

Mikko Nissinen

## **HAKELÄMPÖLAITOKSEN TERÄSRAKENTEEN MITOITUS**

# **HAKELÄMPÖLAITOKSEN TERÄSRAKENTEEN MITOITUS**

Mikko Nissinen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2021  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

---

Tekijä: Mikko Nissinen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Hakelämpölaitoksen teräsrakenteen mitoitus

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Steel Frame for Heating Plant

Työn ohjaaja: Kai Jokinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021

Sivumäärä: 43 + 11 liitettä

---

Opinnäytetyön aiheena oli mitoittaa Utajärvellä sijaitsevaan Orasko Oy:n uuteen sahatavaraa valmistavaan tuotantolaitokseen hakelämpölaitoksen teräsrunkorakenne. Työssä suunniteltiin ja mitoitettiin hakelämpölaitoksen teräsrakenne eurokoodistandardien mukaisesti. Kattorakenne haluttiin toteuttaa yleisesti käytetyn kattoristikkorakenteen sijasta yksinkertaisella ja valmistuskustannuksiltaan edullisella I-profiiliratkaisulla.

Rakenteelta vaadittavien ominaisarvojen määrittelyssä käytettiin SFS-EN 1990 -standardeja kestävyuden varmistamiseksi. Rakenteen mitoituksessa hyödynnettiin Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmistoa, jolla selvitettiin rakenteen siirtymät ja maksimijännitykset. Lopulliset materiaalivahvuudet määriteltiin ohjelman avulla. Teräsprofiilien taipumat käyttörajatilassa sekä murtorajatilat varmistettiin lisäksi lujuusopin ja ISO 1990 -standardien mukaisin laskelmin.

Useimmissa kohdissa käyttökelpoisuusvaatimukset käyttörajatilassa osoittautuivat teräsrakenteen määrääviksi mitoitettaviksi tekijöiksi. Murtorajatilatarkastelussa varmuus tuli olemaan näin ollen suuri rakenteen murtorajatilaan nähden ja myös käyttöasteet jäivät oletettua alhaisemmaksi.

Työn lopputuloksena saatiin mitoitettua teräsrakenne, joka täyttää toimeksiantajan antamat vaatimukset eurokoodistandardein. Kyseisellä mitoitetulla työllä ja rakennepiirroksilla voidaan selvittää mahdolliset teräsrakenteen materiaalikustannukset. Selvitetyjä rakenteeseen kohdistuvia momenteja ja jännityksiä voidaan hyödyntää liitoksien ja perustuksien mitoituksessa teräsrakenteelle myöhemmin.

---

Asiasanat: teollisuusrakennukset, teräsrakenteet, eurokoodit, rakennesuunnittelu

## **ALKULAUSE**

Kiitän toimeksiantajaani Orasko Oy:tä mahdollisuudesta teettää opinnäytetyö työpaikalla työnohessa. Kiitän myös suuresti ohjaavaa opettajaani Kai Jokista aktiivisesta panostuksesta opinnäytetyöni etenemisessä. Haluan myös kiittää muita projektissa olleita.

Oulussa 4.2.2021

Mikko Nissinen

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 LÄHTÖTIEDOT	9
2.1 Toimeksiantaja	9
2.2 Hakelämpölaite	9
2.3 Työn rajaus	9
2.4 Työn tavoitteet	10
2.5 Eurokoodit	11
3 KUORMIEN MITOITUS	12
3.1 Omapaino	12
3.2 Lumikuormat	13
3.3 Tuulikuormat	14
3.4 Rajatilamitoitus	19
3.5 Käyttörajatila	19
3.6 Murtorajatila	20
3.7 Kuormitusyhdistelmät	22
4 TERÄSRAKENTEEN MITOITUS JA LUJUUSANALYYSI	23
4.1 Rakenteen teräsprofiilien mitoitus	23
4.1.1 Palkin poikkileikkausluokka	23
4.1.2 Poikkileikkauksen laskenta	24
4.1.3 Puristuskestävyyden määrittäminen	25
4.1.4 Taivutusmomentti	25
4.1.5 Leikkausjännitys	26
4.1.6 Taivutus ja leikkaus	27
4.1.7 Kiepahduksen estäminen sivusuuntaisella tuella	27
4.1.8 Nurjahduskestävyys	29
4.2 Vinojäykisteet	32
4.3 Autodesk Robot Structural Analysis Professional lujuusanalyysit	33

4.4 Mitoitetut teräsprofiilit	37
5 YHTEENVETO	39
LÄHTEET	41
LIITTEET	43

## SANASTO

$A$	onnettomuuskuorma
$A_{ref}$	tuulikuorman vaikutusala
$C_e$	tuulensuojaisuuskerroin
$C_f$	voimakerroin
$C_s C_d$	rakennekerroin
$C_t$	lämpökerroin
$F_w$	kokonaistuulikuorma
$G$	pysyvät kuormat
$G_{(k.i)}$	pysyvän kuorman ominaisarvo
$i$	muuttuvan kuorman indeksi
$J$	pysyvän kuorman indeksi
$M_{ed}$	taivutusmomentin mitoitusarvo
$N_{ed}$	puristusvoiman mitoitusarvo
$N_{c.Rd}$	puristuskestävyyden mitoitusarvo
$q_p(h)$	maaston pinnan muodon mukaan modifioitu nopeuspaine
$s$	lumen ominaiskuormanarvo
$S_k$	maassa olevan lumikuorman ominaisarvo
$Q$	muuttuvat kuormat, kuten tuuli ja lumikuorma
$Q_{(k.i)}$	muun kuorman muuttuvan kuorman ominaisarvo
$Q_{(k.1)}$	määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$V_{ed}$	pilarin alapäihin vaikuttava kaikkien pystysuuntaisten voimien mitoitussarvo
$V_d$	tuulen modifioimaton peruspaine
$\mu_i$	lumikuorman muotokerroin
”+”	lausekkeen termien yhdistämistä
$Y_{G.j}$	pysyvän kuorman osavarmuusluku
$Y_{Q.1}$	määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$Y_{Q.i}$	muun muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$\Psi_{0.1}$	määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\Psi_{0.i}$	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\xi_j$	epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena mitoitetaan Utajärvellä sijaitsevaan Orasko Oy:n uuteen sahatavaraa valmistavaan tuotantolaitokseen hakelämpölaitoksen teräsrunkorakenne. Yrityksen tavoite on pyrkiä omalla polttolaitoksella tuottamaan sen tuotantoalueella toimiviin tuotantotiloihin itsenäisesti oma tarvittava lämpö sivutuotteena tulevan puuhakkeen avulla.

Työ sisältää teräsprofiilien mitoittamisen, jossa runkorakenne mitoitetaan siten, että se täyttää sille määrätyt eurokoodistandardit. Toimeksiantajan pyynnöstä suunniteltava rakenne on pulpettikattoinen. Työssä määritetään rakennusympäristön ja rakenteen geometrian avulla rakenteelta vaadittavat ominaiskuormanarvot. Määritetyillä ominaiskuormanarvoilla mitoitetaan suunniteltava rakenne rajatilamitoituksia noudattaen. Mitoituksessa optimoidaan rakenteen vaatima teräsprofiilin koko.

Rakenteen profiilien kestävyys ja siirtymäarvot tarkistetaan Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmalla, joka hyödyntää kantavien rakenteiden ISO 1990 -standardeja lujuusanalyysilaskelmissa. Tulokset varmistetaan paikkaansa pitäviksi lujuusopin ja ISO 1990 -standardin mukaisin varmistuslaskelmin. Lopuksi käydään läpi mitoitettujen teräsprofiilikokojen tulokset ja vastaan tulleet ongelmakohdat.



## **2 LÄHTÖTIEDOT**

### **2.1 Toimeksiantaja**

Orasko Oy on vientiyritys, joka toimittaa asiakkaan tarpeiden mukaista mänty- ja kuusisahatavaraa Euroopan, Lähi-idän, Aasian ja Pohjois-Afrikan markkinoille (Orasko Oy. 2020). Valmistuva uusi tuotantolaitos sijaitsee Utajärvellä. Yritys on suunnitellut oman hakelämpölaitoksen perustamista alueelle, josta lämmönjakelu tapahtuisi tuotantolaitoksen kuivaus- ja tuotantotiloihin.

### **2.2 Hakelämpölaitos**

Hakelämpölaitoksen toimintaperiaate koostuu erillisestä varastosäiliöstä, josta hake kuljetetaan kuljettimen avulla kattilan polttimeen. Sahan sivutuotteena syntyvää puuhaketta voidaan käyttää tuotantotilojen lämmittämiseen kattilassa. Näin prosessissa syntyvä hukka-aines voidaan minimoida. Kattilassa poltettavan hakeen syöttönopeus ja annostelu määräytyy kattilaveden tarvittavaan lämpötilaan ja sen ylläpitämiseen eri vuodenaajat huomioon ottaen. Kattilassa lämmitetty vesi ohjataan kiertoon, josta se putkistoja pitkin kuljetetaan eri tuotantopisteiden pattereihin ja kennostoihin.

### **2.3 Työn rajaus**

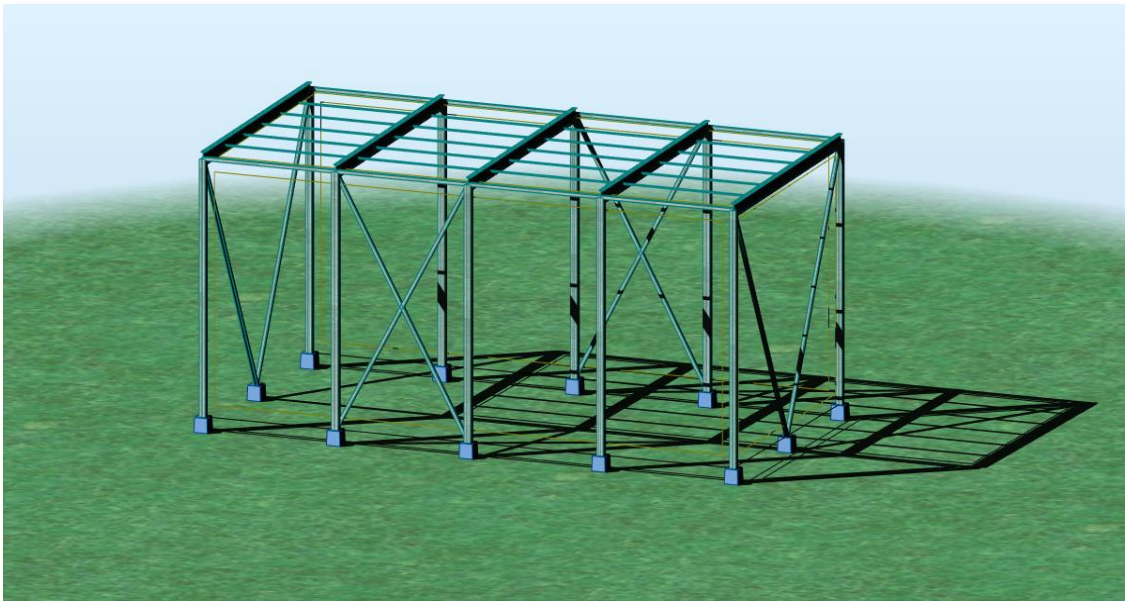
Suunniteltava rakenne on 10 m leveä, 20 m pitkä ja 9 m korkea suorakaiteen muotoinen pulpettikattoinen teräsrakenne, johon lämpökattila toimilaitteistoinen on suunniteltu mahtuvan. Suunniteltava käyttöikä rakenteella on 50 vuotta. Sisätiloilta rakenteen täytyy olla avara, koska kattila vie sekä leveys- että korkeussuunnassa paljon tilaa.

Teräsrakenteen kattorakenne toteutetaan yleisestikäytetyn ristikkorakenteen sijasta yksinkertaisella ja valmistuskustannuksiltaan edullisella I-profiili ratkaisulla. Teräsprofiileina käytetään pystypilareihin HEA-profiilia, jolla on hyvät staattiset lujuusarvot. Kattopalkit ovat IPN-profiilia. Vaakasuuntaiset voimat siirretään vinojäykisteiden kautta pohja-anturalle. Katon kaltevuus on 1:50:een. Kevytorret halutaan kattopalkkeihin jakamaan vesikatteeseen kohdistuva kuormaa palkeille ja

helpottamaan vesikatteen asennustyötä. Työssä ei käydä läpi kevytorsien valintaperusteita, eivätkä kevytorret toimi rakenteeseen kohdistuvien vaakavoimien siirtäjinä vinositeille. Teräspalkkien koko optimoidaan kuormille sopivaksi lujuusanalysoinnin aikana. Rakenne suunnitellaan mastorakenteiseksi, jolloin pilarien ja palkkien liitokset ovat kokonaan jäykät. Hyötykuormitusta ei aiheudu rakenteeseen. Rakennus kuuluu käyttöluokkaan SC2. Toteutusluokka on EXC2. Erityisvaatimuksia palonkestävyyden suhteen rakenteella ei ole, sillä rakenne kuuluu P3-paloluokkaan. Riittävä turvallisuustaso kyseisessä paloluokassa saavutetaan rajoittamalla rakennuksen kokoa ja henkilömääriä. Korroosiosuojausta ei huomioida tässä työssä.

## 2.4 Työn tavoitteet

Työn tavoite on suunnitella annetuin mitoin, lähtötiedoin ja ympäristö huomioon ottaen rakenne, joka täyttää sille vaaditut eurokoodistandardit. Rakenteelta vaaditaan yksinkertaisuutta. Teräsprofiilien koko ja massa pyritään optimoimaan. Tavoitteena on tehdä työstä selkeä ja suoraviivainen. Projektin aikataulutus ja työvaiheiden rytmittäminen on tärkeä muistaa, koska työ sisältää paljon eri työvaiheita. Kuvassa 1 on hahmotelma mitoitettavasta teräsrakenteesta.



KUVA 1. Hahmotelma mitoitettavasta rakenteesta

## 2.5 Eurokoodit

Eurokoodit on kehitetty eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukyvyn parantamiseksi sekä EU:n alueella että muualla maailmassa. Eurokoodeja koskevat säädökset tulivat voimaan 1.9.2014. Siitä alkaen talonrakennuksen suunnittelussa on käytetty eurokoodeja yhdessä kansallisten liitteiden kanssa. Talonrakennuksessa käytettävistä liitteistä vastaa ympäristöministeriö ja sillanrakentamisen kansallisista liitteistä vastaa Väylävirasto. Seuraavan sukupolven eurokoodeja työstetään parhaillaan. Niiden arvioidaan tulevan käyttöön vuonna 2025. (Rakentaminen.)

Tämän työn teräsrakenteiden mitoituksen pohjana käytetään eurokoodistandardien mukaisia ohjeita. Teräsrakenteiden kuormien ominaismitoitus voidaan suorittaa, joko suoraan SFS-EN 1990 eurokoodi -kirjasta (SFS-EN 1991-1-1+AC. 2002) tai raportissa käytettävästä Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat -käsikirjasta (RIL 201-1-2017. 2017). Käsikirjaan on koottu kantavien teräsrakenteiden ominaismitoituksessa huomioitavat asiat. Myös hitsatut profiilit- (Ongelin – Valkonen 2010) ja rakenneputket käsikirjan (Ongelin – Valkonen 2012) esimerkkejä hyödynnetään tässä työssä.

### 3 KUORMIEN MITOITUS

Standardissa SFS-EN 1991-1-1 annetaan rakennuksien sekä maa- ja vesirakennuskohteiden rakennussuunnittelussa käytettäviä mitoitus- ja kuormaohjeita.

Kuormat luokitellaan ajallisen vaihtelun mukaan seuraavasti:

- Pysyvät kuormat (*G*) on rakenteiden ja kiinteiden laitteiden oma paino.
- Muuttuvat kuormat (*Q*) on hyöty, lumi ja tuulikuormia.
- Onnettomuuskuormat (*A*) on esimerkiksi ajoneuvojen törmäykset tai räjähdykset. (RIL 201-1-2017. 2017, 31.)

#### 3.1 Omapaino

Omapaino on pysyvää ja kiinteää staattista kuormaa. Tarvittaessa voidaan joutua käyttämään painon ominaisarvolle standardin EN 1990 mukaisia ylä- ja alarajoja (RIL 201–1–2017. 2017, 63).

