

JÄYKISTYS JA KIEPAHDUKSEN HALLINTA LAPWALL LEKO
-KATTOELEMENTILLÄ



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Visamäki, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Syksy, 2018

Martti Perikangas

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK
Visamäki

| | | |
|--------------|---|------------|
| Tekijä | Martti Perikangas | Vuosi 2018 |
| Työn nimi | Jäykistys ja kiepahduksen hallinta LapWall Leko -kattoelementillä | |
| Työn ohjaaja | Ville Pulkkinen | |

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia liimapuurunkoisen hallin pääkannattimien kiepahdustuenta sekä katon kokonaisjäykistystä kertopuurunkoisella LapWall Leko -kattoelementillä sekä luoda tähän liittyvä suunnitteluohje.

Leko-kattoelementti on tehdasvalmistettu tuoteosa, jota käytetään erilaisissa hallimaisissa rakennuksissa yläpohjarakenteena. Kattoelementit suunnitellaan ja valmistetaan kohdekohtaisesti Pälkäneellä. Kattoelementin kantavana rakenteena toimivat Kertopuu-palkit, sisäverhouksena pääsääntöisesti kipsilevy tai akustovilla ja vesikatteena bitumikermi tai PVC-kate.

Tässä opinnäytetyössä on käyty läpi ja selitetty laskentakaavat palkkien kiepahdustuentaan liittyen sekä kokonaisjäykistyksen periaatteet käytettäessä kattoelementtiä joko jäykisteenä tai voimien kuljettamisessa erilliselle jäykisteelle liimapuurunkoisessa hallissa. Lisäksi on tehty esimerkilaskelmat eri kaavojen käytöstä asian konkretisoimiseksi.

Laskentakaavoja voidaan hyödyntää katon jäykistysuunnittelussa sekä tarkasteltaessa yksittäisen kattoelementin jäykistyskapasiteettia eri kuorimitustapauksissa.

Avainsanat kattoelementti, kiepahdus, jäykistys, kertopuu, liimapuu

Sivut 48 sivua, joista liitteitä 7 sivua

Degree Programme in Construction Engineering
 Visamäki

| | | |
|------------|---|-----------|
| Author | Martti Perikangas | Year 2018 |
| Subject | Stiffening and stabilization with a roofing element | |
| Supervisor | Ville Pulkkinen | |

ABSTRACT

The aim of this Bachelor's thesis was to study the stabilization of the main members of a glulam structure and stiffening of the roof level with LapWall Leko roofing elements made of laminated veneer lumber and to create a design handbook of the subject.

Leko roofing element is a structural component used as a roof structure mostly in bigger industrial buildings. The elements are designed and pre-fabricated on a case by case basis at LapWall's factory in Pälkäne. The load-bearing structures of the element are made of laminated veneer lumber while the inner lining is mostly gypsum board or stone wool with an aluminium surface. The roofing underlayment is mostly made of joint-sealed roofing bitumen or PVC roof covering.

Formulas related to the stabilization and stiffening of the roofing structures are introduced and explained in cases where the elements are used to transfer the forces to a separate bracing or in a case where the element is used as a stiffener of the main members. In addition, actual calculations are made to give a better understanding of the subject.

Formulas introduced in the thesis can be utilized while designing the stabilization of roofing structures or while verifying the stiffness of a single element under different kind of loading cases.

Keywords stabilization, roofing element, stiffness, glulam

Pages 48 pages including appendices 7 pages

SISÄLLYS

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 3 |
| 2 | LAPWALL LEKO -KATTOELEMENTTI..... | 5 |
| 2.1 | Elementtityypit | 6 |
| 2.2 | Kipsielementti | 7 |
| 2.3 | Akustoelementti..... | 8 |
| 3 | LIIMAPUURUNGON JÄYKISTYS..... | 9 |
| 3.1 | Kehärakenne jäykistysristikoilla | 10 |
| 3.2 | Mastopilarit ja päätypalkki | 11 |
| 3.3 | Levyjäykistys | 12 |
| 4 | PALKKIRAKENTEIDEN KIEPAHDUSMUODOT..... | 14 |
| 4.1 | Kiepahduksen 1. muoto..... | 14 |
| 4.2 | Kiepahduksen 2. muoto..... | 17 |
| 5 | PALKISTON STABILOINTI KATTOELEMENTILLÄ..... | 22 |
| 5.1 | Liitossiirtymät | 23 |
| 5.2 | Levyjäykiste..... | 24 |
| 5.3 | Kerto-T-laudan ja reunapalkin välinen liitos..... | 27 |
| 5.4 | Kattoelementin ja liimapuupalkin välinen liitossiirtymä..... | 28 |
| 5.5 | Liitossiirtymät yhteensä | 29 |
| 5.6 | Kattoelementin ja liimapuupalkin välinen liitosmitoitus | 30 |
| 6 | KATTOTASON JÄYKISTYS KATTOELEMENTILLÄ..... | 32 |
| 6.1 | Kattoelementtiin kohdistuva kuormitus | 34 |
| 6.2 | Siirtymät levyjäykistekentässä..... | 36 |
| 6.3 | Siirtymät elementtisaumassa | 37 |
| 7 | YHTEENVETO..... | 38 |
| | LÄHTEET..... | 40 |

Liitteet

| | |
|---------|--|
| Liite 1 | Kerto-T 27x100 kasettipuun ja Kerto-S reunapalkin liitossiirtymä |
| Liite 2 | Kipsilevyn jäykkyys murtorajatilassa |
| Liite 3 | Kipsilevyn leikkausvoimakestävyys murtorajatilassa |
| Liite 4 | Kriittinen aallonpituus |
| Liite 5 | Kiepahdustuelta vaadittava jousijäykkyys |
| Liite 6 | Kattoelementin ja palkin liitoksen mitoitus kiepahdusvoimalle |

1 JOHDANTO

LapWall on vuonna 2011 perustettu Suomen suurin puuelementtivalmistaja, jolla on tuotantolaitoksia Pyhännällä, Pälkäneellä ja Keuruulla. Pyhännän tehdas on keskittynyt seinäelementteihin, Keuruun tilamoduuleihin ja Pälkäne vaakaelementteihin. Pälkäneen tehdas on liittynyt osaksi LapWall-konsernia vuoden 2017 alussa. (LapWall 2018)

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii LapWall Oy:n Pälkäneen yksikkö, joka valmistaa pääasiassa kertopuurunkoisia LapWall Leko -kattoelementtejä. Kattoelementtien lisäksi valmistetaan puisia väli- ja alapohjaelementtejä. (LapWall 2018)

LapWall Leko -kattoelementin maksimipituus on noin 24 metriä rungon jännevälillä ollessa 4-9 metriä. Hallirakennuksen primäärirakenteiden jännevälillä ollessa kuusi metriä voidaan kattoelementti tehdä neliaukkoisena tai 7,5 metriä kolmiaukkoisena. Elementin leveys on tyypillisesti 2,44 metriä, jolloin yhdellä elementillä saadaan parhaimmillaan lähes 60m² valmista kattoa. (LapWall 2018)

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia liimapuurunkoisen hallin palkkien kiepahdustuenta, sekä katon kokonaisjäykistystä kertopuurunkoisella LapWall Leko -kattoelementillä. Työssä käydään läpi jäykistystä yleisellä tasolla, tarkastellaan kattoelementtien eri rakennetyypit ja toimintaperiaatteet, sekä tehdään laskennallinen tarkastelu jäykistykseen ja kiepahduksen eri vaiheille.

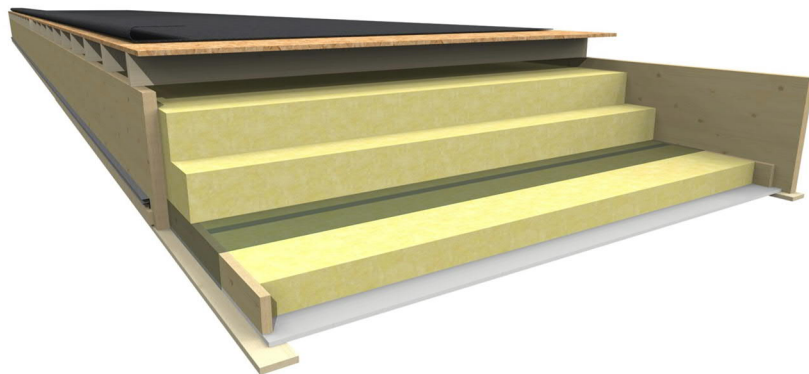
Liimapuurunkoisen hallin ollessa kyseessä, toteutetaan jäykistys yleensä jäykisteristikkoilla tai vinotuilla. Tällöin jäykisteristikko sijoitetaan myös liimapuupalkkien väliin keräämään yläpohjatasoon kohdistuvia erilaisia vaakavoimia, kuten tuulikuormaa ja kiepahdusvoimia. Jäykisteristikoiden lisäksi tarvitaan puristussauvoja, jotka siirtävät voimia palkeilta ristikoille.

Käyttämällä LapWall Leko -kattoelementtiä voidaan ylimääräisen kiepahdustuennan tarvetta kuitenkin pienentää hyödyntämällä kattoelementtiä jäykisteenä sekä kattoelementin kertopuupalkkeja voimia siirtävänä sekundäärirakenteena.

2 LAPWALL LEKO -KATTOELEMENTTI

LapWall Leko -kattoelementti on puurunkoinen pääasiassa teollisuuskohdeissa ja julkisissa rakennuksissa käytettävä kattorakenne. Kattoelementti valmistetaan kuivissa tehdasolosuhteissa kauttaaltaan valmiiksi, kuljetaan työmaalle ja asennetaan rakennuksen rungon päälle. Kattoelementillä saadaan siis nopeasti valmis veden- ja lämmönpitävä yläpohja ja vesikattorakenne. (LapWall 2018)

LapWall Leko -kattoelementin kantava runko on Kerto-S-palkkia. Elementin maksimipituus on noin 24 metriä rakennuksen rungon jännevälillä ollessa 4-9 metriä (Lapwall 2018). Tyypillisesti elementit ovat kolmi- tai neliaukkoisia jännevälillä vaihdeltaessa 6-7,5 metrin välillä. Myös yksi- ja kaksiaukkoiset elementit ovat mahdollisia. (LapWall 2018)



Kuva 1. LapWall Leko -kattoelementti (LapWall 2018).

Kattoelementin leveyden ollessa 2,44 metriä mahdollistetaan täysleveän levytavaran käytön sekä elementtien rahtaus työmaalle ilman erikoiskuljetuksen tarvetta. Käytännössä kuitenkin myös leveämpiä tai kapeampia elementtejä valmistetaan esimerkiksi räystäälle.

Kattoelementin korkeus vaihtelee kantavan palkin korkeuden mukaan. Käytännössä palkin korkeuteen vaikuttavat elementin jänneväli, elementtiin kohdistuvat kuormitukset, U-arvo vaatimusten mukainen eristeen määrä sekä tuuletuksen tarve. Kattoelementin korkeus on tyypillisesti noin 600-650 millimetriä. (LapWall 2018)

Kattoelementin katemateriaalina käytetään 2-kerros-bitumikermiä, PVC-kattokermiä tai peltiä (Lapwall 2018). Kattoelementin lämmöneristeenä toimii mineraalivilla U-arvo vaatimusten mukaisesti ja höyrynsulkuna

0,2 millimetrin höyrnsulkumuovi. Sisäverhouksena käytetään tyypillisesti kipsilevyä tai akustovillaa. (LapWall 2018)

Kattoelementtien saumat ja seinäliitokset tiivistetään työmaalla. Kattoelementtien pituus- ja päätysaumojen väliset raot tiivistetään polyuretaanivaahdolla. Seinäliittymissä käytetään erilaisia höyrnsulkujen limityksiä, mineraalivillaa sekä polyuretaanivaahdotiivistystä. (LapWall 2018)

PVC tai bitumikermikate kiinnitetään lopullisesti työmaalla. Samalla tehdään mahdolliset seinänostot, läpivientien tiivistykset, ja huolehditaan katto vesitiiviiksi. Mahdollinen pintahuopa asennetaan pohjahuovan päälle. (LapWall 2018)

2.1 Elementtityypit

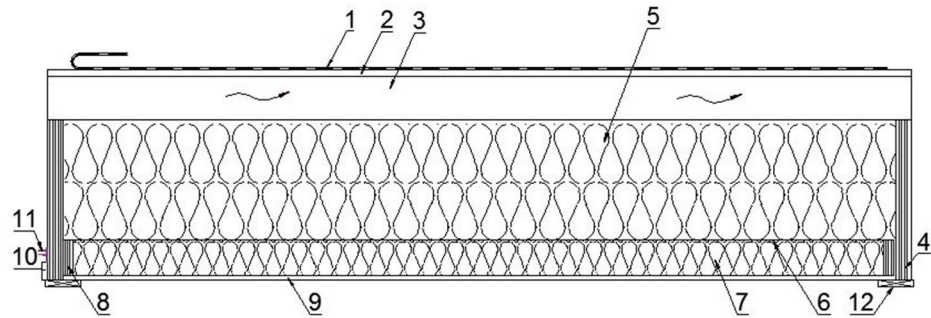
Kattoelementtejä on kahta päätyyppiä, kipsi- ja akustovillapohjainen. Näistä käytetään nimityksiä kipsielementti ja akustoelementti. Jäykistykseen kannalta ero on merkittävä, kipsielementissä on alapinnassa 13mm kipsilevytys, joka jäykistää elementin. Akustoelementti puolestaan on varsin joustava, koska alapinnan verhous tehdään kovalla levyvillalla.

Akustoelementtiä voidaankin siis käyttää ainoastaan voimien kuljettamiseen reunapalkkien avulla erilliselle jäykisteelle, eikä elementillä itsessään ole jäykistäviä ominaisuuksia. Myös elementtien sisäverhouksen yläpuolinen rakenne on erilainen, kipsielementissä on koolaus ST48x98 k600, kun akustoelementti on koolattu 51x50 Kertopuulla k1251.

Elementtien tarkemmat rakenneleikkaukset on esitelty seuraavassa kapaleessa.

2.2 Kipsielementti

Kipsielementin sisäverhouksena toimii 13 millimetrin normaali kipsilevy. Kipsilevy ruuvataan kiinni elementin pohjassa 600 millimetrin koolausjäljellä oleviin ST 48x98 koolauksiin. Ruuvausjakona käytetään reunoilla k200 millimetriä ja keskellä k300 millimetriä.

