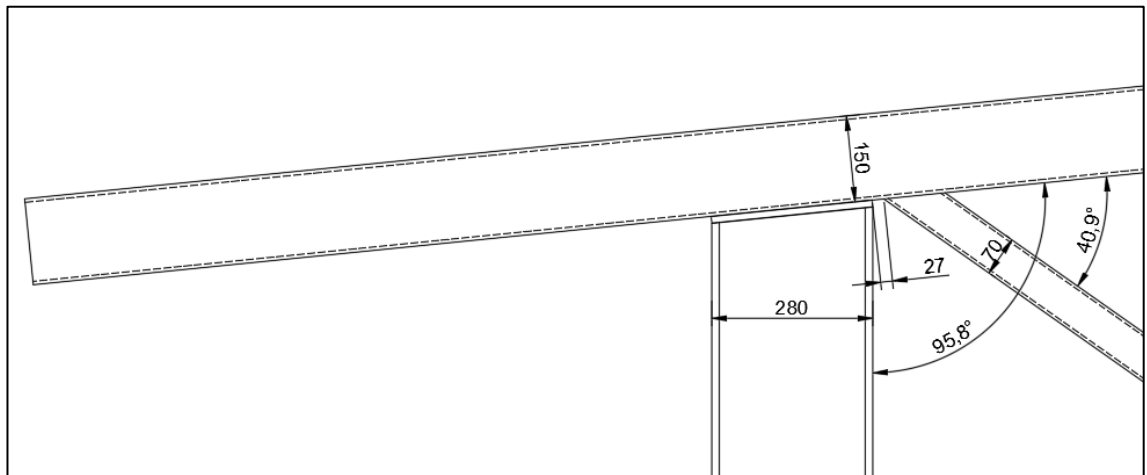
$$N_{b,Rd,2} = \frac{\chi * A_2 * f_{y,2}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,9155 * 1236 \text{ mm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 401,7 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,2}}{N_{b,Rd,2}} = \frac{217,33 \text{ kN}}{401,7 \text{ kN}} = 0,54$$

Ensimmäisen puristetun sauvan käyttöaste on murtorajatilassa 54%. Tällä kaavalla voitaisiin käydä jokainen puristettu sauva läpi ja alapaarteen mitoitustyyllillä kaikki vedetyt sauvat. Valmistuskustannukset kuitenkin usein muuttuvat suuremmiksi kuin optimoinnista saavutettava hyöty, jos valitun profiilin seinämävahvuuksia muutetaan 1–2 millimetrin välillä.

3.4.5 Ristikon kuormitetuimmat liitokset

Ristikon tukipisteiden läheisyyteen syntyvät suuret leikkausvoimat. Tarkastetaan seuraavaksi ristikon yläpaarteiden kestävyys tuella ensin ilman ylimääräistä vahvikelevyä. Liitos tuella on esitetty kuvassa 13.



Kuva 10. Ristikon liitos tuella.

Liitoksessa vaikuttavat voimat ovat otettu Autodesk robot structural analysis -ohjelmasta kuvioista 3–5.

$V_{Ed} = 158,64 \text{ kN}$ (Yläpaarre, leikkausvoima)

$N_{0,Ed} = -201,36 \text{ kN}$ (Yläpaarre, puristusta)

$N_{1,Ed} = -383,44 \text{ kN}$ (Pilari, puristusta)

$N_{2,Ed} = 254,56 \text{ kN}$ (Uumasauva, vetoa)

Pilari:

Uumasauva:

Yläpaarre:

