

Senni Vuolle

HIRSIRAKENTEIDEN RAKENNESUUNNITTELU

Hirsiseinien laskennallinen mitoitus

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Professori Sami Pajunen
Professori Mikko Malaska
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Senni Vuolle: Hirsirakenteiden rakennesuunnittelu
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2024

Hirsirakentamisella on Suomessa pitkä historia, ja hirren käyttö rakennusmateriaalina on kasvanut myös julkisessa rakentamisessa. Hirsirakenteet ovat massiivipuurakenteita, jotka voidaan toteuttaa ilman muita rakenneosia. Nykyään suurin osa käytettävistä hirsistä on teollisesti valmistettuja, jonka myötä asennustyö ja rakentaminen etenevät työmaalla nopeasti.

Huolimatta siitä, että hirsirakentamisella on pitkät perinteet, hirsirakenteiden suunnittelu ja mitoitus aiheuttavat rakennesuunnittelijalle päänvaivaa. Hirsirakenteiden suunnitteluun ei ole olemassa yleistä mitoitusohjeistusta, eikä hirsirakenteisiin liittyvä tutkimusaineisto ja muu ohjeistus ole julkisesti saatavilla. Hirsi on puumateriaali, jonka suunnittelun tulisi noudattaa puurakenteiden suunnitteluun liittyviä eurokoodeja SFS-EN 1995-1-1 ja SFS-EN 1995-1-2, mutta se ei kaikilta osin sovellu hirsirakenteiden suunnitteluun. Etenkin hirsiseinän nurjahduskestävyyden määrittäminen on haastavaa, johtuen hirsiseinän rakenteesta, jossa hirret pinotaan toistensa päälle. Hirsiseinien pystykuorman kestävyys ja monet muutkin hirsirakenteille määritetyt ominaisuudet perustuvatkin pitkälti koekuormituksiin.

Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, jonka tutkimusaineisto koostui niin julkisesti saatavilla olevasta aineistosta kuin hirsitalovalmistajilta saadusta aineistosta, kuten koekuormitusraporteista, lausunnoista ja muista yrityskohtaisista ohjeista ja dokumenteista. Työn tavoitteena oli koota tutkimusaineiston pohjalta ohjeistusta hirsirakenteiden rakennesuunnitteluun, nostaa esiin hirsirakenteiden suunnittelussa huomioon otettavia asioita, sekä luoda mitoitusohjeistusta hirsiseinien mitoitukseen. Tarkoituksena oli nostaa myös esiin lisätutkimustarpeita hirsirakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen liittyen.

Työn tutkimusnäkökulma kohdistui erityisesti hirsiseinän nurjahdusmitoitukseen ja pystykuorman kestävyYTEEN, ja työssä vertailtiin eri tapoja määrittää hirsiseinän nurjahduskestävyyttä. Mitoitustapojen rajoituksia ja soveltuvuutta yleiseksi mitoitustavaksi pohdittiin. Lisäksi toteutettiin vertailulaskelmat, joiden avulla pohdittiin mitoitustapojen eroavaisuuksia sekä soveltuvuutta eri mitoitustilanteisiin. Tutkimustuloksena todettiin, ettei yksikään mitoitustavoista sovellu hirsiseinän nurjahdusmitoituksen yleiseksi mitoitustavaksi sellaisenaan, vaan lisätutkimuksia tarvitaan. Todettiin kuitenkin, että on näyttöä siitä, että hirsiseinän nurjahdusmitoitus voisi olla mahdollista puristettuna sauvana, jolloin eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 soveltaminen voisi tulla kyseeseen. Aiheesta tarvitaan kuitenkin lisätutkimuksia.

Työssä tutkittiin myös hirsiseinän tukipainemitoitusta, följäreiden mitoitusta, hirsipalkin mitoitusta, hirsiseinän painumaa sekä jäykistävän hirsiseinän mitoitusta. Följäreiden mitoituksen osalta tutkimusaineisto oli suppea, ja niiden osalta todettiin, että aiheesta tarvitaan lisätutkimuksia. Tukipainemitoituksen, hirsipalkin mitoituksen sekä hirsiseinän painuman osalta tutkimusaineiston laajuus oli riittävä siihen, että työssä pystyttiin muodostamaan mitoitusohjeistus kyseisiin tarkasteluihin. Hirsipalkin osalta tarkasteltiin erikseen kytkemättömistä osista koottua palkkia sekä mekaanisin liittimin koottua palkkia, ja näitä vertailtiin myös laskelmin. Vertailulaskelmien avulla todettiin, että mekaanisin liittimin kootun palkin kapasiteetti ei ole niin paljon suurempi, että sen käyttö suunnitteluratkaisuna olisi kannattavaa, huomioiden sekä mitoituksen, valmistuksen että asennustyön haastavuuden verrattuna kytkemättömistä osista koottuun palkkiin. Jäykistävän hirsiseinän osalta työssä perehdyttiin teoriaan mitoituksen taustalla sekä toteutettiin esimerkkilaskelma Puuinfon mitoitusohjelmalla. Jäykistävän hirsiseinän tarkastelu ei kuitenkaan ollut keskiössä tässä työssä.

Avainsanat: hirsi, hirsiseinä, hirsirakenne, hirsipalkki, rakennesuunnittelu, nurjahdus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Senni Vuolle: Structural design of log structures
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
May 2024

Log construction has a long history in Finland, and the use of log as a building material has increased also in public construction. Log structures are solid timber structures that can be built without other structural components. Today, most of the logs used are industrially manufactured, which means that installation and construction can proceed quickly on site.

Despite the long tradition of log construction, the designing of log structures is a headache for the structural engineer. There are limited general design guidelines for log structures and no publicly available research or other guidance material. Log is a timber material, the design of which should comply with the Eurocodes for the design of timber structures SFS-EN 1995-1-1 and SFS-EN 1995-1-2, but they are not fully applicable to the design of log structures. In particular, determining the buckling resistance of a log wall is challenging due to the log wall structure, where logs are stacked on top of each other. Indeed, the vertical load resistance of log walls and many other properties specified for log structures are largely based on experimental testing.