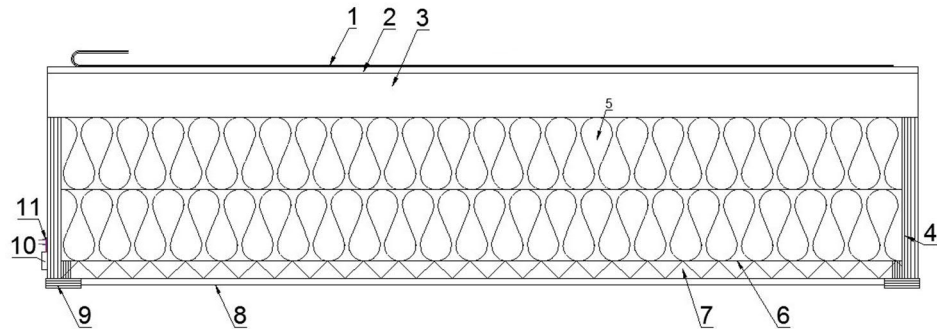


Kuva 2. Kipsielementin leikkauskuva (LapWall 2018).

1. PVC-yksikerroskate tai bitumikermi
2. OSB 18mm
3. 42x123 ST C24 k/k 610 / tuuletusväli
4. Reunapalkit Kerto-S
5. Mineraalivilla 0,037 W/mK 400mm, A2-s1,d0, yläpinnan luokitus B-s1,d0,T2
6. Höyrinsulkumuovi
7. Koolaus ST 48x98 k/k 610 + mineraalivilla 0,037 W/mK 100mm, A2-s1,d0, yläpinnan luokitus B-s1,d0
8. Kerto-T 27x100
9. Kipsilevy 13mm
10. 15x50 vaneri
11. EPDM-tiiviste 25x40mm

2.3 Akustoelementti

Akustoelementin alapinnan verhouksena toimii akustovilla, joka asennetaan 51x50mm ja 27x50mm Kertopuusta muodostettavan kehikon, ns. akustolaatikon sisään. Tämä rakenne ei ole jäykkä, sillä villa ainoastaan asetetaan kehikkoon, jossa se tukeutuu ST 18x95 lautoja vasten.



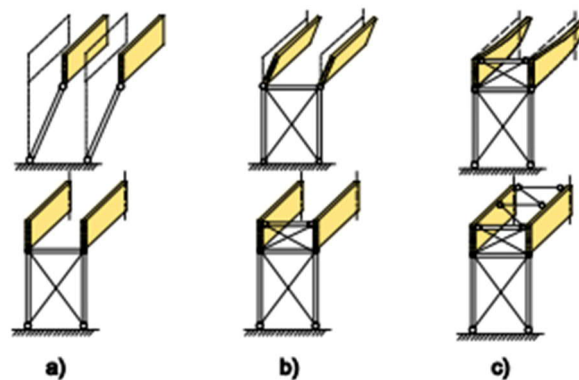
Kuva 3. Akustoelementin leikkauskuva (LapWall 2018).

1. PVC-yksikerroskate tai bitumikermi
2. OSB 18mm
3. 42x123 ST C24 koolaus k610
4. Reunapalkki Kerto-S
5. Mineraalivilla 0,037 W/mK 400mm, A2-s1,d0, yläpinnan luokitus B-s1,d0,T2
6. Höyrinsulkumuovi
7. Koolaus Kerto-S 51x50 k/k 1251, alumiinipintainen teollisuusakustointilevy 0,033W/mk
8. HS ST 18x95 k/k 1251
9. Kerto-T 27x50
10. 15x50 vaneri
11. EPDM-tiiviste 25x40mm

3 LIIMAPUURUNGON JÄYKISTYS

Rakennuksen rungon jäykistyksellä tarkoitetaan rakenteiden stabiilisuuden varmistamista ja runkoon kohdistuvien ulkoisten vaakakuormien siirtämistä rakennuksen perustuksille ja aina maaperään sekä työ- ja asennusaikana kuin myös valmiissa rakennuksessa. Jäykistyskuormia rakennukseen voivat aiheuttaa esimerkiksi nurjahduksesta- ja kiepahduksesta aiheutuvat tuentavoimat, rakenteiden vinous ja epäkeskeiset pystykuormat, tuuli tai nosturin jarruvoimat. (RIL 248-2008, s. 9)

Jäykistysuunnittelu käsittää sekä yksittäisten rakenneosien sekä näistä koostuvien rakennekokonaisuuksien sekä koko rakennuksen jäykistysuunnittelun. Yleensä yksittäisten kantavien rakenneosien sekä näistä muodostuvien rakennekokonaisuuksien osalta voidaan puhua nurjahduksesta, kiepahduksesta sekä näiden yhteisvaikutuksesta. (Finnish Wood Research 2014)



Kuva 4. Kuormat on siirrettävä tasosta perustuksiin asti (Suomen liimapuu-yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015).

Kuvassa kaksi on esitetty jäykistysprosessin eri vaiheita. Kohdassa a) on ensin estetty pilareiden sivuttainen liike. Pilareista saadaan jäykät, mutta katon kuormat eivät vielä välity perustuksille. Voimien välittämiseksi perustuksille pääkannattajien väliin lisätään kohdan b) mukaiset ristikot. Kolmantena estetään palkkien kiepahdus esimerkiksi kohdan c) mukaisesti käyttämällä jäykisteristikkoita pääkannattajien välissä. (Suomen liimapuu-yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015)

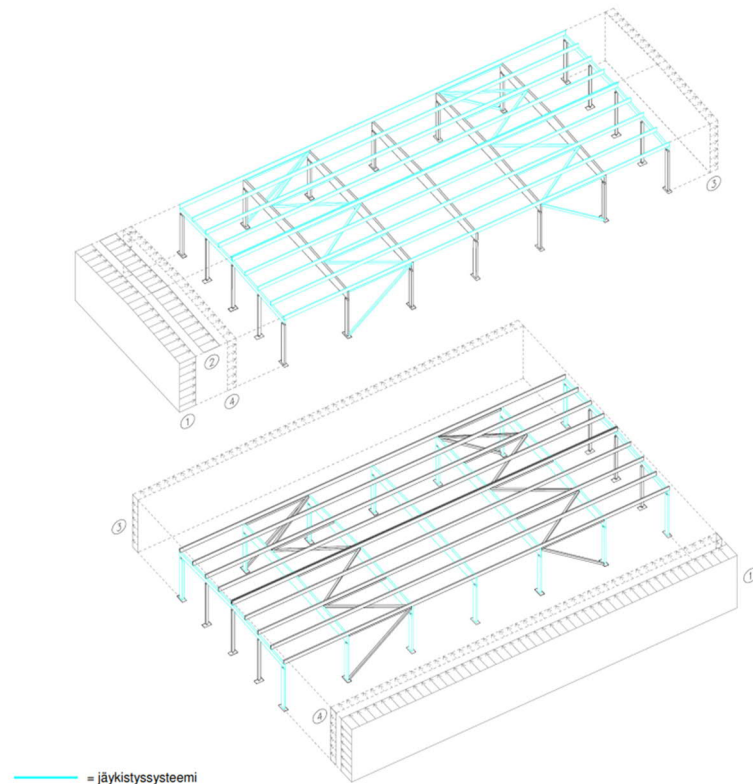
Runko jäykistetään erikseen sekä pituus, että poikkisuunnassa. Jos rakennuksessa on mastopilarit, kuormat voidaan johtaa suoraan mastopilareilla perustuksille. Kuormat voidaan siirtää myös ensin tasossa toimiville levy- tai ristikkorakenteille, josta kuormitus siirretään jäykistäville pystyrakenteille, kuten jäykisteristikoille tai levyrakenteelle. (Puuinfo 2009)

Hallin rungon jäykistyksessä voidaan hyödyntää myös muita runkoon liittyviä rakenteita, kuten esimerkiksi betonisia välipohjia tai väestönsuojan rakenteita. Jäykistyksessä tulee ottaa huomioon myös rakennustyön aikainen jäykistys. Asennusaikaisesta tuennasta laaditaan erillinen suunnitelma, mutta osa rakennuksen varsinaisista jäykisteistä tulisi sijoittaa rakennuksen alkupäähän työnaikaisen tuennan tarpeen minimoimiseksi. (Puuinfo 2009)

Kannattajien nurjahdus- ja kiepahdustuentavoimia ei viedä rakennuksen pystyjäykisteelle, vaan nämä tarkastellaan aina erikseen. Nurjahdus- ja kiepahdustuentavoimat määrittää kannattajien suunnittelija, vaikka tuentajärjestelmä muutoin vastaa päärakennesuunnittelija. (Puuinfo 2009)

3.1 Kehärakenne jäykistysristikoilla

Rakennus voidaan jäykistää käyttämällä erillisiä jäykisteristikoita sekä katto-orsia, joilla voimat johdetaan jäykistävälle ristikolle. Jäykisteristikot sijoitetaan rungon kehäväleille lähelle rakennuksen päätyä, yleensä toiseen väliin, jolloin ensimmäisen välin poikkeava rakenne ei häiritse liitosuunnittelua (Suomen liimapuu yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015).



Kuva 5. Jäykisteristikoilla jäykistetty kehärakenne (Finnish Wood Research 2014).

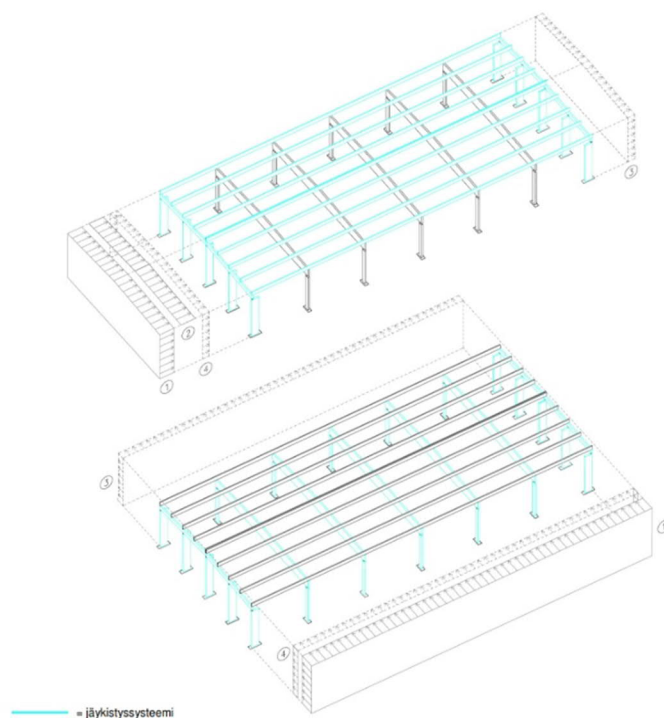
Ristikoiden määrä vaihtelee rakennuksen pituuden mukaan, useampi ristikko helpottaa pitkän rakennuksen asennusta. Jos käytetään palosuojaamattomia ristikoita, tulisi ristikot sijoittaa rakennuksen molempiin päihin. Sisäiset voimat voidaan johtaa pääkannattimen päihin, joten niitä ei tarvitse viedä perustuksille. Yksittäiset kehät toimivat jäykisteenä leveysuunnassa. (Finnish Wood Research 2014)

Katto-orret ovat olennainen osa tätä jäykistysjärjestelmää ja tämä tulee huomioida katto-orsien mitoituksessa. Katto-orret mitoitetaan taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutukselle, joka on riippuvainen jäykistysristikoiden määrästä, niiden jäykkyydestä sekä tuulikuormien huomioinnista. (Finnish Wood Research 2014)

Rakennuksen pätyyn kohdistuva tuulivoima siirretään tuulipilareiden avulla päätypalkille ja rakennuksen perustuksille. Päätypalkilta voima siirtyy tuulisiteiden avulla katon tasossa oleville jäykisteristikoiille, josta voima siirtyy edelleen seinillä oleville jäykisteristikoiille. (Finnish Wood Research 2014)

3.2 Mastopilarit ja päätypalkki

Rakennuksen jäykistys voidaan hoitaa myös mastopilareilla sekä niiden päähän momenttijäykästi kiinnitetyllä päätypalkilla. Tämä on kannattavaa lähinnä matalissa, alle neljä metriä korkeissa rakennuksissa. Tätä korkeammissa rakennuksissa on taloudellisempaa käyttää esimerkiksi tuuliristikoita tai ristikoiden jäykistystä. (Suomen Liimapuu yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015).



Kuva 6. Mastopilarit ja päätypalkki. (Finnish Wood Research 2014).

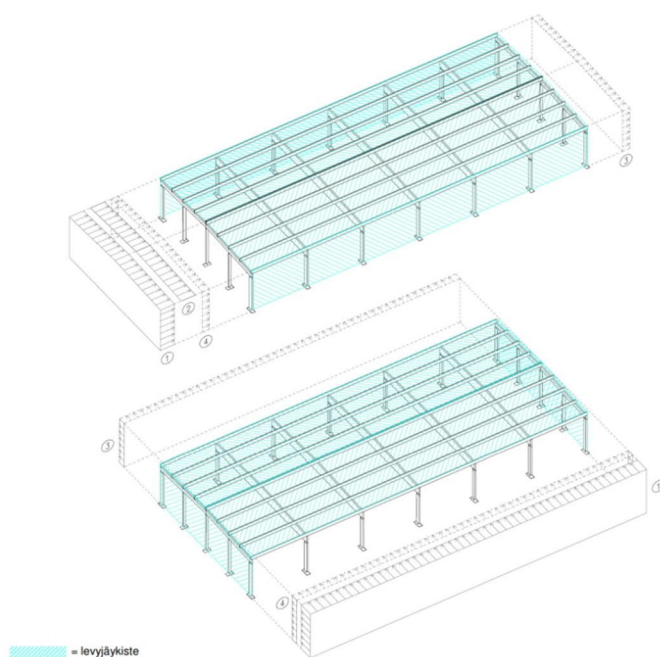
Tässä menetelmässä katto-orret välittävät sisäiset ja ulkoiset kuormat mastopilareiden päähän asennetulle päätypalkille. Myös sisäiset voimat joudutaan siirtämään perustuksille, koska kattotasossa ei ole sellaista jäykistysrakennetta, joka voisi siirtää tukireaktiot pääkannattimien päihin. Tämä tulee huomioida katto-orsien mitoituksessa. (Finnish Wood Research 2014)

Poikittainen jäykistys hoidetaan kehärakenteella; jokainen kehä toimii yksittäisenä jäykisteenä. Mikäli päätyseinillä olevien mastopilareiden jäykkyys ei ole riittävä, käytetään päätylinjoilla muuta erillistä jäykistettä kuten levyrakennetta tai ristikoita. (Finnish Wood Research 2014)

Menetelmän etuna on käytännössä heti valmis jäykistys pilareiden asennuksen jälkeen, kuten myös yksinkertaisuus ja selkeys. Haittapuolia ovat mastopilarin suuri tukimomentti, joka kasvattaa anturan kokoa sekä pilareiden melko suuri sivuttaismitta. (Puuinfo 2009)

3.3 Levyjäykistys

Tässä menetelmässä runko on jäykistetty levyrakenteella sekä yläpohjasta että seinistä. Käyttämällä levyjäykistettä sisäisiä voimia ei tarvitse kuljettaa pituussuunnassa yläpohjarakenteelta perustuksille, koska katto-orsien ja levyjen muodostama rakenne palauttaa voiman suoraan pääkannattimien päihin. (Finnish Wood Research 2014) Katto-orsiin ei kuitenkaan kohdistu vastaavia veto- ja puristusvoimia kuin aiemmin käsitellyissä jäykistysmenetelmissä, koska katto-orsien yläpuolinen levytys vastaanottaa syntyvät kuormat ja ohjaa ne jäykisteelle.