Työssä käytetään alustavina lähtöarvoina teräsprofilleja, joiden uskotaan olevan lähellä oikeita käyttörajatilan vaatimia arvoja. Rakenteen alustavia teräsprofiilin valintoja helpotti toimeksiantajan tuotantoalueella oleva jo pystytetty hieman suurempi teräsrakenne. Omapaino pyritään pitämään realistisena ja hieman ylimitoitettuna. Kokeneille suunnittelijoille omapainojen suuruudet on helpompi määrittellä jo lähelle oikeita arvoja. Lopulliset profiilikoot valitaan, kun on todettu rakenteen kestävän siltä vaadittavat murtorajatilanteet ja käyttörajassa siirtymät eivät ylitä sallittuja raja-arvoja. Taulukossa 1 on käytetty alustavia mitoituksia rakenteen omapainolle.

*TAULUKKO 1. Rakenteen omapaino kuormat vaakapalkille*

Nimitys	Tyyppi	Kuorma/ kN
Vesikate, eristetty	Balexmetal, PU-R	0,686 kN/m (balex.eu 2020, sandwich-panels)
Kevytorret	LP-Z250	0,2 kN/m (Ruukki.fi 2020, kevytorret)
Kattopalkit	IPN-450, S355	0,761 kN/m (tekniikan taulukkokirja 2016, 809)

### 3.2 Lumikuormat

Lumikuorma on muuttuva kiinteä kuorma, joka luokitellaan staattiseksi kuormaksi. Lumikuorma  $s$  määritetään kaavan 1 mukaisesti. (RIL 201-1-2017. 2017, 116.)

$$s = \mu_i C_e C_t S_k$$

KAAVA 1

$\mu_i$  = lumikuorman muotokerroin

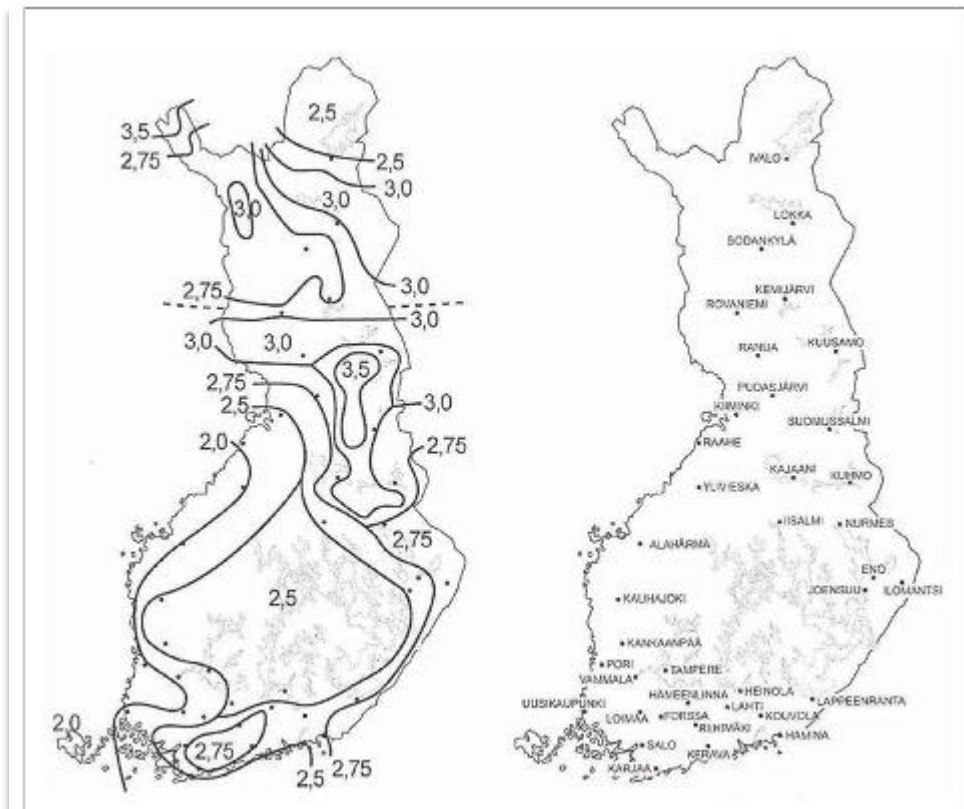
$S_k$  = maassa olevan lumikuorman ominaisarvo (kN/m<sup>2</sup>)

$C_e$  = tuulensuojaisuuskerroin (1,0)

$C_t$  = lämpökerroin, joka tavallisesti on 1,0

Normaalitilanteissa kaava 1 pelkistyy muotoon  $s = \mu_i S_k$ .

Lumikuorman määrittäminen aloitetaan selvittävällä kuvalla 2 paikkakunnalla olevan lumikuorman ominaisarvo  $S_k$ . Kuvassa 2 esitetyt arvot ovat minimiarvoja.



KUVA 2. Lumen kokonaisarvot maanpinnalla (RIL 201-1-2017. 2017, 116)

Vaikka kuvan 2 perusteella ominaisarvot voidaan interpoloida suoraviivaisesti, teräsrakenneyhdistyksen sivuilta löytyy tieto lumikuormista paikkakunnittain. Kuvassa 3 on esitetty paikkakuntakohtaiset ominaisarvot.

859	<a href="#">Tyrvävä</a>	kunta	suomi	<a href="#">Pohjois-Pohjanmaa</a>	6 757	494,86	491,81	13,7	2,40
886	<a href="#">Ulvila</a>	kaupunki	suomi	<a href="#">Satakunta</a>	13 325	422,51	400,65	33,3	2,00
887	<a href="#">Urijala</a>	kunta	suomi	<a href="#">Pirkanmaa</a>	4 858	505,37	475,18	10,2	2,40
889	<a href="#">Utajärvi</a>	kunta	suomi	<a href="#">Pohjois-Pohjanmaa</a>	2 824	1 736,70	1 671,01	1,7	2,85
890	<a href="#">Utsjoki</a>	kunta	suomi, pohjoissaame	<a href="#">Lappi</a>	1 239	5 372,00	5 144,52	0,2	2,50

KUVA 3. Ominaisarvot paikkakunnittain (Teräsrakenneyhdistys, linkit dokumentit -> lumikuormat)

Rakennuspaikkakunta on Utajärvi, joten  $S_k = 2,85 \text{ kN/m}^2$ . Minimiarvoja käytettäessä tulee varautua lumenpoistoon lumisateen jälkeen (RIL 201-2-2017. 2017, 88). Lumikuorman muotokertoimenä voidaan käyttää suoraan kuvan 4 arvoja, kun tiedetään katon kaltevuuskulma. Työssä kaltevuuskulma on alle  $5^\circ$  ja lunta ei estetä liukumasta pois katolta.

Katon kaltevuuskulma $\alpha$	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1, \mu_2$	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
$\mu_3$	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	1,6

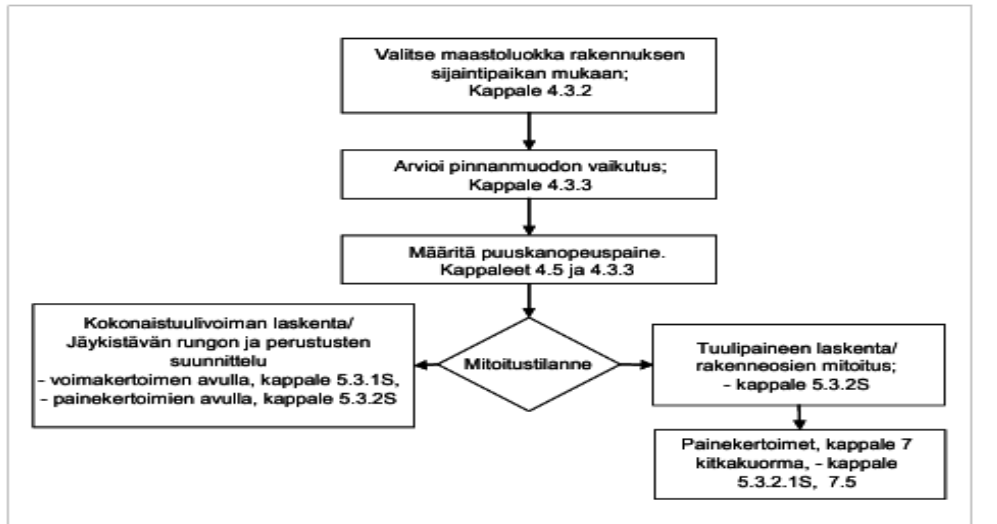
KUVA 4. Lumikuorman muotokertoimet (RIL 201-1-2017. 2017, 102)

Lumikuorman muotokerroin  $\mu_i = 0,8$ . Lumen ominaiskuormaksi  $s$  kaavaa 1 käyttäen saadaan

$$s = 0,8 \times 2,85 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,28 \text{ kN/m}^2.$$

### 3.3 Tuulikuormat

Tuulikuormat vaihtelevat ajan mukana. Ne aiheuttavat painetta umpinaisten rakenteiden ulkopintoihin ja ulkopinnan huokoisuuden vuoksi myös välillisesti sisäpintoihin. Tuulikuormat luokitetaan muuttuviksi kiinteiksi kuormiksi, ellei toisin mainita. (RIL 201-1-2017. 2017, 127.) Tuulikuorman määrittely tapahtuu kuvan 5 mukaisesti, josta lasketaan kokonaistuulikuorman avulla rakenteen tuulikuormat.



KUVA 5. Kulkukaavio (RIL 201-1-2017. 2017, 128)

### Kokonaistuulikuorman laskenta

Suunniteltavan rakennuksen korkeus on pienempi kuin sen leveys ( $h < b$ ), joten oletetaan, että tuulenpaineella on kaikissa korkeusasemissa rakennuksen harjalla vallitseva arvo. Kaavalla 2 rakennukseen kohdistuva kokonaisvoima  $F_w$  (kN) voidaan laskea (RIL 201-1-2017. 2017, 140).

$$F_w = C_s C_d C_f q_p(h) A_{ref} \quad \text{KAAVA 2}$$

$C_s C_d$  = rakennekerroin

$C_f$  = voimakerroin

$q_p(h)$  = maaston pinnan muodon mukaan modifioitu nopeuspaine, joka määritetään rakennuksen harjan korkeudella eli  $z = h$

$A_{ref}$  = tuulikuorman vaikutusala

Tuulikuorman vaikutusala  $A_{ref}$  lasketaan kaavan 3 mukaisesti (RIL 201-1-2017. 2017, 140).

$$A_{ref} = b \times h \quad \text{KAAVA 3}$$

$b$  = rakennuksen leveys tuulen näkemänä

$h$  = rakenteen harjakorkeus

Rakennekertoimelle  $C_s C_d$  voidaan käyttää matalissa rakenteissa varmallalla puolella olevaa arvoa  $C_s C_d = 1$  (RIL 201-1-2017. 2017, 145).

Voimakertoimen määrittäminen aloitetaan selvittämällä ensin rakenteen tehollinen hoikkuus  $\lambda$  kaavalla 4, kun rakennuksen korkeus on alle 15 m. (RIL 201-1-2017. 2017, 140.)

$$\lambda = 2 * \frac{h}{b} \quad \text{KAAVA 4}$$

Kun tuuli vaikuttaa rakennuksen lyhyeen sivuun kohtisuorasti saadaan

$$\lambda = 2 * \frac{9\text{ m}}{10\text{ m}} = 1,8 \text{ ja sivusuhte } \frac{d}{b} = \frac{20\text{ m}}{10\text{ m}} = 2.$$

Taulukon 2 mukaan voimakerroin  $C_f$  rakennuksen lyhyttä sivua kohti on 0,99. Tässä tilanteessa  $C_f$  voidaan pyöristää numeroon 1 selkeyttämään laskentoja.

TAULUKKO 2. Voimakertoimet (RIL 201-1-2017. 2017, 141)

$\lambda$	Sivusuhte $d/b$								
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
$\leq 1$	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

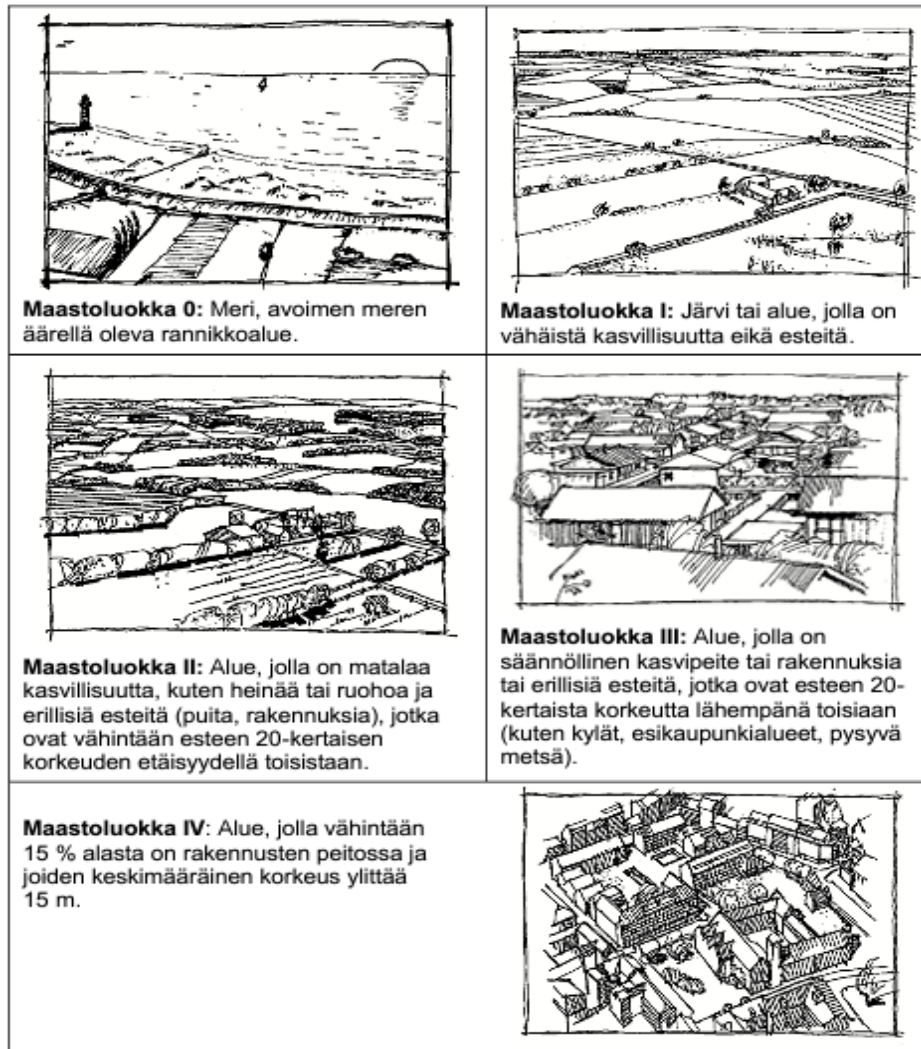
Kun tuuli vaikuttaa rakennuksen pitkää sivua kohti saadaan arvoksi

$$\lambda = 2 * \frac{9\text{ m}}{10\text{ m}} = 0,9 \text{ ja sivusuhte } \frac{d}{b} = \frac{10\text{ m}}{20\text{ m}} = 0,5.$$

Taulukon 2 mukaan  $C_f$  rakennuksen pitkää sivua kohti on 1,37.

Tuulen voimakkuus rakennusympäristössä vaihtelee maaston rosoisuuden mukaan. Eurokoodi luokittelee kuvan 6 mukaisesti maasto-olosuhteet maaston rosoisuuden mukaan viiteen eri luokkaan.