The study was carried out as a literature study, with research material consisting of both publicly available material and material from log house manufacturers, such as test reports, statements and other company-specific guidelines and documents. The aim of the study was to compile guidelines for the structural design of log structures and to highlight issues to be considered in the design of log structures. The aim was also to highlight the need for further research on the design of log structures.

The research aspect of the study focused in particular on the buckling and vertical load resistance of log walls, and compared different methods of determining the buckling resistance of log walls. The limitations of the design methods and their suitability as a general design method were discussed. Comparative calculations were also carried out to consider the differences between the design methods and their suitability for different design situations. As a result, it was concluded that none of the design methods is suitable as a general design method for buckling resistance of log walls as such, and that further studies are needed. However, evidence was found that it could be possible to design the buckling of a log wall as a compressed column, in which case the application of the Eurocode SFS-EN 1995-1-1 could be considered. However, further research on this topic is needed.

The study also investigated the design of bearing pressure of the log wall, the design of followers, the design of the log beam, the settlement of the log wall and the design of a stiffening log wall. The research material on the design of followers was limited and it was concluded that further research on this topic is needed. With regard to the design of bearing pressure, the design of log beams and the compression of log walls, the extent of the research material was sufficient for the study to provide design guidelines for these analyses. For the log beam, a beam assembled from unconnected sections and a mechanically jointed beam were investigated and compared by means of calculations. The comparative calculations showed that the capacity of the mechanically jointed beam is not so much higher that it is worth using as a design solution, compared to the unconnected beam, given the challenges of design, manufacturing and installation. In the case of the design of a stiffening log wall, the work explored the theory behind the design and carried out an example calculation using the Puuinfo design software. However, the analysis of the design of stiffening log wall was not the focus of this study.

Keywords: Log, log wall, log structure, log beam, structural design, buckling

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

ALKUSANAT

Haluan kiittää A-Insinöörit Suunnittelu Oy:tä sekä Hirsitaloteollisuus ry:tä diplomityön mahdollistamisesta. Kiitos erityisesti A-Insinöörien Henri Saloselle ohjauksesta, avusta sekä kannustuksesta. Kiitos myös Hirsitaloteollisuuden ohjausryhmälle; Seppo Romppaiselle, Mikko Löfille sekä Jarmo Valkoselle. Erityiskiitoksen haluan esittää työn ohjauksesta, mielenkiintoisista keskusteluista ja ajatuksenvaihdoista sekä kannustavista sanoista professori Sami Pajuselle. Iso kiitos myös lähipiirille tsemppaamisesta ja kannustuksesta niin epätoivon kuin onnistumisten hetkellä.

Nyt innolla uutta kohti!

Tampereella, 3.5.2024

Senni Vuolle

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HIRSIRAKENTAMISESTA YLEISESTI	3
2.1 Hirsirakentamisen historia ja kehitys	3
2.2 Hirsityypit ja niiden valmistus	4
2.2.1 Pyöröhirsi	4
2.2.2 Massiivihirsi	4
2.2.3 Lamellihirsi	5
2.2.4 Painumaton hirsi	7
2.3 Hirren työstöt	9
2.3.1 Nurkkatyypit	9
2.4 Hirsirungon asentaminen	10
2.5 Hirsirakentamisen edut ja haasteet	11
3. HIRSI RAKENNUSMATERIAALINA	12
3.1 Lujuusominaisuudet	12
3.2 Hirren kosteuskäyttäytyminen	13
3.3 Painuma	14
3.4 Tiiveys	15
3.5 Energiatehokkuus ja lämmöneristävyys	16
3.6 Palotekniset ominaisuudet	17
3.7 Ääneneristävyys	21
3.8 Hirren tuotesertifiointi	22
4. HIRSIRUNGON TOIMINTAPERIAATE	24
4.1 Hirsiseinän tapitus ja pulttaus	24
4.2 Hirsirungon toiminta pystykuormille	26
4.2.1 Följärit	27
4.2.2 Karapuut	28
4.3 Hirsirakennuksen jäykistys	29
4.3.1 Hirsiseinän leikkausvoimakkestävyys	32
4.3.2 Hirsiseinän ankkurointi	32
5. HIRSIRAKENTEIDEN KANTAVUUDEN ANALYSOINTI	34
5.1 Materiaaliominaisuuksien mitoitusarvot	34
5.2 Hirsiseinän pystykuorman kestävyys	36
5.3 Tukipaine	44
5.4 Följärit	49
5.5 Hirsipalkki	51
5.5.1 Kytkemättömistä osista koottu hirsipalkki	52
5.5.2 Mekaanisin liittimin koottu hirsipalkki	58
5.6 Painuma	64

5.6.1	Vaakasaumojen välisten rakojen aiheuttama painuma.....	64
5.6.2	Hirsiseinän kokoonpuristuma	65
5.6.3	Kosteusmuodonmuutoksen aiheuttama painuma.....	67
5.6.4	Kokonaispainuma	68
5.7	Jäykistävän hirsiseinän mitoitus.....	69
5.7.1	Mitoitusohjelmaan syötettävät perustiedot	69
5.7.2	Hirren paneelileikkauskestävyys	70
5.7.3	Vaarnauksen leikkausvoimakestävyys	70
5.7.4	Seinän leikkaussiirtymä.....	71
5.7.5	Seinän ankkurointitarve.....	71
6.	SOVELLUSLASKELMAT	74
6.1	Nurjahduskestävyys.....	74
6.2	Hirsipalkki	79
6.3	Jäykistävä hirsiseinä.....	82
6.3.1	Rakenteen tiedot.....	82
6.3.2	Kuormitus	83
6.3.3	Mitoitustulokset	83
7.	YHTEENVETO.....	87
	LÄHTEET	90

