



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Janne Laukkonen

---

## TimberFrame pilari-palkkikehä

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Tekijä: Janne Laukkonen

Työn nimi alaotsikoineen: TimberFrame pilari-palkkikehä

Ohjaaja: Martti Perälä

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 58

Liitteiden lukumäärä: -

---

Opinnäytetyö on tehty pientalovalmistaja DEN Finland Oy:n toimeksiannosta. Yhtiön Finnlamelli-brändillä Alajärvellä valmistettavaan hirsirunkoiseen rakennukseen tarjotaan optiona suuret lasipinnat mahdollistavia pilari-palkkirunkoja tuotenimellä TimberFrame.

Kehärakenteen mitoituksen erityispiirteitä ovat momenttikuormitetun ruuvikiinnikkeisen puu-teräslevyliitoksen kiertymisen vaikutus käyttörajatilatarkastelussa ja lattateräksen kiepahduskestävyyden tarkastaminen eurokoodin mukaisesti. Teräslevyn kokoa ja ruuviryhmää optimoimalla on saavutettu liitoskapasiteetissa tasapaino murto- ja käyttörajatilan välille.

Kirjallisuustutkimuksen pohjalta on luotu vahva laskennallinen perusta teräslevyin jäykistetyn puurakenteisen kehän rakennesuunnitteluun. Tutkimuksen perusteella on ohjelmoitu Excel-laskentapohja rakennesuunnittelun käyttöön.

<sup>1</sup> Asiasanat: kehärakenne, jäykistys, liitokset

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Degree programme: Master of Engineering, Construction Engineering

Specialisation: Structural Design

Author: Janne Laukkonen

Title of thesis: TimberFrame column-and-beam frame

Supervisor: Martti Perälä

Year: 2024

Number of pages: 58

Number of appendices: -

---

The thesis was commissioned by the low-rise residential building manufacturer DEN Finland Oy. For log-framed buildings manufactured in Alajärvi under the company's Finnlamelli brand, column-and-beam frames with the brand name TimberFrame are offered as an option, enabling large glass surfaces.

The special features of the dimensioning of the frame are the effect of twisting of a bending moment-loaded screw-fastened wood-steel plate joint in the serviceability limit state inspection and the checking for lateral torsional buckling of a flat steel bar in accordance with the Eurocode. By optimizing the size of the steel plate and the screw group, a balance was achieved in the joint capacity between the ultimate and service limit states.

Based on the literature research, a strong computational basis was created for the structural design of a timber frame stiffened with steel plates. Based on the research, an Excel calculation template was programmed for use in structural design.

<sup>1</sup> Keywords: frame, bracing, joints

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä .....	2
Thesis abstract .....	3
SISÄLTÖ .....	4
Kuva- ja taulukkoluettelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO .....	9
1.1 Opinnäytetyön tausta .....	9
1.2 Opinnäytetyön tavoite.....	9
1.3 Opinnäytetyön rakenne .....	9
1.4 Tutkimusmenetelmät.....	9
1.5 Opinnäytetyön rajaukset.....	10
1.6 Yritysesittely .....	10
2 KUORMAT JA JÄYKISTYS .....	12
2.1 Kuormat.....	12
2.1.1 Omapaino ja hyötykuorma .....	12
2.1.2 Lumikuorma .....	12
2.1.3 Tuulikuorma .....	15
2.1.4 Lisävaakavoimat .....	18
2.1.5 Stabiiliteettikuormat .....	18
2.2 Jäykistys.....	22
2.2.1 Mastojäykistys.....	22
2.2.2 Levyjäykistys.....	23
2.2.3 Kehjäykistys .....	23
2.2.4 Kiertokeskiöläskenta .....	23
3 NYKYTILAN KUVAUS.....	25
3.1 TimberFrame.....	25
3.1.1 Puurakenteet.....	25
3.1.2 Teräsjäykisteet.....	26

3.1.3	Kiinnitys muuhun rakennusrunkoon .....	26
3.1.4	Lasielementit .....	26
3.2	Laskenta .....	27
4	RAKENNEMITOITUS .....	28
4.1	Puurakenteiden mitoitus .....	28
4.2	Teräslevyn mitoitus .....	29
4.2.1	Veto .....	29
4.2.2	Leikkaus .....	29
4.2.3	Taivutus .....	30
4.3	Ruuviliitosten mitoitus .....	34
4.3.1	Ruuvivälit .....	34
4.3.2	Ruuvin leikkauskestävyys .....	36
4.3.3	Ruuviliitoksen voimat .....	38
4.4	Puuosan liitosalueen tarkastukset .....	39
4.5	Teräsosan liitosalueen tarkastukset .....	42
4.6	Liitossiirtymän arviointi .....	45
4.7	Alajuoksun perustuskiinnitys .....	47
4.8	Yläjuoksun kiinnitys hirteen .....	48
5	TULOKSET .....	50
5.1	Teräslevy .....	50
5.2	Ruuvivalinta .....	50
5.3	Käyttörajan taipuma .....	53
6	POHDINTA .....	56
	LÄHTEET .....	57

## Kuva- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Timberkoti-esittelytalon tupanäkymä .....	11
Kuva 2. Lumen kinostuminen taitoksessa .....	14
Kuva 3. Lumen kinostuminen korkeampaa rakennuskohdetta vasten .....	14
Kuva 4. Lumikuorman kinostuminen sisäjiirissä.....	15
Kuva 5. Tuulen maastoluokat .....	17
Kuva 6. Nurjahduksen ensimmäisen muodon jäykistyskuormat .....	20
Kuva 7. Nurjahduksen toisen muodon jäykistyskuormat.....	21
Kuva 8. Uumasauvan nurjahdustuenta .....	22
Kuva 9. Mastojäykistys, levyjäykistys, kehäjäykistys .....	22
Kuva 10. Kiertokeskiön määrittäminen.....	24
Kuva 11. TimberFrame naamakuva.....	25
Kuva 12. TimberFrame vaakaleikkaus.....	27
Kuva 13. Taivutusmomentti Jigi-mallissa.....	28
Kuva 14. Ruuviryhmien välien momentit.....	33
Kuva 15. Ruuviryhmän voimat ja kiertokeskiö. ....	39
Kuva 16. Halkeaminen ja palamurtuminen. ....	42
Kuva 17. Ruuvivälit ja palamurtumislinjojen esimerkkejä.....	43
Kuva 18. Pilari-palkkikehän lisäsiirtymä.....	47
Kuva 19. Alajuoksun kiinnitys. ....	48
Kuva 20. TimberFrame yläliitos. ....	49

Kuva 21. Ruuviryhmän kiertymäjäykkyys C24. ....	52
Kuva 22. Ruuviryhmän kiertymäjäykkyys GL30h. ....	53
Kuva 23. Ruuviryhmän selitteet. ....	53
Kuva 24. Esimerkkikehät. ....	54
Taulukko 1. Voimakerroin $c_f$ . ....	18
Taulukko 2. Nettopainekerroin $c_{p,net}$ . ....	18
Taulukko 3. Ruuvivälien minimiarvot ruuvityypeittäin. ....	35
Taulukko 4. Teräslevyn kiepahduskestävyys, $C_1=1,0$ ja $L=150$ mm. ....	50
Taulukko 5. Ruuvien puu-teräs-liitoksen leikkauslujuus hetkellisessä aikaluokassa. ....	51
Taulukko 6. Ruuviryhmien vertailu kiertymäjäykkyydellä. ....	52
Taulukko 7. Puukehän 200x200 C24 kapasiteetti. ....	55
Taulukko 8. Puukehän 165x215 GL30h kapasiteetti. ....	55

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Kiepahdus</b>	Rakenneosan puristetun osuuden stabiliteetin menetys taivutettuna ennen täyttä taivutuskapasiteettia
<b>Lommahdus</b>	Rakenneosan levymäisen osuuden paikallinen stabiliteetin menetys ennen täyttä puristus- ja taivutuskapasiteettia
<b>NR-rakenne</b>	Naulalevyliitoksin rakennettu puusauvainen ristikkorakenne tai vaarnapalkki
<b>Nurjahdus</b>	Rakenneosan stabiliteetin menetys puristettuna ennen täyttä puristuskapasiteettia
<b>Paarre</b>	Ristikkorakenteen ylä- tai alareunasauva



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Pientalon rakenteissa suuret ikkuna-aukot aiheuttavat merkittävää jäykistyskapasiteetin pienenemistä. Usein upeisiin maisemiin rakennettava unelmakoti, vapaa-ajanasunto tai saunatupa sijaitsee maastoluokaltaan tuulisella alueella, jolloin rakennukseen kohdistuvat kaatavat voimat ovat suuria. Teräs- ja puurakenteiset mastopilarit ovat kalliita toteuttaa ja vaativat perusrakenteiden erikoissuunnittelua. Teräspilarien ja -palkkien käyttö ei myöskään sovi puun ekologisuuteen profiloituneelle hirsitalovalmistajalle. Puinen kehärakenne, joka ei vaadi perustukselta erityisratkaisuja, on toivottu lopputulos.

## 1.2 Opinnäytetyön tavoite

Puurakenteisella pilari-palkkikehällä pyritään vastaanottamaan mahdollisimman paljon rakennuksen jäykistyskuormia. Rakennelaskennalle halutaan selkeä mitoitusketju, jolla varmistetaan rakenteellinen toimivuus sekä laskennan sujuvuus ja uskottavuus. Lisäksi halutaan luoda työkaluja luonnossuunnitteluvaiheeseen, jolla pystytään arvioimaan TimberFrame-kehällä varustetun rakennuksen toteutuskelpoisuutta.

## 1.3 Opinnäytetyön rakenne

Opinnäytetyön toisessa luvussa käsitellään pientalorakentamiseen oleellisimmin liittyviä kuormituksia ja erilaisia jäykistysvaihtoehtoja. Kolmannessa luvussa esitellään TimberFramen suunnittelun nykytilaa ennen opinnäytetyön aloitusta. Neljännen luvun aiheena on rakennelaskentaketjun perusteellinen läpikäynti lähdekirjallisuuden tietoihin pohjautuen. Viidennessä luvussa esitellään laskentapohjan rakennetta ja mitoitukseen liittyviä havaintoja. Kuudennessa luvussa on koottuna loppuyhteenveto ja pohdintoja jatkotutkimuksista.

## 1.4 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyö pohjautuu kirjallisuustutkimukseen. Tutkimusten perusteella luodaan ohjeistusta ja laskentapohjia, joiden sisällöstä käydään rakennesuunnittelutiimin jäsenten kanssa

keskustelua kehityssuunnasta ja korjauksista. Esimerkiksi ruuvivalinnoista tehdään vertailuanalyysiä materiaali- ja työkustannusten sekä rakenneteknisten ominaisuuksien osalta.

## 1.5 Opinnäytetyön rajaukset

Opinnäytetyössä käsitellään kehärakenteen ja sen liitoskiinnikkeiden rakennemitoitusta. Kehärakenteelle siirrettävien kuormien johtamista ei esitellä tarkemmin, koska siihen on jo olemassa työkaluja yrityksen rakennesuunnittelutiimin käytössä. Lasielementtien ominaisuudet ja tuennat sekä rakennekokonaisuuden rakennusfysikaalinen toiminta jäävät myös opinnäytetyön aihepiirin ulkopuolelle.

## 1.6 Yritysesittely

Den Finland Oy on tällä hetkellä Suomen suurin pientalorakentaja. Yrityksen brändeihin kuuluu Nivalassa elementtitaloja valmistava Designtalo ja Alajärvellä hirsitaloja valmistava Finnlamelli sekä K-raudan myyntimallistossa oleva Ainoakoti ja Ainoahirsi. Den Finland Oy on muuttovalmiiden talojen toimituksissa alansa edelläkävijöitä niin elementti- kuin hirsitaloissakin. Hirsitaloja on valmistettu Finnlamellin tehtaalla jo vuodesta 1995 saakka.

Finnlamelli toimitti Timberkoti-brändillä täysin pilari-palkkirunkoisia pientaloja vuoteen 2018 saakka. Kuvassa 1 on Finnlamellin Alajärvellä sijaitsevan Timberkoti-näyttelytalon oleskelutila, jossa on rakennuksen kantava runko näkyvillä. Rakennerratkaisu on hyödynnetty myös osana hirsitalon muuta runkoa ei-jäykistävänä rakenteena muodostamaan suuria ikkunapintoja nimikkeellä TimberFrame (Eurofins Expert Services, 2020, s. 8). Rakenteen toteutustapaa muuttamalla on luotu mahdollisuus suurempiin ikkunapintoihin tinkimättä talon rakenteellisesta toimivuudesta.



Kuva 1. Timberkoti-esittelytalon tupanäkymä (Finnlamelli, 2013).

## 2 KUORMAT JA JÄYKISTYS

Pilari-palkkikehään kohdistuu pystykuormia sekä tarkastelutilanteen mukaan vaakakuormia joko kehämällin tasossa tai tasoa vastaan kohtisuoraan. Luvussa käydään läpi pientalorakentamisen kannalta oleelliset rakennukseen kohdistuvat kuormitukset sekä tavalisimmat jäykistysperiaatteet.

### 2.1 Kuormat

#### 2.1.1 Omapaino ja hyötykuorma

Rakennuksen omapaino koostuu kaikista rakennukseen pysyvästi ja kiinteästi asennettavista rakenteista ja tarvikkeista (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL), 2019, s. 67). Hyötykuorma muodostuu rakennuksen käytön aikana siirtyvistä kuormituksista kuten henkilökuormat, huonekalut, varastointi ja siirrettävät kevyet väliseinät (mts. 68). 2- ja 1,5-kerroksisten pientalojen välipohjissa voidaan huomioida kevyet väliseinät tasaisena omapainona  $0,3 \text{ kN/m}^2$  tai vaihtoehtoisesti keskipitkän aikaluokan hyötykuormana  $0,5 \text{ kN/m}^2$  (mts. 34–35). Kattoristikoissa voi joissakin kohteissa olla käyttöullakko, jossa on varastointia varten mitoitettu tilavaraus hyötykuormalla  $2,0 \text{ kN/m}^2$ .

#### 2.1.2 Lumikuorma

Rakennuksen lumikuorman laskenta perustuu maahan satavan lumikuorman ominaisarvoon, jonka ennustetaan ylittyvän enintään kerran tulevan 50 vuoden jaksolla (RIL, 2017, s. 98). Lumikuorma katolla lasketaan kaavalla (mts. 100)

$$s = \mu_i C_e C_t S_k \quad (1)$$

missä

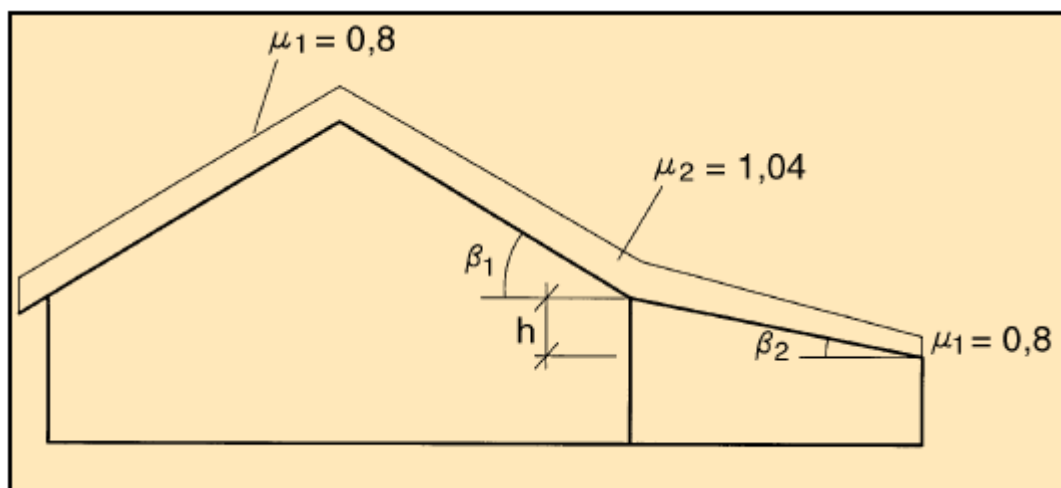
- s on lumikuorman katolla
- $\mu_i$  on lumikuorman muotokerroin
- $C_e$  on tuulensuojauskerroin

- $C_t$  on lämpökerroin  
 $s_k$  on lumikuorman ominaisarvo maassa.