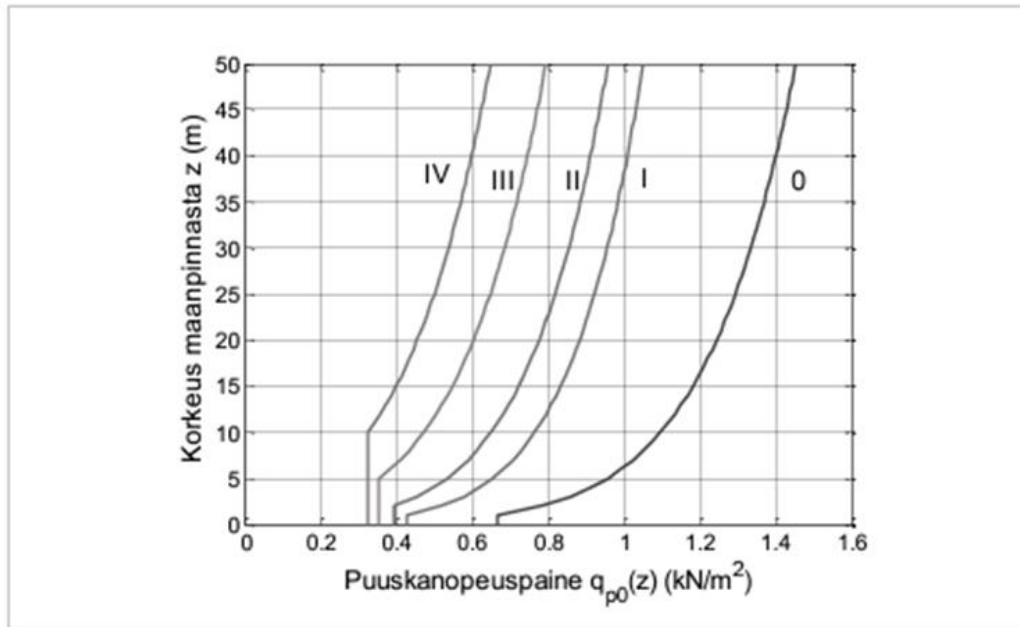




KUVA 6. Maastoluokkien kuvaukset (RIL 201-1-2017. 2017, 131)

Suunniteltava rakenne sijaitsee, maastoluokan II kuvatulla alueella, jossa on matalaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä. Maastoluokan ja rakenteen harjakorkeuden tiedettyä, voidaan selvittää puuskanopeuspaine kohteella.

Nopeuspaineen perusarvojen määrittämisessä on otettu huomioon se, että tuulivoimat kasvavat ilmastomuutoksen takia. Aiempien tilastojen perusteella on arvioitu, että kyseiset tuulen paineet ovat varmalla puolella vuoteen 2035 asti (RIL 201-1-2017. 2017, 136). Kuvassa 7 on esitetty tuulen nopeuden modifioimaton perusarvo, jonka mukaan tuulen puuskanopeuspaine  $q_p(h)$  määritetään.



KUVA 7. Puuskannopeuspaineen ominaisarvo, eri maastoluokissa (RIL 201-1-2017. 2017, 136)

Harjakorkeuden ollessa 9 metriä ja maastoluokan ollessa II. Puuskanopeuden arvoksi saadaan  $q_p(h) = 0,65 \text{ kN/m}^2$ .

Arvoja käyttäen pitkän ja lyhyen sivun kokonaistuulivoimiksi  $F_w$  saadaan

$$F_{w.\text{pitkäsivu}} = 1 \times 1,37 \times 0,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times (20\text{m} \times 9\text{m}) = 160,29\text{kN} \left(0,88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right).$$

$$F_{w.\text{lyhytsivu}} = 1 \times 1 \times 0,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times (10\text{m} \times 9\text{m}) = 58,5\text{kN} \left(0,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right).$$

Rakenteen murtorajatilamitoituksessa käytetään tuulen pitkään sivuun aiheuttamaa ominaistuulenarvoa. Tuulesta syntyvä kitkan vaikutus rakenteen pintaan voidaan jättää huomioimatta, kun rakenteen kaikkien tuulen suuntaisten pinta-alojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien ulkopintojen kokonaisala. Pääsääntöisesti kitkakuormaa ei tarvitse huomioida seiniä mitoittaessa, joten työssä kitkakuormien vaikutus jätetään huomioimatta. (SFS-EN 1991-1-4, 48.)

### 3.4 Rajatilamitoitus

Rajatilamitoitus perustuu asianomaista rajatilaa varten muodostettuihin rakenne- ja kuormitusmalleihin. Mikään rajatila ei saa ylittyä, kun malleissa käytetään asianmukaisia mitoitusarvoja kuormille, materiaalille- tai tuoteominaisuuksille sekä mittatiedoille. Tarkastelut suoritetaan kaikille merkittävälle mitoitustilanteille. (RIL 201-1-2017, 38). On hyvä muistaa, että suunnittelijan on aina sallittua tehdä laske- kentoja helpottavia yksinkertaistuksia, jotka johtavat mitoituksessa varmalle puo- lella oleviin tuloksiin (Ongelin – Valkonen 2010, 71).

### 3.5 Käyttörajatila

Käyttörajatilaksi luokitellaan rajatilat, jotka liittyvät rakenteen tai rakenneosien toi- mintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen tai rakennuskohteen ulkonä- köön. Palautuva ja palautumaton käyttörajatila tulee erotella. Käyttörajatilän mi- toitusarvoilla tarkastetaan rakenteen siirtymät siten, että ne eivät ylitä niille an- nettuja raja-arvoja. (RIL 201-1-2017. 2017, 30). Kuvassa 8 esitetään eurokoodin mukaiset eri rakennuskohteisiin sallitut rakenteen pysty- ja vaakasiirtymien arvot käyttörajatilamitoituksessa.

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
<b>Pääkannattajat:</b> - vesikatoissa ja katoksissa - välipohjissa	L / 300 L / 400
<b>Ulokkeet</b>	L / 150
<b>Katto-orret</b>	L / 200
<b>Seinäorret</b>	L / 150
<b>Muotolevyt:</b> - katoissa, joissa ei ole vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaaraa - katoissa, joissa vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaara on olemassa - kun $L \leq 4,5$ m - kun $4,5$ m $< L \leq 6,0$ m - kun $L > 6,0$ m - välipohjissa - seinissä - ulokkeissa	L / 100  L / 150 30 mm L / 200  L / 300 L / 100 L / 100
<b>Rakenteen vaakasiirtymän rajatila:</b> - 1 ja 2 kerroksiset rakennukset - muut rakennukset	H / 150 H / 400
L = jänneväli H = rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	
Rakennukset, joissa on nosturirata, ks. Eurocoden osa EN 1993-6 ja sen kansallinen liite.	

KUVA 8. Siirtymien raja-arvot (Ongelin – Valkonen. 2017, 527)

Käyttörajatilassa kuormien yhdistely suoritetaan suomessa kaavalla 5 (Ongelin – Valkonen 2010, 525). Suureiden merkitykset kerrotaan murtorajatila kohdassa 3.6. Liitteessä 1 on profiilien laskelmat käyttörajatilassa.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{Q,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 5}$$

### 3.6 Murtorajatila

Murtorajatiloiksi luokitellaan rakenteen tasapainonmenetys, vaurioituminen, murtuminen tai väsymisen aiheuttama vaurioituminen. Ne liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen. Joissakin olosuhteissa ne liittyvät myös aineen tai tavaran suojaamiseen. (RIL 201-1-2017, 29.)

Tarkasteltavia murtorajajiloja ovat

- jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menetys
- liian suuret siirtymätilat
- rakenteen tai sen osan muuttuminen mekanismiksi
- katkeaminen
- rakenteen tai osan stabiiliuden menetys
- ajasta riippuva vaurioituminen, kuten väsyminen. (RIL.201-1-2017, 30.)

Murtorajassa tavanomainen tilanne, johon ei liity onnettomuuskuormia, yhdistely voidaan toteuttaa kaavan 6 mukaisesti (Ongelin – Valkonen 2010, 72).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{Q,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 6}$$

Vaihtoehtoisesti voidaan kaavan 2 tai 3 lausekkeella, valita epäedullisempi vaihtoehto (Ongelin – Valkonen 2010, 72).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{Q,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 7}$$

tai

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 8}$$

”+” = lausekkeen termien yhdistämistä

$J$  = pysyvän kuorman indeksi

$i$  = muuttuvan kuorman indeksi

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

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

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

$\gamma_{G,j}$  = pysyvän kuorman osavarmuusluku

$\gamma_{Q,1}$  = määrävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku

$\gamma_{Q,i}$  = muun muuttuvan kuorman osavarmuusluku

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

$\psi_{0,i}$  = muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

$\xi_j$  = epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin

Liitteessä 2 on teräsprofiilien laskelmat murtorajatilassa. kuormitusyhdistelmiä tehdessä on muuttuville kuormille käytettävä niille määrättyjä ominaisyhdistelykertoimia. Taulukossa 3 on koottu eurokoodin ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset yhdistelykertoimet yhteen eri käyttötilanteiden mitoitukseen.

### TAULUKKO 3. Yhdistelmäkerroimet (Ongelin – Valkonen 2010, 75)

Kuorma	EN 1990			Suomi		
	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Hyötykuormat rakennuksissa,</b> luokka (ks. EN 1991-1-1)						
- Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
- Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
- Luokka C: kokoonmistilat	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,3
- Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6
- Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,8
- Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6
- Luokka G: liikennöitävät tilat, 30 kN < ajoneuvon paino $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
- Luokka H: vesikatot	0	0	0	0	0	0
<b>Rakennusten lumikuormat</b> (ks. EN 1991-1-3) <sup>a)</sup>				b)		
- Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,7	0,5	0,2	0,7 <sup>c)</sup> 0,7 <sup>d)</sup>	0,4 <sup>c)</sup> 0,5 <sup>d)</sup>	0,2 <sup>c)</sup> 0,2 <sup>d)</sup>
- Muut CEN:n jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H > 1000$ m merenpinnan yläpuolella	0,7	0,5	0,2			
- Muut CEN:n jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H \leq 1000$ m merenpinnan yläpuolella	0,5	0,2	0			
<b>Jäskuorma</b> <sup>e)</sup>				0,7	0,3	0
<b>Rakennusten tuulikuormat</b> (ks. EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0	0,6	0,2	0
<b>Rakennusten sisäinen lämpötila,</b> ei tulipalossa (ks. EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0	0,6	0,5	0
a) Mikäli maata ei ole mainittu, kyseiset paikalliset olosuhteet selvitetään erikseen. b) Suomi: Lumikuorma: ulkotasolla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä c) Suomi: kun $s_k < 2,75$ kN/m <sup>2</sup> d) Suomi: kun $s_k \geq 2,75$ kN/m <sup>2</sup> e) Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.						
Tässä taulukossa on esitetty Eurocoden (EN 1990) ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset kuormien yhdistelykertoimet. <b>Muiden maiden maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).</b>						

### 3.7 Kuormitusyhdistelmät

Eri seuraamusluokissa tulee yhdistelykaavioissa huomioida kuormakerroin  $K_{FI}$ . Kuormakerrointa  $K_{FI}$  on käytettävä luotettavuuden tasoluokituksen aikaansaamiseksi normaalisti vallitsevien ja tilapäisten mitoitustilanteiden kuormayhdistelmissä. Kerrointa ei käytetä onnettomuustilanteessa, eikä väsyty- tai käyttörajatilatarkasteluissa. (RIL 201-1-2017. 2017, 39.) Kuvan 9 mukaisesti ja seuraamusluokan mukaan määritetään kuormakerroin.

Kuormakerroin $K_{FI}$	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1,0	CC2
0,9	CC1

*KUVA 9. Suomessa käytettävät kuormayhdistelmät (RIL 201-1-2017. 2017, 39)*

Kyseisen työn seuraamusluokka on CC2, kun tiedetään, että jänneväli on suurempi kuin 6 m ja rakenne ei ole yli 8-kerroksinen (RIL 201-1-2017, 2017, 26). Kuormakertoimeksi  $K_{fi}$  saadaan kuvan 9 mukaan 1,0.

## 4 TERÄSRAKENTEEN MITOITUS JA LUJUUSANALYYSI

### 4.1 Rakenteen teräsprofiilien mitoitus

Rakenteen palkkeja ja pilareita mitoittaessa rakenteen stabiilius, eli kestävyys täytyy tarkastaa. Stabiiliuden menetyksellä tarkoitetaan sitä, että rakenne pettää ennen sen poikkileikkauksen maksimikestävyyttä. Epästabiili rakenne on altis nurjahdus, kiepahdus ja lommahdustilanteille. Teräsprofiileita mitoittaessa on myös käyttö- ja murtorajatilanmitoituksessa huomioitavat tilanteet tarkastettava (RIL 201-1-2017. 2017, 30). Vaakapalkkiin kohdistuvat leikkaus, taivutus ja pistekuormat murtorajatilan mitoitusarvoilla saatiin, kun tiedettiin rakenteeseen kohdistuvat pystysuuntaiset kokonaiskuormat. Profiilien mitoitus ja kestävyys laskettiin SFS-EN 1993 kaavioparametreja käyttäen (SFS-EN 1993-1-1. 2005). Tuloksia verrattiin Robot Structural Analysis Professional -ohjelman antamiin käyttöasteisiin, jotka osoittivat laskelmien olevan lähellä samoja tuloksia. Vaakapalkin laskelmat ovat liitteissä 4.

Pilarin mitoituksessa on otettava huomioon vaaka sekä pystysuuntaisten kuormien vaikutus. Pystysuuntaiset kuormat ovat rakenteen omapaino, muuttuvat kuormat ja hyötykuormat. Vaakakuormat ovat yleensä tuulikuormasta ja nosturinhöyrykuormista aiheutuvia voimia. Pilariin mitoitusarvot ovat saatu Robot Structural Analysis -ohjelmaan määritetyillä murtorajakuormilla, jossa on mukana myös vaakasuuntaiset tuulikuormat. Teräspilareiden korkeus on 9 m ja 8,8 m. Teräsprofiiliksi on valittu S355 HEB 240 poikkileikkausluokan 1 teräspilari. Määrävänä pilarin mitoituspituutena pidetään 9 m, jonka mukaan käsinlaskennat suoritetaan. Pystypilarin laskennat ovat esitetty liitteessä 5.

#### 4.1.1 Palkin poikkileikkausluokka

Poikkileikkausluokituksen tarkoitus on tunnistaa missä laajuudessa poikkileikkauksen paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen kestävyyttä ja kiertymiskykyä (SFS EN 1993-1-1, 42).

Poikkileikkaukset voidaan jakaa neljään eri luokkaan 1, 2, 3 ja 4. Luokissa 1 - 3 koko poikkileikkaus toimii tehollisena, mutta luokassa 4 poikkileikkauksessa on

tehoton alue, joten poikkileikkaukselle on laskettava tehollinen poikkileikkaus. Rakenteen rakenneosa voi koostua eri poikkileikkausluokista. Saman poikkileikkauksen eri osat, kuten laipat ja uumat voivat myös kuulua eri poikkileikkausluokkiin. Poikkileikkausluokka riippuu poikkileikkauksen puristettujen osien leveys-paksuussuhteesta ja jännitystilasta. Poikkileikkauksen puristettuun osaan kuuluu jokainen osa, johon tarkasteltavan kuormitusyhdistelmän vaikutuksesta syntyy joko täysi tai osittainen puristus. Saman profiilin poikkileikkausluokka voi olla erilainen taivutuksessa ja puristuksessa. (Ongelin – Valkonen 2010, 77.)

#### 4.1.2 Poikkileikkauksen laskenta

Yleensä teräsvalmistajat ilmoittavat yleisimpien teräsprofiilien poikkileikkausluokat. Rakenteen palkkien ja pilareiden poikkileikkausluokat voidaan laskea selvittämällä profiilin leveys-paksuussuhde ja jännitystila. Taulukossa 4 on esitetty 1 - 3 poikkileikkausluokan selvittäminen, poikkileikkausprofiilin ja myötölujuuden avulla I-profiilille.