LIITE 1: Vertailulaskelmat, hirsiseinän nurjahduskestävyys

LIITE 2: Vertailulaskelmat, hirsipalkin kestävyys

LIITE 3: Jäykistävän hirsiseinän mitoitus

LYHENTEET JA MERKINNÄT

C22	Sahatavaran lujuusluokka, taivutuslujuus 22 N/mm ²
C24	Sahatavaran lujuusluokka, taivutuslujuus 24 N/mm ²
C30	Sahatavaran lujuusluokka, taivutuslujuus 30 N/mm ²
CE	CE-merkintä, Conformité Européenne
CNC	Computerized Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus
CLT	Cross Laminated Timber, ristiinlaminoitu monikerroslevy
DoP	Suoritustasoilmoitus
EAD	Eurooppalainen arviointiasiakirja
EC5	Eurokoodi 5; SFS-EN 1995-1-1
EIxx	Rakenteen osastoivuus palotilanteessa minuutteina, esim. EI30
E-luku	Energialuku
ETA	Eurooppalainen tekninen arviointi
hEN	Harmoninen eurooppalainen tuotestandardi
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
Rw	Ilmaääneneristävyysluku
Rxx	Rakenteen kantavuus palotilanteessa minuutteina, esim. R30
SFS	Suomen Standardoimisliitto SFS ry
U-arvo	Lämmönläpäisykerroin

1. JOHDANTO

Hirsi on perinteikäs rakennusmateriaali Suomessa, ja sen käyttö julkisessa rakentamisessa on kasvanut. Hirsirakenteet ovat massiivipuurakenteita, jotka voidaan toteuttaa pelkillä hirsillä ilman muita rakennekerroksia, ja siten ne voivat muodostaa rakenteesen sen sisäpinnan, kantavan rungon, äänen- ja lämmöneristyksen sekä julkisivun. Teollinen esivalmistus mahdollistaa rungon nopean asennuksen työmaalla. Hirsi on rakennusmateriaalina ekologinen, ja sen tasatessa rakennuksen sisäilman kosteuspitoisuutta, sitä pidetään myös sisäilman laadun kannalta terveellisenä. (Puuinfo Oy 2020; RT 82-11168 2014).

Siitä huolimatta, että hirsirakentamisella on Suomessa pitkät perinteet, on hirsirakenteiden suunnittelusta olemassa melko vähän tutkimustietoa. Hirsirakenteiden suunnitteluun ei ole saatavilla yleistä mitoitusohjeistusta, ja rakennesuunnittelijan näkökulmasta hirsirakenteiden suunnittelu on siten haastavaa. Hirsi on puumateriaali, ja hirsirakenteiden rakennesuunnittelun tulisi siten noudattaa puurakenteiden suunnitteluun liittyviä eurokoodeja SFS-EN 1995-1-1 ja SFS-EN 1995-1-2, mutta eurokoodien mukaiset mitoitusohjeet ja -ehdot eivät kuitenkaan sovellu sellaisenaan kaikkiin tarkasteltaviin tilanteisiin hirren osalta. Etenkin hirsiseinän nurjahduskestävyyden ja siten pystykuormien kantokyvyn määrittäminen on haastavaa. Hirsirakenteiden suunnittelu perustuukin pitkälti koekuormituksiin ja niiden tuloksiin, joita hirsitalovalmistajat ovat omille hirsityypeilleen ja -rakenteilleen teettänyt. Tutkimustulokset ovat kuitenkin vain valmistajan omassa käytössä, eikä siten julkisesti saatavilla.

Tämän työn tavoitteena on koota tutkimusaineiston pohjalta ohjeistusta hirsirakenteiden rakennesuunnitteluun, nostaa esiin hirsirakenteiden suunnittelussa huomioon otettavia asioita, sekä luoda mitoitusohjeistusta hirsiseinien mitoitukseen. Tarkoituksena on nostaa myös esiin lisätutkimustarpeita hirsirakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen liittyen. Tutkimus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jonka aineistona hyödynnetään julkisesti saatavilla olevan aineiston lisäksi hirsitalovalmistajilta työhön saatua aineistoa, kuten koekuormitusraportteja, lausuntoja, valmistajakohtaisia suunnitteluohjeita ja muita dokumentteja. Hirsirakenteille teetetyt tutkimustulokset ja mitoitusohjeet ovat valmistajakohtaisia ja poikkeavat toisistaan, joten niiden avulla pyritään luomaan yhteenveto ja yleiskäsitys hirsirakenteiden suunnittelusta, jota hirsirakenteiden mitoituksessa voidaan hyödyntää.

Työn tutkimusnäkökulma paneutuu erityisesti hirsiseinien nurjahduskestävyyteen ja sen määrittämiseen laskennallisesti. Nurjahduskestävyydelle esitetään työssä useampi mitoitusperiaate, joiden eroja ja ongelmia pyritään havaitsemaan. Työn tavoitteena on myös löytää jatkotutkimustarpeita hirsiseinän nurjahduskestävyyteen liittyen.

Työssä käsitellään teollisesta hirrestä valmistettujen pystyrakenteiden eli seinien mitoitusta. Työ ei siis sisällä välipohjarakenteita ja siten palkkien värähtelymitoitusta. Mitoitusohjeet eivät päde sellaisenaan käsin veistetylle hirrelle ilman lisätutkimuksia. Työ ei sisällä myöskään liittimien mitoituksen ohjeistusta, eikä hirteen liitettävien rakenneosien liitosten suunnittelua tai mitoitusta. Hirsiseinien vaakakuorman kestävyys käsitellään perehtyen teoriaan jäykistävän hirsiseinän mitoituksen taustalla sekä esitellen tähän teoriaan perustuva mitoitusohjelma jäykistävän hirsiseinän mitoitukseen. Työ ei käsittele myöskään hirsirakenteiden suunnittelua maanjäristystilanteessa.

Tässä työssä perehdytään ensin kirjallisuustutkimuksen avulla hirsirakentamiseen yleisesti, hirren ominaisuuksiin rakennusmateriaalina sekä hirsirakentamisessa huomioon otettaviin ominais- ja erityispiirteisiin. Tämän jälkeen käsitellään hirsirungon toimintaperiaatetta kantavana ja jäykistävänä rakenteena. Työn sovellusosassa on kirjallisuustutkimuksen perusteella koostettu mitoitusohjeita ja -oletuksia kantavien hirsiseinien mitoitukseen, ja työn lopussa näitä mitoitusohjeita on sovellettu esimerkki- ja vertailulaskelmin. Laskelmien avulla on pohdittu mitoitusohjeiden soveltuvuutta hirsirakenteiden suunnitteluun ja nostettu esiin lisätutkimustarpeita aiheeseen liittyen. Laskelmat on esitetty kokonaisuudessaan työn liitteissä.