$A_1 = 13136 \text{ mm}^2$

$A_2 = 1236 \text{ mm}^2$

$A_0 = 3524 \text{ mm}^2$

$t_1 = 18 \text{ mm}$

$t_2 = 5 \text{ mm}$

$t_0 = 8 \text{ mm}$

$h_1 = 280 \text{ mm}$

$h_2 = 70 \text{ mm}$

$h_0 = 150 \text{ mm}$

$b_1 = 280 \text{ mm}$

$b_2 = 70 \text{ mm}$

$b_0 = 100 \text{ mm}$

$$f_{y,1} = 355 \text{ MPa}$$

$$f_{y,2} = 355 \text{ MPa}$$

$$f_{y,0} = 355 \text{ MPa}$$

$$L_1 = 9980 \text{ mm}$$

$$L_2 = 1381 \text{ mm}$$

$$W_{el,y,0} = 111\,300 \text{ mm}^3$$

$$\theta_1 = 95,8^\circ$$

$$\theta_2 = 40,9^\circ$$

Uumasauvojen geometria:

$$g = 24 \text{ mm} \quad (\text{Sauvojen vapaaväli})$$

$$m_i = 2 \quad (\text{Sauvojen lukumäärä tarkasteltavassa liitoksessa})$$

Parametrit:

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{2 \times m_i \times b_0} = \frac{280 \text{ mm} + 70 \text{ mm} + 280 \text{ mm} + 70 \text{ mm}}{2 \times 2 \times 100 \text{ mm}} = 1,75$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 * t_0} = \frac{100 \text{ mm}}{2 \times 8 \text{ mm}} = 6,25$$

Osavarmuusluvut:

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ (SSAB 2016, taulukko 2.1)}$$

$$\gamma_{M1} = 1,0 \text{ (SSAB 2016, taulukko 2.1)}$$

$$\gamma_{M5} = 1,0 \text{ (SSAB 2016, taulukko 2.1)}$$

Voimassaoloehdot ja liitokselle yleisesti (SSAB 2016, taulukko 11.3.1)

$$30^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$$

$$t_i \geq 2,5 \text{ mm}$$

$$L_2 = 1381 \text{ mm} \geq 6 \times h_2 = 420 \text{ mm}$$

$$g = 27 \text{ mm} \geq t_1 + t_2 = 23 \text{ mm}$$

$$\frac{g}{b_0} = 0,27 \geq 0,5 * (1 - \beta) = -0,375$$

$$\frac{g}{b_0} = 0,27 \leq 1,5 * (1 - \beta) = -1,125$$

Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat: (SSAB 2016, taulukko 11.3.1)

$$\frac{b_2}{b_0} = 0,7 \geq 0,25$$

$$\frac{b_2}{t_2} = 14 \leq 35$$

$$0,5 \leq \frac{h_2}{b_2} = 1 \leq 2,0$$

Paarteet: (SSAB 2016, taulukko 11.3.1)

$$\frac{b_0}{t_0} = 12,5 \leq 35$$

$$\frac{h_0}{t_0} = 18,75 \leq 35$$

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} = 1,5 \leq 2,0$$

Paarteen pinnan myötääminen:

$$e = 95 \text{ mm}$$

$$\sigma_{0,c} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} = \frac{-201\,360 \text{ N}}{3524 \text{ mm}^2} = -57,14 \text{ MPa}$$

$$M_{0,Ed} = N_{0,Ed} \times e = -201,36 \text{ kN} \times 0,095 \text{ m} = -19,13 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{0,t} = \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,y,0}} = \frac{-19,13 \times 10^6 \text{ Nmm}}{111\,300 \text{ mm}^3} = 171,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{0,Ed} = \sigma_{0,t} - \sigma_{0,c} = -171,88 \text{ MPa} - (-57,14 \text{ MPa}) = -114,74 \text{ MPa}$$