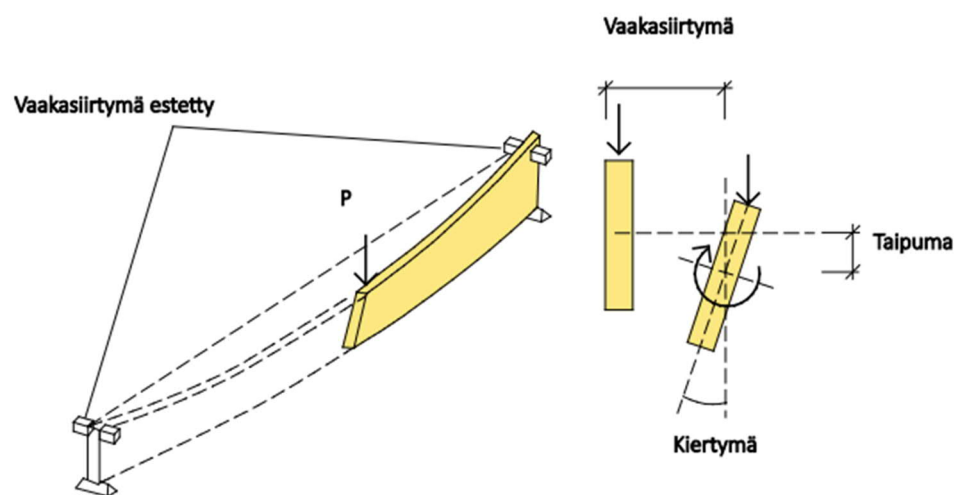
Kuva 7. Rakennuksen jäykistys on toteutettu nivelpäisillä pilareilla ja levytyksellä. (Finnish Wood Research 2014)

Leveyssuunnassa katto-orret vastaanottavat kehiltä tulevat kuormat, ohjaavat ne katto-orsien yläpuoliselle levyjäykisteelle ja sieltä päätyseiniä levyjäykisteille. Katto-orret siis osallistuvat jäykistykseen sekä pituus, että poikkisuunnassa ja ovat oleellinen osa jäykistysjärjestelmää. (Finnish Wood Research 2014)

4 PALKKIRAKENTEIDEN KIEPAHDUSMUODOT

4.1 Kiepahduksen 1. muoto

Kiepahduksen 1. muodolla tarkoitetaan palkin yläreunan kiepahtamista yhteen suuntaan käytännössä palkin koko pituudelta (Finnish Wood Research 2014). Palkin kiepahdukseen vaikuttavat muutamia asioita kuten palkin hoikkuus, asennusepätkätkuudet, kuorman jakautuminen palkille, kuormituksen tyyppi, tuentatapa, yläreunan jäykistystapa sekä jäykistyskohtien keskinäinen etäisyys. Näistä tekijöistä johtuen palkin puristetun – eli käytännössä yläreunan – siirtyminen tasossaan tulee estää. (Suomen liimapuu yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015)



Kuva 8. Palkin kiepahduksen 1. muoto. (Suomen liimapuu yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015)

Hoikat – kapeat ja korkeat – palkit kiepahtavat helpommin kuin matalat ja leveät palkit. Palkin profiilin kiepahduserkkyyttä voi arvioida suhteellisella hoikkuusluvulla $\lambda_{rel,m}$.

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (1)$$

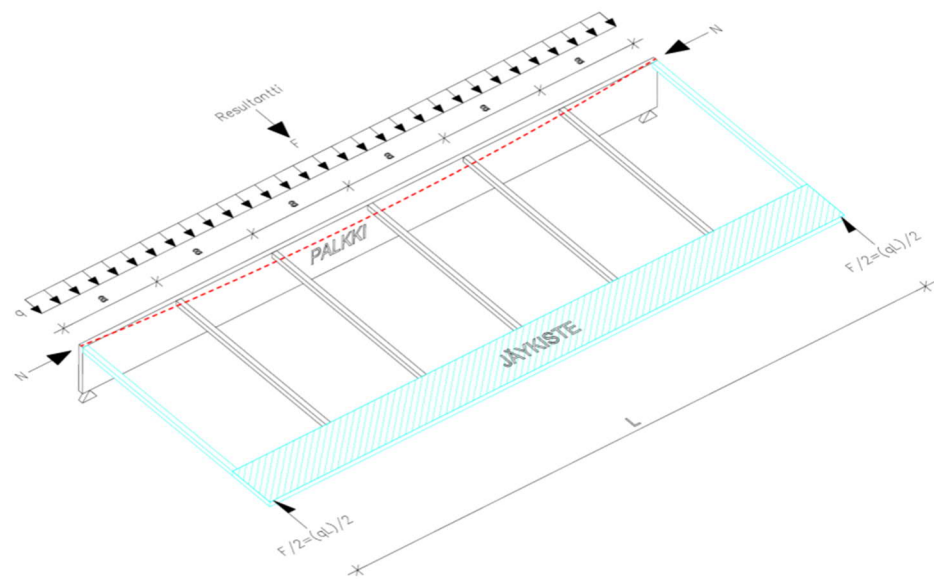
missä

$f_{m,k}$ taivutuslujuuden ominaisarvo
 $\sigma_{m,crit}$ kriittinen taivutusjännitys

Palkit säilyttävät stabiilitteettinsa eivätkä kiepahda, jos hoikkuusluku $\lambda_{rel,m}$ on alle 0,75. (Suomen liimapuu yhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015)

Palkin tuentatavalla voidaan vaikuttaa kiepahduserkkyteen tukemalla palkki kiinteästi molemmista päistään. Jos palkki on tuettu vapaasti tai nivelellisesti, tapahtuu kiepahdus helpommin. Palkin yläreunaan kohdistuva kuormitus puolestaan pyrkii kiepauttamaan palkin herkemmin kuin neutraaliakselille, eli palkin keskikohtaan vaikuttava kuormitus (Suomen Liimapuuyhdistys RY ja Puuinfo Oy 2015).

Jos palkin yläreunan sivuttaistuenta on ratkaistu voimia siirtävillä puristus-sauvoilla, on sauvojen keskinäisellä etäisyydellä vaikutusta palkin kiepauttamisherkkyyteen. Sauvaan kohdistuvan voiman ollessa $F=q*a$, suuremmalla sauvamäärällä yksittäiseen sauvaan kohdistuva voima on pienempi.



Kuva 9. Resultantti F aiheuttaa sauvoihin voiman $q*a$. (Finnish Wood Research 2014)

Yksittäiseen stabiileettitukeen kohdistuva voima $F_{d,tuki}$ voidaan määrittää kiepahduksen 1. muodon tapauksessa seuraavalla kaavalla

$$q = k_L \frac{N_d}{50 * L} \quad (2)$$

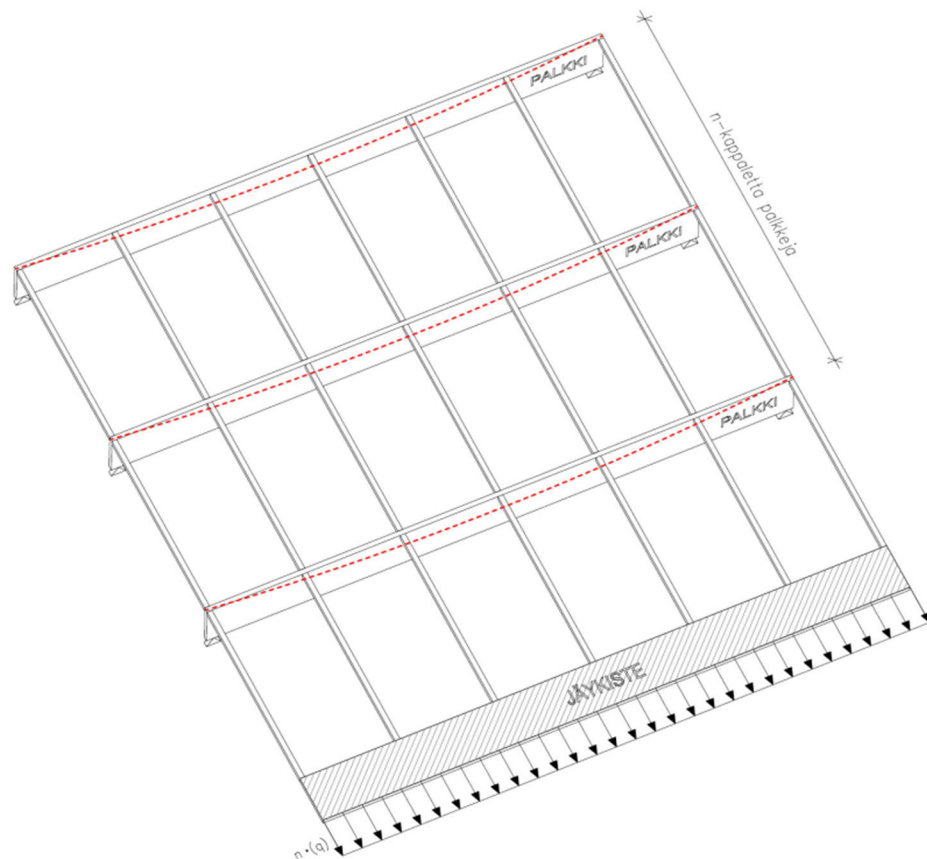
N_d = poikittaistuettavassa rakenneosassa vaikuttava puristusvoiman mitoitusarvo (saadaan yleensä liimapuurungon suunnittelijalta)

L = aallonpituus metreinä

$$K_L = \left\{ \frac{1}{\sqrt{15}} \right\} \quad (3)$$

$$F_{d,tuki} = q \cdot a \quad (4)$$

Kiepahduksen 1. muoto aiheuttaa palkkien jäykistysrakenteeseen – kuten jäykisteristikoille – suuren voiman, koska kaikki rakenneosat kiepahtavat samaan suuntaan. Varsinkin kun tuettavia palkkeja on useita, kertyvät voimat usealta palkilta samalle jäykisteelle. Tästä syystä yhteen suuntaan kiepahtava palkki on usein jäykisteen kannalta mitoittava. (Finnish Wood Research 2014)

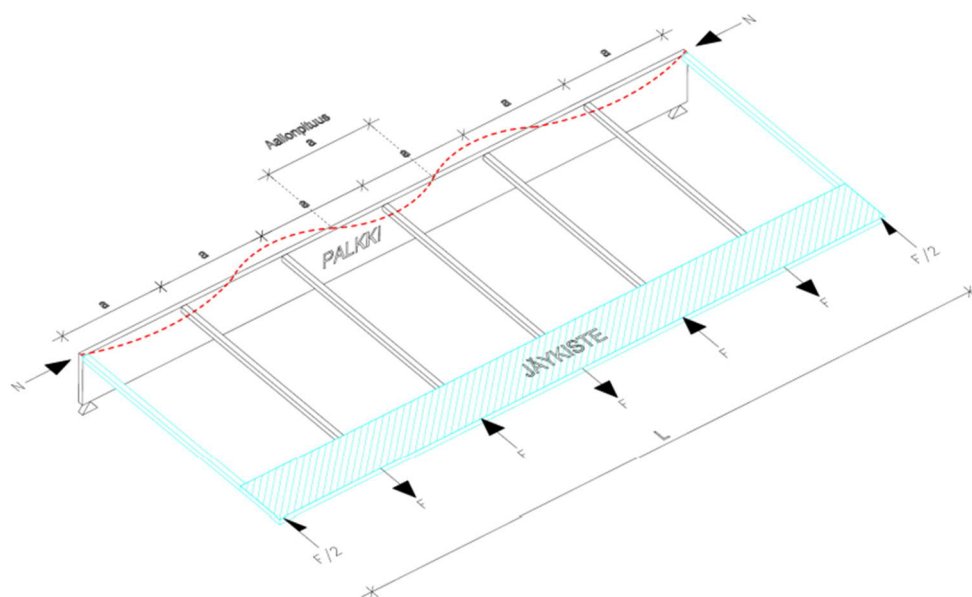


Kuva 10. Voimat kertyvät usealta palkilta samalle jäykisteelle. (Finnish Wood Research 2014)

4.2 Kiepahduksen 2. muoto

Kiepahduksen 2. muodossa palkin yläreuna kiepahtaa vuorotellen eri suuntiin muodostaen S-kiepahduksen. S-kiepahduksen mitoituksessa käytetään lyhyempiä kiepahdusaallonpituuksia a ja $2a$. Toisin kuin kiepahduksen ensimmäisessä muodossa, kiepahdus tapahtuu kahteen eri suuntaan.