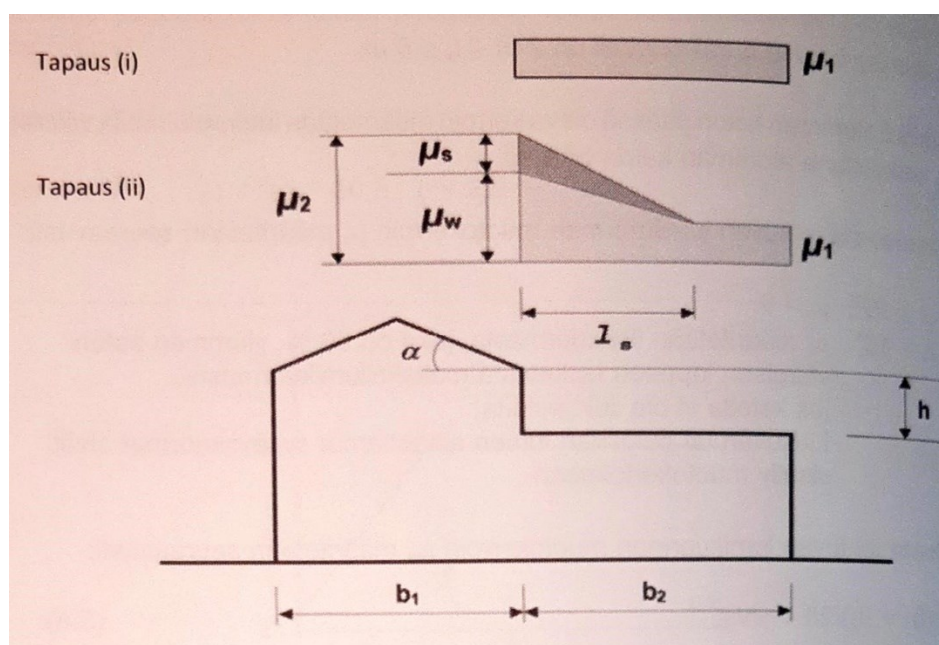
Tuulensuojauskertoimella huomioidaan maastonmuotojen tai ympäröivän korkeamman rakennuskannan vaikutus katolle jäävään lumikuormaan. Pientalorakentamisessa alentavaa vaikutusta ei käytännössä oteta huomioon eikä rakennuksen sivumitat yleensä anna syytä lähteä korottamaan lumikuormaa. Lämpökertoimella huomioitaisiin esimerkiksi lasikattojen sulattavaa vaikutusta, joka sekin on erittäin poikkeuksellinen rakenne ainakaan suurina pinta-aloina pientalojen kattorakenteissa.

Lumikuorman ominaisarvot on määritetty paikkakuntakohtaisesti esimerkiksi RIL-ohjeessa 205-1-2017, mutta joissakin tapauksissa kuntaliitokset aiheuttavat ristiriitaisuuksia vanhoihin lumikuormataulukoihin. Paikkakunnan rakennusvalvonta saattaa myös antaa oman ohjeistuksen käytettävästä ominaisarvosta, esimerkiksi Oulun alueella käytetään lähtökohtaisesti vanhan Yli-lin kunnan ominaislumikuormaa  $2,75 \text{ kN/m}^2$ .

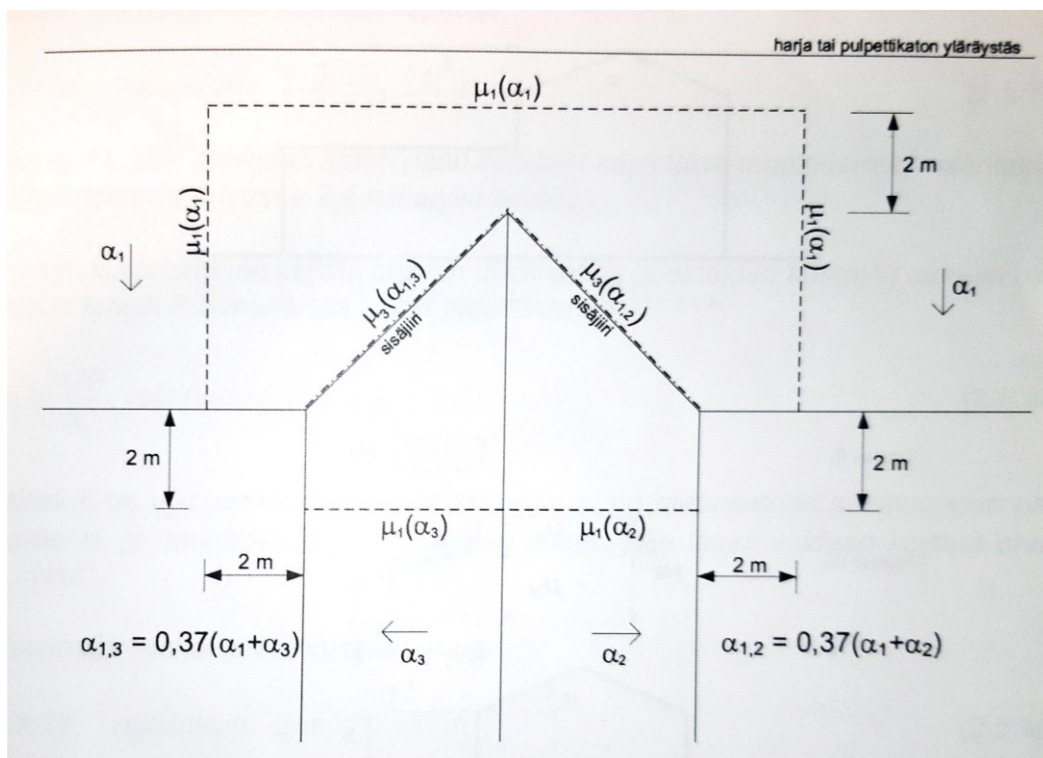
Lumikuormaa voi paikallisesti kinostua tuulen vaikutuksesta tai liukumisesta katto-osuuk-sien välillä (RIL, 2017, s. 104–105). Kuvassa 3 on esitettyä korkeuseron kohdalla tarkas-tettavat lumen kinostumat. Erittäin yleinen liukumisesta johtuva kinostuma on katon sisäjiirin alueelle kasaantuva lisälumikuorma, joka on havainnollistettuna kuvassa 4. Sisäjiirin ki-nostuma mallinnetaan eräänlaisena sahakattona, jonka leveyttä on kuvan 4 mukaisesti ra-joitettu. Suomessa perinteisesti käytettävästä ohjeistuksesta ei ilmiselvästi pysty päättele-mään jyrkemmän ja loivemman katto-osuuden kinostumaa, mutta voidaan soveltaa saha-kattojen kinostumaa kuvan 2 mukaisesti, jossa on esimerkinomaisesti laskettu sahakaton kinostumakaavalla taitoskohdan muotokerroin käyttäen loivemmalle kulmalle negatiivista arvoa.



Kuva 2. Lumen kinostuminen taitoksessa (Norges Byggscole, 1999, s. 60).



Kuva 3. Lumen kinostuminen korkeampaa rakennuskohdetta vasten (RIL, 2017, s. 106).



Kuva 4. Lumikuorman kinostuminen sisäjiirissä (RIL, 2019, s. 39).

### 2.1.3 Tuulikuorma

Tuulikuorma on luonteeltaan hetkellinen, puuskittainen ilmiö. Tuulikuorman perusarvoon vaikuttaa suuresti maaston rosoisuus, jota havainnollistetaan maastoluokilla kuvassa 5. Tapauskohtaisesti voidaan joutua huomioimaan rakennuspaikan sijainti rinteessä tai sen läheisyydessä (RIL, 2017, s. 133–135). Tuulen nopeuspaineen ominaisarvo lasketaan maastoluokan mukaan kaavalla (mts. 188)

$$q_{p0}(z) = \begin{cases} 0,00893 \left[ \ln \left( \frac{\max(1|z)}{0,003} \right) \right]^2 + 0,0625 \ln \left( \frac{\max(1|z)}{0,003} \right) & \text{maastoluokassa 0} \\ 0,00794 \left[ \ln \left( \frac{\max(1|z)}{0,01} \right) \right]^2 + 0,0556 \ln \left( \frac{\max(1|z)}{0,01} \right) & \text{maastoluokassa I} \\ 0,00995 \left[ \ln \left( \frac{\max(2|z)}{0,05} \right) \right]^2 + 0,0697 \ln \left( \frac{\max(2|z)}{0,05} \right) & \text{maastoluokassa II} \\ 0,01279 \left[ \ln \left( \frac{\max(5|z)}{0,3} \right) \right]^2 + 0,0895 \ln \left( \frac{\max(5|z)}{0,3} \right) & \text{maastoluokassa III} \\ 0,01513 \left[ \ln(\max(10|z)) \right]^2 + 0,1059 \ln(\max(10|z)) & \text{maastoluokassa IV} \end{cases} \quad (2)$$

missä

$q_{p0}(z)$  on tuulen nopeuspaineen ominaisarvo rakennuksen korkeuden funktiona  
 $z$  on rakennuksen korkeus.

Rakennuksen jäykistykseen kannalta on järkevää tarkastella kokonaistuulivoimaa kutakin rakennuksen pääjulkisivua vasten. Voimakerroinmenetelmällä kokonaistuulivoima määritetään korkeuden ja sivusuhteen perusteella taulukkoa 1 hyödyntäen kaavalla (RIL, 2017, s. 140)

$$F_{wk} = c_s c_d c_f q_p(h) A_{ref} \quad (3)$$

missä

$F_{wk}$  on kokonaistuulivoiman ominaisarvo  
 $c_s c_d$  on rakennekerroin, joka on usein 1,0  
 $c_f$  on voimakerroin  
 $q_p(h)$  on modifioitu nopeuspaine harjakorkeudella  $z=h$   
 $A_{ref}$  on tuulen vaikutuspinta-ala.

Rakennusosakohtaista taivutuslujuutta tarkastettaessa käytetään tuulikuorman nettopainemenetelmää. Esimerkiksi seinärakenteen tolppaan kohdistuva tuulen imu ja paine laskeaan käyttäen taulukon 2 mukaista nettopainekerrointa kaavalla (RIL, 2019, s. 44)

$$q_{wk} = c_{p.net} q_p(h) \quad (4)$$

missä

$q_{wk}$  on tarkasteltavan pinnan tuulen nettopaineen ominaisarvo  
 $c_{p.net}$  on tarkasteltavan pinnan nettotuulenpaine kerroin.





Kuva 5. Tuulen maastoluokat (RIL, 2019, s. 131).

Taulukko 1. Voimakerroin  $c_f$  (RIL, 2019, s. 141).

$\lambda=2h/b$ , $h<15m$	Sivusuhte d/b (d=tuulen suuntainen sivumitta, b=tuulen vastainen sivumitta)							
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10
$\leq 1$	1,20	1,20	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63

Taulukko 2. Nettopainekerroin  $c_{p,net}$  (RIL, 2019, s. 44).

	Imu nurkka-alueella		Imu keskialueella		Suurin paine	
$A_{ref}$	$\geq 10 m^2$	$\leq 1 m^2$	$\geq 10 m^2$	$\leq 1 m^2$	$\geq 10 m^2$	$\leq 1 m^2$
$c_{p,net}$	-1,5	-1,7	-1,1	-1,4	+1,1	+1,3

#### 2.1.4 Lisävaakavoimat

Rakennuksen pystykuormista aiheutuu asennusvinouden takia lisävaakavoimia, jotka kohdistetaan jäykistävälle rakenteille. Vaakarakenteen, esimerkiksi väli- tai yläpohjan, korkeudella vaikuttavan vaakavoiman voi laskea vaakarakenteen pystykuormasta kaavoilla (RIL, 2017, s. 78–79)

$$H_{dt} = \frac{N_d}{150} \quad (5)$$

$$H_{dl} = \frac{b}{l} \frac{N_d}{150} \geq \frac{N_d}{250} \quad (6)$$

missä

- $H_{dt}$  on lisävaakavoima rakennuksen lyhyemmässä suunnassa
- $H_{dl}$  on lisävaakavoima rakennuksen pidemmässä suunnassa
- $N_d$  on tarkasteltava pystykuorma
- $b$  on rakennuksen pienempi sivumitta
- $l$  on rakennuksen suurempi sivumitta.

#### 2.1.5 Stabiiliteettikuormat

Pientalojen yleinen kattorakenne on puutavarasta naulalevyliitoksin kasattu kattoristikko tai vaarnapalkki. Kattorakenteeseen kohdistuvat kuormat aiheuttavat naulalevyrakenteen

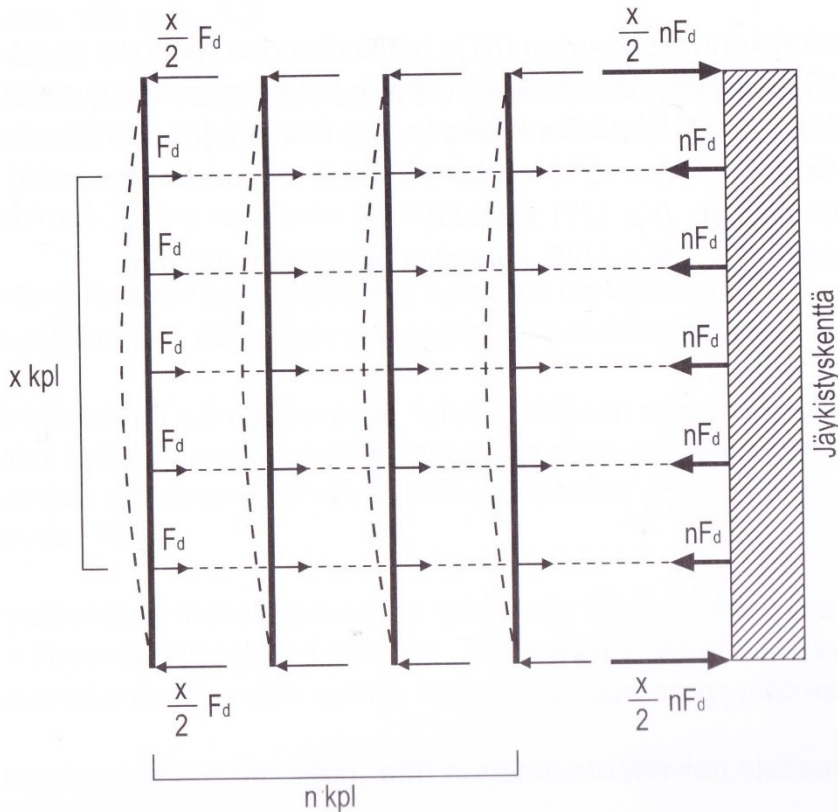
yläpaarteeseen suuren puristusvoiman, joka aiheuttaa tukemattomana paarteen nurjahduksen (RIL, 2013, s. 19).

Katon vesikattorakenteiden ruoteet, ponttilaudoitus tai levytys voivat toimia yläpaarteen nurjahdustukena. Nurjahdustuennan ensimmäisen muodon tapauksessa yläpaarre pyrkii kaareutumaan yhdelle pitkälle kaarelle. Nurjahdustuentavoima jakautuu tuentakentän ruoteille ja kulkeutuu jäykistävälle rakenteelle kuvan 6 mukaisesti. Nurjahdustuentavoima jäykistyskentän matkalla, kun paarteen pituus on alle 15 metriä, lasketaan tällöin kaavalla (RIL, 2013, s. 22)

$$q_{j,d} = \frac{nN_d}{50l_p} \quad (7)$$

missä

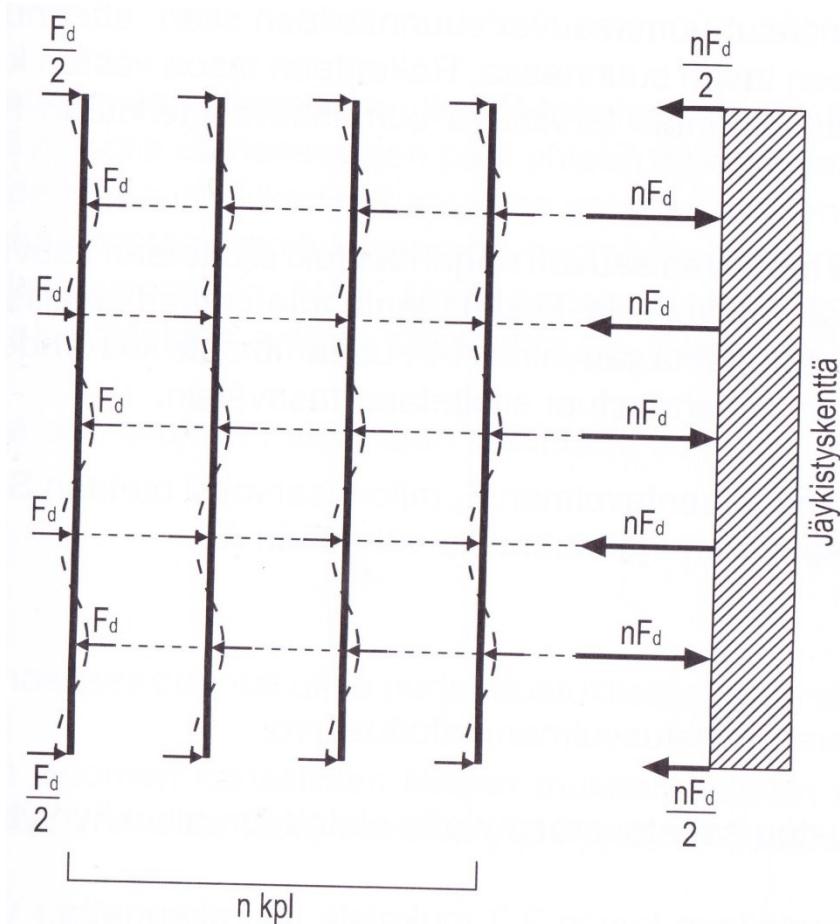
- $q_{j,d}$  on paarteen jäykistyskuorman mitoitusarvo
- $n$  on tuettavien kattoristikoiden määrä
- $N_d$  on tarkasteltavan paarteen keskimääräinen puristusvoima
- $l_p$  on tarkasteltavan paarteen pituus.



Kuva 6. Nurjahduksen ensimmäisen muodon jäykistyskuormat (RIL, 2013, s. 14).