Paarteen pinnassa on vetoa, joten $k_n = 1,0$ (SSAB 2016, taulukko 11.3.1)

$$\eta = \frac{h_2}{b_0} = 0,7$$

$$\beta = \frac{b_2}{b_0} = 0,7$$

Kun $\beta \leq 0,85$ saadaan paarteen pinnan myötääminen laskettua kaavasta:

$$N_{2,Rd} = \frac{k_n \times f_{y,0} \times t_0^2}{(1-\beta) \times \sin(\theta_2)} \times \frac{\frac{2 \times \eta}{\sin(\theta_2)} + 4\sqrt{1-\beta}}{\gamma_{M5}} \text{ (SSAB 2016, taulukko 11.3.1)}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{1,0 \times 355 \text{ MPa} \times (8 \text{ mm})^2}{(1-0,7) \times \sin(40,9^\circ)} \times \frac{\frac{2 \times 0,7}{\sin(40,9^\circ)} + 4 \times \sqrt{1-0,7}}{1,0} = 500,75 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{254,56 \text{ kN}}{500,75 \text{ kN}} = 0,51$$

Yläpaarteen 150 x 100 x 8 putkiprofiili kestää murtorajatilamitoitus tarkastelussa paarteen pintaan kohdistuvan vetovoiman. Käyttöaste on 51%.

Seuraavaksi tarkastetaan yläpaarteen käyttöaste tuella vahvistamattomana.

$$N_{Ed} = -9,81 \text{ kN}$$

Puristus tuen puolella liitosta. Katsottu Auto-desk robot structural analysis -ohjelmasta.

$$e = 119 \text{ mm}$$

Epäkeskisyyys

$$M_{Ed} = V_{Ed} \times e = 158,64 \text{ kN} \times 0,119 \text{ m} = 18,88 \text{ kNm}$$

Yläpaarre kuuluu ensimmäiseen poikkileikkausluokkaan, joten profiilin poikkileikkauksen kestävydet lasketaan kaavoista (SSAB 2016, 456)

$$V_{c,rd} = \frac{A_0 \times \left(\frac{f_{y,0}}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{3524 \text{ mm}^2 \times \left(\frac{355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}\right)}{1} = 722,28 \text{ kN}$$

$$M_{c,rd} = \frac{W_{el,y,0} \times f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{111\,300 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ MPa}}{1} = 39,51 \text{ kNm}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A_0 \times f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{3524 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}}{1} = 1251,02 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,rd}} = \frac{158,64 \text{ kN}}{722,28 \text{ kN}} = 0,22 < 0,5$$

Leikkausta ei tarvitse huomioida taivutuskestävyydessä.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,rd}} = \frac{18,88 \text{ kNm}}{39,51 \text{ kNm}} = 0,48$$

M+N+V yhteisvaikutus paarteelle:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,rd}} + \frac{N_{Ed}}{N_{c,rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{c,rd}} = 0,71$$

150 x 100 x 8 yläpaarre kestää tuella vahvistamattomana 71% käyttöasteella.

3.4.6 Ristikön taipuma

Ristikön taipuma määritetään käyttörajatilassa käyttäen ominaisyhdistelmää lumi määrävänä kuormana. Tässä tapauksessa voidaan yksinkertaistettuna jakaa pistekuorma yläpaarteelle tasaisesti jakautuneeksi kuormaksi.

$$P_{Ed,ris} = G_k + q_{k,lumi} = 2,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 11,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 13,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Taipuman laskemista varten on ristikolle arvioitava jäyhyys. Ristikon jäyhyys arvioidaan kaavasta

$$I_{ris} = A_0 \times h_{ristikko}^2 \left[\frac{A_{ap}}{A_0} \right] + A_{ap} \times h_{ristikko}^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{A_{ap}}{A_0}} \right]^2$$

$$I_{ris} = 3524 \text{ mm}^2 \times (1973 \text{ mm})^2 \times \left[\frac{2036 \text{ mm}^2}{3524 \text{ mm}^2} \right] + 2036 \text{ mm}^2 \times (1973 \text{ mm})^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{2036 \text{ mm}^2}{3524 \text{ mm}^2}} \right]^2$$

$$I_{ris} = 157 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

Ristikon taipuma saadaan laskettua kaavasta

$$\Delta L = \frac{5P_{Ed,ris} \times L^4}{384 \times EI_{ris}} = \frac{5 \times 13,75 \frac{N}{mm} \times (19730 \text{ mm})^4}{384 \times 210000 \text{ MPa} \times 157 \times 10^8 \text{ mm}^4} = 8,2 \text{ mm}$$