Tällöin yksittäiseen stabiliteettitukeen kohdistuu suurempi voima kuin kiepahduksen 1. muodon tapauksessa, koska kiepahdusaallonpituus on lyhyempi ja aallonpituudelle osuu yleensä vain yksi tuki. Tästä syystä S-kiepahdus yleensä mitoittaa palkin ja stabiliteettituen välisen liitoksen. (Finnish Wood Research 2014)



Kuva 11. S-kiepahdus ja aallonpituus a . Aallonpituudelle osuu vain yksi sauva. (Finnish Wood Research 2014)

Eurokoodi ei huomio laskennassa mitenkään tuettavan palkin profiilia ja jäykkyyttä, vaan laskennallisessa tarkastelussa dimensioiltaan erilaisten liimapuupalkkien jäykistys mitoitetään samalla tavalla. Tässä päädytäänkin osassa tapauksista tilanteeseen, jossa rakenteet eivät ole järkevästi toteutettavissa, koska jäykisteelle kertyvät voimat ovat niin suuria, ettei liitoksia saada laskennallisesti kestäväksi. (Finnish Wood Research 2014)

Jos aallonpituus on suurempi kuin $2a$, kohdistuu stabiliteettitukiin vähemmän kuormitusta, koska kuormitus jakautuu useammalle sauvalla samaan tapaan kuin kiepahduksen 1. muodon tapauksessa. Jotta laskennassa voitaisiin käyttää pidempää aallonpituutta kuin $2a$, tulee laskennassa määrittää lyhin mahdollinen aallonpituus L_{crit} , joka palkkiin voi kohdistua. (VTT-S-05262-14, s. 3)

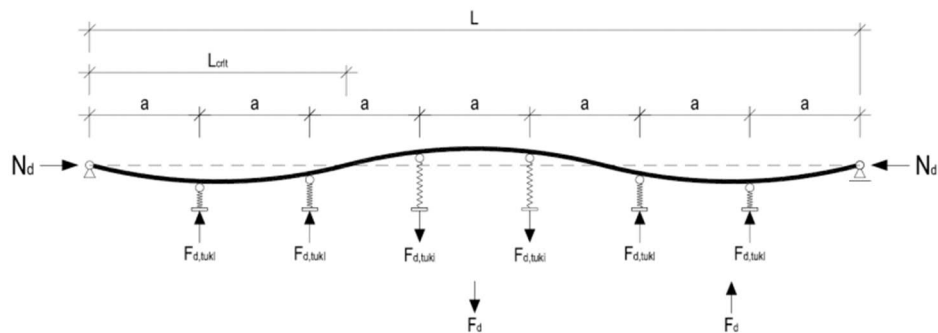
$$L_{crit} = \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C_{vaad}}{a \cdot E_{0,05} \cdot I}}} \quad (5)$$

missä

| | |
|------------|---|
| C_{vaad} | Stabiiteettituelta vaadittava jousijäykkyys (Eurokoodi 5) |
| a | tukiväli |
| $E_{0,05}$ | tuettavan rakenneosan kimmomoduulin ominaisarvo tuettavassa suunnassa |
| I | tuettavan rakenneosan tuettavan suunnan mukainen jäyhyysmomentti |

Määrittämällä kriittinen aallonpituus VTT:n eurokoodia täydentävän kaavan mukaisesti, myös rakenneosan jäykkyys tulee huomioiduksi mitoituksessa. Kuitenkin, jotta S-kiepahdus voi tapahtua, seuraavan ehdon tulee olla voimassa:

$$L_{crit} > \frac{L}{2} \quad (6)$$



Kuva 12. Esimerkki kriittisestä aallonpituudesta, joka on isompi kuin $2a$. (Finnish Wood Research 2014)

Koska puurakenneosat ovat yleensä joustavia, tulee jokaiselle tuelle määrittää vaadittava jousijäykkyys eurokoodi 5:n kansallisen liitteen mukaisesti, jotta tuen joustavuus tulee huomioiduksi laskennassa. Jousijäykkyys määritetään kaavalla

$$C_{vaad} = (2 + 2\cos(\frac{180^\circ}{m})) \frac{N_d}{a} \quad (7)$$

| | |
|-------|--|
| missä | |
| m | välein a poikittaistuettujen kenttien lukumäärä ≥ 2 |
| N_d | poikittaistuettavassa rakenneosassa vaikuttava puristusvoiman mitoitusarvo |
| a | tukiväli |

Kun jousijäykkyys sekä kriittinen aallonpituus on määritetty, voidaan yksittäiseen stabiiteettitukeen kohdistuva voima $F_{d,tuki}$ määrittää seuraavalla kaavalla.

$$F_{d,tuki} = \frac{F_d}{\frac{L_{crit}}{a}} - 1 \quad (8)$$

| | |
|------------|---|
| missä | |
| F_d | $\frac{N_d}{50}$ sahatavaralle |
| F_d | $\frac{N_d}{80}$ liimapuulle ja LVL:lle |
| L_{crit} | kriittinen aallonpituus (kaavasta 2) |
| a | tukiväli |

Voimaa F_d saadaan pienentää käyttöastekertoimella k, mikäli tukiväli a ei ole rakenneosan poikkileikkauksen kannalta suurin mahdollinen.

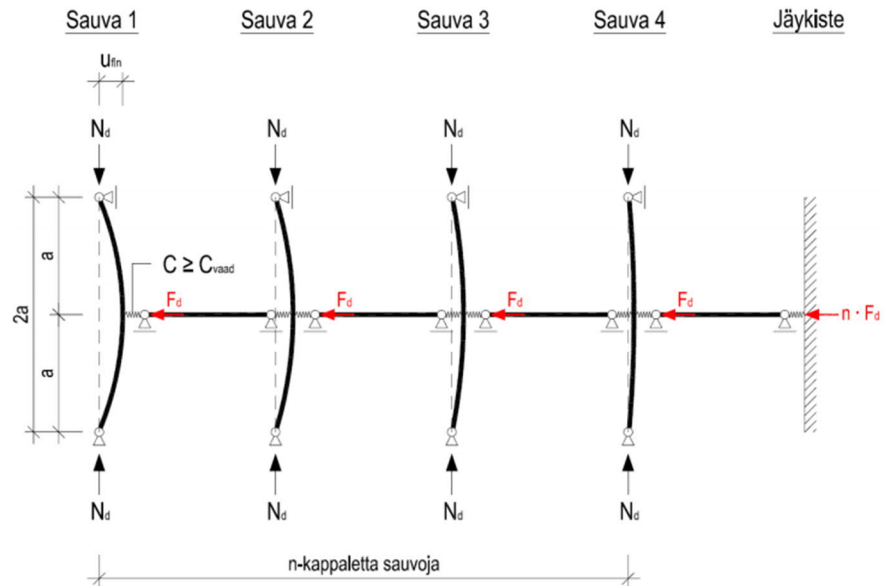
$$k = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} * f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (9)$$

| | |
|----------------|---|
| missä | |
| $\sigma_{m,d}$ | tuettavan sauvan taivutusjännityksen mitoitusarvo |
| k_{crit} | kiepahduskerroin tukivälillä a |
| $f_{m,d}$ | taivutuslujuuden mitoitusarvo |
| $\sigma_{c,d}$ | puristusjännityksen mitoitusarvo |
| $k_{c,z}$ | poikittaissuunnan nurjahduskerroin tukivälillä a |
| $f_{bc,0,d}$ | tuettavan sauvan puristuslujuuden mitoitusarvo |

Kriittisen aallonpituuden määrittämisestä on erityistä hyötyä, mikäli voimia joudutaan kuljettamaan katto-orsilla, kuten kattoelementin reunapalkkeilla, pidempi matka kiepahdustuettavalta palkilta erilliselle jäykisteelle.

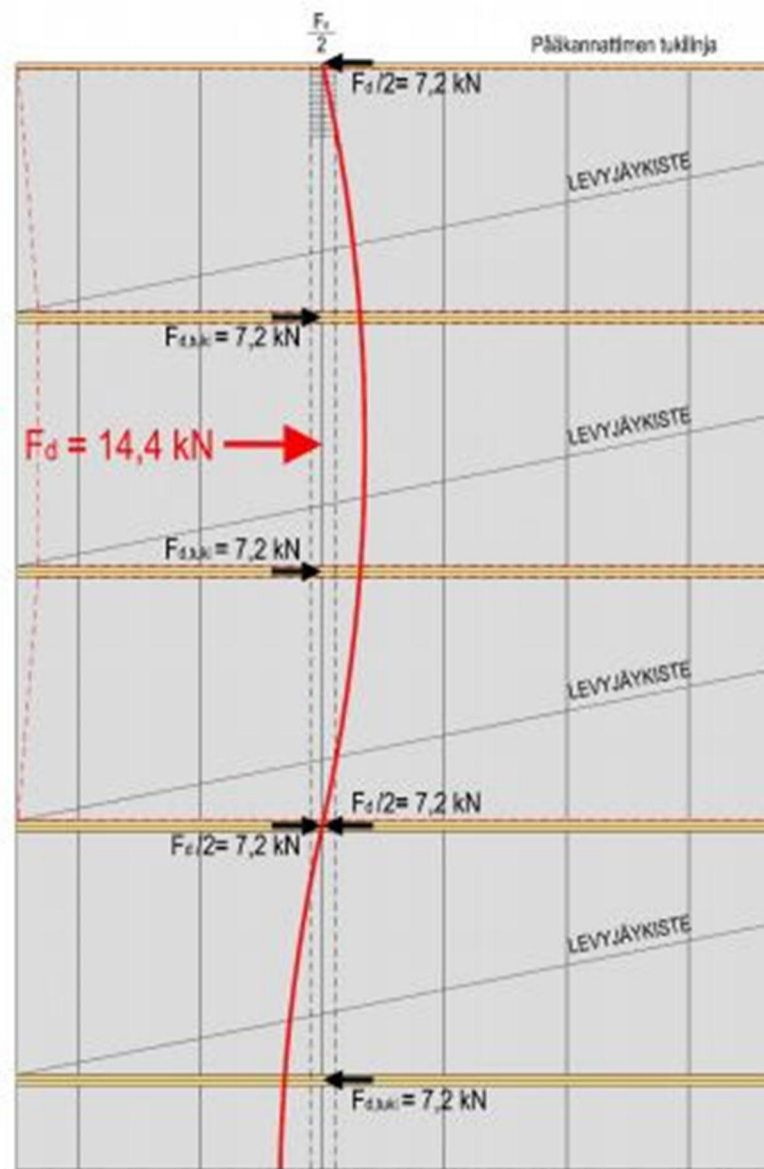
Mitä kauempaa voimia tuodaan, sitä suurempi voima jäykisteen ja kattoorren väliseen liitokseen kohdistuu. Mitoittamalla voima $F_{d,tuki}$ yllä

mainitulla tavalla, saadaan liitosvoimia yleensä pienennettyä ja liitokset järkevämmiin toteutettua. (Finnish Wood Research 2014)



Kuva 13. Kun voimia joudutaan tuomaan usealta palkilta yhdelle jäykisteelle, liitosvoimat jäykisteen kohdalla kasvavat helposti suuriksi. (Finnish Wood Research 2014)

Sen sijaan, jos jäykistys hoidetaan palkkikohtaisesti kattoelementin levyjäykisteellä, kriittisen aallonpituuden määrittäminen ei ole aina järkevää, jos saman aallonpituuden matkalle sopii useampia elementtejä. Tällöin ai-noastaan reunimmaisets elementit osallistuvat jäykistykseen, ja aallon kes-kelle jäävän elementin kiinnitysruuveja ei voida huomioida palkin ja kat-toelementin välisen liitoksen mitoituksessa.

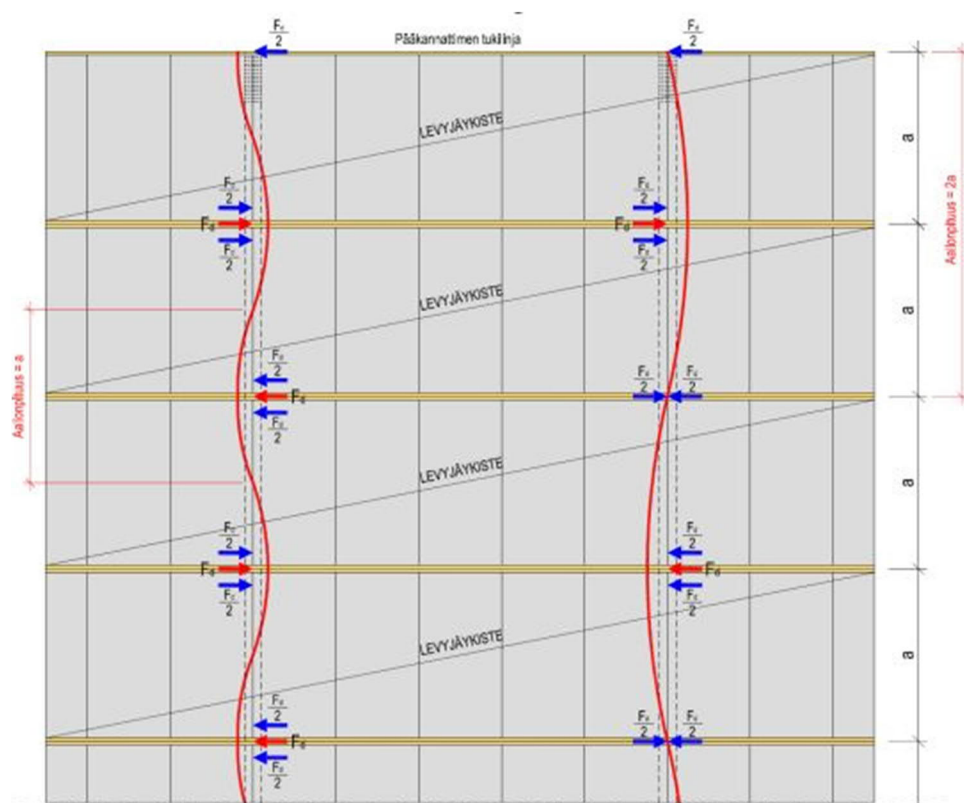


Kuva 14. Keskimäinen elementti ei osallistu jäykistykseen, joten liitos joudutaan mitoittamaan kahdelle kiinnitysruuville. (Lahtela 2015.)

5 PALKISTON STABILOINTI KATTOELEMENTILLÄ

Liimapuupalkkien kiepahdustuenta 2. kiepahdusmuodon kanssa on usein järkevää hoitaa palkiston yläpuolisella rakenteella, joka voi vastaanottaa kiepahdusvoimat ja palauttaa ne takaisin rakenteelle. Tällainen rakenneosa on esimerkiksi kipsilevyllä jäykistetty kattoelementti. (Finnish Wood Research 2014)

Kattoelementin kertopuupalkit vastaanottavat voiman F , josta voima siirtyy levyjäykisteen avulla viereisille reunapalkeille, kunnes voima $F/2$ lopulta palautuu takaisin kiepahdustuettavalle palkille. Jotta kattoelementti toimisi jäykisteenä, tulee jäykisteenä olevan kipsilevyn jäykkyys ja leikkausvoimakestävyys tarkistaa, kuten myös kattoelementin rakenteiden liitokset sekä kattoelementin ja kiepahdustuettavan palkin välinen liitos.



Kuva 15. Voimien kulkeutuminen levyjäykisteellä. (Lahtela 2015.)

Kattoelementin mitoituksessa kiepahdustuennan näkökulmasta lasketaan siis stabiiloivan tuen – eli kattoelementin – jäykkyys C ja verrataan sitä aiemmin laskettuun tuen jousijäykkyysvaatimukseen C_{vaad} . Jotta kattoelementti toimii jäykisteenä $C > C_{vaad}$. Jos jäykkyys on riittävä, tulee myös kattoelementin ja liimapuupalkin välisen liitoksen kapasiteetti olla riittävä.

Kattoelementin jäykkyyttä laskettaessa lasketaan seuraavat liitossiirtymät, kun S-kiepahdus vastaanotetaan kattoelementillä

1. Tuettavan palkin ja kattoelementin välinen liitos
2. Kipsilevyjen siirtymä
3. Kerto-T-laudan ja reunapalkin välinen siirtymä

Jos kiepahdusta ei vastaanoteta kattoelementillä, vaan voima viedään reunapalkeilla erilliselle jäykisteelle, kuten tuuliristikoille tai mastopilareille, kipsilevyjen siirtymää ei tarvitse tarkastella. Kattoelementillä stabiloinnissa onkin hyvä tunnistaa kaksi eri tapausta, joissa stabilointi hoidetaan joko

- Kattoelementillä, jolloin kattoelementti toimii palkiston yläpuolisena levyjäykisteenä ja vastaanottaa S-kiepahduksen. Jos kiepahduksen 1. muoto halutaan hallita pelkästään kattoelementillä, tulee elementit kiinnittää toisiinsa.
- Ulkopuolisella jäykisteellä, jolloin voimat ainoastaan siirretään kattoelementin reunapalkeilla jäykisteelle. Tällöin reunapalkit toimivat katto-orsina, jotka välittävät sisäiset ja ulkoiset voimat erilliselle jäykisteelle.