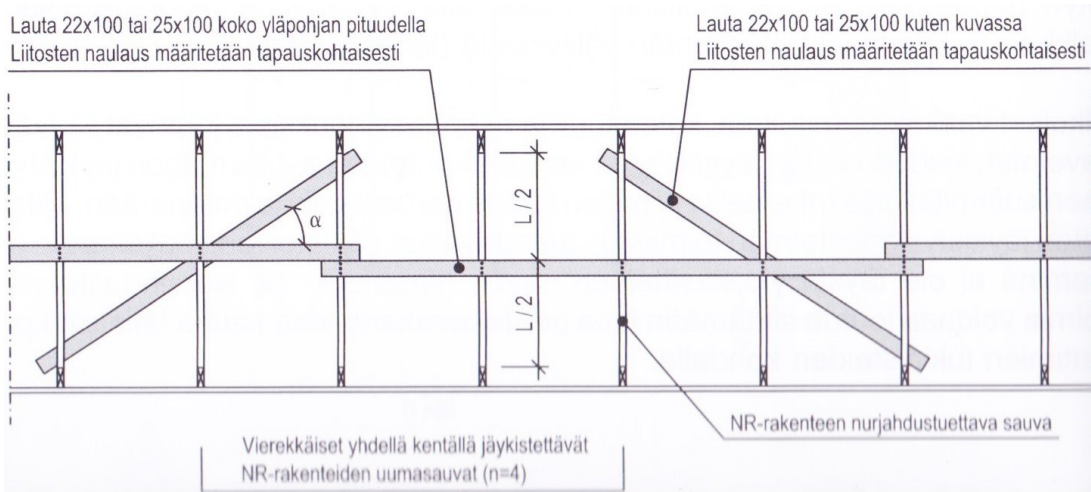
Jäykistyskuorma voidaan jättää yläpaarretasoon sisäiseksi kuormaksi mitoittamalla tuentapisteisiin, käytännössä sivuseinän kohdalle ja harjalle, lisäruoteet tukivoimille (RIL, 2013, s. 23–24). Vaihtoehtoisesti kuorma voidaan siirtää ristikoiden tukirakenteilla yläpaarretasolta seinärungolle ja siitä perustuksille ja lopulta maaperään.

Nurjahduksen toinen muoto, S-nurjahdus, on myös tarkistettava. S-nurjahduksessa puristettu parre kaareutuu pituudellaan useaan aaltoon, jossa jokainen aiheuttaa tuettavan nurjahdustuentavoiman kuten on esitetty kuvassa 7. Laskennassa tarkistetaan kriittinen aallonpituus, johon parre pyrkii kaareutumaan. Mikäli aallonpituus on riittävän suuri, S-nurjahdusta ei tapahdu ja tukivoimien laskenta suoritetaan vain ensimmäisen nurjahdusmuodon mukaan (VTT Expert Services, 2014, s. 4).



Kuva 7. Nurjahduksen toisen muodon jäykistyskuormat (RIL, 2013, s. 15).

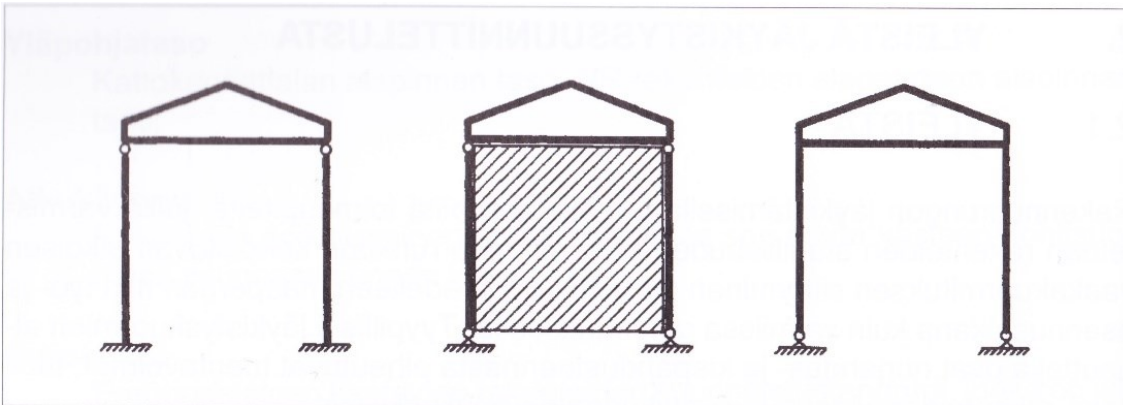
Tehdasvalmisteiset NR-kattoristikot valmistetaan 42 mm puutavarasta jännevälillä ollessa alle 18 metriä, jolloin vähintään 120 mm leveät puristetut uumasauvat voivat vaatia nurjahdustuennan (RIL, 2013, s. 12–13). Kattoristikon NR-suunnitelmassa esitetään nurjahdustuettaville sauvoille kuvan 8 tapainen tuentaohje. Joskus yksittäisen ristikkomallin nurjahdustaltis sauva voidaan vahvistaa T-poikkileikkaukseksi naulaamalla lauta lappeelleen sauvan kylkeen. Paarteiden nurjahdustuentaväli esitetään NR-suunnitelmissa, mutta toteutuksesta vastaa puurakennesuunnittelija.



Kuva 8. Uumasauvan nurjahdustuenta (RIL, 2013, s. 16).

## 2.2 Jäykistys

Rakennukseen kohdistuvat vaakakuormitukset siirretään jäykistävillä vaakarakenteilla pystyrakenteisiin, joiden jäykistävät osat siirtävät kuormat perustuksille ja siitä maaperään saakka. Jäykistysrakenteisiin muodostuu ankkuroitavia pystykuormia, joiden suuruus riippuu jäykistystavasta. Kuvassa 9 on havainnollistettu NR-rakenteisella katolla toteutetun pientalon jäykistysvaihtoehtoja.



Kuva 9. Mastojäykistys, levyjäykistys, kehäjäykistys (RIL, 2013, s. 10).

### 2.2.1 Mastojäykistys

Mastojäykistyksessä pystyrunko-osa kiinnitetään momenttijäykästi perustukseen ja katto-rakenteen liitos pystyrunkoon voi olla nivelellinen (RIL, 2013, s. 9). Puupilareita

käytettäessä liitososa perustukseen on teräsrakenteinen ja puuosat suojataan kosteudelta (RIL, 2007, s. 19–20).

### **2.2.2 Levyjäykistys**

Levyjäykistyksessä vaakasuuntaiset voimat siirrettään rakenteen yläjuoksusta alajuoksulle levytuotteen reunojen ruuvauksen tai naulauksen avulla (RIL, 2013, s. 9). Vaakajuoksut ankkuroidaan vaakavoimille yläpohjaan ja perutuksiin ja pystysuuntaiset puuosat on tarvittaessa ankkuroitava nostevoimille, jos tasapainottavat omapainot eivät riitä kumoamaan nostetta (RIL, 2007, s. 20).

### **2.2.3 Kehäjäykistys**

Kehäjäykistyksessä rakenneosaan muodostetaan jäykkä nurkka esimerkiksi liimaliitoksin, ruuvi- tai tappivaarnaliitoksin tai kaarevalla liimapuurakenteella (RIL, 2007, s. 19). NR-kattoristikon ja pystytolpan liitosta ei Suomessa yleisesti rakenneta momenttijäykkänä, mutta kyseinen toteutustapa on yleinen esimerkiksi Yhdysvalloissa nimellä post-frame (RIL, 2013, s. 10).

### **2.2.4 Kiertokeskiölaskenta**

Rakennusrungon jäykistävät osat ovat pientalorakenteissa harvoin symmetrisesti jakautuneita. Tällöin on epätodennäköistä, että sivu- tai päätyseinää vasten kohdistuvan kokonaistuulikuorman resultantti osuu seinien jäykkyyksien kiertokeskiön kohdalle. Voiman epäkeskisyys kiertokeskiöstä aiheuttaa momentin jäykistävään vaakatasoon, joka jakaa kuorman seinäosuuksille jäykkyyksien ja sijainnin mukaan (RIL, 2007, s. 50–51). Kuvassa 10 on esitetty kiertokeskiötarkasteluun laskentakaavoja, jotka perustuvat polaarisen neliömomentin laskentaan.

$x_s = \frac{\sum b_{yj} x_i}{\sum b_{yj}}$	$y_s = \frac{\sum b_{xi} x_i}{\sum b_{xi}}$
$s_{xi} = (x_i - x_s)$	$s_{yi} = (y_i - y_s)$
Tuulen suunta $W_x$ :	Tuulen suunta $W_y$ :
$H_{xi} = \frac{b_{xi}}{\sum_j b_{xj}} W_x + \frac{W_x e_y s_{yj} b_{xi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$	$H_{xi} = \frac{W_y e_x s_{yj} b_{xi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$
$H_{yi} = \frac{W_x e_y s_{xi} b_{yi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$	$H_{yi} = \frac{b_{yi}}{\sum_j b_{yj}} W_y + \frac{W_y e_x s_{xi} b_{yi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$

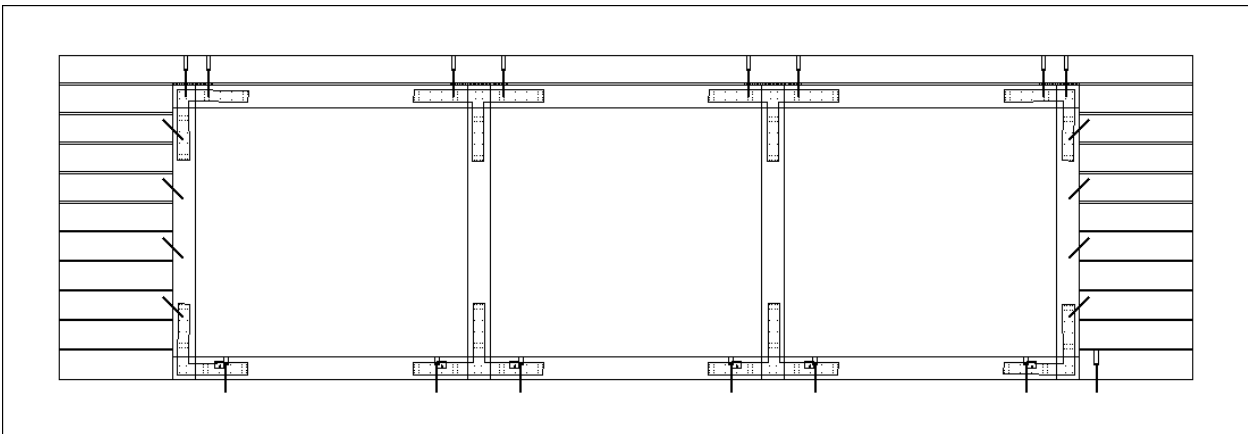
Kuva 10. Kiertokeskiön määrittäminen (RIL, 2007, s. 51).



### 3 NYKYTILAN KUVAUS

#### 3.1 TimberFrame

TimberFrame on osana hirsitaloa toteutettava pilari-palkkirakenne, jolla pyritään luomaan mahdollisimman suuria ikkunapintoja. Ulkoseinärakenteeseen tehtävät aukot ovat suuria, jolloin rakennuksen jäykistyskapasiteettia on pyrittävä lisäämään myös pilari-palkkirungon liitoksia jäykistämällä. Kuvassa 11 on hahmoteltu TimberFrame-kehä liitoksineen osana hirsiseinää.



Kuva 11. TimberFrame naamakuva.

##### 3.1.1 Puurakenteet

Pilari-palkkirungon puuosina käytetään lujuusluokaltaan C24 liimattua pilaria 200 mm x 200 mm. Tarpeen mukaan voidaan myös hyödyntää 164–210 mm leveitä GL30h-lujuusluokan liimapuupalkkeja. Puuosien väliset liitokset toteutetaan lapaliitoksilla, joissa pilarin osuus pidetään noin kahdessa kolmanneksessa. Kattorakenteen omapaino ja lumikuorma kohdistetaan pilareille, joten niiden loveus pyritään pitämään mahdollisimman vähäisinä. Vaakapalkit välittävät jäykistyskuormia sekä rakenneosamitoituksessa kohtisuoria tuulikuormia.

### 3.1.2 Teräsjäykisteet

Puuosien välisinä liitoskappaleina käytetään lattateräksestä konepajatyönä teetettyjä teräslevykiinnikkeitä. Teräslevyt kiinnitetään puuosien ulkopintaan kansiruuveilla. Ulkonäkösyistä teräslevyjä ei voida kiinnittää sisäpintaan, jolloin on huomioitava kiinnityksen epäsymmetrisyys liitosta mitoittaessa (RIL, 2019, s. 105). Puu-teräslitoksen liittimien siirtymiä ei ole vielä huomioitu käyttörajatilatarkastelussa (Heikkilä, 2019, s. 34).

### 3.1.3 Kiinnitys muuhun rakennusrunkoon

Pilari-palkkirunko toimii osana hirsirakennuksen jäykistävää runkoa. Kuormitukset siirtyvät hirsien ja rungon kiinnitysten kautta aina perustuksille asti.

Hirsikehikon ylimmät hirret ja pilari-palkkirungon yläjuoksun väli kiilataan pilarien kohdalta toisiaan vasten 18 mm paksulla OSB4-levyllä. Muualla vastaavan paksuinen asennusvälys tiivistetään uretaanilla. Yläpuolisen hirren läpi asennetaan vastaavantyyppinen leveäkantaruuvi kuin hirsikehikon asennuksessakin käytetään.

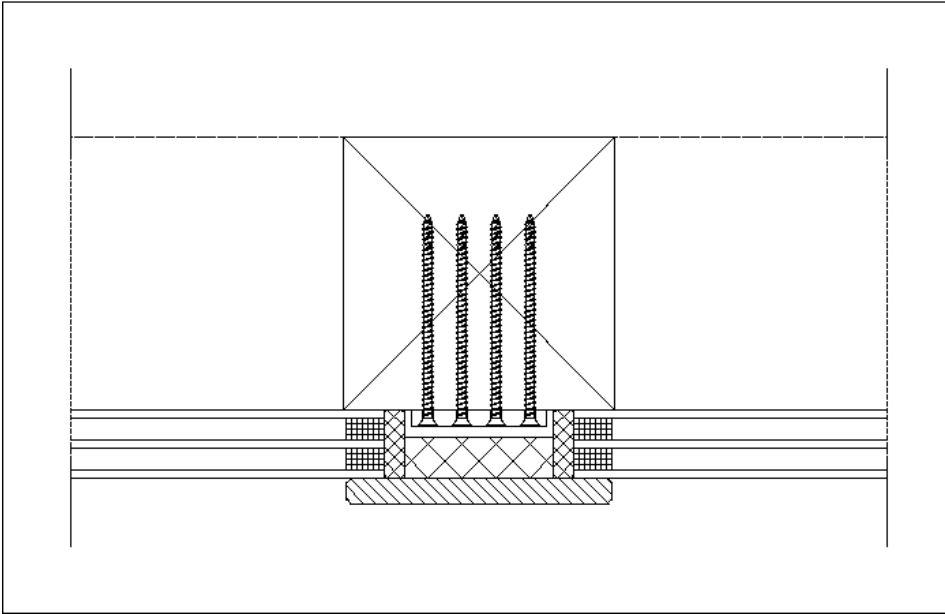
Pilari-palkkikehän reunatolpat kiinnitetään hirsiseinään liitoksen tiivistämiseksi. Käytettävät kiinnikkeet valitaan sen perusteella, onko kyseessä liitos hirren päähän vai kylkeen. Alajuoksu kiinnitetään perustukseen betoniruuveilla aluslevyn kanssa. Ruuvia varten porataan työmaalla asennusreikä, joka tulpataan.

### 3.1.4 Lasielementit

Pilari-palkkirungon ulkopinta sisennetään 50 mm hirsiseinän ulkopinnasta, johon tilaan sijoitetaan vastaavan paksuinen, kolminkertainen lasielementti. Elementin vaadittu U-arvo määräytyy energialaskelmien perusteella. Lasipaksuudet määräytyvät tehtaalla lasielementin mittojen, tuulikuormien sekä mahdollisten pudotusten vaatimien kaidekuormien perusteella. Lasielementin asennustila eristetään ja tiivistetään alumiinipintaisella uretaanilevyllä, jolloin teräsjäykisteet eivät joudu ulkotilan kosteuden kanssa kosketuksiin.

Lasielementti limittyy valoaukon reunoilla 30 mm pilari-palkkirungon kanssa kuvan 12 mukaisesti. Lasin ja puuosien väliin asennetaan tiivistenauha. Sisälasin puoleiseen välilistaan

sijoitetaan kiinnityshahlot, joista z-kiinnikkeillä lasielementti kiristetään runkoa vasten. Laselementti kannatellaan alanurkkien läheltä vaakapuuhun kiinnitetyllä kannakkeella, jotka tilataan yhdessä jäykisterautojen kanssa. Laselementtiä suositellaan tuettavan kahdesta pisteestä, koska lisätuentapisteet saattavat aiheuttaa epäedullisia jännityksiä lasiin ja rikkoo sen.



Kuva 12. TimberFrame vaakaleikkaus.

### 3.2 Laskenta

Pilari-palkkirungon liitosten kuormitukset tarkistetaan StruSoftin Jigi-staatiikkaohjelmalla. Rakenteen puuosien mitoitus ja yläreunan kokonaistaipuma tarkistetaan laskentareportista. Liitoksissa vaikuttava suurin taivutusmomentin arvo poimitaan teräsosa- ja liitosmitoitusta varten.

Excel-laskentataulukon avulla tarkistetaan teräsosan taivutuskestävyys sekä puu-teräslevyliitoksen liittimien leikkauskestävyys. Liitoksen kapasiteettiin vaikuttaa valitun kansiruuvin paksuus ja pituus, teräslevyn paksuus sekä ruuviryhmien välinen etäisyys. Liittimien tehollisessa määrässä huomioidaan syysuuntaan peräkkäisten liittimien määrä, ja liittimien kuormitussuunnan mukaan pienennetään leikkauslujuutta.