2. HIRSIRAKENTAMISESTA YLEISESTI

2.1 Hirsirakentamisen historia ja kehitys

Hirsirakentaminen on kehittynyt pohjoisella pallonpuoliskolla havupuuvyöhykkeellä, kun puuta alettiin hyödyntää lähellä sen alkuperäistä muotoa asentamalla liittyviltä pinnoilta työstettyjä puurunkoja päällekkäin ja sitomalla ne toisiinsa loveuksin eli salvoksilla. Ensimmäiset nurkkasalvoksin valmistetut hirsirakennukset ajoittuvat kivikaudelle. (RT 82-11168 2014).

Hirsi oli pääasiallinen rakennusmateriaali Suomessa lähes kaikessa rakentamisessa 1920-luvulle asti, jonka jälkeen rankarakentaminen alkoi korvata hirsirakentamista, ja hirttä käytettiin pitkään lähinnä vain vapaa-ajan rakennuksissa (Puuinfo Oy 2020). 1950-luvulla teollinen hirrenvalmistus yleistyi, ja hirsirakentaminen muuttui teolliseksi tuotantoprosessiksi. 1970- ja 1980-luvuilla hirsitalo otti tuotteena kehitysaskelia, kun kutistumiseen, tiiviyteen, lämmöneristävyyteen ja rakenteiden painumiseen liittyviin ongelmiin löydettiin ratkaisuja. (RT 82-11168 2014).

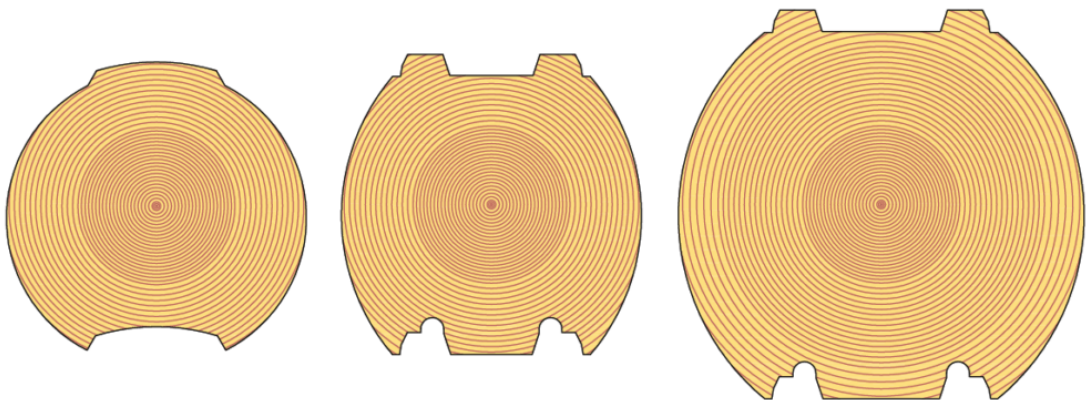
Uusista suomalaisista hirsitaloista lähes 90 % on teollisesti tuotettuja. Tietokoneohjatun teollisen esivalmistuksen myötä esimerkiksi hirsien esikuivatus ja mittatarkkojen liitosrakenteiden valmistus on mahdollista. Hirsirakentamisessa pystytään käyttämään tietokoneavusteista suunnittelua sekä tietomallinnusta, ja osien valmistuksessa voidaan soveltaa automaatio- ja robottitekniikkaa sekä hyödyntää työstöissä CNC-työasemia. Hirsikehän pystytys työmaalla kestää yleensä muutaman päivän ja rakennus saadaan nopeasti vesikaton alle. (RT 82-11168 2014). Nykyisin hirttä käytetään rakennusmateriaalina erikokoisiin ja käyttötarkoitukseltaan erilaisiin rakennuksiin, ja hirren käyttö rakennusmateriaalina on kasvamassa myös julkisissa rakennuksissa, kuten päiväkodeissa ja koulurakennuksissa (Puuinfo Oy 2020). Suuri osa nykyisin valmistuvista hirsirakennuksista on massiivipuurakennuksia. Massiivipuurakennus on rakennus, jossa ulkoseinien pääasiallinen rakennusmateriaali on massiivipuurakenne, jonka paksuus on vähintään 180 mm (YmA 1010/2017). Hirsirakennuksien osalta massiivipuurakennuksen määritelmää eivät siis täytä ne hirsirakennukset, joissa hirren paksuus on alle 180 mm.

2.2 Hirsityypit ja niiden valmistus

Hirret jaotellaan niiden koostumuksen ja muodon perusteella eri hirsityyppeihin. Koostumukseltaan hirsi voi olla massiivi- tai lamellihirsi, ja muodoltaan pyöreä tai kulmikas. Massiivihirret ovat yhdestä puusta valmistettuja, lamellihirret kootaan useasta osasta yhteen liimaamalla. Nykyisin saatavilla on myös painumattomia hirsiiä, joiden rakenne on teknisesti sellainen, ettei hirsirakenteille tyypillistä painumista pääse tapahtumaan. Painumattomista hirsistä valmistettujen rakenteiden painuminen on verrattavissa muuhun puurakentamiseen. Kaikkien hirsityyppien muodot ja dimensiot vaihtelevat valmistajakohtaisesti. (Puuinfo Oy 2020). Hirren valmistusmenetelmiä ovat veistäminen, höylääminen sekä sorvaaminen (Mylly 2022).

2.2.1 Pyöröhirsi

Pyöröhirsi on poikkileikkaukseltaan ympyrä tai lähellä sitä oleva muoto, ja se on valmistettu yhdestä puusta. Pyöröhirsi voidaan valmistaa koneellisesti sorvaamalla tai höyläämällä sekä käsin veistämällä. (Puuinfo Oy 2020, Lauharo 2002). Koneellisesti valmistetut pyöröhirret voidaan valmistaa joko sorvaamalla mahdollisimman suorita tukkeja tasapaksuiksi, tai sahaamalla tukista parruja, jotka sorvataan tai höylätään pyöreiksi (Lauharo 2002). Pyöröhirret voivat olla halkaisijaltaan 150–230 mm paksuja (Puuinfo Oy 2020). Pyöröhirsi on perinteikäs hirsityyppi, mutta sen käyttö nykyisin on vähäistä rakennuksen ulkonäön ja kaavamääräysten vuoksi (Hirsitaloteollisuus ry n.d.). Alla olevassa kuvassa (Kuva 1) on esitetty esimerkkejä pyöröhirsien profiileista.