Seuraavissa kappaleissa on laskettu liitossiirtymät tapauksessa, jossa kattoelementti toimii palkiston yläpuolisena jäykisteenä. Lisäksi kappaleessa 5.4 on käsitelty liimapuupalkin ja kattoelementin välinen liitossiirtymä, kun voimia viedään erilliselle jäykisteelle.

5.1 Liitossiirtymät

Elementin jäykkyyteen puolestaan vaikuttavat jäykistävän rakenteen ominaisuudet sekä liitossiirtymät. Liitossiirtymällä tarkoitetaan liitoksen kappaleiden liikettä kuormituksen aikana käyttörajatilassa, eli kyseessä ovat muutokset, joilla ei ole vaikutusta liitoksen kestävyysasteeseen. Mekanismit liitossiirtymässä ovat vastaavat kuin murtumistapauksissa, mutta muutokset ovat niin pieniä, ettei liitoksia voida mieltää murtuneiksi. (Kovanen 2014, 34)

Liitossiirtymä määritetään jakamalla kuormitus siirtymäkertoimella K_{ser} , joka lasketaan yhdelle liittimelle yhdessä leikkeessä puikkoliitosteorian mukaisesti. Tästä johtuen kerroin kerrotaan vielä liitoksen leikkeiden ja liitoksen liittimien määrällä. (Kovanen 2014, 34)

Siirtymäkertoimen K_{ser} arvo riippuu liittimen halkaisijasta sekä käytettävän puulajin tiheydestä. K_{ser} kasvaa liittimen halkaisijan tai puun tiheyden

kasvaessa. RIL:n (205-1-2017, 19) puikkoliitosten siirtymäkerroin K_{ser} määritetään nauloille ilman esiporausta seuraavasti

$$K_{ser} = \frac{\rho m^{1,5} * d^{0,8}}{30} \quad (10)$$

ja muille liittimille kuten ruuveille

$$K_{ser} = \frac{\rho m^{1,5} * d}{23} \quad (11)$$

Jos toisiinsa liitettävien puuosien tiheydet ovat keskimääräisesti eri suuret, niin ρm korvataan suureella

$$\rho m = \sqrt{\rho_{m,1} \rho_{m,2}} \quad (12)$$

Liitossiirtymän suuruus riippuu siis käytettävän puulajin tiheydestä, liittimen halkaisijasta sekä liitokseen kohdistuvasta kuormituksesta. Liittimen suurempi halkaisija jakaa kuormituksen suuremmalle pinta-alalle ja tiheäsyinen puu puolestaan kestää kuormitusta paremmin. (Kovanen 2014, 34)

Määritettäessä kattoelementin liitossiirtymiä, tulee kaikki liitokset palkkia stabiloivalta liitokselta aina elementin jäykisteenä toimivaan levytykseen asti huomioida.

5.2 Levyjäykiste

Kun kattoelementtiä käytetään jäykisteenä, edellyttää se kattoelementiltä levyjäykistettä, joka muodostaa palkiston päälle suljetun jäykistyssysteemin. LapWall Leko -kattoelementissä tarvittavana jäykisteenä toimii alapuolinen GN13-kipsilevytys, joka on ruuvattu 3,9x41 ruuveilla kiinni elementin alapuoliseen ST 48x98 k600 -koolaukseen.

Jotta kipsilevyn jäykistyskapasiteetti voidaan määrittää, tulee kipsilevyn leikkausvoimakestävyys sekä jäykkyys tarkastaa. Yksittäisen levyn leikkausvoimakestävyys määritetään RIL:n (205-17-2017, 160) mukaan kaavasta

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd,i} * b_i}{\gamma_i * s_i} \quad (13)$$

| | |
|--------------|---|
| missä | |
| b_i | levyn leveys |
| γ_i | RIL 205-1-2017 kuvasta 9.13S saatava kerroin |
| S_i | liitinjako |
| $F_{f,Rd,i}$ | levyn liittimen leikkausvoimakestävyys (katso kaava 13) |

Kattoelementin kipsilevyn kiinnityksen tapauksessa kerroin γ_i saadaan kaavalla (RIL-205-1-2017, s. 161)

$$\sqrt{\frac{4}{(2+\frac{h}{b})^2} + \frac{9}{(\frac{b}{h}+3)^2}} \quad (14)$$

Lasketaan kipsilevyn ja ruuvin liitoksen kestävyysmitoitussarvo R_d . Kestävyyden mitoitussarvo lasketaan kaavalla (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$R_d = \frac{k_{mod} * R_k}{\gamma_M} \quad (15)$$

| | |
|------------|---|
| missä | |
| R_k | lujuusominaisuuden ominaisarvo |
| γ_M | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |
| k_{mod} | muunnoskerroin, jolla otetaan huomioon kuorman keston ja kosteuden vaikutus |

Jotta kipsilevyn leikkauskestävyys on riittävä, tulee ehdon $F_{i,v,Rd} > F_{d,tuki}$ toteutua. On hyvä huomata, että voima $F_{d,tuki}$ jakautuu kattoelementissä useammalle kipsilevylle, joten voima tulee jakaa vastaanottavien kipsilevyjen määrällä.

Kipsilevyn leikkauskestävyyden lisäksi määritetään levyn jäykkyys, joka vaikuttaa koko elementin jäykkyyteen. Yksittäisen levyn jäykkyyskerroin määritetään kaavasta (RIL 205-1-2017, s. 159)

$$C_{i,v} = \frac{1}{\frac{\beta_i * S_i * h_i^2}{K_{ser} * b_i^3} + \frac{h_i}{b_i * G_{mean,i} * t_i}} \quad (16)$$

| | |
|--------------|--|
| missä | |
| β_i | RIL 205-1-2017 kuvasta 9.13S saatava kerroin |
| S_i | liitinjako |
| h_i | levyn korkeus |
| b_i | levyn leveys |
| t_i | levyn paksuus |
| $G_{mean,i}$ | levyn liukumoduuli (paneelileikkaus) |
| $K_{ser,i}$ | liittimen siirtymäkerroin (lasketaan lopputilan siirtymäkertoimella $k_{u,fin.}$) |

$$\beta_i = \frac{4}{2\left(\frac{h}{b}\right)^2 + 2\left(\frac{h}{b}\right)^3} + \frac{6}{1 + 3\left(\frac{h}{b}\right)} \quad (17)$$

Liitossiirtymät määritetään lopputilan siirtymäkertoimella $K_{u,fin}$ koska viruman vaikutus tulee huomioida (keskipitkä aikaluokka). Lisäksi kun murto-rajatilassa rakenteen jäykkyyss jakauma vaikuttaa sauvojen voimasuureiden jakautumiseen, lasketaan kimmo-, liuku- ja siirtymäkertoimien lopputilan keskiarvot seuraavilla kaavoilla (RIL 205-1-207, s. 46)

$$K_{u,fin} = \frac{\frac{2}{3} * K_{ser}}{(1 + \psi_2 * k_{def})} \quad (18)$$

missä

k_{def} virumaluku (käyttöluokka 1: kipsi ja puu 1,55 RIL 205-1-207, s. 46)

ψ_2 on kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin sille muuttuvalle kuormalle, joka aiheuttaa lujuteen nähden suurimman jännityksen. Lumikuormalle $\psi_2 = 0,2$.

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + \psi_2 * k_{def})} \quad (19)$$

missä

G_{mean} liukukertoimen keskiarvo

Lopuksi lasketaan yksittäisen levyn leikkausvoiman aiheuttama siirtymä, joka kerrotaan yhdessä jäykistelohkossa (yleensä yksi moduliväli) olevien kipsilevyjen määrällä. Näin tiedetään kipsilevyjen siirtymä, joka huomioidaan koko elementin jäykkyyden laskennassa. (RIL 205-1-2017, s. 160)

$$\omega_{levytys} = \frac{F_{i,v} \cdot E_k}{\Sigma C_{i,v}} \quad (20)$$

missä

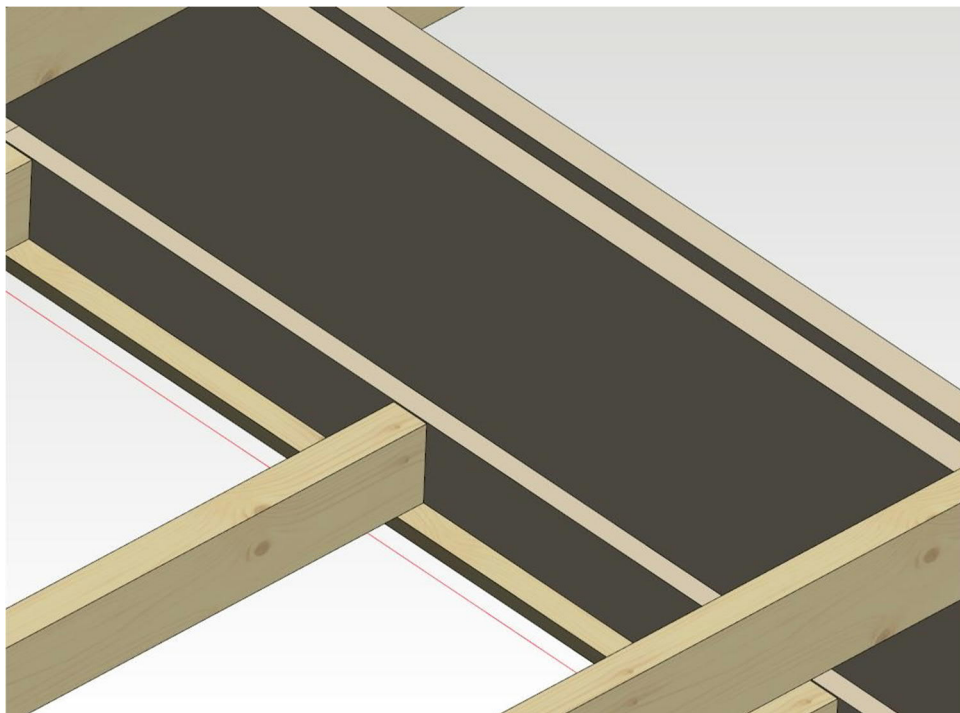
$F_{i,vEk}$ levyä kuormittava vaakavoima käyttörajatilassa

$C_{i,v}$ levyn jäykkyyserroin (kaava 14)

Σ kipsilevyjen määrä jäykistelohkossa (yleensä moduliväli)

5.3 Kerto-T-laudan ja reunapalkin välinen liitos

Kerto-T-lausta niin sanotun kipsilaatikon kyljessä kiinnitetään kattoelementin reunapalkkiin 3,1x90mm nautoilla 200 millimetrin välein sekä 6x150mm ruuveilla 1200 millimetrin välein. Koska ruuveja on harvakseltaan, nämä eivät olennaisesti vaikuta elementin jäykkyyteen ja laskelmassa oletetaan, että liitoksen jäykkyys perustuu pelkkään naulaukseen. Tarvittaessa ruuvauksen jäykkyys voidaan määrittää erikseen ja huomioida suhteessa naulojen määrään.



Kuva 16. Kerto-T:n ja reunapalkin liitos (LapWall 2018).

Liitoksen jäykkyyden laskemiseksi määritetään siirtymäkerroin K_{ser} naulalle kaavalla 11 sekä lopputilan siirtymäkerroin $K_{u,fin}$ kaavalla 18. On hyvä huomata, että jos liitin yhdistää puuosia, joiden ajasta riippuva toiminta on samanlainen, käytetään k_{def} -arvona kaksinkertaista lukua.

Kun nämä ovat tiedossa, lasketaan yhteen yksittäiseen naulaan kohdistuva kuormitus $F_{d,naula}$ jakamalla stabiliteettituelle kohdistuva voima $F_{d,tuki}$ naulaliitosten määrällä. Jos liimapuupalkkien etäisyys toisistaan on esimerkiksi kuusi metriä, sopii tälle matkalle 30 naulaa.

$$F_{d,naula} = \frac{F_{d,tuki}}{n} \quad (21)$$

Koska voima $F_{d,tuki}$ kiertää levyjäykisteen avulla kattoelementin reunalta toiselle, kulkee voima myös kahden Kerto-T-laudan ja kahden liitoksen

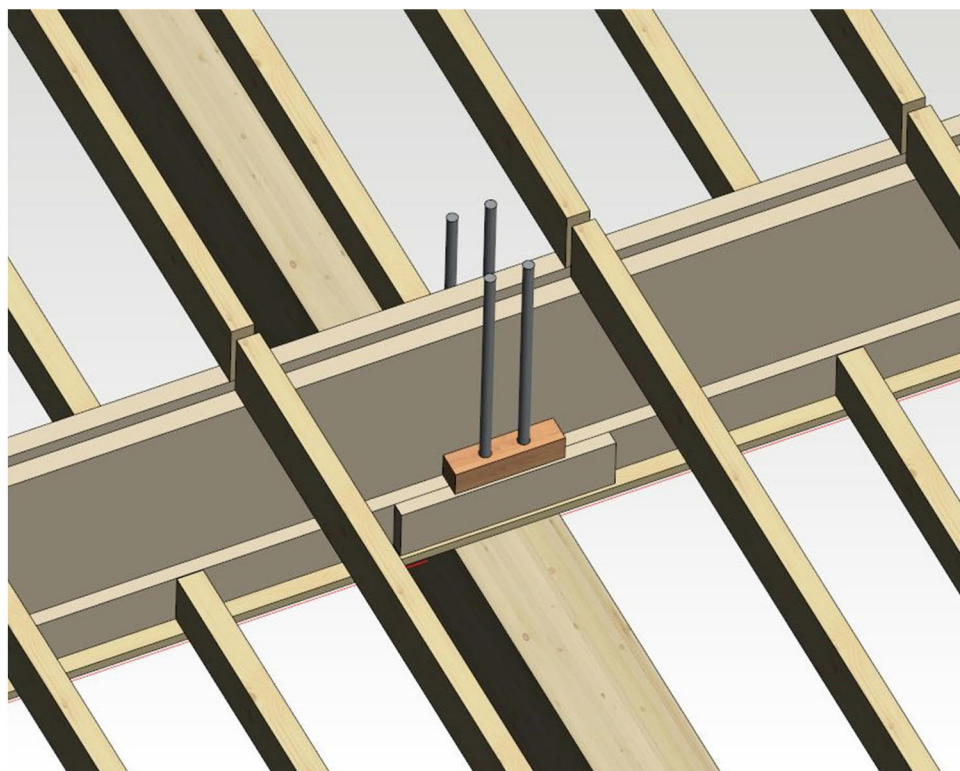
kautta. Kertomalla liitosmäärä (kaksi) yhteen naulaan kohdistuvalla voimalla $F_{d,naula}$ ja jakamalla tulo lopputilan siirtymäkertoimella $K_{u,fin}$, saadaan Kerto-T:n ja reunapalkin välinen siirtymä.