## 4 RAKENNEMITOITUS

Luvussa käydään läpi pilari-palkkirakenteen mitoitukseen liittyvät tarkastukset. Keskeisiä asiakokonaisuuksia ovat puurakenteiden, teräslevyjen sekä ruuviliitosten mitoitus.

### 4.1 Puurakenteiden mitoitus

Puurakenteet mallinnetaan rautalankamallina Jigi-ohjelmaan, josta nähdään puuosien rasi-  
tukset kuvan 13 mukaisesti. Puuosien murto- ja käyttörajatilatarkastelu saadaan pääosin  
ohjelman raporteista muutamia ruuviliitoksiin liittyviä erityistarkasteluita lukuun ottamatta.  
Ne käsitellään ruuviliitosten mitoituksen yhteydessä. Puuosien lujuusominaisuudet tarkas-  
tetaan yleensä kaavalla (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2015, s. 25)

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (8)$$

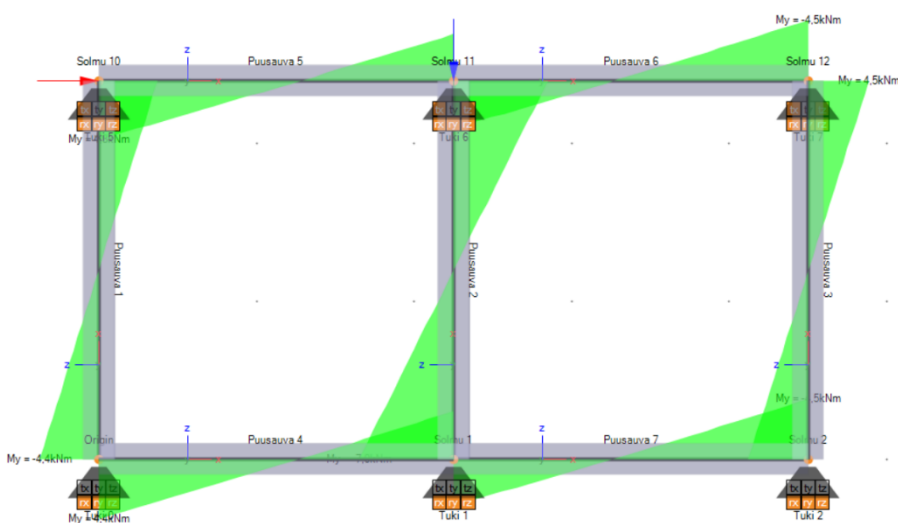
missä

$X_d$  on lujuuden mitoitusarvo

$X_k$  on lujuuden ominaisarvo

$k_{mod}$  on kuorman aikaluokan ja kosteuden huomioiva kerroin

$\gamma_M$  on materiaaliosavarmuusluku.



Kuva 13. Taivutusmomentti Jigi-mallissa.

## 4.2 Teräslevyn mitoitus

Teräslevyjen oletetaan siirtävän liitosalueen momentit sekä puuosien veto- ja leikkauskuormituksia. Puristus- sekä osittain leikkauskuormitukset kykenevät siirtymään puiden välisten kosketuspintojen kautta.

Teräspoikkileikkauksille yleisesti käytössä olevia materiaalien osavarmuuslukuja (SFS, 2006a, s. 48) ovat

- teräksen kestävyysden osavarmuusluku  $\gamma_{M0} = 1,0$
- stabiilisuustarkastelun kestävyysden osavarmuusluku  $\gamma_{M1} = 1,0$
- vetomurtokestävyysden ja liitosten osavarmuusluku  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

### 4.2.1 Veto

Teräslevyyn tehdään ruuveja varten reiät ja tarvittaessa upotukset, joiden koko määräytyy ruuvityypin ja -koon perusteella. Teräsosan vetolujuus tarkistetaan kiinnikkeiden alueen nettopoikkileikkauksen ja välialueiden bruttopoikkileikkauksen välillä kaavalla (SFS, 2006a, s. 52)

$$N_{t,Rd} = \min \left( \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}, \frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \right) \geq N_{Ed} \quad (9)$$

missä

- $N_{Ed}$  on mitoitusvetovoima
- $A$  on poikkileikkauksen bruttopinta-ala
- $f_y$  on teräksen myötölujuus
- $A_{net}$  on poikkileikkauksen nettopinta-ala reikälinjalla
- $f_u$  on teräksen murtolujuus.

### 4.2.2 Leikkaus

Teräsosassa vaikuttaa ruuviliitosten välissä momentin muodostavan voimaparin aiheuttama leikkausvoima. Lattateräksen tapauksessa tehdään kimmoteorian mukainen

suurimman leikkausjännityksen tarkistus, jolla saadaan johdettua leikkauskestävyys kaavalla (SFS, 2006a, s. 55)

$$V_{c,Rd} = \frac{Itf_y}{S_{max}\sqrt{3}\gamma_{M0}} = \frac{2}{3} \frac{btf_y}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} = \frac{2}{3} \frac{Af_y}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \geq V_{Ed} \quad (10)$$

missä

$V_{Ed}$  on mitoitusleikkausvoima

$b$  on lattateräksen leveys

$t$  on lattateräksen paksuus

$I$  on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

$S_{max}$  on suurimman leikkausjännityksen kohdan ylä- tai alapuolella olevan poikkileikkauksen osuuden staattinen momentti painopiste akselin suhteen.

Suorakaidepoikkileikkaukselle leikkauskestävyyden kaava on johdettu jäyhyysmomentin ja staattisen momentin kaavoilla (Salmi & Pajunen, s. 174, 422)

$$I = \frac{tb^3}{12} \quad (11)$$

$$S_{max} = \frac{A}{2} \frac{h}{4} = \frac{tb^2}{8} \quad (12)$$

### 4.2.3 Taivutus

Teräsosan taivutuslujuutta tarkasteltaessa on selvitettävä poikkileikkausluokka. Teräksen poikkileikkausluokituksella tarkastellaan paikallisen lommahduksen vaikutusta profiilin puristettuihin ja taivutettuihin osiin (SFS, 2006a, s. 23). Poikkileikkausluokissa 1 ja 2 voimasuureiden laskenta voidaan suorittaa plastisuusteorian mukaisesti, kun taas poikkileikkausluokissa 3 ja 4 on käytettävä kimmoteorian mukaista taivutusvastusta.

Lattateräksen poikkileikkausluokitukselle ei löydy eurokoodeista suoraa ohjeistusta. Suorakaidepoikkileikkauksella ei ole heikompaa taivutussuuntaa vahvistavia ulokkeita kuten esimerkiksi I-profiileilla, jolloin paikallista lommahdusta ei pääse tapahtumaan puhtaasti puristetussa kappaleessa. Taivutettu kappale on turvallisinta mitoittaa poikkileikkausluokissa 3

ja 4, joiden välisenä rajana voidaan pitää korkeuden ja leveyden suhdetta lujuustekijään kaavalla (Henderson, 2020)

$$\frac{b}{t} \begin{cases} \leq 19\varepsilon \rightarrow PL3 \\ > 19\varepsilon \rightarrow PL4 \end{cases} \quad (13)$$

missä

- b on lattateräksen leveys
- t on lattateräksen paksuus
- $\varepsilon$  on lujuustekijä kaavalla (SFS, 2006a, s. 45)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}. \quad (14)$$

Teräsosa pyritään suunnittelemaan poikkileikkausluokassa 3, jolloin taivutuskestävyys määritetään suorakaidepoikkileikkauksen kimmoisen taivutusvastuksen perusteella kaavalla (SFS, 2006a, s. 53)

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el}f_y}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

missä

- $W_{el}$  on poikkileikkauksen (pienempi) kimmainen taivutusvastus
- $\gamma_{M0}$  on teräksen osavarmuusluku = 1,0.

Kimmainen taivutusvastus suorakaidepoikkileikkaukselle saadaan kaavalla (Salmi & Pajunen, 2010, s. 178)

$$W_{el} = \frac{I}{b/2} = \frac{tb^2}{6}. \quad (16)$$

Lattateräksen kiinnikealueiden välillä taivutuslujuutta saattaa pienentää kiepahdusilmiö, johon päästään käsiksi kiepahduskestävyyden kaavalla (SFS, 2006a, s. 65)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{el}f_y}{\gamma_{M1}} \geq M_{Ed} \quad (17)$$

missä

$M_{Ed}$  on mitoitustaivutusmomentti

$X_{LT}$  on kiepahduskestävyyden pienennystekijä.

Pienennystekijän määrittämistä varten on selvitettävä kriittinen momentti tukipisteiden kohdalla kiepahdustuetulle, nivelellisesti tuetulle suorakaidepalkille, johon vaikuttaa tasainen momentti, joka voidaan laskea kaavalla (Henderson, 2015)

$$M_{cr} = C_1 \frac{bt^3\pi E}{6L\sqrt{2,6}} \quad (18)$$

missä

$M_{cr}$  on kriittinen kiepahdusmomentti

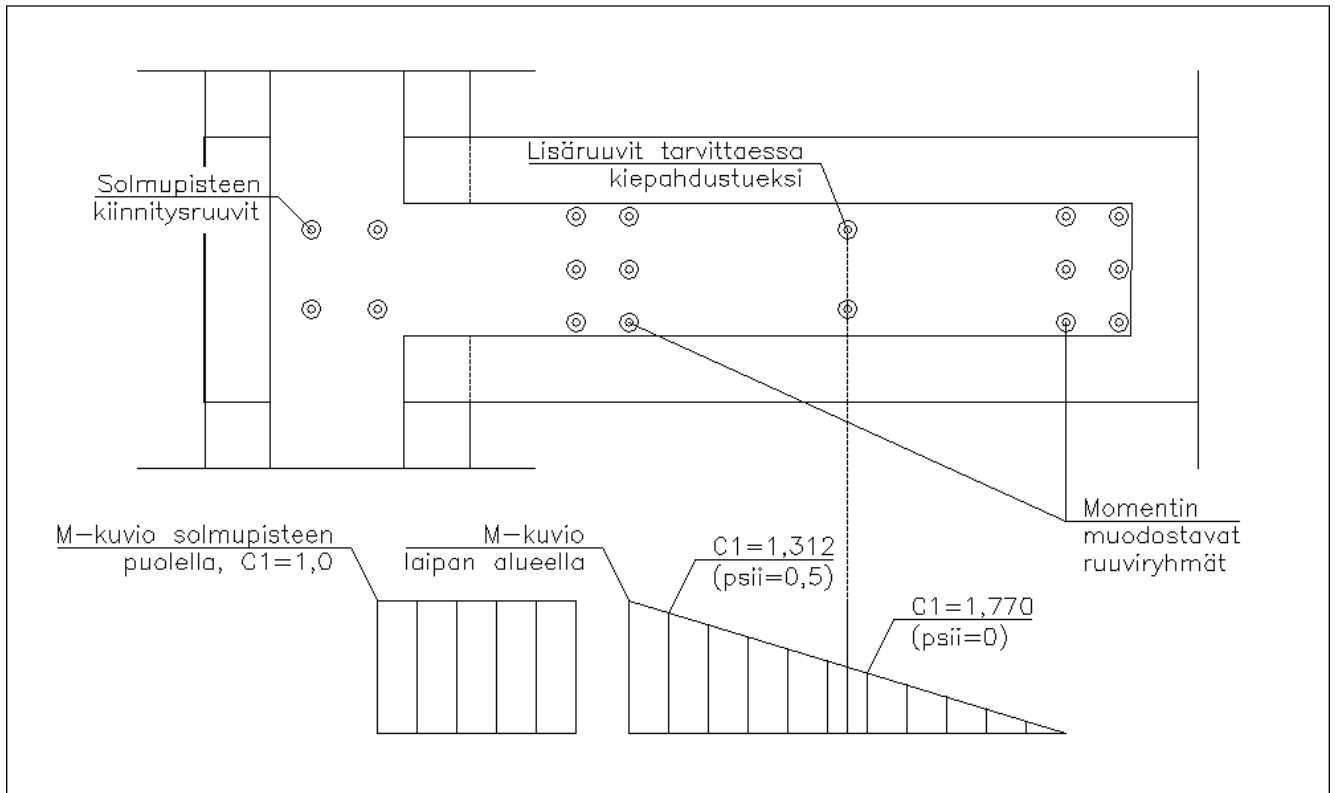
$C_1$  on tuennasta ja kuormitustavasta riippuva kerroin

$E$  on teräksen kimmomoduli = 210000 MPa (N/mm<sup>2</sup>)

$L$  on teräslevyn kiepahduspituus eli ruuviryhmien vapaa väli.

Kuvassa 14 on esitetty teräslevyn momenttikuviot kiepahduksen tarkasteluväleillä. Solmu pistettä lähellä olevalla alueella on tasainen momentti, kun taas ruuviryhmien välisellä alueella momentti kehittyy lineaarisesti. Tarvittaessa on lisättävä kiepahdustueksi ruuvipari. Kerroin  $C_1$  ja kiepahduspituus on valittava tarkasteltavan alueen mukaan (SFS, 2023, s. 265).





Kuva 14. Ruuviryhmien välien momentit.

Kriittisen momentin avulla voidaan laskea muunnettu hoikkuus kaavalla (SFS, 2006a, s. 66)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ef} f_y}{M_{cr}}} \quad (19)$$

missä

$\lambda_{LT}$  on muunnettu hoikkuus.

Vielä tarvitaan apusuure kaavalla

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (20)$$

missä

$\alpha_{LT}$  on epätarkkuustekijä = 0,76 suorakaidepoikkileikkaukselle.

Muunnetun hoikkuuden ja apusuureen avulla voidaan ratkaista kiepahduksen pienennystekijä kaavalla

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0. \quad (21)$$

Kiepahduksen lisäksi teräslevyn solmupisteen puoleisessa päädyssä voi esiintyä vetokuorimitusta. Yhdistetyn kiepahduksen ja vedon tapauksessa suoritetaan tarkistus vielä kaavalla (SFS, 2006a, s. 49)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0. \quad (22)$$

### 4.3 Ruuviliitosten mitoitus

Ruuviliitoksen mitoitukseen vaikuttaa oleellisesti valittu ruuvityyppi. Kansiruuvi on edullisen hintansa vuoksi hyvä vaihtoehto, mutta vaatii asennuksessa esiporauksen puuosiin. Toisena vaihtoehtona tutkitaan porakärkisiä Eurotec KonstruX ST täyskierrerruuveja, joita käytetään ennestäänkin talotehtaan rakennesuunnittelussa. Porakärkiruuvit eivät vaadi esiporausta ja ovat helppoja asentaa.

#### 4.3.1 Ruuvivälit

KonstruX-ruuvien ruuviväleille sovelletaan esiporattujen naulaliitosten ohjeita käyttäen tarkastelupaksuutena ruuvien nimellishalkaisijaa (ETA-Danmark, 2023, s. 11). Kansiruuvien ruuvivälit puuliitoksissa määräytyvät pulttiliitosten ohjeistuksen mukaan, kun ruuvien tehollinen halkaisija on suurempi kuin 6 mm. Ehto toteutuu 8 mm ja sitä suuremmilla kansiruuveilla, kun tehollinen paksuus lasketaan kaavalla (SFS, 2015, s. 70)

$$d_{ef} = \begin{cases} d, & \text{kun } 0,4l - t \geq 4d \\ 1,1 \times 0,7d & \text{muulloin} \end{cases} \quad (23)$$

missä

- $d_{ef}$  on ruuvien tehollinen halkaisija
- $d$  on ruuvien nimellishalkaisija
- $l$  on ruuvien pituus.

Taulukossa 3 esitetään ruuvityyppien liitinvälit suhteessa liittimen nimellishalkaisijaan ja kuormitussuuntaan  $\alpha$ , jossa kuormitus syysuunnassa päätypuuta kohti vastaa  $\alpha$ :n arvoa 0. Syysuuntaisen ruuvirivin tehollinen lukumäärä leikkauslujuutta laskettaessa rajoitetaan kaavalla (SFS, 2015, s. 59–60, 68)

$$n_{1,ef} = \min \begin{cases} n_1 \\ n_1^{k_{ef}} \text{ Konstrux ruuveilla} \\ n_1^{0,9} \left(\frac{a_1}{13d}\right)^{0,25} \text{ kansiruuveilla min M8} \end{cases} \quad (24)$$

missä

$n_{1,ef}$  on ruuvien tehollinen lukumäärä syysuunnassa

$n_1$  on ruuvien lukumäärä syysuunnassa

$a_1$  on ruuviväli syysuunnassa.

$$k_{ef} = \begin{cases} 1,0 & , \text{ kun } a_1 \geq 14d \\ 0,85 & , \text{ kun } a_1 = 10d \\ 0,7 & , \text{ kun } a_1 = 7d \\ 0,5 & , \text{ kun } a_1 = 4d \end{cases} \quad (25)$$

Taulukko 3. Ruuvivälien minimiarvot ruuvityypeittäin (soveltaen SFS, 2015, s. 61, 68; Mendes & Asım Şişman, 2023, s. 14).