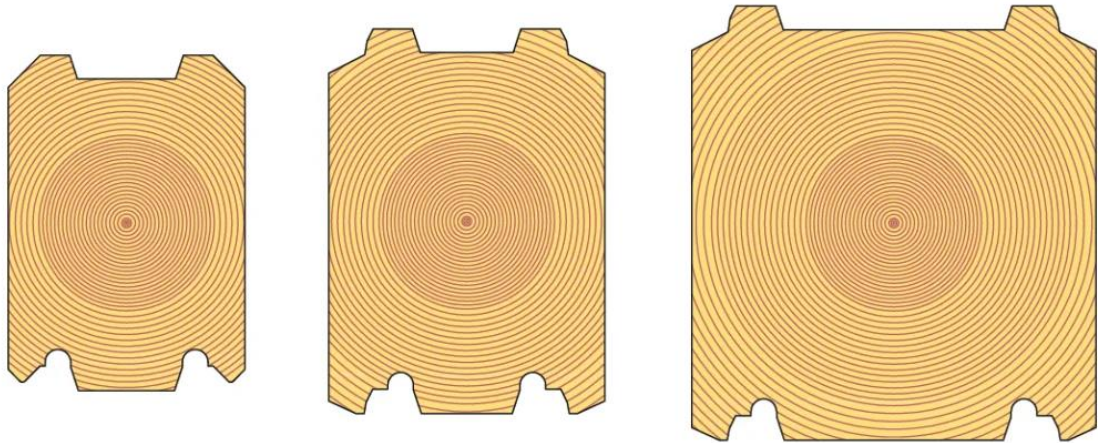


Kuva 1. Esimerkkejä pyöröhirsien profiileista (Puuinfo Oy 2020).

2.2.2 Massiivihirsi

Massiivihirsi on perusmuodoltaan kulmikas, ja siinä voi olla pontteja. Massiivihirttä voidaan kutsua myös höylähirreksi. Massiivihirren valmistuksessa tukit sahataan hirsiaihiiksi, jonka jälkeen ne höylätään. Hirsiaihiio profiloidaan höyläämällä tarkkoihin poikki-

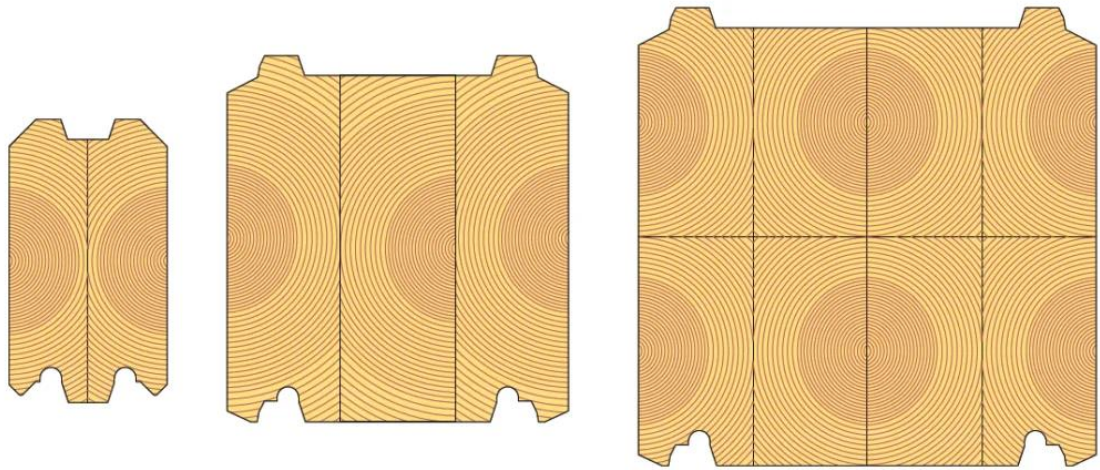
leikkausmittoihin, ja aihioon tehdään ylä- ja alapontit, urat yläpintaan sekä kulmativisteet. Yksipuiset hirret valmistetaan poikkileikkaukseltaan vähintään 75 mm paksuisesta sahatavarasta, ja hirren minimileveys on 68 mm. Yleisimmin käytettyjen massiivihirsien leveys on 95–205 mm ja korkeus 170–220 mm. Massiivihirsiä voidaan jatkaa sormijatkosin, jolloin saadaan pidempiä hirsiiä sekä materiaali tarkemmin käyttöön. (Mylly 2022; Puuinfo Oy 2020; RT 82-11168 2014; Hirsitaloteollisuus ry n.d.). Esimerkkejä massiivihirren profiileista on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 2).



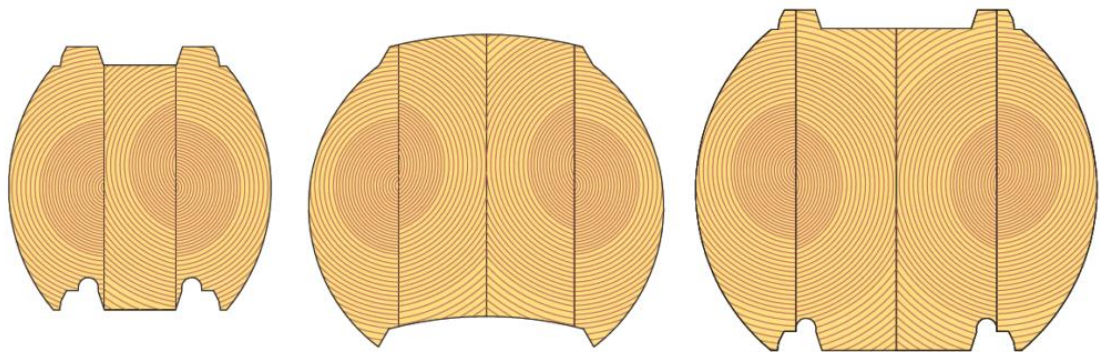
Kuva 2. Esimerkkejä massiivihirsien profiileista (Puuinfo Oy 2020).