Ristikon taipuman raja-arvo vesikatoissa ja välipohjissa (Kouhi 2015b, 177.)

$$\Delta L_{sall} = \frac{L}{300}$$

Taipuman ehto

$$\Delta L_{sall} = \frac{19730 \text{ mm}}{300} = 65,8 \text{ mm} \geq \Delta L = 8,2 \text{ mm}$$

Ristikko kestää kaikki sille asetetut vaatimukset murto- ja käyttörajatiloissa. Ristikosta tehtiin tietoisesti ylijäreä, sillä työn tilanneelle yritykselle materiaalikustannukset ovat vähäiset, mutta valmistuskustannukset korkeat.

4 LOPUKSI

Opinnäytetyön tavoitteena oli mitoittaa kantavan teräsrunгон pääosat noin 880 neliömetrin halliin. Tarvittavat rakenneosat mitoitettiin RIL 201-1-2017 ja eurokoodien mukaisesti. Saadut tulokset ja käytetyt kaavat tarkistetaan kuitenkin vielä kohteen pääsuunnittelijan kanssa ennen konepaja-, kokoonpano- ja asennuskuvien piirtämistä. Näin halutaan varmistaa, että pääsuunnittelija hyväksyy käytettävien profiilien poikkileikkaukset ja vältytään piirustusten ylimääräiseltä muokkaamiselta.

Opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään HEB- ja HEA-profiileita pilareina. Suurimman kuormituksen pilari oviaukolla tehdään HEB320 profiilista. Muut rakennuksen lipan puoleiset pilarit valmistetaan HEB280 profiilista ja rakennuksen toisen puolen kaikki pilarit HEA280 profiilista.

Ristikoiden yläpaarteet valmistetaan 150 x 100 x 8 profiilista, sauvat 70 x 70 x 5 profiilista ja alapaarre 120 x 100 x 5.

LÄHTEET

- Accesses Steel 2008. NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.05.2020] Saatavissa: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/SN003a-EN-EU.pdf>
- Eriksson, Erik 2010. Teräspalkkisilta, Siltaeurokoodikoulutus. WSP Finland Oy. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/sillat/eurocode/Eriksson_teraspalkkisilta.pdf
- Jackon 2020. Konesaumattava kattoelementti. [verkkoaineisto]. [viitattu 20.05.2020] Saatavissa: https://www.jackon.fi/media/esitteet/elementit/kattotuotteet/Jackon_Konesaumattava_Kattoelementti_2020.pdf
- Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Helsinki: Ympäristöministeriö. [Viitattu 22.05.2020]. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20RakMK-21758>
- Kouhi, Jouko 2015a. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. 1–5 Levyrakenteet. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- Kouhi, Jouko 2015b. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu 1–1 yleiset ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- Rakennusinsinööriliitto. 2017. RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Crano Oy.
- Rautaruukki Oyj. 2012. Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja. Keuruu: Rautaruukki Oyj.
- Ruukki 2020. Kevytorret seinärakenteisiin. [verkkoaineisto]. [viitattu 20.05.2020] Saatavissa: <https://www.ruukki.com/fin/b2b/tuotteet/kantavat-ja-muut-profiilit/kevytorret/light-weight-purlins-details/z-purlin>
- SSAB Europe Oy. 2016. SSAB Domex Tube Rakenneputket EN 1993-käsikirja. Keuruu: SSAB Europe Oy.
- Teräsrakenneyhdistys ry 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus.
- Teräsrakenneyhdistys. Teräsrakenneteollisuus. Rakentaminen teräksessä. [verkkoaineisto]. [viitattu 17.11.2020] Saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenneteollisuus/rakentaminen-teraksesta/>