Selite	Kansiruuvi, min M8	KonstruX
Ruuviväli syysuunnassa $a_1$	$(4+ \cos \alpha )d$	$0,7(4+ \cos \alpha )d$
Ruuviväli kohtisuoraan syysuunnasta $a_2$	$4d$	$0,7(3+ \sin \alpha )d$
Etäisyys kuormitetusta päästä $a_{3,t}$	$\max\{7d; 80 \text{ mm}\}$	$(7+5\cos \alpha)d$
Etäisyys kuormittamattomasta päästä $a_{3,c}$	$\max\{4d; (1+6\sin \alpha)d\}$	$7d$
Etäisyys kuormitetusta reunasta $a_{4,t}$	$\max\{3d; (2+2\sin \alpha)d\}$	$(3+4\sin \alpha)d$
Etäisyys kuormittamattomasta reunasta $a_{4,c}$	$3d$	$3d$

EkspONENTIN  $k_{ef}$  arvot interpoloidaan lineaarisesti. Koska ei ole erillistä ohjetta, miten menetellä  $k_{ef}$  arvojen kanssa syysuuntaisen ruuvivälin ollessa alle  $4d$ , kyseistä arvoa ei aliteta. Konstrux-ruuveja käytettäessä voidaan tehokasta ruuvimäärää tarkasteltaessa tulkita syysuuntainen kiinnikeväli kaksinkertaisena, jos pystytään limittämään ruuveja syysuuntaa

kohtisuorassa suunnassa nimellishalkaisijan verran (SFS, 2015, s. 60). Ruuviin kohdistetun voiman vaikuttaessa kohtisuoraan syysuuntaa vastaan, voidaan käyttää tehollisen kiinnikerivin lukumäärän arvona suoraan kiinnikerivin todellista määrää. Tehollisen lukumäärän vaikutusta leikkauslujuuteen voidaan kuormitussuunnan mukaan interpoloida lineaarisesti tehollisen ja todellisen lukumäärän suhteena (mts. 68).

### 4.3.2 Ruuvin leikkauskestävyys

Teräksen ja puun välisen yksileikkeisen ruuviliitoksen leikkauskestävyys ratkaistaan ja tarvittaessa lineaarisesti interpoloidaan kaavoilla (SFS, 2015, s. 56–57)

$$F_{v,Rk}(d \leq 0,5t) = \min \begin{cases} 0,4f_{h,k}t_1d & (a) \\ 1,15\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \end{cases}, \frac{F_{ax,Rk}}{4} \leq \frac{F_{v,Rk}}{2} \quad (26)$$

$$F_{v,Rk}(d \geq t) = \min \begin{cases} f_{h,k}t_1d & (e) \\ f_{h,k}t_1d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c), \frac{F_{ax,Rk}}{4} \leq \frac{F_{v,Rk}}{2} \\ 2,3\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \end{cases} \quad (27)$$

missä

$F_{v,Rk}$  on yhden ruuvin ominaisleikkauskestävyys

$f_{h,k}$  on puun reunapuristuslujuus

$t_1$  on ruuvin tunkeuma puuosaan

$M_{y,Rk}$  on ruuvin myötömomenti

$F_{ax,Rk}$  on ruuvin ominaisvetokestävyys.

Leikkauskestävyyden kaavoihin on merkittynä murtotapaa kuvaavat tunnuksat a-e, joita voidaan hyödyntää jatkolaskennassa. On huomattava, että KonstruX-ruuveilla käytetään suoraan nimellishalkaisijaa  $d$  leikkauslujuutta määrittäessä, kun taas kansiruuveilla on käytettävä  $d$ :n sijaan tehollista halkaisijaa. Kun oletetaan, että ruuvit asennetaan 90 asteen kulmaan syysuuntaan nähden, voidaan ruuvin kuormitussuunnasta riippuva puun reunapuristuslujuus havupuisessa sahatavarassa ja liimapuussa laskea kaavalla (SFS, 2015, s. 67; ETA-Danmark, 2023, s. 7)

$$f_{h,\alpha,k} = \begin{cases} \frac{0,082\rho_k d^{-0,3}}{(1,35+0,015d) \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} & \text{KonstruX} \\ \frac{0,082(1+0,01d_{ef})\rho_k}{(1,35+0,015d_{ef}) \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} & \text{Kansiruuvi min M8.} \end{cases} \quad (28)$$

KonstruX-ruuvien myötömomentti löytyy ETA-dokumentista ja kansiruuville se voidaan laskea kaavalla (SFS, 2015, s. 67)

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{ub}d^{2,6} \quad (29)$$

missä

$f_{ub}$  on kansiruuvin vetolujuuden ominaisarvo.

KonstruX-ruuvin ominaisvetokestävyys teräslevyn ja havu- tai liimapuun liitoksessa määrittyy pienimmän arvon mukaan joko varren vetokestävyys tai ruuvin ulosvetokestävyys kaavalla (ETA-Danmark, 2023, s. 8–9)

$$F_{ax,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{tens} \frac{\gamma_M}{k_{mod}\gamma_{M2}} \\ f_{ax,k} d l_{ef} \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \end{array} \right. \quad (30)$$

missä

$f_{tens}$  on ruuvin varren vetokestävyys

$f_{ax,k}$  on ruuvin kierreosan ominaisulosvetolujuus

$l_{ef}$  on ruuvin kierreosan pituus puussa.

Vedettyjen ruuviryhmien ominaisvetokestävyys kerrotaan yleensä pienemmällä tehollisella lukumäärällä, mutta nyt tarkastellaan tilannetta, jossa ruuveihin kohdistuu ainoastaan leikkausvoimaa. Lisäksi on huomattava, että ruuvin vetokestävyys laskennassa on kyseessä teräsosan mitoitus, jolloin on varmistettava vertailukelpoisuus poistamalla puumateriaaleihin liittyvien osavarmuuskertoimien vaikutus kaavassa esitetyllä tavalla. Kansiruuvin vetokestävyys lasketaan vastaavasti kaavalla (SFS, 2015, s. 72; SFS, 2006b, s. 28)

$$F_{ax,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,9f_{ub}A_s \frac{\gamma_M}{k_{mod}\gamma_{M2}} \\ 0,52d^{0,5}l_{ef}^{0,9}\rho_k^{0,8} \min\left(\frac{d}{8}, 1\right) \end{array} \right. \quad (31)$$

missä

$A_s$  on ruuvin kierteisen osan pinta-ala

$l_{ef}$  on ruuvin kierreosan pituus puussa.

Pitkittäin kuormitetuille ruuveille on omat ruuviväli- ja reunaetäisyysvaatimukset, jotka ovat tietyiltä osin tiukemmat kuin poikittain kuormitetussa tilanteessa. Ruuviryhmiin kohdistetaan tarkasteltavassa rakenteessa vain leikkausvoimia, joten vedetyn tilanteen etäisyysvaatimukset jätetään huomioimatta. Tilanteessa, jossa ruuveihin kohdistuisi leikkaus- ja vetokuormitusta, olisi syytä jättää leikkausvoimakkestävyyden lakentakaavasta vetokestävyyden tuottama köysivaikutuksen osuus pois.

### 4.3.3 Ruuviliitoksen voimat

Ruuviryhmien yksittäisen liittimen voimat voidaan ratkaista polaarisen neliömomentin avulla. Kuvassa 15 on havainnollistettu ruuviryhmän kiertokeskiö ja kunkin ruuvin koordinaatit sen suhteen. Kuvan 15 mukaisia voiman suuntia valittuun koordinaatistoon nähden lasketaan ruuvien voimakomponentit kaavoilla (Tiainen & Papula, 2020, s. 167)

$$F_{xi} = \frac{N_{Ed}}{n} - \frac{M_{Ed}y_i}{\sum(x_i^2 + y_i^2)} = \frac{N_{Ed}}{n} - \frac{M_{Ed}y_i}{\sum(r_i^2)} = \frac{N_{Ed}}{n} - \frac{M_{Ed}y_i}{I_p} \quad (32)$$

$$F_{yi} = \frac{V_{Ed}}{n} + \frac{M_{Ed}x_i}{\sum(x_i^2 + y_i^2)} = \frac{V_{Ed}}{n} + \frac{M_{Ed}x_i}{\sum(r_i^2)} = \frac{V_{Ed}}{n} + \frac{M_{Ed}x_i}{I_p} \quad (33)$$

$$F_{Ed,i} = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2} \quad (34)$$

missä

$F_{xi}$  on ruuviin  $i$  kohdistuvan voiman  $x$ -suuntainen komponentti

$F_{yi}$  on ruuviin  $i$  kohdistuvan voiman  $y$ -suuntainen komponentti

$F_{Ed,i}$  on ruuviin  $i$  kohdistuva mitoitusleikkausvoima

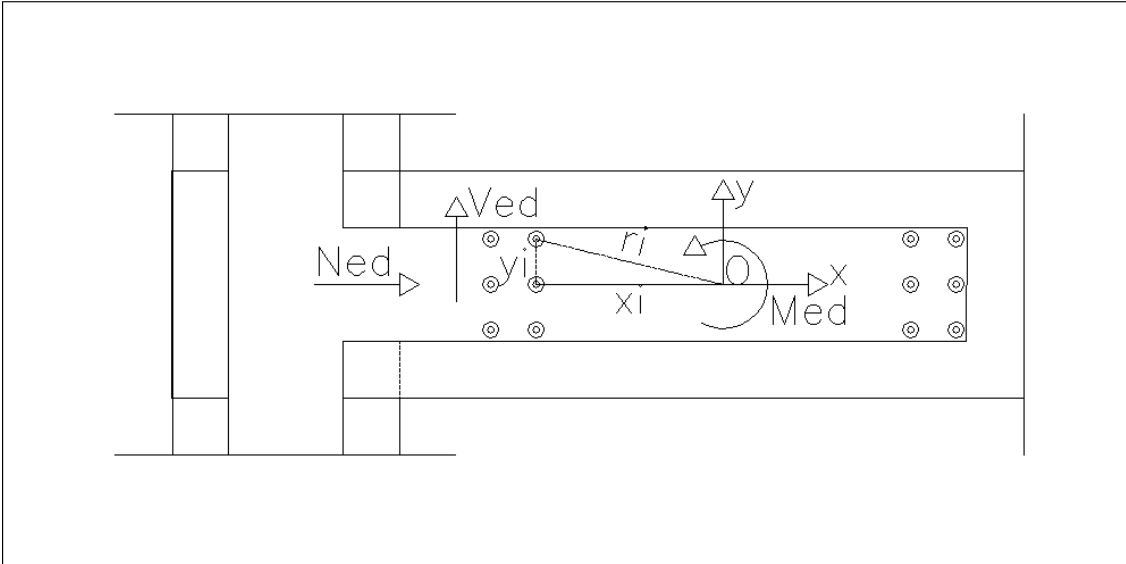
$n$  on liitoksen kokonaisruuvimäärä (kuvassa 15  $n = 12$ )

$x_i$  on ruuvin  $x$ -akselin koordinaatti kiertokeskiöstä

$y_i$  on ruuvin  $y$ -akselin koordinaatti kiertokeskiöstä

$r_i$  on ruuvin etäisyys kiertokeskiöstä

$I_p$  on ruuviryhmän polaariset neliömomentit (Salmi & Pajunen, 2010, s. 410–411).



Kuva 15. Ruuviryhmän voimat ja kiertokeskiö.

On huomattava, että teräslevy on vain toisella puolella puosia, jolloin liitokseen kohdistetut kuormitukset lasketaan 1,5-kertaisina statiikkaohjelmalla määritettyihin arvoihin nähden (RIL, 2019, s. 105). Ilman kuormitustestejä ei voida olla varmoja, voidaanko liitoksen epäkeskisyyden aiheuttamat lisäkuormitukset jättää huomiotta. Kun jätetään kokonaan huomiotta puuosien välisen liitoksen sekundäärinen momenttijäykkyys ja kohdistetaan momentit kokonaisuudessaan teräslevyyn, ollaan riittävästi varmalla puolella.

#### 4.4 Puosien liitosalueen tarkastukset

Liittimien voimien avulla voidaan suorittaa puutavaran lisätarkastuksia liitosalueilla. Käytävällä liitosmallilla on tarkastettava puosien halkeaminen leikkausvoimasta ja palamurtuminen puosien päästä vetovoimasta. Havupuun halkeamiskestävyys ruuviliitoksella lasketaan kaavalla (SFS, 2015, s. 54)

$$F_{90,Rk} = 14t_p \sqrt{\frac{h_e}{1 - \frac{h_e}{h}}} \quad (35)$$

missä

- $F_{90,Rk}$  puuosan ominaishalkeamiskestävyys liitosalueella  
 $t_p$  on puuosan kokonaispaksuus  
 $h_e$  on korkeus kuormitetusta reunasta kauimmaiseen ruuviin  
 $h$  on puuosan kokonaiskorkeus.

Halkaisevaa voimaa muodostuu kahteen ruuviryhmään, joista tarkistetaan summana suurimman y-suunnan kokonaisvoiman tuottava. Koska ruuviryhmät ovat verrattain lähellä toisiaan, kertyy y-suuntaista kuormitusta merkittävästi mitoitusmomenttia lisättäessä. Palamurtumiskestävyys tarkastetaan vain vetovoimalle  $N_{Ed}$ , koska x-suunnan voiman kaavoista voi päätellä momentin osuuden kumoutuvan pois ruuviryhmäkohtaisesti. Kuvassa 16 on havainnollistettu halkeamislinja sekä palamurtumisessa tarkasteltava murtopalikka. Puuosan pään lähellä olevissa ruuveissa on puolet mitoitusvetovoimista. Palamurtumiskestävyys lasketaan kaavalla (SFS, 2015, s. 100–101)

$$F_{bs,Rk} = \max \begin{cases} 1,5A_{net,t}f_{t,0,k} \\ 0,7A_{net,v}f_{v,k} \end{cases} \quad (36)$$

missä

- $F_{bs,Rk}$  puuosan päässä ominaispalamurtumiskestävyys liitosalueella  
 $f_{t,0,k}$  on puuosan syysuuntainen ominaisvetolujuus  
 $f_{v,k}$  on puuosan ominaisleikkauslujuus  
 $A_{net,t}$  on liitosalueen nettopinta-ala vedolle  
 $A_{net,v}$  on liitosalueen nettopinta-ala leikkaukselle.

Liitosalueen nettopinta-aloissa huomioidaan ruuveille tehdyt poraukset puuhun. Koska ohjeistuksessa ei ole erikseen mainittu, voidaanko ruuveilla käyttää tapauskohtaisesti kierteen sisähalkaisijaa, vähennetään pinta-aloista varmuuden vuoksi nimellishalkaisijan mukaiset osuudet. Nettopinta-alat lasketaan kaavoilla (SFS, 2015, s. 100–101)

$$A_{net,t} = L_{net,t}t_1 \quad (37)$$

$$L_{net,t} = (n_y - 1)(a_2 - d) \quad (37)$$



$$A_{net,v} = \begin{cases} L_{net,v}t_1 & (e) \\ 0,5L_{net,v}(L_{net,t} + 2t_{ef}) & (a, b, c, d) \end{cases} \quad (38)$$

$$L_{net,v} = a_3 - 0,5d + (n_x - 1)(a_1 - d) \quad (39)$$

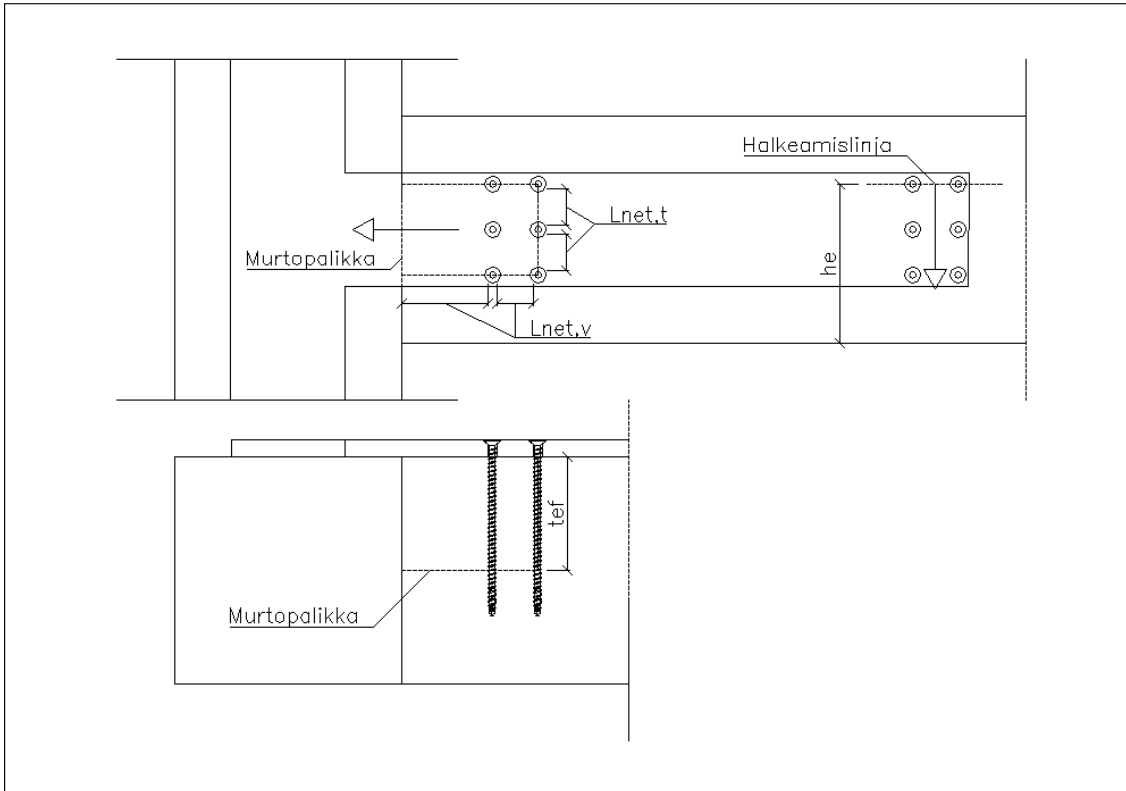
$$t_{ef}(d \leq 0,5t) = \min \begin{cases} 0,4t_1 & (a) \\ 1,4 \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,0,k}d}} & (b) \end{cases} \quad (40)$$

$$t_{ef}(d \geq t) = \min \begin{cases} t_1 \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,0,k}dt_1^2}} - 1 \right] & (c) \\ 2 \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,0,k}d}} & (d) \end{cases} \quad (41)$$

missä

- $L_{net,t}$  on liitosalueen nettoleveys
- $L_{net,v}$  on liitosalueen nettopituus
- $a_1$  on ruuviväli syysuunnassa
- $a_2$  on ruuviväli syysuuntaan nähden kohtisuoraan
- $a_3$  on ruuvin etäisyys päätypuuhun
- $n_x$  on ruuvimäärä syysuunnassa
- $n_x$  on ruuvimäärä syysuuntaan nähden kohtisuoraan
- $f_{h,0,k}$  on puun reunapuristuslujuus syysuuntaan
- $t_{ef}$  on liitosalueen tehollinen paksuus.