2.2.3 Lamellihirsi

Lamellihirressä kaksi tai useampia saman suuntaisia lamelleja liimataan kiinni toisiinsa pysty-, vaaka- tai ristisaumoin. Lamellihirsiä on saatavilla sekä kulmikkaina lamellihirsinä että pyöreinä lamellipyöröhirsinä. Lamellirakenne mahdollistaa suuremmat hirsien poikkileikkauskoot, kun massiivihirsillä koon määrittää saatavilla olevan sahatavaran koko. Kulmikkaiden lamellihirsien leveys voi olla 95–275 mm ja korkeus 170–275 mm. Lamellipyöröhirsien halkaisija voi olla 170–260 mm. Lamellihirsi on massiivihirttä stabiilimpi kosteusmuodonmuutoksien, kuten halkeilun ja kieroutumisen suhteen. Lamellihirren koostuessa saman suuntaisista lamelleista, on sen kosteuseläminen painumisen suhteen kuitenkin massiivihirren kaltaista, joten seinien painuma tulee ottaa huomioon myös lamellihirsirakenteissa. (Puuinfo Oy 2020). Alla olevissa kuvissa (Kuva 3 ja Kuva 4) on esitetty esimerkkejä lamellihirsien profiileista.



Kuva 3. Esimerkkejä kulmikkaiden lamellihirsien profiileista (Puuinfo Oy 2020).



Kuva 4. Esimerkkejä lamellipyöröhirsien profiileista (Puuinfo Oy 2020).

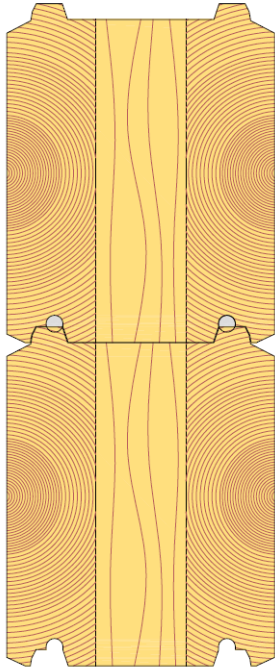
Lamellihirren valmistuksen esikäsittelyvaiheisiin kuuluu puusoirojen eli sahatavaran lujuuslajittelu, sormijatkaminen sekä höylääminen. Sahatavaran eli hirsilamellien höyläämisen yhteydessä lamellit eritellään pinta- ja keskilamelleihin, jossa pintalamellit ovat visuaalisista syistä parempilaatuisia. Höyläämisen jälkeen lamellit liimataan lapepuolelta toisiinsa kiinni hirsiaihioksi. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden tulee olla määräysten mukaisia liimauksen onnistumiseksi. Lamellien liimattaville pinnoille ruiskutetaan liima, jonka jälkeen ne puristetaan hirsiaihioksi hydraulisella puristimella. Käytettäväksi liimaksi on yleistynyt ympäristöystävällinen polyuretaaniliima. Liimatut aihiot profiloidaan höyläämällä massiivihirren tapaan, samalla höyläys puhdistaa näkyviin jääneen liiman. (Mylly 2022).

Lamellihirsien kantavissa saumoissa käytettävän liiman on oltava standardin SFS-EN 301 luokan I tai vastaavat vaatimukset täyttäviä. Jotta lamellihirsien osien voidaan katsoa toimivan täydellisesti yhdessä, liimasaumojen tulee täyttää standardin SFS-EN 14080 vaatimukset. Tämä koskee palkkihirsiiä, ja tällöin hirsien lujuusluokka voidaan määrittellä laskemalla lamellien lujuusluokasta. Standardissa SFS-EN 14080 esitetään

vaatimuksia myös lamellien saumojen sijoittelulle. Kun käytetään saumantäyttöliimaa, jonka on osoitettu toimivan vähintään 0,3 mm paksulle saumalle, saa hirren poikkileikkauksessa olla risteäviä saumoja. Seinähirsille voidaan liimauksen osalta käyttää lievennettyjä vaatimuksia, jos seinähirsien rasitus on hirren korkeuden suunnassa pääasiassa puristusta, eikä liimasaumoille siten tule leikkausjännityksiä. Liimauksen onnistuminen todennetaan standardin SFS-EN 14080 mukaisella delaminointikokeella, jonka tarkoituksena on varmistaa hirren liimasaumojen pitkäaikaiskestävyys lämpö- ja kosteusrasituksissa. (Mylly 2022; SFS 5973:2022).

2.2.4 Painumaton hirsi

Painumaton hirsi on parittomasta määrästä lamelleja koostuva lamellihirsi, jossa keskimmäisten lamellien syysuunta on pystyyn. Puun syynsuuntainen kutistuminen kosteuselämisestä on hyvin pientä, joten hirren kosteuselämisestä aiheutuva seinän painuminen vähenee huomattavasti eri suuntaisten lamellikerrosten myötä. Voidaan siis puhua painumattomasta hirsiseinästä. Painumaton hirsi tunnetaan myös nimellä ristiinlaminoitu hirsi, ja painumattomasta hirrestä muodostuukin rakenteeltaan CLT-levyseinän kaltainen rakennusosa. Painumattomassa hirressä pystykuormaa kantaa vain pystysuuntaiset lamellit. Ristiinlaminoidun hirren leveys riippuu lamellien lukumäärästä. Tyypillisesti lamellikerroksia on kolme tai viisi, eli pystylamelleja on yksi tai kaksi. Ristiinlaminoitujen hirsien profiilien koot vaihtelee valmistajakohtaisesti, leveys voi olla 132–275 mm ja korkeus 220–277 mm. (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2020; Hirsitaloteollisuus ry n.d.). Esimerkki painumattoman hirren profiilista on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 5).



Kuva 5. Esimerkki painumattoman hirren profiilista (Puuinfo Oy 2020).