**TAULUKKO 4. Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat (Ongelin – Valkonen 2010, 83)**

Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat <sup>a)</sup>				
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	$b/t \leq 124\epsilon$ <sup>c)</sup>	$b/t \leq 42\epsilon$ <sup>d)</sup>	$kun \psi > -1: b/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ <sup>e)</sup> $kun \psi \leq -1: b/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$ <sup>f)</sup>				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460	500
	$\epsilon$	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
	$\epsilon$	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) Puristetun osan korkeuden määrittäminen ( $\alpha$ -kerroin), ks. kohta 2.7.1  
c) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan:  $b/t \leq 121,43\epsilon$   
d) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan:  $b/t \leq 38,25\epsilon$   
e) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta  $k_{\sigma}$  ja jännityssuhteesta  $\psi$   
f) Kohtaa  $\psi \leq -1$  käytetään, kun joko puristusjännitys  $\sigma < f_y$  tai vedetyn puolen venymä  $\epsilon_y > f_y/E$



Teräsprofiilin symmetrisyyden takia voidaan todeta, että profiili ei kuulu poikkileikkausluokkaan 4. Tiedetään, että palkkiin kohdistuu puristusta ja poikkileikkaus on taulukon 4 kuvien tapainen. Näin voidaan selvittää työssä käytettävän IPN 450 profiilin poikkileikkausluokka. Lasketaan profiilin korkeus paksuussuhde ja vaakapalkin poikkileikkausluokka kaavan 9 avulla (Ongelin – Valkonen 2010, 83).

$$\frac{b}{t} \leq 33\varepsilon \quad \text{KAAVA 9}$$

$b$  = tehollinen korkeus

$t$  = tehollinen laipan paksuus

$\varepsilon$  = taulukon arvo, riippuen materiaalin myötölujuudesta

Profiilin IPN 450 uuman tehollinen korkeus on  $b = 450 \text{ mm} - (t \times 2) - (r \times 2) = 369 \text{ mm}$  ja laipan paksuus  $t = 24,3 \text{ mm}$ .

Sijoitettua kaavaan 9 selvitettyt arvot saadaan tulokseksi  $\frac{369 \text{ mm}}{24,3 \text{ mm}} = 15,19$ . Kyseessä on lujuusominaisuuksiltaan S355 teräs, joten taulukosta 3 määritelty  $\varepsilon = 0,813$ . Tulokseksi saadaan  $15,19 \leq 26,8$ . Näin todetaan, että palkki kuuluu poikkileikkausluokkaan 1. Kaikki lasketut poikkileikkausluokka tulokset ovat liitteessä 3.

#### 4.1.3 Puristuskestävyyden määrittäminen

Kun poikkileikkausluokka on 1, 2 tai 3 puristuskestävyyttä mitoittaessa, voidaan käyttää kaavaa 10 (SFS EN- 1993-1-1,53).

$$N_{ed} \leq N_{c,rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m0}} \quad \text{KAAVA 10}$$

$N_{ed}$  = puristusvoiman mitoitusarvo

$N_{c,rd}$  = puristuskestävyyden mitoitusarvo

Teräsprofiilien puristuskestävyyden tulokset ovat liitteissä 3 ja 4.

#### 4.1.4 Taivutusmomentti

Taivutusmomentin mitoitusarvon  $M_{ed}$  tulee kaikissa poikkileikkauksissa täyttää ehto (SFS-EN 1993-1-1, 53).

$$\frac{M_{ed}}{M_{c.rd}} \leq 1,0$$

KAAVA 11

Kyseisessä ehdossa  $M_{c.rd}$  huomioidaan kiinnittimien reiät, mutta tähän on poikkeuksia (SFS-EN 1993-1-1, 54). Kaavalla 12 lasketaan poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo yhden pääjäyhysakselin suhteen poikkileikkausluokille 1 ja 2 (SFS-EN 1993-1-1, 53).

$$M_{c.rd} = M_{pl.rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

KAAVA 12

Lasketut profiilien taivutuksen käyttöasteet ovat liitteissä 4 ja 5.

#### 4.1.5 Leikkausjännitys

Leikkausvoiman mitoitusarvon  $V_{ed}$  tulee kaikissa poikkileikkauksissa täyttää kaavan 13 ehto (SFS-EN 1993-1-1, 54).

$$\frac{V_{ed}}{V_{c.rd}} \leq 1,0$$

KAAVA 13

$V_{ed}$  = leikkausvoiman mitoitusarvo

$V_{c.rd}$  = leikkauskestävyyden mitoitusarvo

Jos mitoitus tehdään plastisuusteorian mukaan poikkileikkausluokille 1 ja 2, voidaan laskenta suorittaa kaavan 14 mukaisesti (SFS EN-1993-1-1, 54).

$$V_{pl.rd} = A_v \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)$$

KAAVA 14

$A_v$  = leikkauspinta-ala

Kaavan 15 mukaan valssatuille uuman suuntaisille I- ja H-profiileille  $A_v$  laskenta-kaava on seuraavanlainen (SFS EN 1993-1-1, 54).

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

KAAVA 15

$A$  = poikkileikkauksen pinta-ala

$b$  = kokonaisleveys

$h$  = kokonaiskorkeus

$h_w$  = uuman korkeus

$r$  = nurkan pyöristyssäde

$t_f$  = laipan paksuus

$t_w$  = uuman paksuus (jos uuman paksuus ei ole vakio, valitaan pienin arvo)

$n$  = ks. standardi EN 1993-1-5. Huom.  $n$ -arvolla 1, on varmalla puolella.

Leikkauslommahduskestävyys voidaan jättää huomioimatta, jos kaavan 16 ehto täyttyy (SFS-EN 1993-1-1, 55).

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{n} \quad \text{KAAVA 16}$$

Tämän teräspalkin mitoituksessa leikkauslommahdus ei rajoita leikkauskestävyyttä kyseisellä IPN 450 profiililla.

$$\frac{385\text{mm}}{16.2\text{mm}} \leq 72 * \frac{0.81}{1} = 23.778 \leq 58,32$$

Tulokset ovat liitteessä 3.

#### 4.1.6 Taivutus ja leikkaus

Leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen otetaan huomioon, jos leikkausvoima on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä taivutusmomenttikestävyyteen. Muissa tapauksissa, taivutusmomenttikestävyyttä pienennetään käyttämällä leikkauspinta-alalle pienennettyjä myötörajoja (SFS-EN 1993-1-1, 57).

Opinnäytetyön tapauksessa kaavalla 17 selviää, että leikkausvoiman vaikutus on pienempi kuin puolet leikkauskestävyydestä (SFS-EN 1993-1-1, 60). Myöskään kaavalla 17 laskettu leikkauslommahdus ei rajoita poikkileikkauksen kestävyyttä.

$$V_{ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd} \quad \text{KAAVA 17}$$

$$134,99k \leq 0,5 * 1560,0kN = 134,44k \leq 779,8kN$$

#### 4.1.7 Kiepahduksen estäminen sivusuuntaisella tuella

Koska vaakapalkin kiepahdus estetään sivusuuntaisella riittävällä määrällä tuentoja, ei kiepahduskestävyyden tarkastelua tarvitse suorittaa. Tällöin riittää, että

sivuttaistukien riittävyys tarkastetaan. Sivuttaistukina toimii kevytorret, joita tulee katolle 7 kappaletta. Kevytorret tulevat 1,66 m välein.

Puristetusta laipasta pistemäisesti sivusuunnassa tuettuja sauvoja ei tarvitse tarkastaa, jos kiepsahduskestävyyden suhteen sivuttaistukien välin  $L_c$  perusteella laskettu laipan muunnettu hoikkuus  $\lambda_f$  täyttää kaavan 18 ehdon (SFS-EN 1993-1-1,68).

$$\lambda_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \lambda_{c0} \frac{M_{c,RD}}{M_{y,ED}} \quad \text{KAAVA 18}$$

$M_{y,ED}$  = suurin taivutusmomentti sivuttaistukien välillä

$M_{c,RD} = W_y \frac{F_y}{\gamma_{M1}} =$  taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$W_y$  = poikkileikkauksen taivutusvastus puristetun laipan suhteen

$K_c$  = sivuttaistukien välisen momenttipinnan jakaantumisen huomioon otettava hoikkuuden korjaustekijä

$i_{f,z}$  = ekvivalentin puristetun laipan, joka koostuu puristetusta laipasta ja 1/3-osasta uuman puristetusta alueesta, hitaussäde poikkileikkauksen heikoimman akselin suhteen.

$\lambda_{c0}$  = muunnetun hoikkuuden raja-arvo yleisesti (0,3)

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Puristetun ekvivalentin laipan hitaussäteen  $i_{f,z}$  arvo saadaan kaavasta 19 (SFS EN-1993-1-1, 69).

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{eff,f}}{A_{eff,f} + \frac{1}{3} A_{eff,w,c}}} \quad \text{KAAVA 19}$$









$I_{eff,f}$  = poikkileikkauksen heikomman akselin suhteen laskettu puristetun laipan tehollinen neliömomentti

$A_{eff,f}$  = puristetun laipan tehollinen pinta-ala

$A_{eff,w,c}$  = puristetun laipan uuman tehollinen pinta-ala

Sivuttaistukien välisen momenttipinnan muodon huomioon otettava hoikkuuden korjaustekijä saadaan taulukon 5 momenttipinnan muodon määrittämisellä.

TAULUKKO 5. Korjaustekijät (SFS-EN 1993-1-1, 68)

Momenttipinnan muoto	$k_c$
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
  	0,94 0,90 0,91
  	0,86 0,77 0,82

Tulokset kertoivat, että tuettuja sauvoja ei tarvitse tarkastaa kiepahduskestävyyden suhteen, koska rakenteen vaakapalkin kokonaistaivutusmomentin mitoitusarvolla tulos oli  $\lambda_f \leq \lambda_{c0} \frac{M_{c,RD}}{M_{y,ED}}$ . Tulokset vaakapalkin kiepahduksen estämisestä sivusuuntaisella kevytorsituennalla ovat liitteessä 6.

#### 4.1.8 Nurjahduskestävyys

Kaksoissymmetrisellä profiililla poikkileikkauksen leikkauskeskiö sijaitsee poikkileikkauksen painopisteessä. Täten mahdollisia nurjahdustapoja on tasonurjahdus jommankumman pääjäyhyysakselin suhteen ja puhdas vääntönurjahdus. Pilarin mitoitusarvo pitää kaikissa poikkileikkausluokissa täyttää kaavan 20 ehto (SFS-EN 1993-1-1, 61).

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

KAAVA 20

$N_{ed}$  = sauvaa puristava voiman mitoitusarvo

$N_{b,RD}$  = nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea kaavalla 21, kun kyseessä on poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3 (SFS-EN 1993-1-1, 61).

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{KAAVA 21}$$

Kaavalla 22 epäsymmetristen poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvien poikkileikkausten osalta otetaan huomioon tehollisen poikkileikkauksen epäkeskeisyydestä aiheutuva lisämomentti  $\Delta M_{ed}$  (SFS-EN 1993-1-1, 61).

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{KAAVA 22}$$

$\chi$  = kyseeseen tulevan nurjahduskestävyyden pienennystekijä.

Aksiaalisesti puristetuille sauvoille muunnettua hoikkuutta  $\lambda$  vastaava pienennystekijä  $\chi$  saadaan kaavasta 23 laskettua käyttäen kyseeseen tulevaa nurjahduskäyrää (SFS-EN 1993-1-1, 61).

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} < 1 \quad \text{KAAVA 23}$$

$$\Phi = 0.5(1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2)$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{A f_y}}{N_{cr}} \text{ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3}$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{A_{eff} f_y}}{N_{cr}} \text{ poikkileikkausluokalle 4}$$

$\alpha$  = epätarkkuustekijä

$N_{cr}$  = kimmoteorian mukaisen bruttopoikkileikkauksen mukaan laskettu kriittinen voima kyseeseen tulevassa nurjahdusmuodossa.

Taivutusnurjahdus  $N_{cr}$  saadaan selvitettyä kaavasta 24, jolloin poikkileikkauksen ominaisuudet määritetään kaikilla poikkileikkausluokilla bruttopoikkileikkauksen mukaan (Ongelin – Valkonen 2010, 111).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad \text{KAAVA 24}$$

$E$  = kimmokerroin

$I$  = bruttoleikkauksen neliömomentti kyseeseen tulevan akselin suhteen

$L_{cr}$  = sauvan nurjahduspituus taivutusnurjahduksessa tarkasteltavaan suuntaan.

$A$  = sauvan bruttopoikkileikkauksen pinta-ala

$i$  = bruttopoikkileikkauksen hitaussäde kyseeseen tulevan akselin suhteen

Taulukon 5 nurjahduskäyrä valitaan, kun tiedetään profiilin valmistustapa ja leveys paksuussuhde.

TAULUKKO 4. Epätarkkuustekijä (SFS-EN 1993-1-1, 62)

Nurjahduskäyrä	$a_0$	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukosta 6 valitaan tietoja vastaava arvo selvittämään epätarkkuustekijä.

TAULUKKO 5. Nurjahduskäyrän valinta (SFS-EN 1993-1-1, 63)

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdusko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Vaikeat profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a	$a_0$
				b	$a_0$
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b	a
				c	a
$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b	a		
		c	a		
$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d	c		
		d	c		
Hitsat I-profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b	b
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c	c
Rakennepuut		Kuumamuovattu	Kaikki	a	$a_0$
		Kylmämuovattu	Kaikki	c	c
Hitsat koneprofiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b
		Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c
U-, T- ja umpiprofiilit			Kaikki	c	c
L-teräkset			Kaikki	b	b

Kun muunnettu hoikkuus  $\lambda \leq 0,2$  tai kun  $N_{ed} \leq 0,04$  nurjahdusta ei tapahdu ja pelkkä poikkileikkauksen tarkastus on riittävä (SFS-EN 1993-1-1, 63). Lasketut nurjahdustulokset ovat liitteessä 5.

## 4.2 Vinojäykisteet

Jotta kantavat rakenteet kestävät stabiilitensa ääritilanteissa ja sivusiirtymiä ei tapahtuisi, varmistetaan stabiilius mitoittamalla rakenteeseen vinojäykisteet pituus- että poikittaissuuntaan. Vinojäykisteet toimivat viemällä vaakavoimat ja pystykuormien aiheuttamat fiktiiviset lisävaakavoimat pohja-anturalle. Pystypilarin päähän kohdistuva voima lasketaan kaavan 25 avulla, jossa mitoittavana määrittävänä tilanteena on tuuli (Ongelin – Valkonen 2012, 459).

$$F_{ed} = Q_{wd} * \left(\frac{3}{8} * H_1\right) * \frac{L_1}{2} \quad \text{KAAVA 25}$$

$Q_{wd}$  = ominaistuulikuorman arvo osavarmuusluvulla

$H_1$  = rakennuksen korkeus

$L_1$  = rakennuksen pituus

Myös rakenteen pystykuormien aiheuttama fiktiivinen lisävaakavoima täytyy huomioida vinojäykisteitä mitoittaessa, jos  $H_{ed} \leq V_{ed}$ . Fiktiivinen lisävaakavoima lasketaan ottaen huomioon rakenteen ekvivalentin alkuvinous  $\Phi$ . Kaavalla 26 voidaan laskea rakenteen pääkehän pilareiden alkuvinoudet (SFS-EN 1993-1-1, 33).

$$\Phi = \frac{\alpha_h * \alpha_m}{200} \quad \text{KAAVA 26}$$

$\alpha_h$  = pilareihin sovellettava pienennystekijä

$\alpha_m$  = pienennystekijä, joka ottaa huomioon rivissä olevien pilareiden lukumäärän

Teräsrakenteessa jaetaan fiktiivinen lisävaakavoima tuulikuormien tapaan vinojäykisteille tasan. Fiktiivinen lisävaakavoima lasketaan alkuvinouden  $\Phi$  ja kokonaisvaakavoiman  $V_{ed}$  avulla kaavalla 27 (Ongelin – Valkonen 2012, 460).