Tehollisen paksuuden laskenta on analoginen ruuvin leikkauskestävyyden kaavojen kanssa, ja täten voidaan tarvittaessa lineaarisesti interpoloida väliarvoja teräslevyn paksuuden ja ruuvin nimellishalkaisijan mukaan. Kaavoihin merkittyyä murtumistapojen tunnuksia on jouduttu korjaamaan eurokooditekstiin nähden, koska suomennokseen tehdyt korjaukset eivät ole näiltä osin täysin yhteneväisiä.



Kuva 16. Halkeaminen ja palamurtuminen.

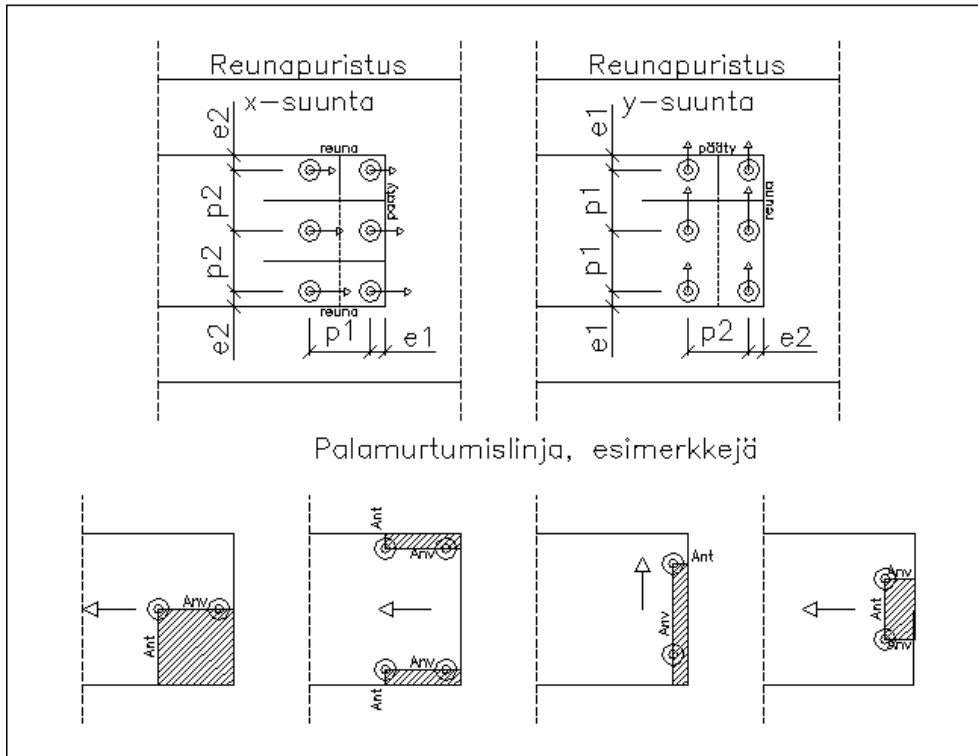
#### 4.5 Teräsosan liitosalueen tarkastukset

Teräsosan liitosalueelta varmistetaan ruuviväljen ja reunaetäisyyksien riittävyys (SFS, 2006b, s. 24). Lisäksi on tarkistettava reunapuristuslujuus ruuvia vasten, ruuvin kannan lävistymisen levystä sekä liitoslevyn palamurtuminen liitinreikien välillä. Teräslevyjä ei mitoiteta puristusvoimille, joten ruuvien välissä ja ruuviryhmien reunoilla ei tarvitse tarkistaa paikallista lommahtamista. Lisäksi teräslevyihin ei kohdistu korroosiorasitusta, jolloin reunaetäisyyksiin ja keskiöväleihin ei tarvitse suorittaa maksimiarvojen tarkastusta.

Ruuvien reikä teräslevyssä saa olla puurakenteeseen liitettäessä enintään 10 prosenttia ruuvien nimellishalkaisijaa suurempi (SFS, 2015, s. 56). Kuvassa 17 on esitetty teräslevyjen minimietäisyydet sekä ruuvien reunapuristuslujuuden laskentaan liittyvä aluejako voimakomponenttien suunnan mukaan. Momentin kuormittamassa ruuviryhmässä on käytännössä aina joissakin ruuveissa voimakomponentti teräslevyn reunaan kohti ja momentti voi olla kumpaankin suuntaan. Ruuvien minimikeskiöväli ja reunaetäisyydet suhteessa teräslevyn reikien halkaisijaan  $d_0$  (SFS, 2006b, s. 24) ovat

- päätyetäisyys  $e_1 \geq 1,2d_0$

- reunaetäisyys  $e_2 \geq 1,2d_0$
- keskiöväli voiman suuntaan  $p_1 \geq 2,2d_0$
- keskiöväli voiman suhteen kohtisuoraan  $p_2 \geq 2,4d_0$ .



Kuva 17. Ruuvivälit ja palamurtumislinjojen esimerkkejä.

Ruuvien ja teräslevyn välinen reunapuristuslujuus riippuu liitoksen ruuvien sijainnista ryhmässä ja toteutuneista keskiöväleistä sekä reuna- ja päätyetäisyyksistä. Yleensä riittää, että pienin arvo löydetään ja voidaan todeta se riittäväksi suurimmallakin ruuvien leikkausvoimalla. Reunapuristuslujuus lasketaan kaavoilla (SFS, 2006b, s. 28)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (42)$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,5 \\ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \text{ reunarivin ruuveille} \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \text{ muille kuin reunarivin ruuveille} \end{cases} \quad (43)$$

$$\alpha_b = \min \begin{cases} 1,0 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ \alpha_d \end{cases} \quad (44)$$

$$\alpha_d = \begin{cases} \frac{e_1}{3d_0} & \text{päätyrivin ruuveille} \\ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} & \text{muille kuin päätyrivin ruuveille} \end{cases} \quad (45)$$

missä

- $F_{b,Rd}$  on reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo
- $k_1$  on voiman kohtisuoran suunnan ruuvijainnista riippuva kerroin
- $\alpha_b$  on rajoittava kerroin
- $\alpha_d$  on voimansuuntaisesta ruuvijainnista riippuva kerroin.

Reunapuristuslujuutta laskettaessa uppokantaiselle ruuville on pienennettävä kaavassa 42 olevaa teräslevyn paksuutta puolet upotuksen verran (SFS, 2006b, s. 29). Ruuveille ei varsinaisia vetokuormituksia kohdisteta, mutta leikkauskestävyyden köysivaikutuksen osuuden toimivuuden osalta tarkistetaan kannan lävistymiskestävyys teräslevystä. Lävistymiskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla (mts. 28)

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} \quad (46)$$

missä

- $B_{p,Rd}$  on lävistymiskestävyyden mitoitusarvo
- $d_m$  on lävistymishalkaisija
- $t_p$  on lävistyvän levyn paksuus.

Lävistymishalkaisija kuusiokantaiselle kansiruuville lasketaan avainvälin ja kuusikulmion lävistäjän keskiarvona, ja teräslevyn koko paksuutta voidaan käyttää lävistystarkastelussa (SFS, 2006b, s. 13). Uppokantaiselle ruuville voidaan käyttää suoraan ruuvin kannan halkaisijaa, mutta on huomioitava teräslevyn paksuus kohdalla, jossa ruuvin kanta koskettaa teräslevyyn, kun upotuksen uloin halkaisija on kannan halkaisijaa suurempi.

Levyn palamurtumisessa tarkastellaan ruuviryhmän alueella veto- ja leikkausmurtumisen yhdistelmää ruuvireikien ja levyn reunojen välillä (SFS, 2006b, s. 34). Kuvassa 4 on esitettyä esimerkkitapauksia, joissa palamurtuminen voisi olla yleistä leikkaus- tai vetomurtumista mitoittavampi. Suurempilukuisilla ruuviryhmillä leikkaus- ja vetopinta-alat kasvavat helposti jo melko suuriksi. Palamurtumiskestävyys lasketaan kaavalla

$$V_{eff,Rd} = \begin{cases} \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} & \text{keskeisesti kuormitetulla symmetrisellä ruuviryhmällä} \\ \frac{0,5f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} & \text{muulloin} \end{cases} \quad (47)$$

missä

$A_{nt}$  on vedon rasittama pinta-ala murtumislinjalla

$A_{nv}$  on leikkauksen rasittama pinta-ala murtumislinjalla.

#### 4.6 Liitossiirtymän arviointi

Jigi-staatiikkaohjelman tuloksista voidaan tarkistaa käyttörajatilatarkastelua varten puukehän taipuma yläreunan solmuissa. Ohjelmassa ei kuitenkaan pystytä asettamaan puuosien päitä osittain jäykiksi, jolloin on erikseen lisättävä liitoksen kiertymän vaikutus rakenteen yläreunan siirtymään. Ruuviliitokset tehdään lähtökohtaisesti samanlaisina jokaiseen teräslevyn laippaan kaikkiin puosiin, jolloin kuormien jakautuminen voidaan olettaa samaksi kuin täysjäykässä tarkastelutilanteessa.

Puutavaran ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen käyttörajatilan lineaarinen siirtymäkerroin ruuvia kohden lasketaan kaavalla (SFS, 2015, s. 50)

$$K_{ser} = \frac{2}{23} \rho_m^{1,5} d \quad (48)$$

missä

$\rho_m$  on puutavaran keskimääräinen tiheys.

Ruuviryhmien kiertymäjäykkyyttä arvioidaan vertaamalla liitoksen momenttikuormituksen aiheuttamaa ruuvivoimaa kyseisen ruuvin kiertokeskiön etäisyyden muodostaman ympyrän matkalla. Ajattelu on analoginen ruuviin kohdistuvien leikkausvoimien laskennan kanssa. Kun leikkaus- ja vetovoima jätetään pois ruuvin mitoitusleikkausvoiman kaavasta ja tarkastellaan liitoksen momenttia käyttörajatilassa, voidaan ruuvin käyttörajatilan kuormalle johtaa kaava

$$F_{k,i} = \frac{M_{Ek} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{I_p} = \frac{M_{Ek} r_i}{I_p} \quad (49)$$

missä

$M_{Ek}$  on liitoksen momentti käyttörajatilassa.

Käyttörajatilan liitossiirtymien tarkastelussa ei huomioida kuormitusten 1,5-kertaistusta. Statiikkaohjelmasta on muistettava poimia käyttörajatilan momentti kehän nurkkaliitoksesta. Ruuvin lopputilan siirtymä käyttörajatilassa pelkälle tuulikuormalle voidaan laskea kaavalla (SFS, 2015, s. 22)

$$u_i = \frac{F_{k,i}}{K_{ser}} = \frac{M_{Ek}r_i}{I_p K_{ser}} \quad (50)$$

Siirtymäkertoimen ja ruuviryhmän polaarisen neliömomentin tulosta voidaan käyttää nimitystä kiertymäjäykkyys. Oletetaan siirtymän olevan pieni verrattuna ympyräkaareen, jota pitkin se kulkee. Otetaan huomioon myös puolet ruuvin välyksestä teräslevystä. Siirtymä voidaan tällöin likimääräisesti muuntaa kiertymäksi radiaaneina kaavalla

$$\varphi = \frac{u_i}{r_i} + \frac{0,5(d_0-d)}{r_m} = \frac{M_{Ek}}{K_{ser}I_p} + \frac{0,5(d_0-d)}{r_m} \quad (51)$$

missä

$\varphi$  on teräslevyn ja puun välisen liitoksen kiertymä

$r_m$  on ruuvien etäisyyden keskiarvo kiertokeskiöstä.

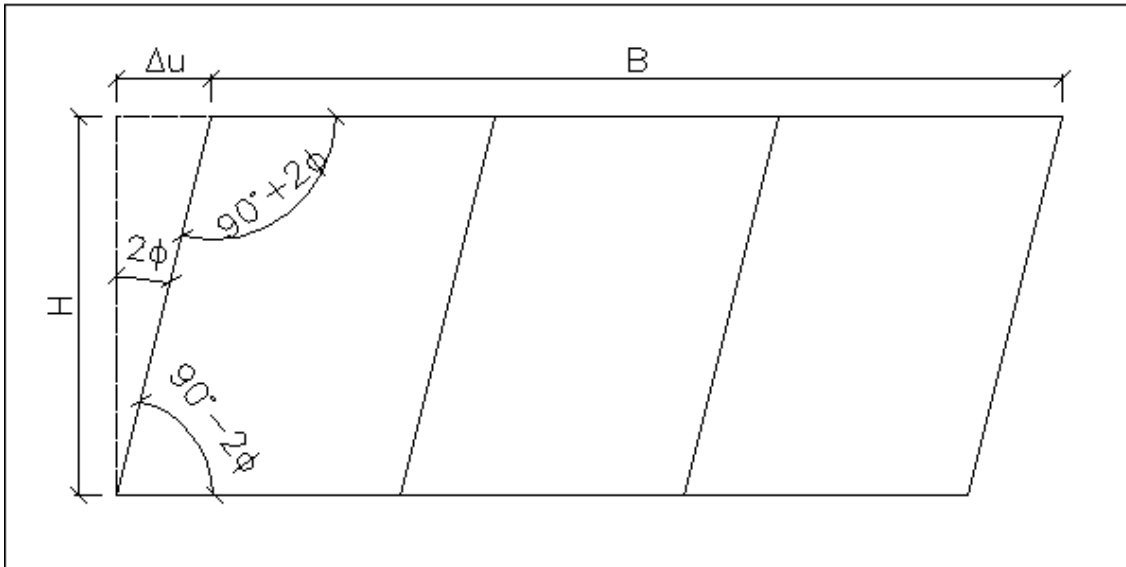
Kiertymän vaikutusta kehärakenteen yläpään siirtymään arvioidaan kuvassa 18 havainnollistetulla suorakulmiolla, jonka nurkat aukenevat tai sulkeutuvat kaksinkertaisesti lasketun kiertymän mukaan. Yläpään lisäsiirtymä voidaan laskea kehän korkeuden mukaan kaavalla

$$\Delta u = H \tan(2\varphi) \quad (52)$$

missä

$\Delta u$  on käyttörajatilan lisäsiirtymä

$H$  on kehän korkeus.



Kuva 18. Pilari-palkkikehän lisäsiirtymä.

#### 4.7 Alajuoksun perustuskiinnitys

Alajuoksun perustuskiinnitykseen käytetään Eurotecin valmistamaa betoniruuvia 12,5x240. Vastaavaa ruuvia käytetään jo ennestään hirsikehikon alajuoksujen kiinnitykseen. Ruuvi asennetaan aluslevyn kanssa upotukseen kuvan 19 mukaisesti siten, että ruuvin 95 mm pitkä kierreosa ylettyy kokonaisuudessaan perustukseen (Deutsches Institut für Bautechnik, 2016, s. 9). Ruuvia varten tehdään esiporaus puuosan läpi perustukseen. Vetokestävyys tarkistetaan vedettynä pulttiliitoksena kaavalla (SFS, 2015, s. 69)

$$N_{p,Rk} = 3f_{c,90,k} \frac{\pi}{4} \min \left\{ \begin{array}{l} 12t_{aluslevy}^2 \\ 4d_{ruuvi}^2 \end{array} \right. \quad (53)$$

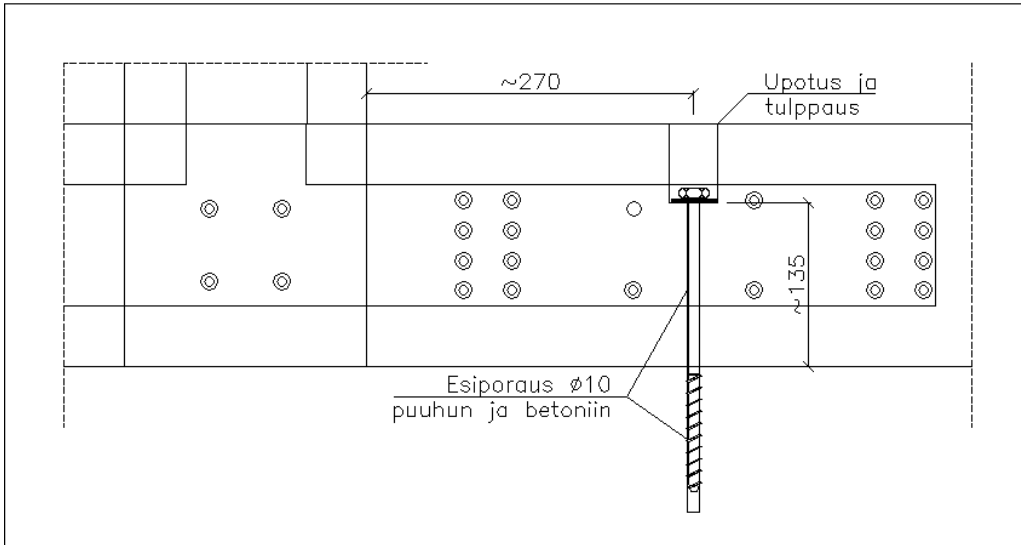
missä

$N_{p,Rk}$  on puosan ja perustusruuvin välisen liitoksen vetokestävyys

$f_{c,90,k}$  on puosan puristuslujuus syysuuntaa kohtisuoraan

$t_{aluslevy}$  on perustusruuvilla käytettävän aluslevyn paksuus, vähintään 3,3 mm

$d_{ruuvi}$  on perustusruuvin sileän varren halkaisija 9,85 mm.