Painumaton hirsi ja hirsirakenne voidaan toteuttaa myös muilla tavoin. Esimerkiksi Finnlamellin painumattoman hirren painumattomuus perustuu asennustekniikkaan, jolla poistetaan asennuslöyhyys ja siten hirsikertojen välisten saumojen tiivistymisestä aiheutuva painuma. Lisäksi Finnlamellin painumaton hirsi kantaa vain keskeltä, jolloin hirren kantava keskiosa on suojassa kosteuselämiseltä, ja näin ollen kuivumiskutistumisesta aiheutuvaa painumista ei pääse tapahtumaan. (Den Finland Oy 2024). Honkatalojen painumattoman hirren painumattomuus taas perustuu hirsiseinän tapitusruuvaus-tekniikkaan, jonka myötä hirsiseinä ei painu (Oy Primapoli Ltd 2024). Tässä työssä painumattomalla hirrellä tarkoitetaan kuitenkin vain ristiinlaminoitua hirttä, sillä työn tutkimusaineisto rajatuu painumattoman hirren osalta ristiinlaminoituun hirteen.

Hirsiseinärakennetta voidaan pitää painumattomana, kun sen pitkäaikainen muodonmuutos on keskimäärin korkeintaan 0,2 % seinärakenteen suunnitellusta korkeudesta, mikä vastaa siis 2 mm painumaa seinän korkeusmetriä kohden. Hirsiseinärakenteen painumattomuus osoitetaan testituloksilla, käytännön mittauksilla tai muilla luotettavilla tavoilla, kuten laskelmin. (SFS 5973:2022).

Painumaton hirsi valmistetaan lamellihirren kaltaisesti sahatavarasta, ja liimoille sekä liimaukselle asetetaan samat vaatimukset kuin lamellihirrelle.

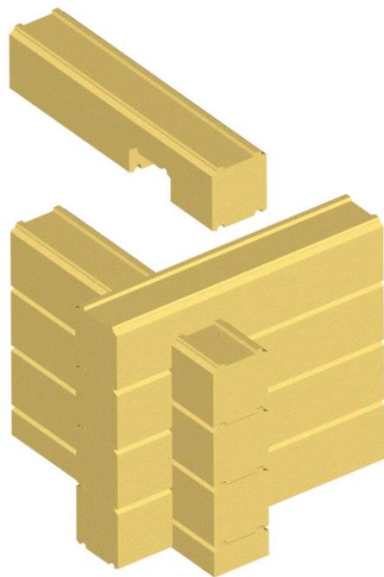
2.3 Hirren työstöt

Hirsien työstäminen tehdään salvoskoneilla, jotka ovat automatisoituja työstölinjoja. Niillä hirsiiin työstetään salvokset eli nurkkaliitokset, reiät, karaurat sekä muut hirsien asentamiseen tarvittavat työstöt. Tehdastyöstöjen myötä hirsirungon pystyttäminen työmaalla sujuu jouhevasti ja rakennus saadaan nopeasti säältä suojaan. (Mylly 2022; Hirsitaloteollisuus ry n.d.).

2.3.1 Nurkkatyypit

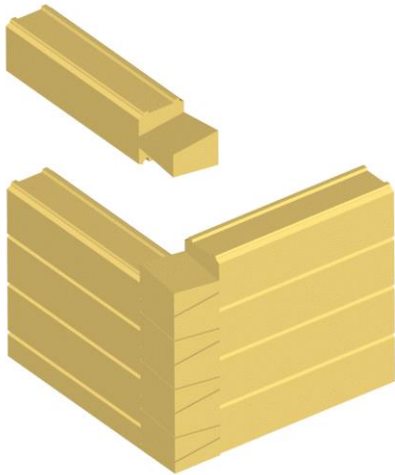
Hirsirungon nurkkaliitosten eli salvosten avulla ristikkäisten seinien hirret liittyvät toisiinsa, jolloin rungosta saadaan yhtenäinen. Ristikkäiset seinät myös jäykistävät toisiaan. Nurkkatyyppejä on monia erilaisia, ja ne eroavat toisistaan niin ulkonäöllisesti kuin teknisiltä ominaisuuksiltaan. Teknisistä eroista tärkein on salvoksen ilmatiiveys. Teollisessa hirsirakentamisessa käytettäviä nurkkatyyppejä ovat pitkänurkka, lohenpyrstönurkka sekä citynurkka. (Mylly 2022; Puuinfo Oy 2016; Hirsitaloteollisuus ry n.d.). Nurkkatyypeillä ei kuitenkaan ole virallisia tai yleistyneitä nimiä, ja nurkkien nimitykset voivat vaihdella valmistajan mukaan.

Tavallisin nurkkatyyppejä on pitkänurkkasalvos (kts. Kuva 6), jossa hirren päät jatkuvat nurkan yli. Siinä hirren ylä- ja alapintaan noin 200–300 mm etäisyydelle hirren päästä tehdään kolot, joihin risteävän seinän hirret voidaan asentaa ylä- ja alapuolelle. Salvosten väliin ja sivuille jätetään eristysvara, jotta liitos saadaan tiiviiksi. Hirteen voidaan tehdä pelkkä ylä- tai alasalvos, jos liittyvä hirsi asennetaan vain ylä- tai alapuolelle. Pitkänurkkasalvoksessa risteävät hirret limittyvät toisiinsa puolen hirsikerran verran. Pitkänurkkasalvosta kutsutaan myös ristinurkaksi. (Mylly 2022; Puuinfo Oy 2020).

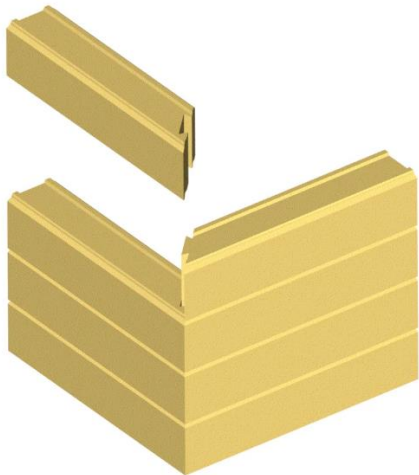


Kuva 6. Pitkänurkkasalvos (Puuinfo Oy 2020).