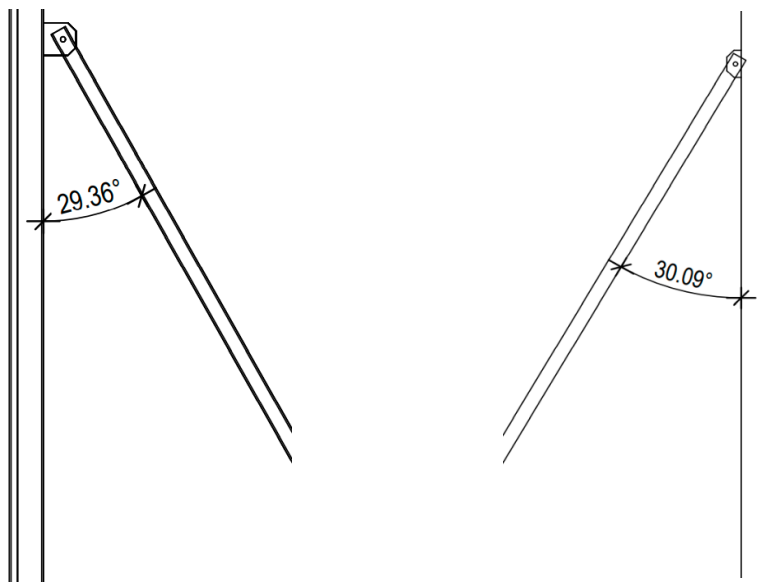
$$H_{fic} = \Phi * V_{ed} \quad \text{KAAVA 27}$$

Työssä fiktiivinen lisävaakavoima täytyy huomioida vinojäykisteiden mitoittamisessa sillä  $H_{fic} \leq V_{ed}$ . Kaavalla 28 lasketaan kokonaiskuorma, jossa fiktiivinen lisävaakavoima on mukana (Ongelin – Valkonen 2012, 460).

$$H_{ed} = F_{ed} * H_{fic} \quad \text{KAAVA 28}$$



Työssä jäykistys toteutetaan kahdella vinositeellä, jolloin toinen on puristettu ja toinen vedetty. Vinositeiden kulma suhteessa pilariin on  $30,09^\circ$  rakenteen päädyissä. Pitkän sivun pilareiden vinositeiden kulma on  $28,39^\circ$ . Siirretään vaakavoimat kokonaisuudessaan vedetyllä vinositeellä. Kaikki rakenteen vinopalkit ja myös pystypilareiden yläpään vaakapalkit, jotka vievät vaakavoimat vinopalkeille mitoitetaan pitkän sivun saamalla vaakasuuntaisilla kuorman tuloksilla. Näin mitoitettavista rakenneosista tulee varmalla puolen olevia. Lasketut vinojäykisteen tulokset ovat liitteessä 7. Kuvassa 10 on esitetty rakenteen vinojäykisteen rasiuskulmat.

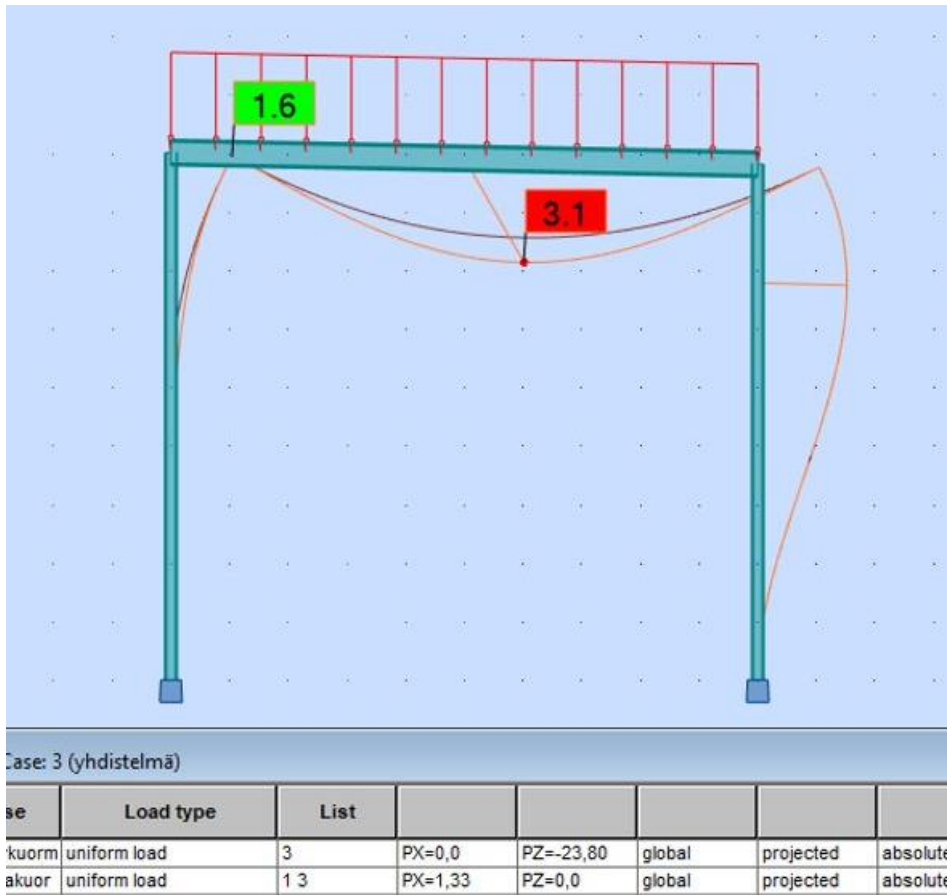


KUVA 10. Pitkän ja lyhyen sivun vinotukien rasiuskulmat

### 4.3 Autodesk Robot Structural Analysis Professional lujusanalyysi

Teräsrungon mitoitus ja lujusanalyysit varmistettiin Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmalla, joka hyödyntää eurokoodistandardeja. Rakenteesta tehtiin kehärakenne, johon syötettiin rakenteen tekniset mitat. Pilareiden kiinnitystapa oli jäykkä kiinnitys maahan. Liitostapaa pilarin ja palkin välillä ei manuaalisesti muuteta, joten ohjelma olettaa liitoksen olevan jäykkä. Tässä tapauksessa liitos pidettiin jäykkänä. Lopuksi kehärakenteelle valittiin mitoitettut teräsprofiilit.

Rakenteen siirtymiä tarkasteltiin ensin käyttörajatilan mitoitusarvoilla. Mitoitusarvot syötettiin tasan jakautuvaksi vaakapalkille. Tuloksista selvisi rakenteen suurimmat taipumat, kuormitukset ja maksimijännityskohdat annetuilla käyttörajatilanarvoilla. Kuvassa 11 on kehärakenne käyttörajatilassa, mistä selvisi rakenteen taipumien pysyvän alle taipuman raja-arvon. Liitteissä 4 ja 5 ovat lasketut taipuman tulokset.



KUVA 11. Käyttörajatilan siirtymät

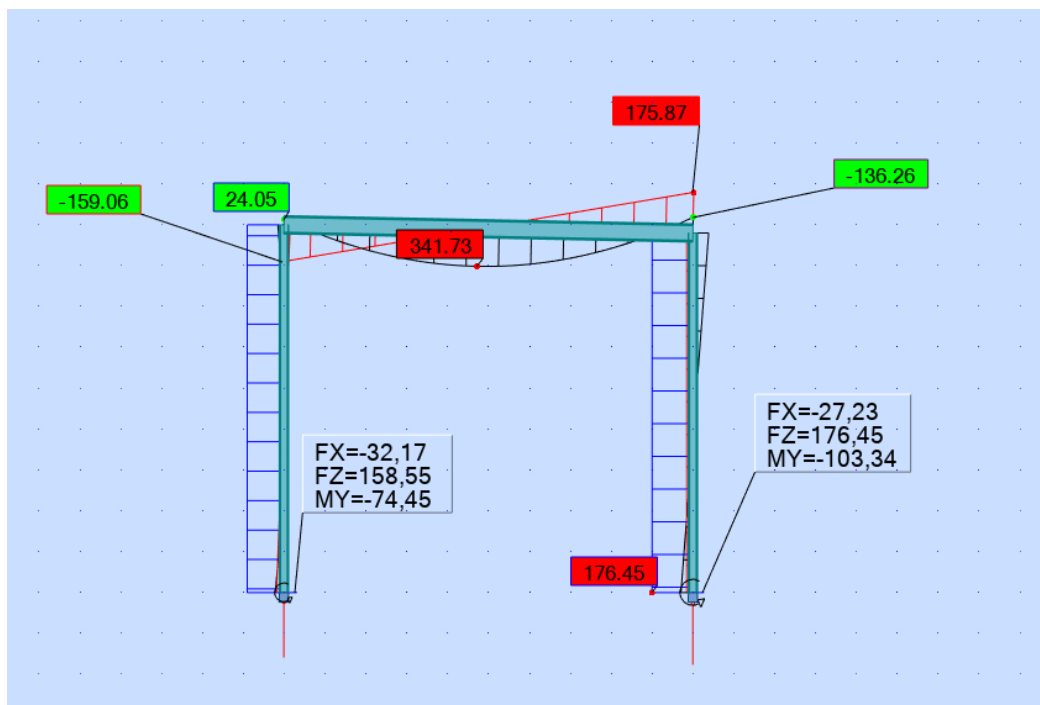
Robot analysoinnin tuloksista voitiin laskentakaavojen taipuma-arvot todeta paikkaansa pitäviksi. Vaakapalkin IPN-profiili jouduttiin kuitenkin laskelmien perusteella pitkän jännevälän takia ylivoimittamaan, jotta päästiin käyttörajatilan sallimiin raja-arvoihin. Tämän takia määräävä tekijä vaakapalkin valintaan oli käyttörajan taipuma-arvot. Vertailen eri teräsprofiilien taipuma-arvoja, todettiin profiilin IPN 450 soveltuvan käyttökohteeseen hyvin, kun huomioitiin profiilin kokonaisuudessa, taipuma ja korkean profiilin kiepahdusalttius. Kiepahdukseen vaikuttaa teräsprofiilin taivutusvastus, kuormitusjakauma, materiaali, tuenta ja poikkileikkaukset,

joiden taivutusjäykkyys z-akselin suhteen on pieni suhteessa taivutusjäykkyyteen y-akselin suhteen (Perälä 2020, 1). Kuvassa 12 on esitetty neljän eri teräsprofiilin koot, joilla olisi voitu vaakapalkki toteuttaa. Toteutus olisi ollut kuitenkin epäkäytännöllinen HEA ja HEB-profiilin kasvaessa liian suureksi.

Teräsprofiilien vaihtoehtojen vertailu käyttörajatilan määräämin raja-arvoihin								
	taipuma		massa		neliömomentti		taivutusvastus	
IPN-450	31,6	mm	1150	kg	458,5	$10^6 \text{mm}^4$	2040	$\text{cm}^3$
IPE-500	30	mm	907	kg	482	$10^6 \text{mm}^4$	1930	$\text{cm}^3$
HEB-400	25	mm	1550	kg	576	$10^6 \text{mm}^4$	2310	$\text{cm}^3$
HEA-450	22,7	mm	1400	kg	637	$10^6 \text{mm}^4$	3550	$\text{cm}^3$

KUVA 12. Profiilien vertailua

Murtorajatilamitoituksessa rakenteelle syötettiin murtorajatilan mitoitusarvot ja lisäksi lisättiin vaakasuuntaiset voimat rasittamaan rakenteen pystypilareita. Kuvan 13 mukaisesti murtorajatilan mitoituskuormilla saatiin selvitettyä rakenteeseen kohdistuvien pysty ja vaakakuormien aiheuttamat murtorajatilan maksimijännitykset ja mitoituskuormien arvot.



KUVA 13. Kehärakennemallin murtorajatilan kuormitustilanne

Liitteessä 8 on esitetty murtorajatilan aiheuttama maksimijännitys rakenteelle. Rakenteelle on tehty myös eri kuormitustilanteita, joilla on varmistettu rakenteen kestävyys murtorajatilassa.

Teräsrakenteen murtorajatilan mitoituskuormia käytettiin lujuusopin laskelmissa selvittämään teräsprofiilien käyttöaste murtorajatilaan. Mitä likemmäs käyttöastetta 1 päästään kasvattamatta profiilikokoa ja kokonaismassaa, sitä kustannustehokkaampi rakenne on. Kyseisen työn laajuuden takia työstä jätettiin pois rakenteen päätyjen pystypilareiden optimointi ja laskenta. Päätypilareihin kohdistuu kuormitustilanteessa keskellä oleviin pystypilareihin nähden vähemmän pystysuuntaista kuormaa. Tämä käy ilmi liitteen 9 kuvasta. Työn pääty pilarit ovat täten varmalla puolen olevia kyseisellä profiilikoolla. Profiilikoko mahdollistaa myös tulevaisuudessa rakenteen helpon laajentamisen pituus suunnassa, jos toimenpiteelle on tarvetta.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelman Steel Desing toiminnolla voitiin varmistaa teräsprofiilien käyttöasteet murto- ja käyttörajatilassa. Ohjelma noudattaa SFS-EN 1993 standardeja. Kyseisessä työssä tutkittiin kriittisimpien paikkojen käyttöasteita. Kuvassa 14 on ohjelmalla saadut rakenteen pystypilareiden sekä vaakapalkkien käyttöasteet.

2005/NA:2007/A1:2014 - Member Verification ( SLS ; ULS ) 1to17 19 20to29By3 27 30 33to45

Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case	Ratio(uy)	Case (uy)	Ratio(uz)	Case (uz)	Ratio(vx)	Case (vx)	Ratio(vy)	Case (vy)
HEA 240	S355J2G3	92.29	146.59	0.63	3 Korkean pitkänsiv	-	-	-	-	0.98	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
HEA 240	S355J2G3	94.29	149.93	0.63	7 Matalamman pitkänsiv	-	-	-	-	0.97	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
HEA 240	S355J2G3	92.29	146.59	0.62	3 Korkean pitkänsiv	-	-	-	-	0.98	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
HEA 240	S355J2G3	92.29	146.59	0.62	3 Korkean pitkänsiv	-	-	-	-	0.99	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
HEA 240	S355J2G3	94.29	149.93	0.61	7 Matalamman pitkänsiv	-	-	-	-	0.95	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
HEA 240	S355J2G3	94.29	149.93	0.61	7 Matalamman pitkänsiv	-	-	-	-	0.95	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
IPN 450	S355J2G3	56.64	291.82	0.43	6 Lyhyen sivun kuorma	0.37	4 Vaakakuorma2	0.66	1 Pystykuorma	-	-	-	-
IPN 450	S355J2G3	56.64	291.82	0.43	6 Lyhyen sivun kuorma	0.37	4 Vaakakuorma2	0.66	1 Pystykuorma	-	-	-	-
IPN 450	S355J2G3	56.64	291.82	0.43	6 Lyhyen sivun kuorma	0.37	4 Vaakakuorma2	0.66	1 Pystykuorma	-	-	-	-
IPE 120	S355J2G3	181.47	614.97	0.34	6 Lyhyen sivun kuorma	0.01	12 Wind X+Y- 20 m/	0.07	4 Vaakakuorma2	-	-	-	-
HEA 220	S355J2G3	101.85	163.29	0.24	6 Lyhyen sivun kuorma	-	-	-	-	0.02	2 Vaakakuorma1	0.04	4 Vaakakuorma1
HEA 220	S355J2G3	99.67	159.66	0.23	6 Lyhyen sivun kuorma	-	-	-	-	0.02	2 Vaakakuorma1	0.04	4 Vaakakuorma1
IPE 120	S355J2G3	181.47	614.97	0.18	1 Pystykuorma	0.00	2 Vaakakuorma1	0.00	4 Vaakakuorma2	-	-	-	-
HEA 220	S355J2G3	101.85	163.29	0.14	7 Matalamman pitkänsiv	-	-	-	-	0.02	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
HEA 220	S355J2G3	99.67	159.66	0.14	3 Korkean pitkänsiv	-	-	-	-	0.02	2 Vaakakuorma1	0.03	4 Vaakakuorma1
UAP 100	S355J2G3	260.14	657.18	0.09	6 Lyhyen sivun kuorma	0.00	5 Vaakakuorma3	0.00	4 Vaakakuorma2	-	-	-	-
UAP 100	S355J2G3	255.74	646.05	0.09	6 Lyhyen sivun kuorma	0.00	2 Vaakakuorma1	0.00	4 Vaakakuorma2	-	-	-	-
RRHS 50x50x	S355J2G3	263.36	263.36	0.07	4 Vaakakuorma2	0.00	2 Vaakakuorma1	0.00	1 Pystykuorma	-	-	-	-

KUVA 14. Robot Structural Analysis Professional -ohjelman käyttöasteen tarkastelu

Profiilien käyttöasteita vertailen laskettujen profiilien maksimikäyttöastetuloksiin, voitiin todeta laskelmien olevan lähellä toisiaan ja todenmukaisia. Kuvassa 15 on vertailtu murtorajatilan käyttöasteita toisiinsa.