$$\omega_{KertoT} = \frac{n \cdot F_{d,naula}}{K_{u,fin}} \quad (22)$$

5.4 Kattoelementin ja liimapuupalkin välinen liitossiirtymä

Kattoelementin ja liimapuupalkin välisen liitoksen siirtymäkerroin määritetään lopputilan siirtymäkertoimella $K_{u,fin}$ (kaava 18). Liitos koostuu tyyppillisesti neljästä ruuvista, koska samaan tukipisteeseen osuu kaksi elementtiä, joissa molemmissa on kaksi ruuvia. Neljälle ruuville kohdistuva voima $F_{d,tuki}$ jaetaan lopputilan siirtymäkertoimella, joka on kerrottu liitoksessa olevien ruuvien määrällä.

$$\omega_{ruuviliitos} = \frac{F_{d,tuki}}{n \cdot K_{u,fin}} \quad (23)$$

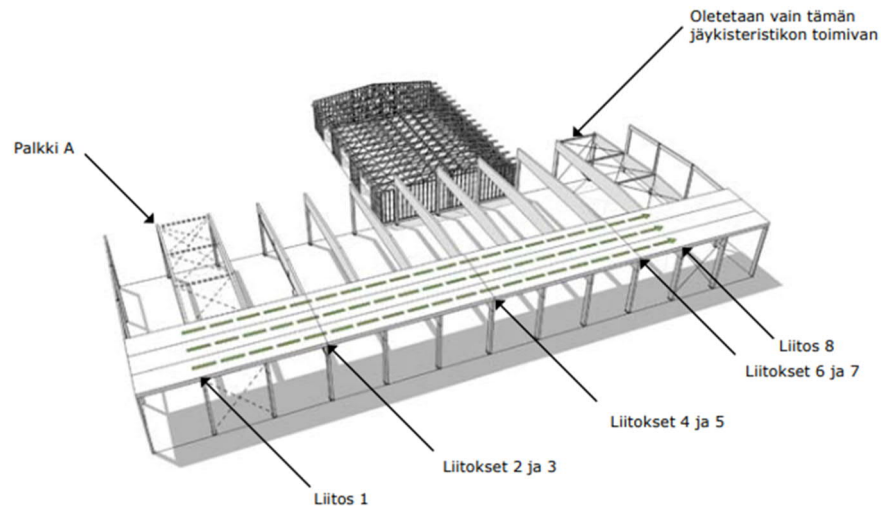


Kuva 17. Kattoelementin liitos liimapuupalkkiin (LapWall 2018).

Näin lasketaan siis yhden tukipisteen liitossiirtymä millimetreissä. On kuitenkin hyvä huomioida, että mikäli kattoelementin reunapalkkeja käytetään voimien siirtämiseen erilliselle jäykistelle, täytyy matkalla olevien

liitoksien määrä huomioida laskennassa. Tällaisessa tapauksessa siirtymäkertoimella saatu arvo N/mm jaetaan liitosmäärällä.

$$C = \frac{K_{ser,liitos}}{n} \quad (24)$$



Kuva 18. Esimerkki rakenteesta, jossa liitosmäärä on kahdeksan. (Puuinfo, 2010)

Liitosmitoituksessa on myös hyvä huomioida jäykisteen ja katto-orren väliseen liitoksen kertyvä voima, joka kasvaa helposti melko suureksi, jos voimia joudutaan tuomaan pidemmältä matkalta. Katso kuva 17.

5.5 Liitossiirtymät yhteensä

Kun kaikki liitossiirtymät on laskettu, lasketaan kaikista liitoksista muodostuneet siirtymät yhteen, jolloin saadaan tukipisteen kokonaissiirtymä. Tukipiste on siis kattoelementin ja liimapuupalkin välinen kiinnityskohta johon voima $F_{d,tuki}$ vaikuttaa.

$$C_v = \frac{F_{d,tuki}}{\omega_{levytys} + \omega_{ruuviliitos} + \omega_{KertoT}} \quad (25)$$

Jotta jäykistys on riittävä, tulee ehdon $C_v > C_{vaad}$ toteutua.

5.6 Kattoelementin ja liimapuupalkin välinen liitosmitoitus

Kattoelementin ja liimapuupalkin välinen liitos tulee mitoittaa liitokseen kohdistuvalle voimalle $F_{d,tuki}$. Liitos toteutetaan neljällä 8x200 ruuvilla kuvan 16 mukaisesti. Liitoksen kestävyys tulee aina tarkistaa, erityisesti jos voimia viedään erilliselle jäykisteelle kasvavat liitosvoimat helposti melko suuriksi.

Liitettävien osien reunapuristuslujuuksien ominaisarvot määritetään erikseen sekä kärjen- että kannan puolen materiaaleille kaavalla

$$f_{h,i,k} = \frac{0,082 * \rho_k k * d^{-0,3}}{2,5 * \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (26)$$

missä

| | |
|----------|--|
| d | ruuvin halkaisija |
| ρ_k | materiaalin ominaistiheys (Kerto-T tai liimapuu) |
| α | ruuvin kulma |

reunapuristuslujuuksien suhde β

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (27)$$

Ruuvin ulosvetokestävyys köysivaikutukselle

$$f_{ax,\alpha,Rk} = k_{ax} * f_{ax,k} * d * l_{ef} * \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8} \quad (28)$$

missä

$$k_{ax} \quad 1,0 \text{ kun } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ, \quad k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 * \alpha}{45^\circ} \text{ kun } 0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$$

Ruuviliitoksen kapasiteetti lasketaan EN 5 kaavalla 8.6

$$F_{v,Rk} \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} * t_1 * d \\ f_{h,2,k} * t_2 * d \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{(\beta + 2\beta^2)} \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 * \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 * \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2} - \beta} \right] + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 * \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2} - \beta} \right] + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta s}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

missä

| | |
|--------------|--------------------------------|
| t_1 | kiinnitettävän osan paksuus |
| t_2 | ruuvin tunkeumapituus |
| $\rho_{1,k}$ | ominaistiheys |
| $\rho_{2,k}$ | ominaistiheys |
| d | ruuvin nimellispaksuus |
| M_y | ruuvin myötömomentti |
| $F_{ax,k}$ | ruuville ilmoitettu $f_{ax,k}$ |

Köysivoiman suurin sallittu osuus Johansenin yhtälöstä maksimissaan 100% ruuviliitoksessa. Köysivaikutuksen osuus $\Delta R = F_{ax,Rk}/4$ saa olla enintään saman suuruinen kuin kaavojen vasemmanpuoleinen osuus (neljä alinta kaavaa)

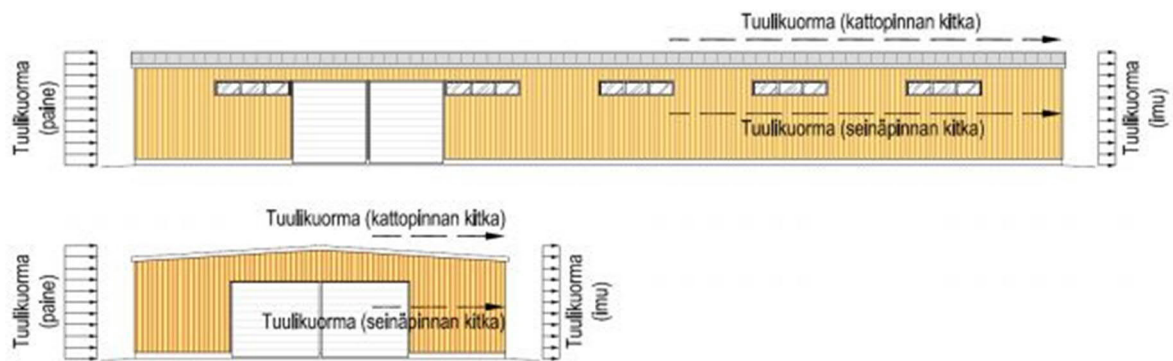
Liitoksen leikkauskestävyys saadaan kaavalla

$$f_{v,Rd} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * F_{v,Rk} \quad (29)$$

6 KATTOTASON JÄYKISTYS KATTOELEMENTILLÄ

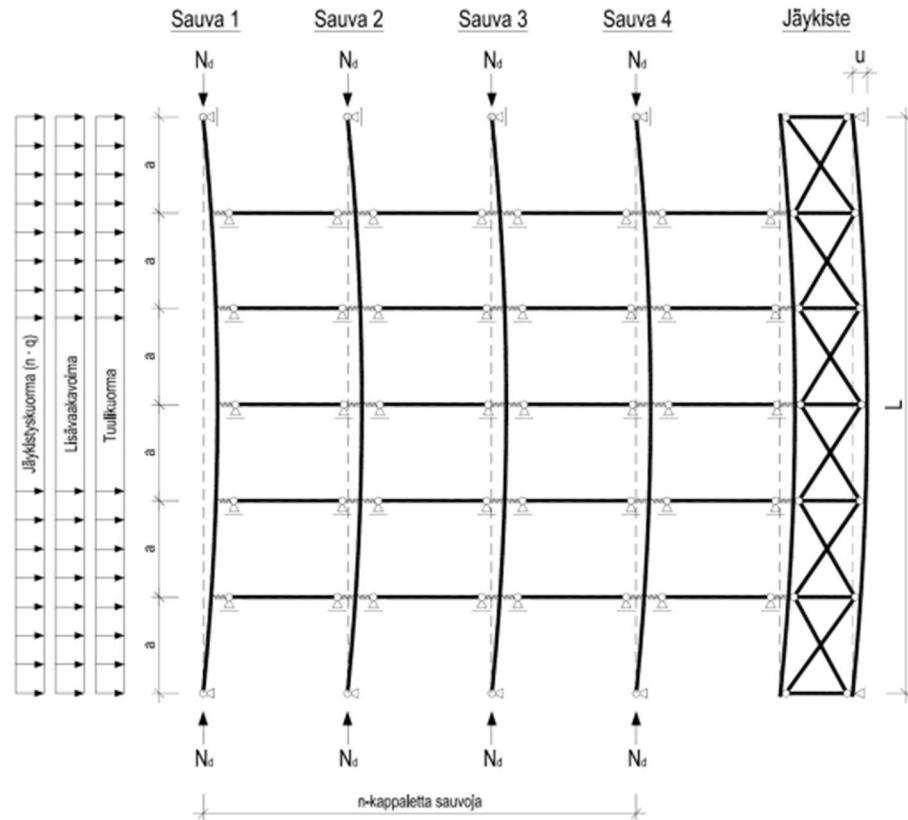
S-kielahduksen hallinnan lisäksi katto tulee jäykistää myös muita katon tassa vaikuttavia ulkoisia ja sisäisiä voimia vastaan. Tällaisia ulkoisia ja sisäisiä voimia ovat esimerkiksi

- pääkannattimien lisävaakavoima
- tuulikuormat
- kiepahdustuennasta syntyvä sisäinen jäykistyskuorma
- muut ulkoiset vaakakuorma (siltanosturin jarrukuorma)



Kuva 19. Kokonaistuulikuorman määrittäminen. (Finnish Wood Research 2014)

Näiden voimien vaikutuksesta palkkien kiepahdus tapahtuu yhteen suuntaan ensimmäisen kiepahdusmuodon mukaisesti. Palkistoon vaikuttaa voima q , joka pyrkii työntämään palkkeja rakennuksen pituussuunnassa ja aiheuttamaan kiepahduksen. Poikittaissuuntainen jäykistys voidaan järjestää esimerkiksi kehärakenteisella liimapuurungolla.

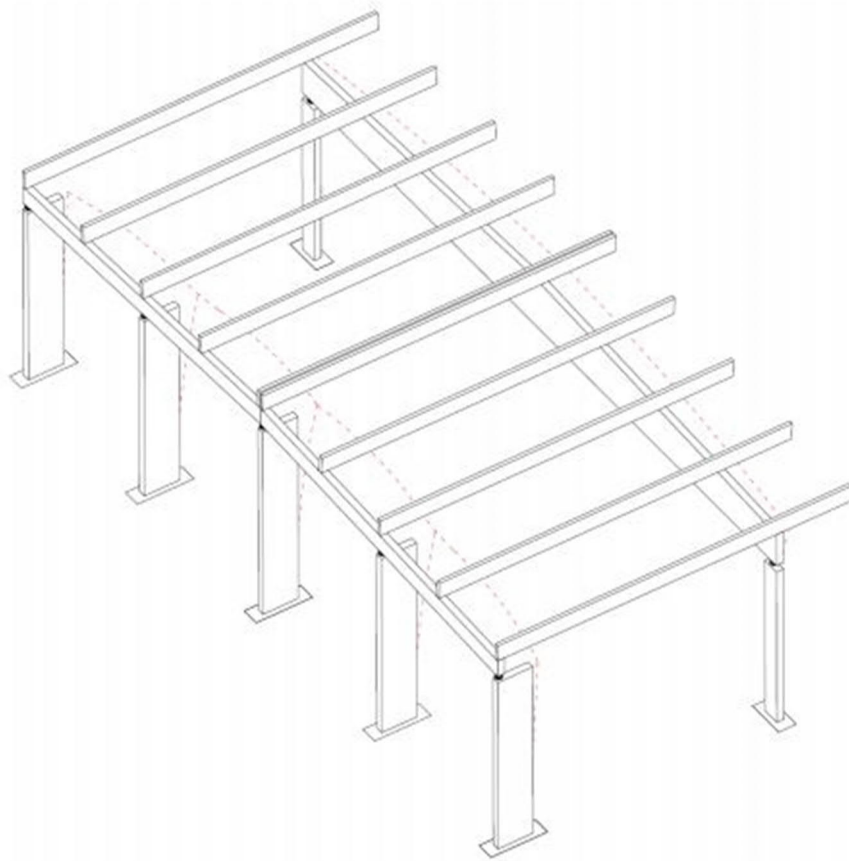


Kuva 20. Palkkeihin kohdistuvia kuormia. (Finnish Wood Research)

Näiden voimien vastaanottaminen kattoelementillä edellyttää, että katossa on jokin jäykiste, kuten tuuliristikko tai mastopilarit ja päätypalkki. Päätypalkin ja mastopilarin liitoksesta on mahdollista mitoittaa riittävän jäykkä kiepahdusvoimien vastaanottamiseen. (Koskeniemi, haastattelu 31.8.2018.). Tällöin kattoelementin reunapalkit siirtävät voimat erilliselle jäykisteelle ja kattoelementit toimivat katto-orsien tavoin.