Kuva 19. Alajuoksun kiinnitys.

Ruuvien ja puun välisen liitoksen leikkauskestävyys voidaan tarkistaa paksun teräslevyn ja puun välisen liitoksen kaavoilla, joissa oletetaan teräslevyn muodostavan jäykän tuen ruuville (SFS, 2015, s. 55–56). Köysivaikutuksen osuus ominaisleikkauskestävyyden laskennassa murtotavoissa c ja d rajoitetaan pulttiliitoksissa viidesosaan koko leikkauskestävyydestä, kun ruuveilla se on rajoitettu puoleen.

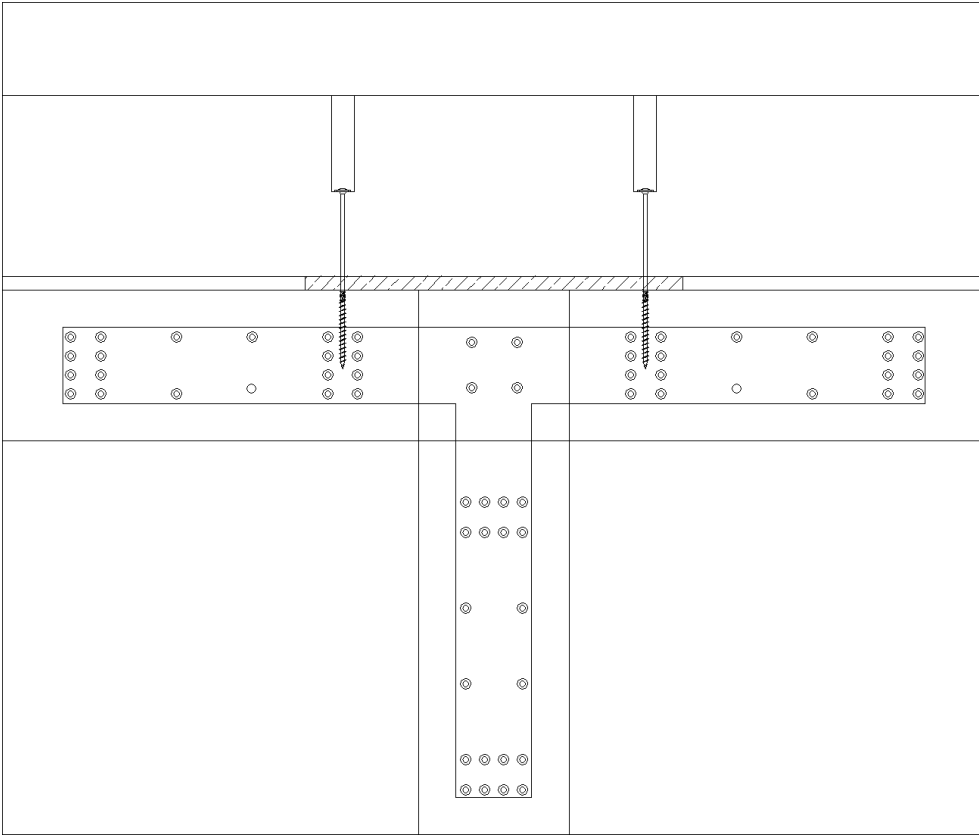
#### 4.8 Yläjuoksun kiinnitys hirteen

Hirren ja kehärakenteen välissä on 18 mm asennusvälys, joka täytetään elastisella uretaanilla. Kehärakenteen pilarien kohdalta hirren ja yläjuoksun väliin asennetaan OSB4-levy, jonka pinta-ala määräytyy välitettävän tukipaineen mukaan. OSB-levylle ei löydy lujustaulukoista arvoa puristuslujuudelle lapepintaa vasten, mutta voidaan arvioida sen olevan 2,5 N/mm<sup>2</sup> (Kowaluk & Ježo, 2021, s. 136). Sahatavaralla C24 ja liimapuulla GL30h on vastaavat puristuslujuusarvot syyn suuntaa kohtisuoraan, ja lujuusarvoa voi lähes aina kuormitustilanteesta riippumatta kasvattaa, joten OSB:n puristuslujuus jää mitoittavaksi (Puuinfo, 2020, s. 24).

Kehärakenteen yläjuoksu kiinnitetään yläpuoliseen hirteen Eurotec Paneltwistec AG 8x240 leveäkantaruuveilla, jotka on upotettu 130 mm kehikkoon kuvassa 20 esitetyllä tavalla. Liitoksessa käytetään vähintään kahta ruuvia. Mikäli tarvitaan suurempaa leikkauslujuutta, voidaan käyttää sylinterikantaista, täyskierteistä KonstruX-ruuvia ristiin asennettuna.



Ruuvien leikkauslujuudet kahden puutavaran liitoksessa voidaan tarkistaa suoraan valmistajan mitoitustaulukosta, koska kuormitus- ja syysuunnat ovat yksiselitteiset.



Kuva 20. TimberFrame yläliitos.

## 5 TULOKSET

Tuloksissa käsitellään rakennemitoituksen rajoittavia tekijöitä teräslevyn, ruuviliitoksen ja puukehän osalta. Lisäksi käydään läpi muutaman TimberFrame-kehän mitoitustuloksia.

### 5.1 Teräslevy

Teräslevyn leveys on rajoitettava 100 mm kapeammaksi kuin puutolppa, koska la-sielementti limittyy 30 mm tolpan kanssa ja on jätettävä 20 mm liikevaraa. Tilannetta on aiemmin havainnollistettu kuvassa 12 puukehän keskitolpan vaakaleikkauksessa. Murtorajatilamitoituksessa kiepahdus solmupisteen puoleisella vapaalla osuudella määräytyy selkeästi määrävimmäksi. Taulukossa 4 esitetään 10, 12 ja 15 mm paksuiselle, 100 ja 115 mm leveälle teräslevylle suurin sallittava mitoitusmomentti kiepahduksen kannalta teräksen lujuusluokilla S235 ja S355. Teräslevyn käyttöaste kiepahduksen ja vedon yhteisvaikutuksessa huononee yleensä alle viisi prosenttiyksikköä tilanteessa, jossa TimberFrame on sijoitettu päätyseinälle ja keskialueen tolpan päällä oleva omapaino ei kumoa täysin nostevoimaa.

Taulukko 4. Teräslevyn kiepahduskestävyys,  $C_1=1,0$  ja  $L=150$  mm.

$M_{b,Rd}$ (kNm)	t = 10 mm		t = 12 mm		t = 15 mm	
Teräslaatu	S235	S355	S235	S355	S235	S355
b = 100 mm	3,63	5,19	4,53	6,55	5,87	8,59
b = 115 mm	4,72	6,72	5,91	8,51	7,70	11,21

Teräslevyn kestävyys tarkistetaan Jigi-mallista tarkistetun puukehän suurimman murtorajatilan taivutusmomentin mukaan. Ruuviryhmän kestävyys murtorajatilassa tarkistetaan samalle momentille.

### 5.2 Ruuvivalinta

Ruuvivalintaan vaikuttaa oleellisesti materiaali- ja asennuskustannus, leikkauslujuus, käyttörajatilan siirtymäkerroin sekä liitosalueeseen mahtuvien ruuvien määrä. Kansiruuvit osoittautuivat kaikilta osa-alueilta ongelmalliseksi. Taulukossa 5 on esitetty eri ruuvityypeille leikkauslujuuksia puu-teräslevyliitoksessa.

Taulukko 5. Ruuvien puu-teräs-liitoksen leikkauslujuus hetkellisessä aikaluokassa.

$F_{v,Rd}$ (kN) $t = 15 \text{ mm}, \alpha = 90^\circ$	C24 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$	GL30h $\rho_k = 430 \text{ kg/m}^3$
KonstruX ST SK 6,5x120	4,19	4,76
KonstruX ST SK 8x155	6,29	7,15
KonstruX ST SK 10x155	8,33	9,47
Kansiruuvi 4.6 M8x120	5,39	6,09
Kansiruuvi 4.6 M10x150	7,74	8,74
Kansiruuvi 4.6 M12x160	10,10	11,37

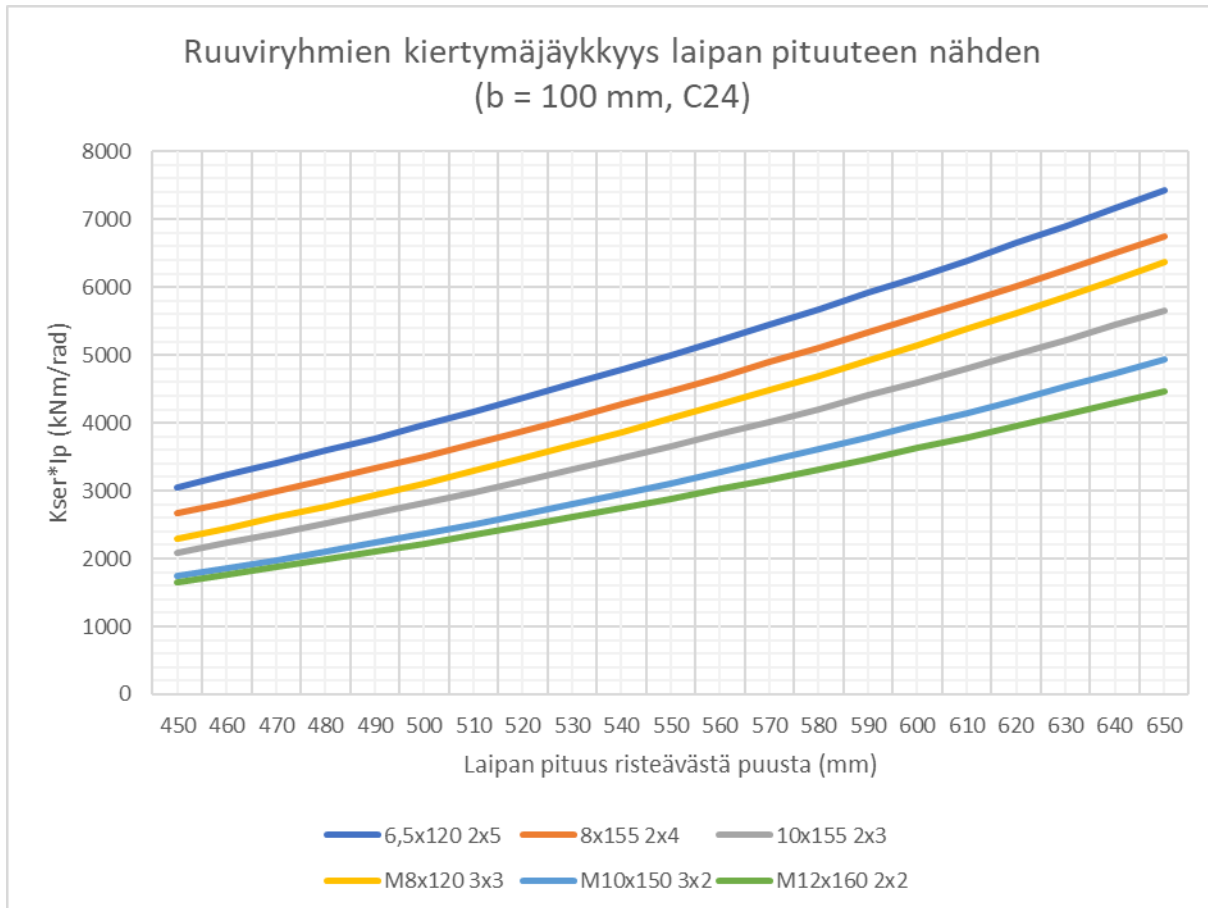
S235-lujuusluokan teräslevyn nurkimmaisena ruuvien kohdalla reunapuristuslujuus 10 mm levy-paksuudella on upotettullakin ruuvilla noin 17 kN, jolloin tarkasteltavien ruuvien leikkauslujuus on aina mitoittavampi. Ruuviryhmät sisältävät useita ruuveja suhteellisen laajalla alueella, jolloin teräslevyyn ei pääse muodostumaan lyhyitä palamurtumislinjoja.

Teräslaippoihin voidaan mahduttaa rajoitettu määrä ruuveja laipan leveys-suunnassa, mikä määrittää teräslaipan vähimmäispituuden risteävän puuosan reunasta, jolloin voidaan saavuttaa vastaava kiertymäjäykkyys eri ruuveilla muodostetuilla ruuviryhmillä. Taulukossa 6 on esitetty tarkasteltavien ruuviryhmien mittatiedot ja kiertymäjäykkyudet kahdella laippaleveydellä. Vertailun lähtökohdaksi on valittu laipan kokonaismitta 500 mm KonstruX-ruuvilla 8x155. Kuvassa 23 on havainnollistettu taulukossa 6 käytettäviä mittoja. Kuvissa 21 ja 22 on esitetty ruuviryhmien kiertymäjäykkyysien kuvaajat teräslaipan pituuden mukaan. Kiertymäjäykkyudet eivät sisällä ruuvivälyksien vaikutusta.

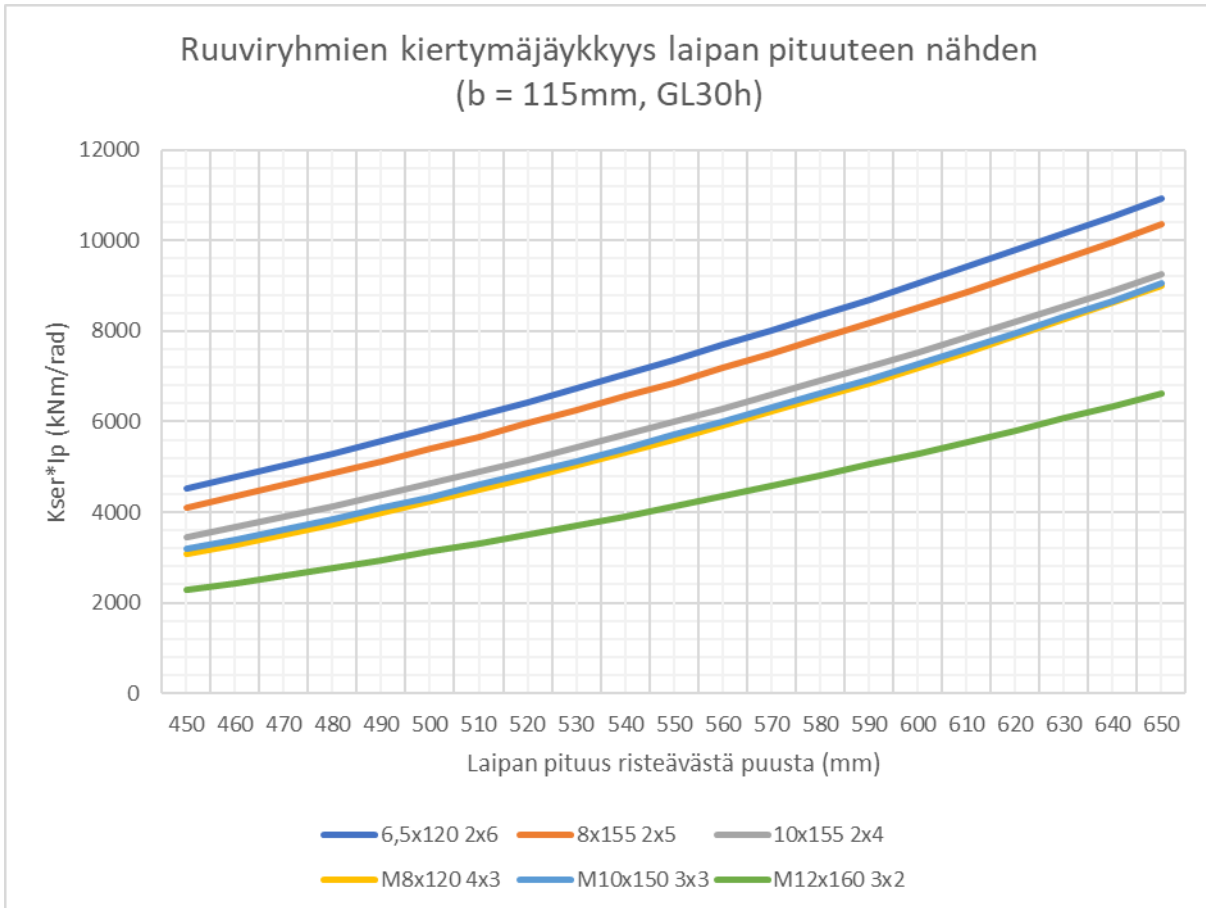
KonstruX-ruuvit 6x120 ja 8x155 erottuvat selkeästi edukseen, koska niitä mahtuu liitosalueelle paljon lähemmäksi, kun taas kansiruuveilla ruuvirivit ajautuvat laajemmalle. Asennustechnisesti porakärkiset KonstruX-ruuvit ovat helppoja, kun taas kansiruuveille jouduttaisiin esiporaamaan kahteen kertaan esireiät jokaiselle ruuville (SFS, 2015, s. 97). Lisäongelmia voi aiheutua myös teräslevyn reikiin jätettävistä välyksistä, koska kansiruuvi esiporausta varten on jätettävä tilaa puuporan terälle, kun taas porakärkiruuvien asennusreikään riittää pienempi välyys valmistustoleranssien ansiosta. KonstruX-ruuveista pidempi 8x155 ulottuu syvemmälle puuosaan, jolloin voisi ennustaa puu-teräsliitoksen epäkeskisyyden olevan vähäisempää.