Profiili	Laskettu maksimi käyttöaste %	Robot analyysin käyttöaste %
HEA 240	51,6	63
IPN 450	40,1	43

KUVA 15. Käyttöastevertailua

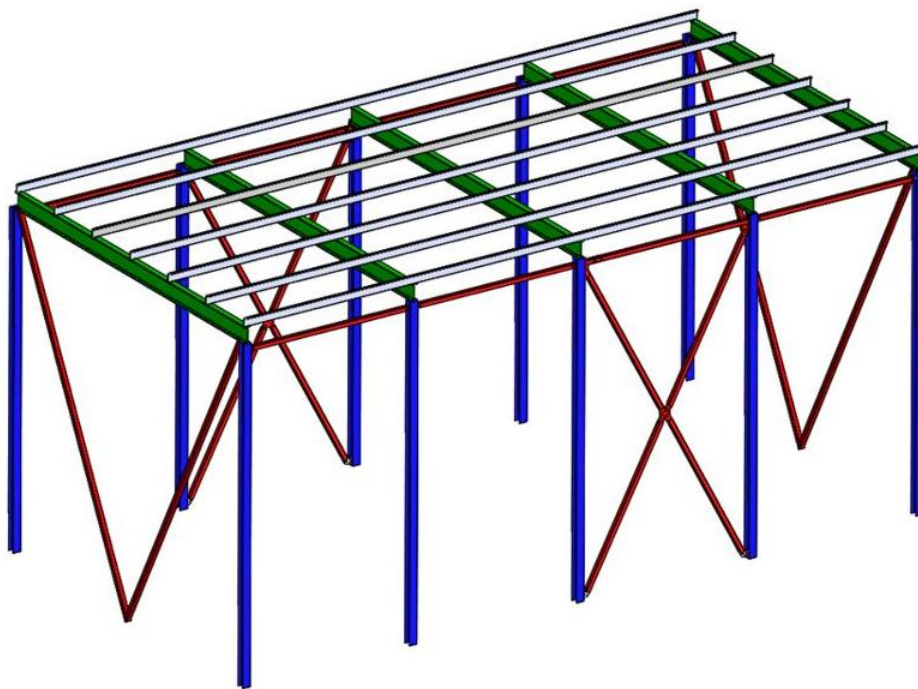
#### 4.4 Mitoitetut teräsprofiilit

Työssä saatiin seuraavat lopulliset mitoitetut teräsprofiilikoot, kappalemäärät ja palkin pituudet.

- HEA 240 S355J2G3 teräsprofiili 5 KPL (8,8 m)
- HEA 240 S355J2G3 teräsprofiili 5 KPL (9 m)
- IPN 450 S355J2G3 teräsprofiili 5 KPL (10 m)
- RHS 120x120x5 S355J2G3 teräsprofiili (kokonaismäärä n. 120 m)

Rakenteen profiilikokojen optimoinnissa käyttörajatilan tuomat suuret taipumat rajoittivat rakenteen perusteellisemmän optimoinnin. Myös mastorakennetapa aiheuttaa korkeille rakenteille ja pitkille jänneväleille tyypillisiä suuria taipumia, minkä takia materiaalikokoa joudutaan kasvattamaan.

Teräsrunгон kokonaismassa on noin 13 300 kg. Mahdollisia jatkotoimenpiteitä työn kehittämisessä eteenpäin on liitteessä 9, jossa on pohjalevyille kohdistuvat kuormat. Liitteen 9 kuormitustuloksia voidaan käyttää perustuksien ja pohja-an-turan suunnitteluun. Liitteessä 10 ja 11 ovat julkisivupiirros ja teräsrunгон raken-nepiirros hahmottamaan työtä paremmin. Kuvassa 16 on esitetty mitoitettu teräs-runko, jossa värein kuvastetaan eri teräsprofiileita.



- IPN 450 PROFII
- HEA 240 PROFII
- RHS 120x120x5 PROFII
- Z-KEVYTORSI

*KUVA 16. Mitoitettu teräsrunko*

## 5 YHTEENVETO

Työn päätavoite oli suunnitella teräs rakenne toimeksiantajan vaatimusten mukaisesti hakelämpölaitokselle ja sen sisältämälle toiminnalle. Rakenteesta haluttiin sisätiloiltaan avara ja yksinkertainen. Teräs rakenne mitoitettiin eurokoodistandardeja noudattaen. Rakennetta mitoittaessa täytyi ensimmäiseksi selvittää standardien avulla ominaismitoitusravot, joihin vaikuttivat rakennusympäristö, rakenteen geometria ja rakenteen tarkoitusperä.

Ominaisarvoilla selvitettiin rakenteeseen kohdistuvat yhdistelmäkerroimet. Valitut teräsprofiilit mitoitettiin siten, etteivät ne ylittäneet niille annettuja siirtymän raja-arvoja käyttörajatilassa. Murtorajatilatarkastelulla selvitettiin, että rakenne kestää siltä vaaditut voimat eivätkä mitoitettut profiilit ylitä murtorajatilaa. Tulokset varmistettiin sekä Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmalla että eurokoodistandardien määräämillä lujuusopillisilla kaavoilla. Tämän takia raportin sisältöä on runsaasti, vaikka aihetta on rajattu.

Teräsprofiileita mitoittaessa huomattiin, että käyttökelpoisuusvaatimuksen rajat käyttörajatilatarkastelussa tulivat vastaan varsin nopeasti. Suureen siirtymään vaikutti vaakapalkin jänneväli ja työn toteuttaminen IPN-profiililla. Tämän takia vaakapalkki jouduttiin mitoittamaan hieman yli suureksi, minkä takia myös palkin massa kasvoi. Myös lopullisten profiilikokojen käyttöasteet pyrittiin pitämään yli 50 %:n. Tavoite oli pyrkiä optimoimaan rakenteelta vaadittava profiilikoko, materiaali ja kokonaisuudessaan. Käyttörajatilan tuomat suuret taipumat rajoittivat rakenteen perusteellisempaa optimointia. Laskelmat osoittivat, että mitoitettu rakenne kestää hyvin siltä vaaditut kuormitukset.

Työ oli työläs, sillä teoria ja standardien mukainen toteuttaminen vei aikaa. Kokemattomuus ja luottamus tuloksiin sai aloittelevan suunnittelijan helposti pyöristelemään tuloksia ylöspäin, mikä tuo mahdollisesti lisäkuluja ja kustannuksia rakenteen materiaalihankintoihin. On myös muistettava, että optimoitu monimutkainen rakenne, joka sisältää paljon eri työvaiheita, voi valmistuskustannuksiltaan maksaa enemmän kuin materiaali. Suunnittelijan on hyvä pystyä identifioimaan rakenteen eniten rasitetut kohdat ja osat jo suunnittelun alussa. Tällä voi olla suuri

helpottava vaikutus työn loppuunsaattamiseen, koska mahdollisiin kriittisiin paikkoihin voidaan puuttua jo rakennetta suunniteltaessa ja mahdolliset korjaukset eivät aiheuta suuria muunnoksia työhön. Näitä asioita suunnittelijan on mietittävä ja silmälläpitää rakennetta suunniteltaessa.



## LÄHTEET

Lumikuormat. 2020. Teräsrakenneyhdistys Ry. Saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/795/a1f6dd1/Lumikuormat4.pdf>. Hakupäivä 4.11.2020.

Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo 2019. Tekniikan kaavasto. Porvoo: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy.

Ongelin, Petri – Valkonen, Iikka. 2012. Rakenneputket EN 1993 -käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj. Saatavissa: [https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012\\_PDFversio.pdf](https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDFversio.pdf). Hakupäivä 14.10.2020.

Ongelin, Petri – Valkonen, Iikka. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj. Saatavissa: [http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010\\_PDF-versio.pdf](http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf). Hakupäivä 14.10.2020.

Orasko Oy. 2020. Saatavissa <https://orasko.fi/>. Hakupäivä 14.12.2020.

Perälä, Martti 2020. Kiepahdusmomentti teräs- ja puurakenteiden mitoituksessa. Verkkolehti SeAMK. Saatavissa: <https://lehti.seamk.fi/alykkaat-ja-energiatehokkaat-jarjestelmat/kiepahdusmomentti-teras-ja-puurakenteiden-mitoituksessa/>. Hakupäivä 20.12.2020.

Rakentaminen. SFS Ry. Saatavissa: <https://sfs.fi/osallistu-ja-vaikuta/aihealueet/rakentaminen/> Hakupäivä 25.1.2021.

RIL 201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL Ry.

RIL 201-2-2019. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL Ry.

SFS EN 1990+A1+AC. 2006. Eurocode. Rakenteiden suunnittelun perusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.

SFS-EN 1991-1-1+AC. 2002. Eurocode. Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, omapaino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS Ry.

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurocode. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS Ry.

Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

## **LIITTEET**

LIITE 1 Käyttörajatila

LIITE 2 Murtorajatila

LIITE 3 Poikkileikkauksen laskeminen

LIITE 4 Vaakapalkin laskentatulokset

LIITE 5 Pystypilarin laskentatulokset

LIITE 6 Kiepahduksen estäminen sivusuuntaisella tuennalla laskentatulokset

LIITE 7 Vinojäykisteen laskentatulokset

LIITE 8 Rakenteen maksimijännitys murtorajatilassa

LIITE 9 Murtorajatilassa pohjalevyille aiheutuvat kuormitukset

LIITE 10 Julkisivupiirros

LIITE 11 Teräsrungon rakennepiirros

**Käyttörajatilan mitoitusarvot**

(RIL 201-1-2017. 2017, 44)

Palkin pituus  $l := 10 \text{ m}$   
 Palkkiväli  $L := 5 \text{ m}$

Omapaino	Palkki(1.12kN/m)+ (katto ja orret 0.88kN/m)	$G_{k,j} := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Tuulikuorma	Yhdistelukerroin $\psi_{0,w} := 0.6$	$Q_{k,w} := 0.65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Lumikuorma	Yhdistelukerroin $\psi_{0,s} := 0.7$	$Q_{k,s} := 2.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ " + " } Q_{k,i} \text{ " + " } \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{ ominaisyhdistelmä (characteristic) } \quad (7.9)$$

Käyttörajatila yhdistelykuormat

Kun lumi on määrävä muuttuva kuorma  $F_{m,s} := G_{k,j} + Q_{k,w} + Q_{k,s} \cdot \psi_{0,s} = 4.246 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Kun tuuli on määrävä muuttuva kuorma  $F_{m,w} := G_{k,j} + Q_{k,s} + Q_{k,w} \cdot \psi_{0,w} = 4.67 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Käyttörajatilan kuorman arvo on epäedullisin edelle lasketuista

$$F := \max(F_{m,s}, F_{m,w}) = 4.67 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Laskettu kuormitus kokonaispinta-alalle, jota palkki kannattelee

$$F_1 := F \cdot (L \cdot l) = 233.5 \text{ kN}$$

**Murtorajakuormat**

(Ongelin – Valkonen 2010, 72)

Palkin pituus	$l := 10 \text{ m}$
Myötölujuus	$R_e := 355 \text{ MPa}$
Kimmokerroin	$E := 210 \text{ GPa}$
Palkkiväli	$L := 5 \text{ m}$

Omapaino	Palkki(1.12kN/m)+ (katto ja orret 0.88kN/m)	$G_{k,j} := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
----------	---	---

Tuulikuorma	Yhdistelukerroin $\psi_{0,w} := 0.6$	$Q_{k,w} := 0.65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
-------------	--------------------------------------	--

Lumikuorma	Yhdistelukerroin $\psi_{0,s} := 0.7$	$Q_{k,s} := 2.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
------------	--------------------------------------	--

Murtorajatila yhdistelykuormat

Kun lumi on määrävä muuttuva kuorma	$F_{m,s} := 1.35 \cdot G_{k,j} + 1.5 \cdot Q_{k,w} + 1.5 \cdot Q_{k,s} \cdot \psi_{0,s} = 6.069 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
-------------------------------------	---

Kun tuuli on määrävä muuttuva kuorma	$F_{m,w} := 1.35 \cdot G_{k,j} + 1.5 \cdot Q_{k,s} + 1.5 \cdot Q_{k,w} \cdot \psi_{0,w} = 6.705 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
--------------------------------------	---

Murtorajatilan kuorman arvo on epäedullisin edelle lasketuista

$$F := \max(F_{m,s}, F_{m,w}) = 6.705 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Laskettu kuormitus kokonaispinta-alalle, jota palkki kannattelee

$$F_1 := F \cdot (L \cdot l) = 335.25 \text{ kN}$$

+

**Poikkileikkauksen laskeminen (Ongelin- Valkonen 2010, 83)**

Teräsprofiili IPN 450 S355

Profiilin korkeus  $h := 450 \text{ mm}$

Laipan paksuus  $t := 24.3 \text{ mm}$

Uuman ja laipan välinen säde  $r := 16.2 \text{ mm}$  (valtanen 2016, 808)

Tehollinen korkeus  $b := h - (t \cdot 2) - (r \cdot 2) = 369 \text{ mm}$

Poikkileikkauksluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat <sup>a)</sup>				
Taso-osan jännityskäyrä (puristus positiivinen)							
1	$b/t \leq 72\epsilon$	$b/t \leq 33\epsilon$	Jos $\alpha > 0, 3$ : $b/t \leq \frac{238\epsilon}{1700 - I}$ Jos $\alpha \leq 0, 3$ : $b/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$				
2	$b/t \leq 87\epsilon$	$b/t \leq 33\epsilon$	Jos $\alpha > 0, 3$ : $b/t \leq \frac{258\epsilon}{1700 - I}$ Jos $\alpha \leq 0, 3$ : $b/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$				
Taso-osan jännityskäyrä (puristus negatiivinen)							
3	$b/t \leq 124\epsilon$ <sup>c)</sup>	$b/t \leq 42\epsilon$ <sup>e)</sup>	Jos $\psi > -1$ : $b/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ <sup>d)</sup> Jos $\psi \leq -1$ : $b/t \leq 42\epsilon(1 - \psi)\sqrt{1 - \psi}$				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460	500
	$\epsilon$	1,0000	0,9244	<b>0,8136</b>	0,7480	0,7148	0,6850
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	550	600	620	650	680	700
	$\epsilon$	0,6537	0,6258	0,6157	0,6013	0,5836	0,5794

a) Varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun poikkileikkauksluokka määritellään puhtaasti puristuksen mukaan  
 b) Puristetun osan korkeuden määrittäminen (α-kertoimella), ks. kohta 2.7.1  
 c) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi asetaan:  $b/t \leq 121,43\epsilon$   
 d) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi asetaan:  $b/t \leq 38,25\epsilon$   
 e) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduksikertoimesta  $k_{\sigma}$  ja jännitysuhteesta  $\psi$   
 f) Kohtaa  $\psi < -1$  käytetään, kun joko puristusjännitys  $\sigma < f_y$  tai vedetyn puolen venymä  $\epsilon_p > f_y/E$

Taulukko (Ongelin- Valkonen 2010, 83)

Palkkiin kohdistuu puristusta, joten käytetään kaavaa  $\frac{b}{t} \leq 33 \epsilon$   
 $\epsilon := 0.8136$  (taulukon ja materiaalin myötölujuuden ollessa 355MPa)

Jos ehto täyttyy profiili kuuluu poikkileikkauksluokkaan 1  $\frac{b}{t} \leq 33 \cdot \epsilon$   
 $\frac{b}{t} = 15.185$   $33 \cdot \epsilon = 26.849$

**Ehto täyttyy!**  $15.185 \leq 26.849$  **OK**

Teräsprofiili	HEA 240 S355
Profiilin korkeus	$h := 230 \text{ mm}$
Laipan paksuus	$t := 7.5 \text{ mm}$
Uuman ja laipan välinen säde	$r := 21 \text{ mm}$ (valtanen 2016, 810)
Tehollinen korkeus	$b := h - (t \cdot 2) - (r \cdot 2) = 173 \text{ mm}$
Palkkiin kohdistuu puristusta, joten käytetään kaavaa $\frac{b}{t} \leq 33 \cdot \epsilon$	
$\epsilon := 0.8136$ (taulukon ja materiaalin myötölujuuden ollessa 355MPa)	
Jos ehto täyttyy profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 1 $\frac{b}{t} \leq 33 \cdot \epsilon$	
$\frac{b}{t} = 23.067$	$33 \cdot \epsilon = 26.849$
<b>Ehto täyttyy!</b>	$23.067 \leq 26.849$ <span style="float: right;"><b>OK</b></span>

## Vaakapalkin taipuma

Palkki IPN 450, Poikkileikkausluokka 1

Palkin pituus	$l := 10 \text{ m}$
Palkkiväli	$L := 5 \text{ m}$
Myötölujuus	$R_e := 355 \text{ MPa}$
Kimmokerroin	$E := 210 \text{ GPa}$
Neliömomentti	$I_x := 458.5 \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^4$
Palkin keskipiste	$x := 5 \text{ m}$

**Taulukko 7.1** Eurocoden osan EN 1993-1-1 Suomen kansallisen liitteen mukaiset taipumien ja siirtymien käyttörajatilat [17]

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
Pääkannattajat: - vesikatolassa ja katokaisaa - välipohjissa	L / 300 L / 400
Ulkokeet	L / 150
Katto-orret	L / 200
Seinäorret	L / 150

(RIL 201-1-2017, 2017, 30)

Palkin taipuma täytyy olla vähemmän kuin suurin laskettu taipuma, jotta ehto täyttyy.

suurin sallittu taipuma

$$\frac{l}{300} = 33.333 \text{ mm}$$

Käyttörajatilan pystysuuntainen tasainen kokonaiskuorma, joka kohdistuu palkkiin

$$F := 233.5 \text{ kN}$$

(Tekniikan kaavasto 2005, 148)

Taipuma 
$$y := \frac{5 \cdot F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I_x} = 31.577 \text{ mm}$$

**Ehto täyttyy, sillä taipuma 31.58mm < 33.3mm**

OK



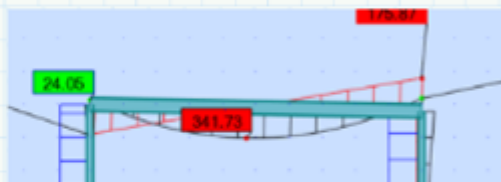
**Vaakapalkin taipuma, IPN 450** (SFS-EN 1993-1-1, 53)  $\frac{M_{ed}}{M_{c,rd}} \leq 1.0$

$$M_{c,rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{m0}} \quad \text{poikkileikkausluokat 1 ja 2} \quad (6.13)$$

(6) Kiinnittimien reikiä, mikäli kiinnitin on reiässä, ei tarvitse ottaa huomioon poikkileikkauksen puristetulla alueella lukuun ottamatta ylisuuria ja pidennettyjä reikiä.