Jos näitä voimia halutaan ottaa vastaan kattoelementillä ilman erillistä katto-tason jäykistettä, tulee elementit kiinnittää toisiinsa yhtenäisen levykentän muodostamiseksi (Lahtela, haastattelu 12.10.2018.) Lisäksi tulee tarkastaa elementin jäykkyys ja leikkausvoimakestävyys. Myös liitosten osalta on huomioitava miten voimat siirtyvät rakenteelta toiselle ja millaisia siirtymiä liitoksiin muodostuu. (Finnish Wood Research 2014)

Jäykisteen sallittu vaakasiirtymä on murtorajatilan mukainen $L/500$. Käytännössä siis esimerkiksi 25 metriä pitkä palkki saa taipua keskeltä 50 millimetriä. Päätyseinän käyttörajatilan siirtymä saa olla enintään $H/300$ mikäli tätä on rajoitettu. (Finnish Wood Research 2014)



Kuva 21. Jäykisteen sallittu siirtymä on $L/500$. (Finnish Wood Research)

6.1 Kattoelementtiin kohdistuva kuormitus

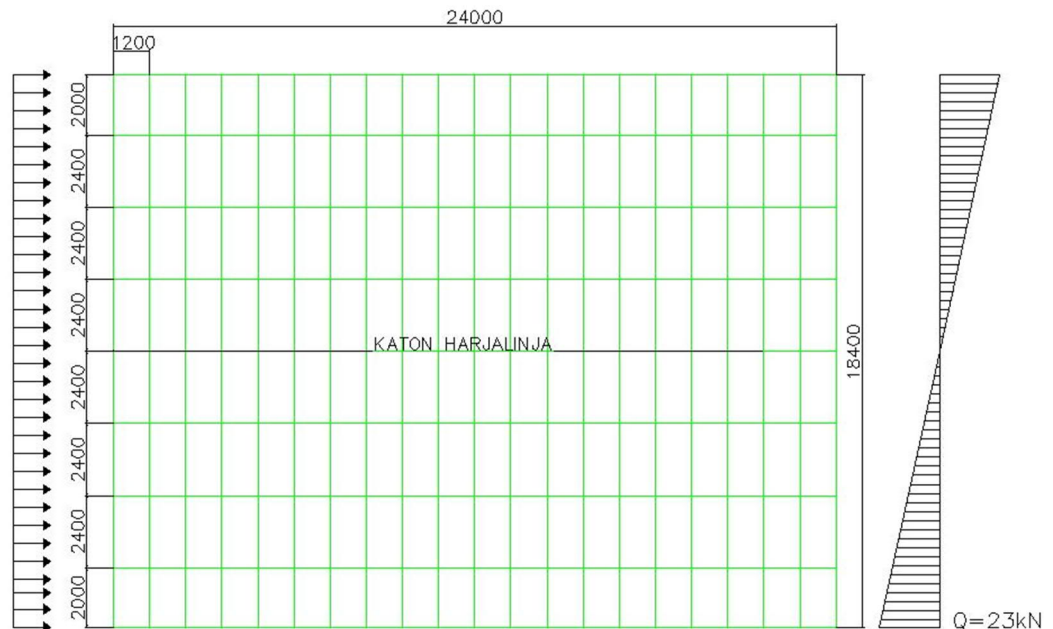
Jos kattotason pituussuuntaisia voimia otetaan vastaan kattoelementillä, tulee elementin lujuusominaisuudet tarkastaa siihen kohdistuvia kuormituksia vastaan. Muista jäykisteistä riippuen osa kuormista viedään perustuksille ja osa voidaan ottaa vastaan kattotasossa.

Käytännössä jos kattotasossa ei ole muita jäykisteitä, kuten tuuliristikoita, voidaan osa kuormista ottaa vastaan kattoelementillä. Tämä kuitenkin edellyttää elementin jäykkyys- ja leikkauskestävyyden tarkastelua sekä kipsilevyjäykisteen, että elementtien keskinäisten saumojen osalta.

Oletetaan, että hallissa katon tasossa vaikuttavan seuraavat kuormat

- tuulikuorma q_w (viedään perustuksille)
- lisävaakavoima q_{HL} (viedään perustuksille)
- jäykistyskuorma q_d (otetaan vastaan kattoelementillä)
- S-kiepahdus (otetaan vastaan kattoelementillä)

Tässä esimerkissä oletetaan, että näistä voimista aiheutuu yhteensä kuormitus $q=5\text{kN/m}$. Rakennuksen pituus on 48 metriä, ja elementit ovat neli-aukkoisia, jolloin yhden elementin pituus on noin 24 metriä. Tällöin voima $q=5\text{kN/m}$ jakautuu kahdelle elementille, joten yhtä elementtiä kuormittaa kuorma $q_{d,\text{elementti}}=2,5\text{kN/m}$.



Kuva 22. Suurin leikkausvoima kohdistuu reunimmaisille elementeille

Tässä esimerkissä reunimmaisiet elementit ovat mitoittavia, koska elementteihin kohdistuu suurin leikkaus. Lisäksi elementit ovat niin sanottuja sovite-elementtejä, eli kapeampia kuin muut, joten niiden leikkausvoimakapasiteetti on pienempi kuin muissa.

Ratkaistaan reunaelementin yhden kipsilevyn leikkauskestävyys kaavalla 11, jolloin yhden levyn leikkauskestävyydeksi saadaan hetkellisessä aika-luokassa ruuvauksen ollessa k200

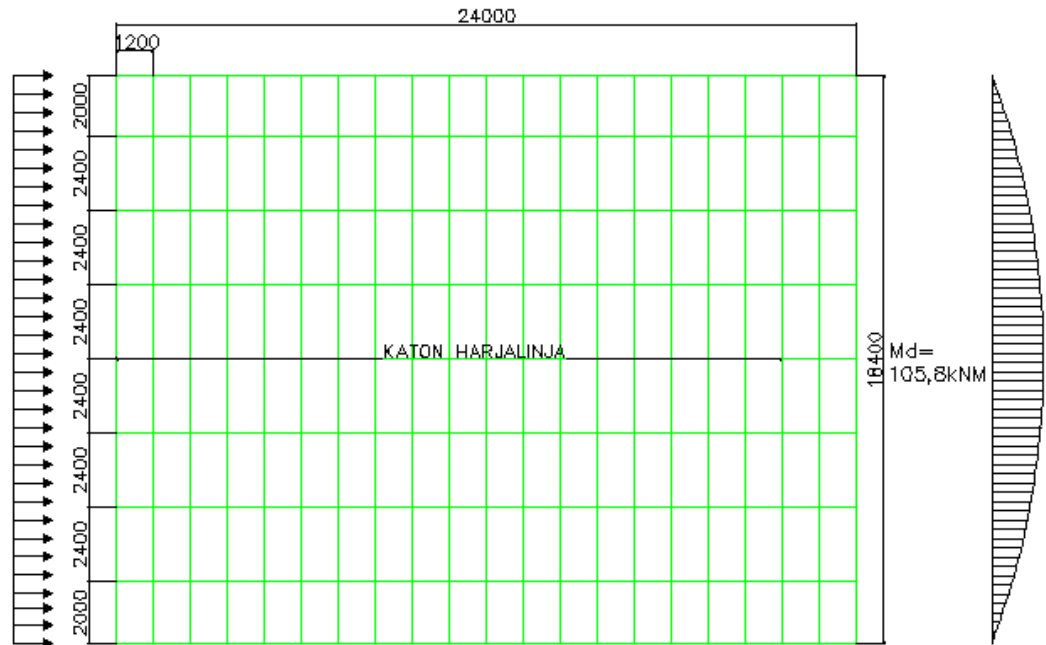
$$q_{d,\text{levy}}=2\text{kN}$$

Koska levyjä on yhdessä 24 metriä pitkässä kattoelementissä 20 kappaletta, muodostuu yhden kattoelementin leikkauskestävyydeksi

$$q_{d,\text{elementti}}=40\text{kN}$$

Näin ollen elementin leikkauskestävyys on riittävä, koska käyttöaste heikoimman elementin kohdalla on ainoastaan 57,5%.

Leikkauksen lisäksi kattoelementteihin kohdistuu taivutusta, joka vastaanotetaan pääkannattimilla.



Kuva 23. Kattoon kohdistuva taivutusmomentti 105,8kN.

Taivutusmomentiksi saadaan 105,8kN. Tällöin jokaisen kattoelementin välisen sauman yli täytyy siirtää voima 4,4kN.

6.2 Siirtymät levyjäykistekentässä

jäykisterakenteen murtorajatilan siirtymä saa olla enintään $L/500$ (Finnish Wood Research 2014). Jos mitta L on 18400, saa siirtymä olla enintään 36,8 millimetriä. Lasketaan eri elementtien siirtymät räystäältä harjalle. Katto on identtinen harjan molemmin puolin. Siirtymä lasketaan kertomalla levyn maksimisiirtymä käyttöasteella.

$$\omega_{elementti1} = \frac{1,15kN}{2kN} * 2,2mm = 1,265 \quad (30)$$

$$\omega_{elementti2} = \frac{0,9kN}{2kN} * 2,6mm = 1,17mm \quad (31)$$

$$\omega_{elementti2} = \frac{0,6kN}{2kN} * 2,6mm = 0,78mm \quad (32)$$

$$\omega_{elementti2} = \frac{0,3kN}{2kN} * 2,6mm = 0,39mm \quad (33)$$

Kun siirtymät lasketaan yhteen, saadaan yhden elementin kipsilevyjäykisteen kokonaissiirtymäksi 3,6 millimetriä sallitun maksimin ollessa 36,8 millimetriä.

6.3 Siirtymät elementtisaumassa

Kipsilevyn siirtymän lisäksi myös elementtien välisen sauman siirtymä tulee huomioida. Oletetaan, että elementit kiinnitetään toisiinsa alapuolelta 27x100 Kerto-T-laudalla. Lauta asetetaan pitkittäin elementtien alapuolelle ja ammutaan kiinni ST 18x95 laudan läpi reunapalkkeihin N3,1x90 k200.

Elementin pituuden ollessa 24 metriä, sopii matkalle 240 naulaa. Lasketaan yhteen naulaan kohdistuva voima

$$F_{d,naula} = \frac{2500N \cdot 2,4m}{240} = 25N \quad (34)$$

Lasketaan elementtisauman siirtymä

$$\omega_{elementtisauma} = \frac{F_{d,naula}}{K_{u,fin}} = \frac{25N}{457N/mm} = 0,05mm \quad (35)$$

Näin ollen yhden naulan siirtymä k200 naulauksella on lähellä nollaa ja kokonaissiirtymäksi saadaan $3,6mm + 0,05mm = 3,65mm$.

7 YHTEENVETO

Työssäni kattoelementtien parissa olen usein pohtinut kollegoideni kanssa erilaisia jäykistykseen liittyviä asioita. On selvästi ollut havaittavissa, että kyseessä ei lopulta ole kovin helppo tai yksinkertainen asia, vaan näkemyksiä jäykistykseen oikeasta mitoistavasta on monia. Tässä opinnäytetyössä pyrin käyttämään lähdemateriaalina luonnollisesti alan virallisia julkaisuja sekä käytännön työssä kertynyttä laskentamateriaalia.

Tyypillisessä liimapuurunkoisessa halliratkaisussa on yleensä jokin muu jäykiste kattoelementin lisäksi, kuten tuuliristikot pääkannattajien välissä tai mastopilarit, joilla rakennuksen jäykistys on ratkaistu. Liimapuurungon suunnittelijalta saadaan tuelle vaikuttava voima F_d , lisävaakavoima q ja tuen jousijäykkyysvaatimus C_{vaad} . Välillä nämäkin lasketaan itse ja hyväksytetään liimapuurungon suunnittelijalla.

Toisinaan epäselvyyttä aiheuttaa mitkä voimat on tarkoitus ottaa vastaan kattoelementillä, ja mitkä voimat ohjataan erilliselle jäykisteelle ja perustuksille? Ajatellaanko elementti voimia jäykisteelle siirtävänä rakenneosana vai pääkannattajien jäykisteenä?

Monesti stabiliteettituen jousijäykkyysvaatimus mitoitetaan toteutettavaksi erillisellä jäykisteellä, jolloin yhden liitoksen kapasiteetti joudutaan jakamaan liitosmäärällä ja elementti ainoastaan siirtää voimia. Tämäkin olisi kuitenkin mahdollista hoitaa elementtikohtaisesti tarkastelemalla yksittäisen elementin jäykkyyttä. Käytännössä tähän ei kuitenkaan yleensä ole tarvetta.

Stabiliteettitukeen kohdistuva voima F_d puolestaan joudutaan usein ottamaan vastaan elementtikohtaisesti, sillä jos voimia viedään monen liitoksen kautta erilliselle jäykisteelle, loppuu kattoelementin ja jäykisteen välisestä liitoksesta kapasiteetti.

Elementtikohtaisessa jäykistyksessä tulee kuitenkin muistaa, että myös elementin jäykisteen leikkauskestävyys täytyy tarkastaa. Tähän vaikuttaa oleellisesti kipsilevyn kiinnitys kattoelementin runkoon. Laskennallisesti tarkastellen onkin niin, että kattoelementtiliitos ei välttämättä muodostu mitoittavaksi vaan levyjäykisteen leikkauskestävyys.

Ajoittain kun kattoelementin ja pääkannattajan liitokseen kohdistuva voima F_d kasvaa liian suureksi liitoskapasiteettiin nähden, lähdetään voimia pienentämään kriittisen aallonpituuden laskennan kautta. Näin aallonpituus kuitenkin usein kasvaa kolmen elementin mittaiseksi, jolloin keskimäinen elementti ei osallistu jäykistykseen. Liitosvoimasta saadaan kyllä pienempi, mutta vastaavasti voimaa vastaanottavien liitosten määrä vähennee.

Myös suunnittelu pohjaksi löytyy vaihtoehtoisia ohjeita, käytetäänkö eurokoodi 5:n mukaisia peruskaavoja vai liimapuustandardin SFS-EN 14080 mukaista laskentatapaa. Lasketaanko materiaalivalmistajien ilmoittamilla lähtöarvoilla vai eurokoodin määrittelemillä? Huomioidaanko palotilannetta mitoituksessa? Kenelle vastuu katon kokonaisjäykistyksestä kuuluu?

Näitä kysymyksiä pohtiessa huomaa helposti aiheeseen liittyvän monimuotoisuuden ja siksi onkin vaikea sanoa yhtä ehdotonta tai oikeaa tapaa jäykistyksen suunnitteluun ja toteutukseen. Kuten sanottua, tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa olen pyrkinyt keräämään yhteen eurokoodin ja RIL:n mukaisia laskentakaavoja suunnittelun helpottamiseksi ja asian avaamiseksi.

Lopullinen suunnittelu ja toteutus joudutaan kuitenkin aina pohtimaan kohdekohtaisesti usein yhteistyössä liimapuurungon ja kattoelementtisuunnittelijan kanssa. Liimapuurungon suunnittelijalta tarvitaan vähintäänkin lähtötiedot ja kattoelementtisuunnittelija tuntee kattoelementin ominaisuudet ja osaa huomioida nämä pääkannattajien jäykistyksessä tarpeen mukaan.