Taulukko 6. Ruuviryhmien vertailu kiertymäjäykkyydellä.

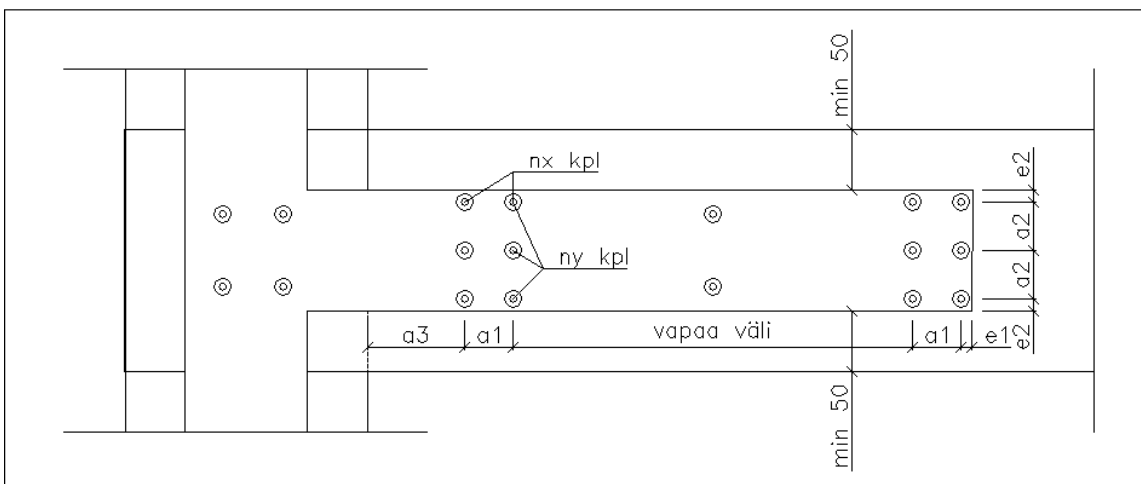
b = 100 mm, C24 $\rho_{\text{mean}} = 420 \text{ kg/m}^3$										
Ruuvi	$n_x$	$a_1$	$e_1$	$n_y$	$a_2$	$e_2$	$a_3$	vapaa	tot	$K_{\text{ser}}$
6,5x120	2	26	10	5	20	10	65	353	480	3588
8x155	2	32	11	4	26	11	80	325	500	3510
10x155	2	40	13	3	36	13	100	347	540	3476
M8x120	3	40	12	3	37	12	80	268	520	3476
M10x150	3	50	14	2	72	14	80	276	570	3441
M12x160	2	60	16	2	68	16	84	370	590	3469
b = 115 mm, GL30h $\rho_{\text{mean}} = 480 \text{ kg/m}^3$										
6,5x120	2	26	10	6	19	10	65	353	480	5297
8x155	2	32	11	5	23	11,5	80	325	500	5391
10x155	2	40	13	4	30	12,5	100	337	530	5422
M8x120	4	40	12	3	45	12	80	208	540	5310
M10x150	3	50	14	3	44	13,5	80	146	540	5413
M12x160	3	60	16	2	83	16	84	260	600	5297



Kuva 21. Ruuviryhmän kiertymäjäykkyys C24.



Kuva 22. Ruuviryhmän kiertymäjäykkyys GL30h.

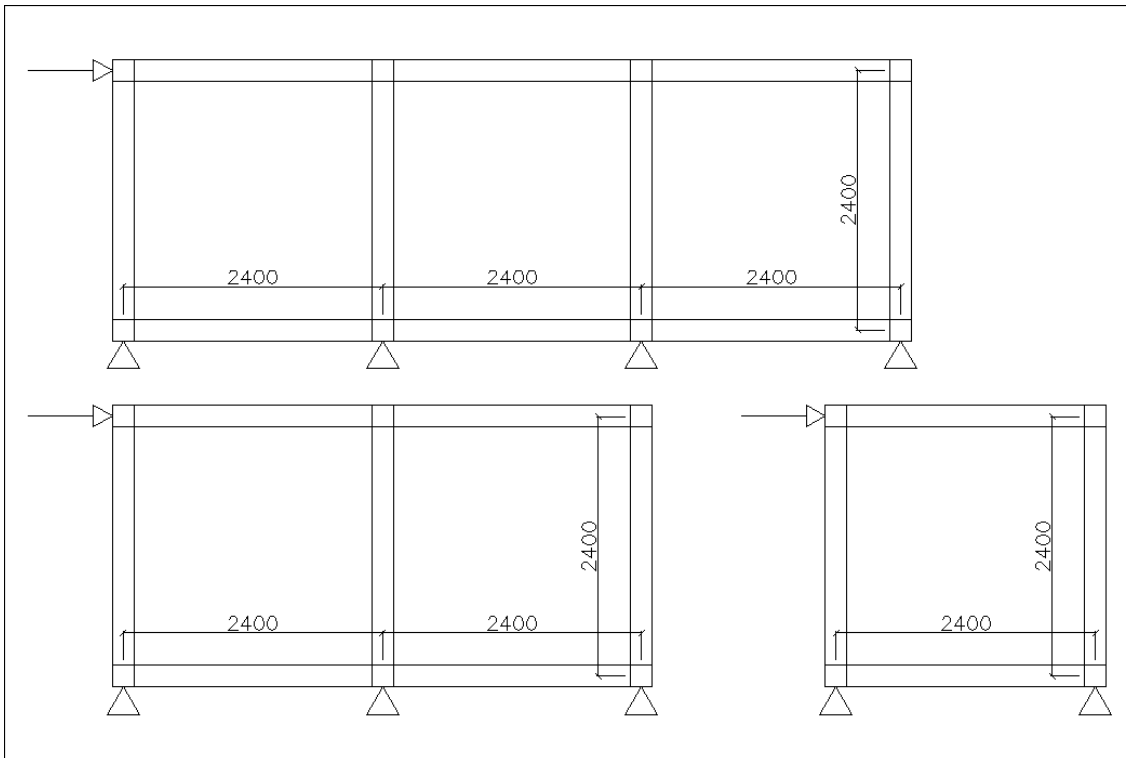


Kuva 23. Ruuviryhmän selitteet.

### 5.3 Käyttörajatilan taipuma

Tarkastellaan käyttörajatilamitoitusta kuvan 24 mukaisille puukehille, joita kuormitetaan ylänurkasta hetkellisen aikaluokan pistekuormalla. Ylänurkan kokonaistaipuma muodostuu

Jigi-mallista saadusta täysjäkän puukehän taipumasta, nurkan puu-teräsliitoksen kiertymäjäykkyyden mukaisesta lisätaipumasta sekä mahdollisen ruuvien asennusvälyksen aiheuttamasta lisätaipumasta. Kokonaistaipuma rajoitetaan arvoon  $H/300$  (RIL, 2019, s. 98). Liitoksen lisätaipumaa laskettaessa tarkastellaan ulkonurkissa olevaa käyttörajan momenttia.



Kuva 24. Esimerkkikehät.

Tarkasteltavien kehien puutavara on liimattua sahatavaraa 200x200 C24. Teräsjäykisteissä käytetään aiemmin taulukossa 6 ruuviryhmälle KonstruX 8x155 esitettyä laippapituutta 500 mm. Käytetään ruuvireikien välyksenä 0,2 mm. Taulukossa 7 on esitettyä kullekin kehälle taipumarajan mukaan kaatavan pistekuorman maksimiarvo, joka voidaan määrittää Jigi-malliin. On huomioitava, että puukehä, liitosteräket ja ruuvit tarkistetaan murtorajatilassa 1,5-kertaisilla kuormilla liitosalueen voimien osalta, joten todellinen sallittava mitoitustuulikuorma on sama kuin Jigi-malliin asetettu ominaistuulikuorma. Samalla periaatteella, kun poimitaan kehänurkista käyttörajan momentti ja siirtymä, jaetaan ne puolellatoista. Taulukosta 7 näkee myös, mikä on 15 mm paksun teräslevyn S355 ja kuormitetuimman ruuvin käyttöaste.

Taulukko 7. Puukehän 200x200 C24 kapasiteetti.

Puukehä	$F_{\max}$ (kN)	$M_{Ed}$ (kNm)	KA teräs	KA ruuvit
3-aukkoinen	14,9	8,1	94,2 %	72,5 %
2-aukkoinen	10,6	8,5	98,9 %	76,1 %
1-aukkoinen	6,2	5,6	65,2 %	50,1 %

Taulukon 7 käyttöasteista nähdään, että on saavutettu sopiva tasapaino murto- ja käyttörajatilatarkastelun välillä. Vain paksuntamalla entisestään teräslevyä ja samalla pidentämällä laippaa voitaisiin lisätä kokonaiskapasiteettia. 1-aukkoinen kehärakenne ei ole yleinen, vaan tavallisesti valoaukkoja on useita peräkkäin. Koska teräslevyn paksuudella ei ole merkitystä puukehän käyttörajatilatarkastelun tuloksiin, voidaan pienempien momenttien liitosalueilla käyttää ohuempia levyjä. Liimapuusta 165x215 GL30h valmistetulle kehälle tehdään vastaava optimointi taulukkoon 8 laippapituudella 500 mm.

Taulukko 8. Puukehän 165x215 GL30h kapasiteetti.

Puukehä	$F_{\max}$ (kN)	$M_{Ed}$ (kNm)	KA teräs	KA ruuvit
3-aukkoinen	19,5	10,6	94,6 %	67,2 %
2-aukkoinen	13,8	11,0	98,1 %	69,7 %
1-aukkoinen	8,2	7,4	66,0 %	46,9 %

Liimapuuksi muuttamalla ja hieman profiilia korottamalla päästiin noin kolmanneksen parempaan kapasiteettiin. Puukehän yläreunan käyttörajatilan pistekuorman ja siirtymän suhteella saadaan siirtymäjäykkyys, jonka avulla voidaan suorittaa tuulikuormien jakaminen kaikille jäykistäville pystyrakenteille jäykkyyksien ja sijainnin mukaan.

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selkeyttää TimberFrame-puurungon rakennesuunnittelua ja tuoda keinoja arvioida rakenteen toteutuskelpoisuutta luonnossuunnittelun tukena. Tutkimustyön pohjalta on luotu Excel-laskentapohja, jolla voidaan tarkistaa teräslevyn ja ruuviliitoksen kestävyys sekä tehdä liitossiirtymät huomioiva käyttörajatilatarkastus. Lisäksi on luotu valmiita Jigi-malleja, joista pienellä muokkauksella päästään tarkistamaan puukehät yleisimmillä aukkomuodoilla. Teräsosille pystytään luomaan valmiita tilauskuvia vakioruuvauksilla, mikä suoraviivaistaa suunnitteluprosessia.

Yhtenä suurimpana haasteena työssä oli selvittää teräsosamitoitusta lattateräkselle. Eurokoodimitoituksessa oletetaan, että tarkasteltavassa rakennekappaleessa on kahden akselin suuntaisesti levyosia, jolloin kiepahdusilmiö ei ole niin voimakas kuin korkealla suorakaidepalkilla. Lattateräsosia ei yleensä mitoiteta momentille. Taivutukselle mitoitettuja puu-teräsliitoksia ei juurikaan löydy laskentaesimerkkeinä, jolloin kiertymäjäykkyyden suuri merkitys kehärakenteen käyttörajitalimitoituksessa tuli osittain yllätyksenä.

Jatkokehitystavoitteena on tehdä rakennetestejä, joilla voisi varmistaa puu-teräsliitoksen epäkeskisyyden todellista vaikutusta kestävyteen. Murtorajatilamitoitus 1,5-kertaisilla kuormituksilla voi olla reilustikin yliampuva. Jigi-staatiikkaohjelmalla voidaan suorittaa laskentaa riittävällä tarkkuudella, mutta epätarkkuutta luo osittain jäykkien liitosten sekä sokkeliperustuksen mukaisen jatkuvan tuen puuttuminen. Vaihtoehtoisesti puu-teräsliitos voidaan toteuttaa puun keskivaiheille tehtävään hahloon asennettavaa teräslevyä hyödyntäen. Ruuvina käytettäisiin poravaarnatappeja, kuten Rothoblaas SBD, jotka muodostavat kaksileikkeisen liitoksen. Tähän yhdistettynä kehärakenteen joustamista alareunassa voidaan vähentää toteuttamalla perustusliitos mastojäykkänä, jolloin alajuoksuja voitaisiin madaltaa. Toimivaksi todettua rakennetta on mielekästä jatkokehittää, ja toteutettavista kohteista saatava palaute niin asennuksen kuin tuotteen lopullisen ulkonäön osalta antaa arvokasta tietoa.



## LÄHTEET

Deutsches Institut für Bautechnik. (23.9.2016). *EuroTec concrete screw Rock* (ETA 15/0886).

ETA-Danmark. (17.8.2023). *E.u.r.o. Tec screws type KonstruX*, “KonstruX Duo”, “Paneltwistec”, “Topduo”, “Terrassotec”, “SP FK”, “Speedo”, “Hobotec”, “Hapatec”, “SP ZK”, “Ecotec”, “WBS”, “Sawtec”, “FBAS”, “VSS”, “Duratec” and “LBS” screws and “BRUTUS” threaded rods (ETA 11/0024).

Eurofins Expert Services. (1.7.2020). *Finnlamelli log houses* (ETA 12/0353).

Finnlamelli. (23.5.2013). *Timberkoti-esittelytalon tupanäkymä*. [Valokuva].  
[https://www.facebook.com/Timberkoti/?locale=fi\\_FI](https://www.facebook.com/Timberkoti/?locale=fi_FI)

Heikkilä, A. (2019). *Kehäjäykistys puu- ja teräsliitoksella* [julkaisematon AMK-opinnäytetyö]. Oulun ammattikorkeakoulu.

Henderson, R. (2015) *AD 391: Lateral Torsional Buckling of rectangular plates in accordance with BS EN 1993-1-1*. <https://www.newsteelconstruction.com/wp/ad-391lateral-torsional-buckling-of-rectangular-plates-in-accordance-with-bs-en-1993-1-1/>

Henderson, R. (2020) *AD 436: Section classification of a flat plate*.  
<https://www.newsteelconstruction.com/wp/ad-436-section-classification-of-a-flat-plate/>

Kowaluk, G. & Ježo, A. (2021). Compression strength-focused properties of wood composites induced by structure. Teoksessa E. Dobrowolska (toim.), *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology Volume 116* (s. 131–140). Warsaw University of Life Sciences.  
<https://wulsannals.com/resources/html/articlesList?issued=14451>

Mendes, R. & Asım Şişman, Ö. (2023). *Wood screws design tables and application examples*. E.u.r.o.Tec. <https://www.eurotec.team/en/about-us/news/exclusive-eurotec-design-guide-timber-construction>

Norges Byggscole. (1999). *Trekonstruksjoner med spikerplater*. Norske Takstolprodusenters Forening.

Puuinfo. (2010). *EC 5 sovelluslaskelmat, Asuinrakennus*. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus0.pdf>

Puuinfo. (2020). *Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje* (5. p.).  
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/eurokoodi-5-lyhennetty-suunnitteluohje/>

- Salmi, T., & Pajunen, S. (2010). *Lujuusoppi*. Pressus.
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (2007). *Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta – Suunnittelu- ja valmistusohjeet* (RIL 244-2007).
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (2013). *NR-kattorakenteen jäykistyksen suunnittelu ja toteutus* (RIL 248-2013).
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (2017). *Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4* (RIL 201-1-2017).
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (2019). *Puurakenteiden suunnitteluohje, eurokoodi EN 1995-1-1 (2. p.)* (RIL 205-1-2017).
- Suomen standardisoimisliitto (SFS). (2006a). *Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt* (SFS-EN 1993-1-1).
- Suomen standardisoimisliitto (SFS). (2006b). *Eurocode3. Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1–8: Liitosten mitoitus* (SFS-EN 1993-1-8).
- Suomen standardisoimisliitto SFS. (2015). *Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC).
- Suomen standardisoimisliitto SFS. (2023). *Eurocode 9. Design of aluminium structures. Part 1-1: General rules* (SFS-EN 1999-1-1).
- Tiainen, T., & Papula, S. (2020). *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 - oppikirja*. Teräsrakenneyhdistys.
- VTT Expert Services. (2014). *Puurakenteiden S-muodon nurjahduksen ja kiepahduksen mitoitusohjeet* (VTT-S-05262-14). <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puurakenteiden-s-muodon-nurjahduksen-ja-kiepahduksen-mitoitusohjeet/>