Poikkileikkaukskestävyyden osavarmuusluku	$\gamma_{m0} := 1$
Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus	$W_{pl} := 2400 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$
Myötöraja	$f_y := 355 \text{ MPa}$
$M_{c,rd} := \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{m0}} = 852 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M_{ed} := 341.73 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$$\frac{M_{ed}}{M_{c,rd}} = 0.401 \quad 0.401 \leq 1.0 \quad \text{OK}$$



**Käyttöaste 40.1%**

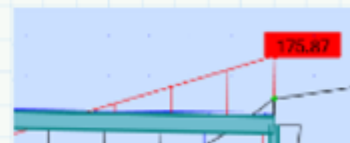
**Vaakapalkin leikkauskestävyys IPN 450** (SFS-EN 1993-1-1, 54)  $\frac{V_{ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0$

Profiilin pinta-ala	$A := 146.90 \text{ cm}^2$	$V_{ed} := 175.87 \text{ kN}$
Profiilin kokonaisleveys	$b := 170 \text{ mm}$	
Profiilin kokonaiskorkeus	$h := 450 \text{ mm}$	
Profiilin laipan paksuus	$t_f := 24.3 \text{ mm}$	
Profiilin uuman paksuus	$t_w := 16.2 \text{ mm}$	
Profiilin pyöristyssäde	$r := 16.2 \text{ mm}$	

Leikkauspinta-ala  $A_v := A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f = (7.609 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo (Plastisuusteorian mukainen mitoitus)  $V_{pl,Rd} := \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{m0}} = (1.56 \cdot 10^3) \text{ kN}$

$$\frac{V_{ed}}{V_{pl,Rd}} = 0.113 \quad \text{Käyttöaste 11.3\%} \quad 0.113 \leq 1.0 \quad \text{OK}$$



Leikkauslommahduskestävyys voidaan jättää huomioimatta, jos seuraava ehto täyttyy

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \cdot \frac{\varepsilon}{n} \quad (\text{SFS EN-1993-1-1, 55})$$

Uuman tehollinen korkeus  $h_w := h - ((t_f \cdot 2) + r) = 0.385 \text{ m}$

(kun materiaalin myötölujuus 355MPa)  $\varepsilon := 0.8136$

Varmuuskerroin  $n := 1$

$$\frac{h_w}{t_w} = 23.778 \quad 72 \cdot \frac{\varepsilon}{n} = 58.579$$

**Ehto täyttyy!**  $23.773 \leq 58.579$

**OK**

Leikkauslommahduskestävyys voidaan jättää huomioimatta!

### 6.2.8 Taivutus ja leikkaus

(1) Leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen otetaan huomioon.

(2) Kun leikkausvoima on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä, sen vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen voidaan jättää huomioon ottamatta paitsi, jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen kestävyyttä, ks. EN 1993-1-5.

$$V_{ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1, 60})$$

$$V_{ed} = 175.87 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} = 779.766 \text{ kN}$$

**OK**

Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutusta ei tarvitse huomioida!

**Teräsrakenteen, pystypilarin taipuma käyttörajatilassa**

Profiili HEA 240, S355

Pilariväli  $l_1 := 5 \text{ m}$

Omapaino, (palkki 1,12kN/m<sup>2</sup> + (katto ja orret 0,88kN/m<sup>2</sup>)  $Q_k := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

**Tuulen ominaiskuorma rakennuksen pitkälle sivulle**

Ominaiskuorma  $Q_{kw} := 0.88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

**Vaakasuuntainen kokonaistuulikuorman vaikutus pilariin tasaisella kuormituksella ja osavarmuusluvulla.**

Tuulen kokonaiskuorma  $Q_{kw,max} := (Q_{kw} \cdot l_1) \cdot 1.5 = 6.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}$

**Pilarin taipuma, (suurin sallittu taipuma)** Ongelin – Valkonen. 2017, 527

Rakenteen vaakasiirtymän rajatila:  
- 1 ja 2 kerroksiset rakennukset  
- muut rakennukset

H / 150  
H / 400

Kimmokerroin  $E := 210 \text{ GPa}$   
 Jäyhyysmomentti  $I_y := 77.6 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$   
 Pilarin pituus  $L := 9 \text{ m} \quad l := 9 \text{ m}$

Suurin sallittu taipuma käyttörajatilassa  $\frac{L}{150} = 60 \text{ mm}$

$$F := Q_{kw,max}$$

Pilarin taipuma tuulikuormasta, tasainen kuormitus  $y_1 := \frac{5 \cdot F \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I_y} = 34.6 \text{ mm}$

$$34.6 \text{ mm} < 60 \text{ mm}$$

OK

**Pilarin puristuskestävyys**

Palkki HEA 240

(SFS-EN 1993-1-1, 53)

Poikkileikkausluokka 1

**Pystysuora kuorma pilariin, murtorajatilassa**

$$N_{ed} := 176.45 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0$$

Poikkileikkauksen tasaisen puristuskestävyyden mitoitusarvo  $N_{c,Rd}$ 

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad +$$

Kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon puristetuissa sauvoissa, mikäli kiinnitin on reiässä.

Brutto poikkileikkaus pinta-ala	$A := 7.68 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$
Kestävyys osavarmuusluku	$\gamma_{M0} := 1$
Puristusvoima, murtorajatilassa	$N_{ed} := 176.45 \text{ kN}$
Kimmokerroin	$E := 210 \text{ GPa}$
Jäyhyysmomentti	$I_y := 27.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$
Nurjahdus pituus	$L_{cr} := 9 \text{ m}$
Materiaalin myötölujuus	$R_e := 355 \text{ MPa}$
	$f_y := R_e$

$$N_{c,Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.726 \text{ MN}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} = 0.065$$

$$0.077 < 1.0$$

Käyttöaste 6.5%

OK

<b>Pilarin taivutuskestävyys</b>		(SFS-EN 1993-1-1, 53)
Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus	$W_{pl,y} := 744 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$	
Taivutusmomentti	$M_{ed} := 136.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$	
Poikkileikkauksen plastinen taivutusvastus	$M_{pl,Rd} := \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 264.12 \text{ kN} \cdot \text{m}$	
$\frac{M_{ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.516$	Käyttöaste 51.6%	OK
<b>Pilarin leikkauskestävyys</b>		(SFS-EN 1993-1-1, 54)
Profilin leveys	$b := 240 \text{ mm}$	
Profilin korkeus	$h := 230 \text{ mm}$	
puristusvoima	$V_{ed,Q} := 32.17 \text{ kN}$	
$A_v := \frac{A \cdot h}{b + h} = (3.758 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$		
$V_{ed} \leq V_{c,Rd}$	$V_{c,Rd} := \frac{A_v \cdot \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = 770.298 \text{ kN}$	
$\frac{V_{ed,Q}}{V_{c,Rd}} = 0.042$	Käyttöaste 4.2%	OK
<b>Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus</b>		(SFS-EN 1993-1-1, 57)
Ei tarvitse huomioida jos	$V_{ed,q} \leq 0.5 \cdot V_{c,Rd}$	
	$0.5 \cdot V_{c,Rd} = 385.149 \text{ kN}$	
$V_{ed} = 32.17 \leq 385.15 V_{c,Rd}$		OK

**Nurjahdus, y-akselin suhteen**  $\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$  (SFS-EN 1993-1-1, 61)

$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$

Kaava pätee poikkileikkauksissa 1-3

$I_y := 7760 \cdot \text{cm}^4$

Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 \cdot \lambda^2}}$

Kriittinen nurjahduskuorma

$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = (1.986 \cdot 10^3) \text{ kN}$

Muunnettu hoikkuus

$\lambda := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = 1.172$

$\frac{h}{b} = 0.958$

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
	$h/b > 1.2$	$t \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a <sub>0</sub>
		$40 \text{ mm} < t \leq 100$	y-y z-z	b c
	$h/b \leq 1.2$	$t \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c
		$t > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d c

Taulukko 2.12 Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijä [3,4,5]

Nurjahduskäyrä	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

$\alpha := 0.21$   $\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 1.289$

Pienennöskerroin

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.548$

Nurjahduskuorma

$N_{b,Rd} := \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = (1.494 \cdot 10^3) \text{ kN}$

$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} = 0.118$

**Käyttöaste 11.8%**

OK

**Nurjahdus, z-akselin suhteen**  $\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$  (SFS-EN 1993-1-1, 61)

$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$

Kaava pätee poikkileikkauksissa 1-3

$I_z = 2770 \text{ cm}^4$

Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 \cdot \lambda^2}}$

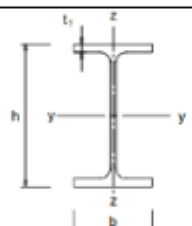
Kriittinen nurjahduskuorma

$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = 708.784 \text{ kN}$

Muunnettu hoikkuus

$\lambda := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = 1.961$

$\frac{h}{b} = 0.958$

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
	$h/b > 1.2$	y-y z-z	a	a <sub>0</sub>
			b	a <sub>0</sub>
	$h/b \leq 1.2$	y-y z-z	b	a
			c	a

**Taulukko 2.12** Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijä [3,4,5]

Nurjahduskäyrä	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

$\alpha = 0.34$

$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 2.723$

Pienennöskerroin

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.217$

Nurjahduskuorma

$N_{b,Rd} := \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 591.25 \text{ kN}$

$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} = 0.298$

**Käyttöaste 29,8%**

OK

**Nurjahdus varmistus (Euler),  
murtorajatilassa** HEA 240 profiili

Puristusvoima	$V_{ed} := 176.45 \text{ kN}$	
Pilarin korkeus	$L = 9 \text{ m}$	$I := 20 \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^4$
Neliösäde	$i_y := 60.0 \text{ mm}$	
Pinta-ala	$A = (7.68 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$	$i := \sqrt{\frac{I}{A}}$
Hoikkuusluku	$\lambda := \frac{L}{i_y} = 150$	
Nurjahdusjännitys	$\sigma_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = 92.116 \text{ MPa}$	
Nurjahdusvoima	$F_n := \sigma_e \cdot A = 707.453 \text{ kN}$	

$\frac{V_{ed}}{F_n} = 0.249$  käyttötila murtorajatilassa on 24.9%

OK



<b>Kiepahduksen estäminen sivuttaistuella</b>		SFS-EN 1993-1-1, kohta 6.59
Teräsprofiili INP 450 ,S355		
Sivuttaistukien väli	$L_c := 1.67 \text{ m}$	
Kimmokerroin	$E := 210 \text{ GPa}$	
Myötölujuus	$f_y := 355 \text{ MPa}$	
Hoikkuuden korjausluku	$k_c := 0.90$	
Varmuusluku	$\gamma_{m1} := 1$	
Poikkileikkauksen taivutusvastus	$W_y := 2040 \text{ cm}^3$	
Palkin laipan paksuus	$t := 24.3 \text{ mm}$	+
Palkin korkeus	$h := 450 \text{ mm}$	
Laipan säde	$r := 16.2 \text{ mm}$	
Uuman tehollinenkorkeus	$h_w := 450 \text{ mm} - (2 \cdot t + r)$	
Uuman paksuus	$t_w := 16.2 \text{ mm}$	
Puristetun laipan tehollinen neliömomentti heikoimman akselin suhteen	$i_{eff,f} := 1730 \text{ cm}^4$	
Puristetun laipan tehollinen pinta-ala	$A_{eff,f} := 146.90 \text{ cm}^2$	
Puristetun laipan uuman tehollinen pinta-ala	$A_{eff,w,c} := h_w \cdot t_w$	
Muunnetun hoikkuuden raja-arvo	$\lambda_c := 0.3$	
	$\lambda_1 := \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	
Hitaussäde poikkileikkauksen heikoimman akselin suhteen	$i_{f,z} := \sqrt{\frac{i_{eff,f}}{A_{eff,f} + \frac{1}{3} \cdot A_{eff,w,c}}} = 0.032 \text{ m}$	
Taivutuskestävyyden mitoitusarvo	$M_{c,RD} := W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m1}}$	
Taivutusmomentin mitoitusarvo sivuttais tukien välillä	$M_{y,ED} := 350 \text{ kN} \cdot \text{m}$	
Sivusuunnassa tuettuja sauvoja ei tarvitse tarkastaa, jos ehto täyttyy	$\lambda_f \leq \lambda_c \cdot \frac{M_{c,RD}}{M_{y,ED}}$	
	$\lambda_f := \frac{k_c \cdot L_c}{i_{f,z} \cdot \lambda_1} = 0.612$	$\lambda_c \cdot \frac{M_{c,RD}}{M_{y,ED}} = 0.621$
	<b>Ehto <math>\lambda_f \leq \lambda_c \cdot \frac{M_{c,RD}}{M_{y,ED}}</math> täyttyy</b>	<b>OK</b>

(Ongelin – Valkonen 2012, 459)

**Jäykisteen mitoitus, pitkän sivun rasitus päätyihin**

Valittu vinojäykiste SHS 120x120x5, kylmämuovattu S355

Putki profiilin pinta-ala	$A := 22.4 \text{ cm}^2$
	$W_{pl} := 33.10 \text{ cm}^3$
kimmokerroin	$E := 210 \text{ GPa}$
Myötölujuus	$R_e := 355 \text{ MPa}$
Jäyhysmomentti	$I := 485 \text{ cm}^4$
Jäykisteen pituus	$L := 10.295 \text{ m}$
	$Y_{m0} := 1$
$f_y := R_e$	

**Jäykistysristikon kannalta mitoittavaksi tilanteeksi tulee tilanne, jossa tuuli on määräävä.**

Pitkän sivun ominaistuulikuorman arvo	$q_{wk} := 0.88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Pitkän sivun ominaistuulikuorman arvo osavarmuusluvulla	$Q_{wd} := q_{wk} \cdot 1.5 = 1.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Rakennuksen korkeus	$H_1 := 9 \text{ m}$
Rakennuksen pituus	$L_1 := 20 \text{ m}$
Rakennuksen leveys	$B := 10 \text{ m}$

**Vaakakuorma jaetaan lyhyille sivuille pilarin päihin tasan** (Ongelin – Valkonen 2012, 459)

Tuulen aiheuttama voima pilarin päähän  $F_{ed} := Q_{wd} \cdot \left( \frac{3}{8} \cdot H_1 \right) \cdot \frac{L_1}{2} = 44.55 \text{ kN}$

Tuulikuorma ollessa määräävä saadaan pystysuuntaisiksi kuormiksi:

Omapaino (2kN/m <sup>2</sup> )	$Q_k := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1.35 = 2.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Lumikuorma (2.28kN/m <sup>2</sup> )	$Q_s := 2.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1.5 \cdot 0.7 = 2.394 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

**Pystykuormasta aiheutuu pilareille fiktiivinen lisävaakavoima, kun pilareiden korkeus on 9.0m saadaan pilareiden ekvivalentiksi alkuvinoudeksi:** (SFS-EN 1993-1-1, 33)

Pilareiden määrä  $m_1 := 5$

$$\alpha_m := \sqrt{0.5 \left(1 + \frac{1}{m_1}\right)} = 0.775$$

$$\alpha_h := \frac{2}{\sqrt{H_1}} = 0.667 \frac{1}{m^2} \quad \alpha_h := 0.667$$

Pääkehän pilareiden alkuvinous  $\phi := \frac{\alpha_h \cdot \alpha_m}{200} = 0.003$   $\phi := \frac{1}{346}$

**Fiktiivinen lisävaakavoima jaetaan tuulikuorman tapaan lyhyille sivuille tasan. Lyhyiden sivujen jäykisteet tulevat olemaan samanlaisia**

(Ongelin -Valkonen 2012, 460)

$$V_{ed} := (Q_k + Q_s) \cdot B \cdot \left(\frac{L_1}{2}\right) = 509.4 \text{ kN} \quad \text{oma paino + lumi}$$

$$H_{fic} := \phi \cdot V_{ed} = 1.472 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima huomioidaan kokonaiskuormassa, koska  $H_{ed} \leq V_{ed}$ .