Opinnäytetyön suurimpana antina pidän sitä oppia, jonka olen asian läpikäymisestä saanut. Vaikka aihe oli rajattu, antaa tiettyyn aiheeseen perusteellisesti perehtyminen kuitenkin aina laajempaa ymmärrystä myös muilta osa-alueilta luettujen lähdemateriaalien ja laskettujen laskujen kautta.

LÄHTEET

Finnish Wood Research (2014). HalliPES 1.0 Haettu 3.9.2018 osoitteesta https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Halli-PES_1.0_Osa_11_J%C3%A4ykistys.pdf

Kovanen, H. (2014) Mitoitusohjelman rakenne ja käyttöliittymä puurakenteiden liitoksille. Diplomityö. Haettu 3.10.2018 osoitteesta <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/14242>

Lahtela, T. (2015) Puuhallin jäykistys ja voimaliitokset. RoadShow 2015. Haettu 25.6.2018 osoitteesta https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/HalliPES_1%200_J%C3%A4ykistys_Voimaliitokset.pdf

LapWall (2018). Kattoelementit. Haettu 28.8.2018 osoitteesta <https://www.lapwall.fi/leko-tuotteet/kattoelementti/>

LapWall (2018). Kattodetaljit. Haettu 28.8.2018 osoitteesta <https://lapwall.fi/wp-content/uploads/2018/05/Kattodetaljit.pdf>

Puuinfo (2010). EC 5 Sovelluslaskelmat Hallirakennus. Haettu 19.10.2018 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennus/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennustoinen-painos.pdf>

Puuinfo (2009). Puuhallin rakenteet, esisuunnittelu ja valintaperusteet. Haettu 3.9.2018 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puuhallin-rakenteet-esisuunnittelu-ja-valintaperusteet/090202-puuhallin-rakennesuunnittelu.pdf>

RIL 205-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL 248-2008. NR-kattorakenteiden jäykistyksen suunnittelu. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Suomen Liimapuuyhdistys RY ja Puuinfo Oy (2015). Liimapuukäsikirja Osa 2. Haettu 5.9.2018 osoitteesta https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%202_0.pdf

VTT-S-05262-14 (2014) Puurakenteiden S-muodon nurjahduksen ja kiepahduksen mitoitusohjeet. VTT Expert Services Oy.

HAASTATTELUT

Koskenniemi, T. (2018). Projektimyyntipäällikkö, Versowood Group Oy. Haastattelu 31.8.2018.

Lahtela, T. (2018). Omistaja, Insinööritoimisto Lahtela Oy. Haastattelu 12.10.2018.

Kerto-T 27x100 kasettipuun ja Kerto-S reunapalkin liitossiirtymä

Aikaluokka: Keskipitkä
 Käyttöluokka: 1
 Kiinnitys: N3,1x90 k100

Yhdistelykerroin $\psi_2 := 0.2$
 Tiheydet:

$$\rho_{KertoT} := 440 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{KertoS} := 510 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_m := \sqrt{\rho_{KertoT} \cdot \rho_{KertoS}} \quad \rho_m = 473.7 \frac{kg}{m^3}$$

$$d := 3.1$$

$$K_{ser} := \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d^{0.8}}{23} \quad K_{ser} = 1108.2 \frac{N}{mm}$$

$$k_{def} := 0.6 \cdot 2 = 1.2$$

$$K_{u.fin} := K_{ser} \cdot \frac{\left(\frac{2}{3}\right)}{(1 + \psi_2 \cdot k_{def})} \quad K_{u.fin} = 595.8 \frac{N}{mm}$$

$$F_{d.tuki} := 6250 \text{ N} \quad n := 60 \quad n_{liitos} := 2$$

$$F_{d.naula} := \frac{F_{d.tuki}}{n} = 104.2 \text{ N}$$

$$\omega_{kasettipuu} := n_{liitos} \cdot \frac{F_{d.naula}}{K_{u.fin}} \quad \omega_{kasettipuu} = 0.3 \text{ mm}$$

Kipsilevyn jäykkyys murtorajatilassa

Kipsilevy: GN13
 Ruuvi: Harvakierteinen kipsilevyruuvi 3,9x41
 Aikaluokka: Keskipitkä
 Käyttöluokka: 1

Ruuvijako (mm) $s := 200$
 Levyn leveys (mm) $b := 1200$
 Levyn korkeus (mm) $h := 2400$
 Levyn paksuus (mm) $t := 13$

$$\beta := \frac{4}{2 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)^3} + \frac{6}{1 + 3 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)} \quad \beta = 1.107 \quad (\text{RIL 205-1-2009 9.13S})$$

Liittimen siirtymäkerroin (N/mm) $K_{ser} := 800$
 Kuormien yhdistelykerroin $\psi_2 := 0.2$
 Virumaluvut $k_{def.st} := 0.6$ $k_{def.kipsi} := 1$

Liitosviruma
 $k_{def} := 2 \cdot \sqrt{k_{def.st} \cdot k_{def.kipsi}} \quad k_{def} = 1.549$

$$K_{u.fin} := K_{ser} \cdot \frac{\left(\frac{2}{3}\right)}{\left(1 + \psi_2 \cdot k_{def}\right)} \quad K_{u.fin} = 407.175 \text{ N/mm} \quad (\text{RIL 248-2008 3.6})$$

Liukumoduuli (N/mm) $G_{mean} := 900 \frac{N}{mm^2}$

$$G_{mean.fin} := \frac{G_{mean}}{1 + \psi_2 \cdot k_{def}} \quad G_{mean.fin} = 687.108 \frac{N}{mm^2}$$

Yhden levyn jäykkyys

$$C_{v.fin} := \frac{1}{\beta \cdot \frac{s \cdot h^2}{K_{u.fin} \cdot b^3} + \frac{h}{b \cdot G_{mean} \cdot 13}} \quad C_{v.fin} = 504.118 \quad (\text{RIL 248-2008 9.00 1S})$$

Viiden levyn muodostaman kentän siirtymä

$$F_{d.tuki} := 6 \text{ kN} \quad \Sigma C_{v.fin} := 5 \cdot C_{v.fin} \frac{N}{mm}$$

$$\omega_{fin.levytys} := \frac{F_{d.tuki}}{\Sigma C_{v.fin}}$$

$$\omega_{fin.levytys} = 2.38 \text{ mm}$$

Kipsilevyn leikkausvoimakestävyys murtorajatilassa

Kipsilevy: GN13
 Ruuvi: Harvakierteinen kipsilevyruuvi 3,9x41
 Aikaluokka: Keskipitkä
 Käyttöluokka: 1

Ruuvijako (mm) $s := 200$
 Levyn leveys (mm) $b := 1200$
 Levyn korkeus (mm) $h := 2400$

$$\gamma := \sqrt{\frac{4}{\left(2 + \frac{h}{b}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{b}{h} + 3\right)^2}} \quad \gamma = 0.992 \quad \text{RIL 205-1-2017 s. 161}$$

Ruuvien ominaislujuus $R_k := 400 \text{ N}$

$$\frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$\frac{0.6}{1.3} = 0.462$$

$$R_d := 0.462 \cdot R_k \quad R_d = 184.8 \text{ N}$$

$$F_{v.Rd} := \frac{R_d \cdot b}{\gamma \cdot s} \quad F_{v.Rd} = 1.117 \text{ kN}$$

Kriittinen aallonpituus

$$C_{vaad} := 1651 \frac{N}{mm}$$

$$a := 2500mm$$

$$E_{0.05} := 10800 \frac{N}{mm^2}$$

$$b := 1800mm$$

$$h := 240 \text{ mm}$$

$$L := 22000$$

$$I_z := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2073600000$$

$$L_{crit} := \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C_{vaad}}{a \cdot E_{0.05} \cdot I_z}}} \quad L_{crit} = 7581.154$$

S-kielähdusta ei tapahdu, mikäli seuraava ehto on voimassa $L_{crit} > \frac{L}{2}$

Tarkastetaan tapahtuuko S-kielähdusta

$$\frac{L}{2} = 11000 \quad L_{crit} < \frac{L}{2}$$

S-kielähdus tapahtuu

Tuella vaikuttava voima $F_{d.tuki}$

$$N_d := 1050 \text{ kN}$$

$$F_d := \frac{N_d}{80} = 13.125 \text{ kN}$$

$$F_{d.tuki} := \frac{F_d}{\frac{L_{crit}}{a} - 1} = 6.458 \text{ kN}$$

Kattoelementin ja liimapuupalkin liitokseen kohdistuu 6.46kN voima, jolle liitos mitoitetaan.

Kiepahdustuettava vaadittava jousijäykkyys C_{vaad}

m = välein a poikittaistuetujen kenttien lukumäärä ($m \geq 2$)

N_d = poikittaistuettavassa rakenneosassa keskimäärin vaikuttavan puristusvoiman mitoitusarvo

a = tukiväli

$$N_d := 1050$$

$$m := 12$$

$$a := 2.5$$

$$C_{vaad} := \left(2 + 2 \cdot \cos \left(\frac{180 \text{ deg}}{m} \right) \right) \cdot \frac{N_d}{a} = 1651.4$$

$$C_{vaad} = 1651.4 \frac{N}{mm}$$

Kiepahdustuen jousijäykkyys

Kiinnitys: R8x200

Kappalemäärä: $n := 4$

Halkaisija: $d := 8$

Liitosmateriaalien tiheydet:

$$\rho_{KertoT} := 440 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{GL30c} := 430 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_m := \sqrt{\rho_{KertoT} \cdot \rho_{GL30c}} \quad \rho_m = 435 \frac{kg}{m^3}$$

Yhden ruuvin siirtymäkerroin

$$K_{ser} := \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d}{23} \quad K_{ser} = 3155.4 \frac{N}{mm}$$

Liitoksen siirtymäkerroin

$$K_{ser.liitos} := n \cdot K_{ser} \quad K_{ser.liitos} = 12621.6 \frac{N}{mm}$$

Liitosten määrä

$$n.liitos := 5$$

Liitoksen jousijäykkyys C

$$C := \frac{K_{ser.liitos}}{n.liitos} = 2524.3 \frac{N}{mm}$$

$$C > C_{vaad} \quad \text{OK!}$$

Kattoelementin ja palkin liitoksen mitoitus kiepahdusvoimalle

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Liitoksen kuorma: | $F_d := 10$ kN |
| Kiinnitettävän osan paksuus | $t_1 := 100$ mm |
| Ruuvien tunkeumapitus | $t_2 := 100$ mm |
| Ominaisihteys | $\rho_{1.k} := 410$ |
| Ominaisihteys | $\rho_{2.k} := 390$ |
| Muunnoskerroin | $k_{mod} := 0.8$ |
| Materiaalin osavarmuusluku | $\gamma_M := 1.3$ |
| Ruuvien kulma | $\alpha := 90$ |
| Ruuvien nimellispaksuus | $d := 8$ |
| Ruuvien sisähalkaisija | $d_i := 5.8$ |
| Ruuvien myötömomentti | $M_{y.Rk} := 20000$ |
| Ulosvetolujuusparametri | $f_{ax.k} := 11$ |
| Ruuvien pituus | $L := 200$ |
| Ruuvimäärä | $n := 4$ |

Liitettävien osien reunapuristuslujuuksien ominaisarvot $f_{h.i.k}$

$$f_{h.1.k} := \frac{0.082 \cdot \rho_{1.k} \cdot d^{-0.3}}{2.5 \cdot (\cos(\alpha \text{ deg})^2) + (\sin(\alpha \text{ deg})^2)} \quad f_{h.1.k} = 18 \quad \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{h.2.k} := \frac{0.082 \cdot \rho_{2.k} \cdot d^{-0.3}}{2.5 \cdot (\cos(\alpha \text{ deg})^2) + (\sin(\alpha \text{ deg})^2)} \quad f_{h.2.k} = 17.1 \quad \frac{N}{mm^2}$$

Reunapuristuslujuuksien suhde β

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} \quad \beta = 1$$

Tehollinen ruuvimäärä n_{ef}

$$n_{ef} := n^{0.9} = 3.5$$

$$kd := \min\left(1, \frac{d}{8}\right)$$

Ruuvien ulosvetokestävyys köysivaikutukselle

$$k_{ax} := 1 \quad \text{kun } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$k_{ax} := 0.3 + \frac{0.7 \cdot \alpha}{45^\circ}$$

$$k_{ax} := 1$$

$$F_{ax.\alpha.Rk} := k_{ax} \cdot f_{ax.k} \cdot d \cdot t_2 \cdot \left(\frac{\rho_{2.k}}{350} \right)^{0.8}$$

$$F_{ax.\alpha.Rk} = 9595.8 \quad N$$

Ruuviliitoksen kapasiteetti EN5, kaava 8.6

$$Fv.Rk.a := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d = 14413.2$$

$$Fv.Rk.b := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d = 13710.1$$

$$Fv.Rk.c := \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt{(\beta + 2\beta^2) \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) + \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4}$$

$$Fv.Rk.d := 1.05 \cdot \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt{\left(2\beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot t_1^2} \right) - \beta} \right) + \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4}$$

$$Fv.Rk.e := 1.05 \cdot \frac{f_{h.1.k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left(\sqrt{\left(2\beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (1 + 2\beta) M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot t_2^2} \right) - \beta} \right) + \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4}$$

$$Fv.Rk.f := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d} + \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4}$$

Köysivaikutuksen osuus $\Delta R := \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4}$ saa olla enintään yhtä suuri, kuin yhtälön muu osuus kaavoissa

Fv.Rk.c, Fv.Rk.d, Fv.Rk.e ja Fv.Rk.f

$$Fv.Rk.c = 8283.1 \quad \Delta R.c := \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4} = 2398.9 \quad \Sigma_c := (Fv.Rk.c + \Delta R.c) = 10682 \quad N$$

$$Fv.Rk.d = 5207.4 \quad \Delta R.d := \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4} = 2398.9 \quad \Sigma_d := (Fv.Rk.d + \Delta R.d) = 7606.3 \quad N$$

$$Fv.Rk.e = 5048.5 \quad \Delta R.e := \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4} = 2398.9 \quad \Sigma_e := (Fv.Rk.e + \Delta R.e) = 7447.4 \quad N$$

$$Fv.Rk.f = 2726.5 \quad \Delta R.f := \frac{F_{ax.\alpha.Rk}}{4} = 2398.9 \quad \Sigma_f := (Fv.Rk.f + \Delta R.f) = 5125.5 \quad N$$

$$Fv.Rk := \min(\Sigma_c, \Sigma_d, \Sigma_e, \Sigma_f) = 5125.5 \quad N$$

$$Fv.Rd_{ruuvi} := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot Fv.Rk = 3154.1 \quad N$$

$$Fv.Rd_{liitos} := Fv.Rd_{ruuvi} \cdot n = 12616.6 \quad N$$