Kokonaiskuorma  $H_{ed} := F_{ed} + H_{fic} = 46.022 \text{ kN}$

Jäykistys toteutetaan kahdella vinositeellä, jolloin toinen on puristettu ja toinen vedetty. Siirretään vaakavoimat kokonaisuudessaan vedetyllä vinositeellä.

Vetovoima/  
puristusvoima  $N_{ed} := \frac{H_{ed}}{\cos(37.5^\circ)} = 58.01 \text{ kN}$

(SFS-EN 1993-1-1, 61).

### RHS 120x 120 x 5mm Vinotuen nurjahduksen laskeminen

Nurjahduskuorma  $N_{cr,y} := \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I}{L^2} = 94.844 \text{ kN}$

Muunnettu hoikkuus  $\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 2.896$

Nurjahduskäyrä  $\alpha := 0.49$

Nurjahduskäyrä	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Epätarkkuestekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Apusuure  $\Phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2) = 5.353$

Pienennystekijä  $X := \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_y^2}} = 0.101$

Palkin kestävyys  $N_{by,Rd} := X \cdot \frac{A \cdot f_y}{Y_{m0}} = 80.695 \text{ kN}$

$$\frac{N_{ed}}{N_{by,Rd}} = 0.719 \quad N_{by,Rd} > N_{ed}$$

**Käyttöaste 71.9%**

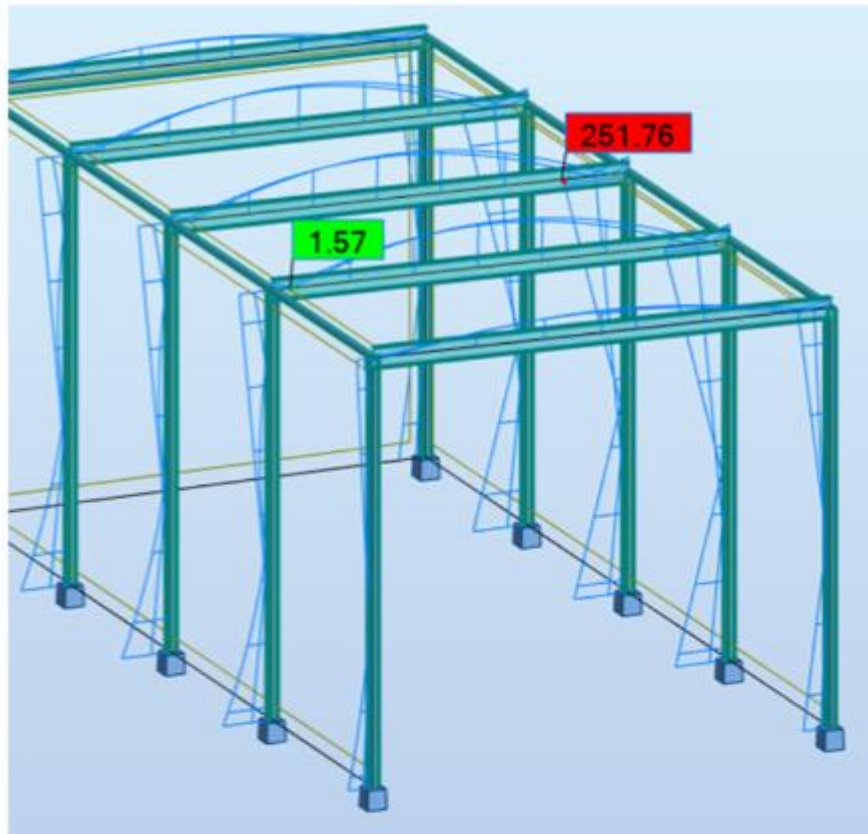
**OK**

Pitkän sivun vinojäykisteet mitoitetaan samaa kokoa olevalla teräsputkella, jolloin mitoituksesta tulee varmalla puolella oleva.

Lisäksi pystypilareiden yläpäänvaakapalkit, jotka ohjaavat vaakavoimat vinositeille mitoitetaan RHS 120 x 120 x 5mm S355 profiililla. (Palkkiin kohdistuu vain aksiaali kuormaa). Kyseisellä mitoituksella palkeista tulee varmalla puolella olevia, sillä myös palkin pituus on vain puolet vinositeiden pituudesta ja näin ollen kriittinen nurjahdus kestävyys kasvaa.

+

## Murtorajatilan jännitystarkastelu



Teräsrakenteen maksimijännitys on 251,76MPa murtorajatilakuormituksella, kun rakenteen pitkää korkeaa sivua kuormitetaan tuulen aiheuttamalla vaakavoimalla. Jännitys ei ylitä teräsprofiilin materiaalin murtorajatilaa (420MPa). Myöskään rakenne ei ylitä myötörajatilaa (355MPa).

Profiilin materiaalin murtorajatilaa  $R_m := 420 \text{ MPa}$

$\sigma := 251.76 \text{ MPa}$

Rakenteen varmuus, ennen murtumista murtorajatilassa

$$n := \frac{R_m}{\sigma} = 1.668$$

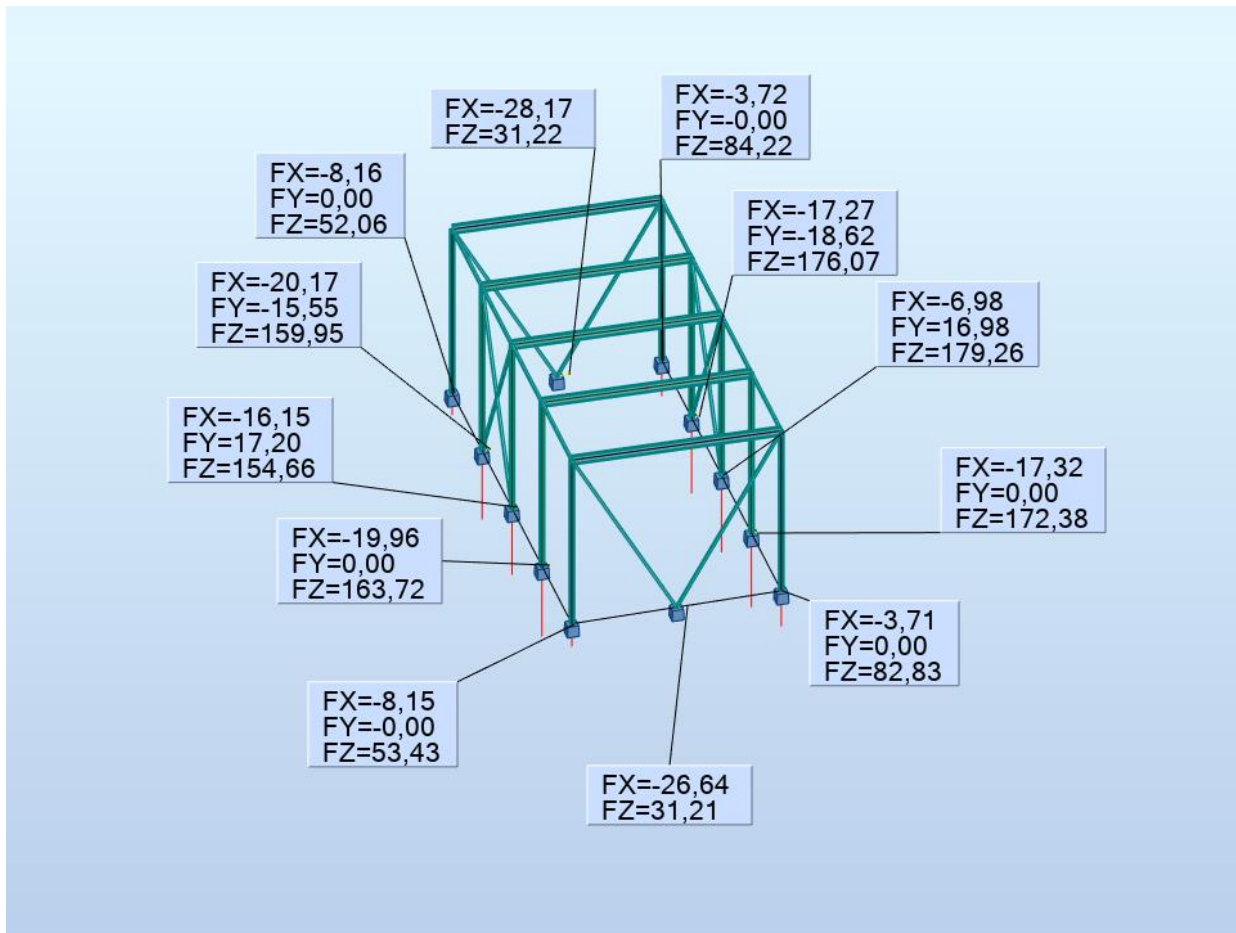
OK

+

Rakenteen kestävyuden varmistus tuulen kuormituksen suunnan muutoksella.

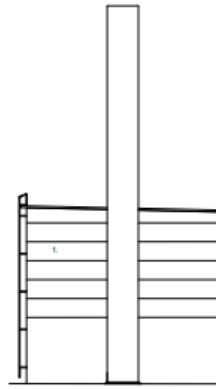
	Tuulen kuormitus suunta	Maksimi jännitys
Kuormitus tilanne 1	Rakenteen pitkän ja korkeamman sivun kuormitus	251.76MPa
Kuormitus tilanne 2	Rakenteen lyhyen sivun kuormitus	198,5MPa
Kuormitus tilanne 3	Rakenteen pitkän ja matalamman sivun kuormitus	245.9MPa

OK

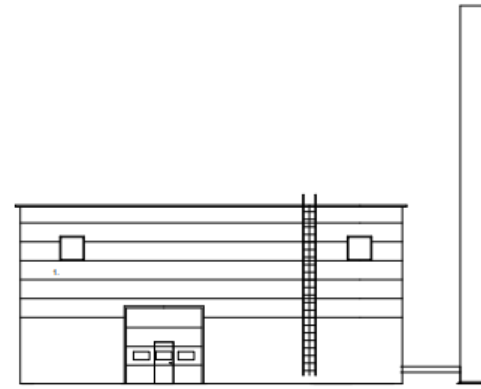




JULKISIVU LÄNTEEN



JULKISIVU ETELÄÄN



JULKISIVU ITÄÄN

JULKISIVUJEN materiaalit ja värit:

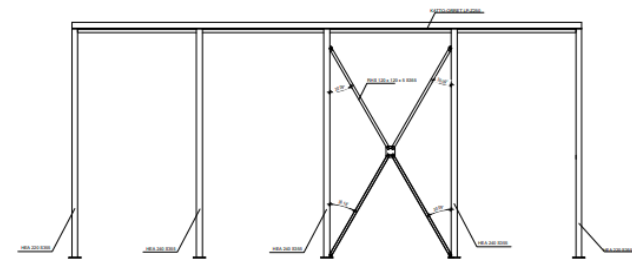
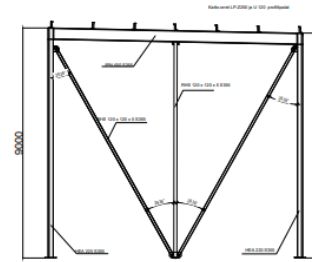
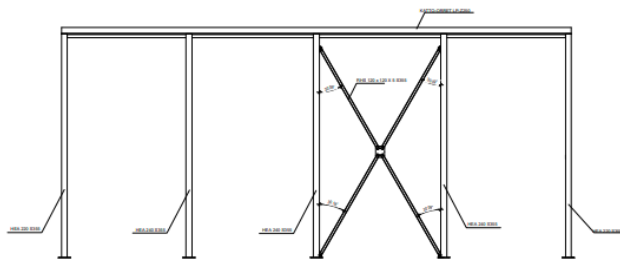
1. väri pinnoitettu teräsohutelevy, väri vaalean harmaa
2. vesikate PIR-pöimukate, väri tumman harmaa

KATTOTURVATUOTTEET sRaM F2  
Ympäristöministeriön asetus rakennuksen  
käytöturvallisuudesta MUKAISESTI.

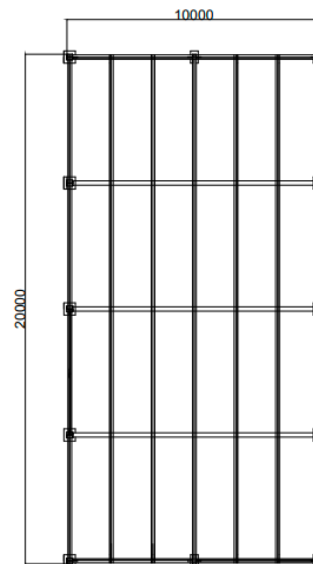
SAVUNPOISTOKKUNAT, 1190 x 1190 mm, 4 kpl  
EN 12101-2 standardin mukaiset

KORTTELI / TILA	TONTTI / RND	RAKENNUSLUVAN TUNNUS (viraston merkintä)
UTA-JÄRVI	-	-
RAKENNUSLOMAKIRJE		PIIRUSTUSLAJI
UUDISRAKENNUS		PÄÄPIIRUSTUS
		PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ
		LÄMPÖLAITOSRAKENNUS
		JULKISIVUPIIRUSTUS
	Pvm.	

# TERÄSRUNGON RAKENNEPIIRROS



Suunnittelustandardi on Eurokoodi EC5. Seuraamusluokka CC2. Suunniteltu käyttöikä 50 v.	
<b>KUORMAT:</b>	
Yläpohja	UTA-JÄRVI 2,28 kN/m <sup>2</sup> (μ= 0.8)
- lumi katolla (EN)	
- omapaino	
- ylävaakaalkki	1,12 kN/m
- vesikate+orret	0,88 kN/m <sup>2</sup>
- tuuli	0,65 kN/m <sup>2</sup> (maastoluokka 2)
<b>Materiaalit:</b>	
- teräs	S355, ellei toisin mainita
<b>RAKENNUKSEN JÄYKISTYS:</b>	
Mastopilarijäykitys. Teräsrunko jäykistetään teräsvincijäykisteillä rungon kuvan mukaisesti (veto).	



KORTTELI/TELA	TUNNUS/RYHMÄ	RAKENNUSLUVAN TUNNUS (viite) (merkitys)
UTA-JÄRVI	-	
RAKENNUSRYHMÄ		008-RY-01-X-1
RAKENNUSRYHMÄN LAAJUUS		PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ
RAKENNUSRYHMÄN LAAJUUS		LÄMPÖLÄMMITTÖRUNKO