Lyhytnurkka on salvostyyppi, jossa risteävät hirret eivät jatku nurkan yli, ja nurkka voidaan halutessa suojata nurkkalaudoin. Lyhytnurkista yleisin on lohenpyrstönurkka (kts. Kuva 7), jossa hirren päät lukitsevat rakenteen paikoilleen. Päät on työstetty kiilamaisiksi ja ne viettävät ulospäin, jotta vesi ei pääse rakenteeseen. Myös lohenpyrstönurkassa risteävät hirret limittyvät toisiinsa puolen hirsikerran verran. Toinen lyhytnurkkatyyppi on citynurkka (kts. Kuva 8), joka on uudehko salvostyyppi. Citynurkkaa voidaan kutsua myös jiiri- tai nollanurkaksi. Citynurkka on piilosalvos, jossa hirsien päät asettuvat kohtisuorasti jiiriin. Citynurkassa liittyvät hirret ovat samassa tasossa. (Puuinfo Oy 2020; Tiainen et al. 2017).



Kuva 7. Lohenpyrstönurkka (Puuinfo Oy 2020).



Kuva 8. Citynurkka (Puuinfo Oy 2020).

2.4 Hirsirungon asentaminen

Hirret pakataan kuljetukseen asennusjärjestyksessä, ja ne on varustettu yksilöllisillä tunnuksilla. Tunnusten perusteella hirret asennetaan kehikkoon oikeille paikoilleen. (Mylly 2022). Hirsiseinät asennetaan perustusten päälle, ja perustusrakenne on tavalli-

sesti jatkuva johtuen hirsiseinän perustuksille aiheuttamasta viivamaisesta kuormituksesta (Puuinfo Oy 2020). Hirsien asentaminen suoritetaan hirsikerta kerrallaan. Jos ristikkäiset seinät ovat puolikkaan hirren verran eri tasoissa, aloitetaan hirsien asentaminen seinältä, joissa on alimpana hirtenä yläpuolikas. Jokaiseen hirsikertaan asennetaan eristeet ja tiivisteet uriin ja salvoksiin, jotta saumoista saadaan kosteus- ja ilmatii- viit. (Mylly 2022). Yleensä vaakatiivisteet asennetaan tehtaalla ja nurkkatiivisteet työ- maalla. Vaarnatapit asennetaan ohjeiden mukaisesti jokaisen hirsikerran asentamisen jälkeen ja kierretangot lopuksi, kun koko hirsikehikko on koottu valmiiksi (Mylly 2022). Tapituksesta ja kierretangoista on kerrottu tarkemmin kappaleessa 4.1.

Hirsikehikon asentaminen työmaalla on nopeaa ja onkin suositeltavaa, että runko pys- tytetään yhtäjaksoisesti. Hirsikehikon asennus onnistuu yleensä muutamassa päivä- sä. Myös vesikate suositellaan rakentamaan heti rungon jälkeen vähintään aluskattee- seen asti, jotta rakennus saadaan mahdollisimman pian säältä suojaan. (RT 82-11168 2014).

2.5 Hirsirakentamisen edut ja haasteet

Hirsirakentamiseen liittyy niin etuja ja vahvuuksia, kuin haasteita. Etuja ovat esimerkiksi teollinen valmistus ja sen myötä mittatarkkuus sekä nopea asennus, rakenteiden yksi- aineisuus sekä helpot kuljetukset. Rakenteiden ekologisuus, purettavuus ja uudelleen- käytettävyys kuuluvat hirsirakentamisen ehdottomiin vahvuuksiin. Massiivipuura- kenteena hirsirakenne toimii myös hiilivarastona. (Lahtela 2021; RT 82-11168 2014). Hirsirakennuksen etuna pidetään myös kosteusteknistä turvallisuutta hirren tasatessa si- säilman kosteuspitoisuutta, joka näkyy sisäilman laadussa (Puuinfo Oy 2020).

Hirsirakentamisen haasteet liittyvät muun muassa rakenteiden kestävyys- ja jäykkyy- teen, sekä liitoksiin, ja erityisesti näiden todentamiseen laskennallisesti. Muita haasteita ovat muun muassa hirsiseinien ankkuroinnin toteutus, painumat sekä ääneneristävyys. (Lahtela 2021).

3. HIRSI RAKENNUSMATERIAALINA

Yleisin hirsirakennusmateriaali on mänty. Se on rungoltaan suora ja melko tasapaksu, ja soveltuu siten massiivihirsien materiaaliksi. Nykyisin käytettävät hirret ovat pääasiassa lamellihirsiä, joten myös kiertyvämpi ja taipuvampi kuusi soveltuu hirsirakennusmateriaaliksi. Lamellihirsissä mänty ja kuusi ovat materiaaleina tasalaatuisia ja yhtä soveltuvia hirsirakentamiseen. Muita harvinaisempia hirsirakennusmateriaaleja ovat haapa, koivu sekä lehtikuusi. (Honkarakenne Oyj 2022; Vuolle-Apiala 2012).

3.1 Lujuusominaisuudet

Hirsien ja hirsilamellien lujuusominaisuudet määräytyvät sahatavaran lujuusluokan mukaan, ja niiden lajittelu tulee tehdä standardin SFS-EN 14081-1 vaatimusten mukaisesti. Kokonaisten hirsien lujuusluokka voidaan vaihtoehtoisesti määrittää kokeellisesti standardien SFS-EN 408 ja SFS-EN 384 mukaisesti. Pyöröhirsille voidaan käyttää myös visuaalista lajittelua. (SFS 5973:2022). Seinähirsille lujuuslajittelu ei ole välttämätöntä, mutta palkkihirsissä käytetyn sahatavaran tulee olla lujuuslajiteltua (Mylly 2022). Palkkihirsi on hirsi, joka täyttää kaikki kantavien puurakenteiden vaatimukset, ja soveltuu siten palkistoihin, joissa liimasaumoille aiheutuu leikkausrasitusta. Seinähirsiä ovat hirret, jotka voivat muodostaa kantavan seinärakenteen päällekkäin asetettuna, vaikka yksittäiset hirret eivät olisi lujuusluokiteltuja. (SFS 5973:2022). Yleisesti on ilmoitettu, että massiivihirsien lujuusluokkana voidaan käyttää luokkaa C22, lamellihirsille luokkaa C24 ja pyöröhirsille luokkaa C30 (RT 82-11168 2014). Hirsien lujuusluokat voivat kuitenkin vaihdella valmistajakohtaisesti, ja hirsivalmistajien käyttämät hirsien lujuusluokat löytyvät valmistajan ETA-dokumentista (eurooppalainen tekninen arviointi).

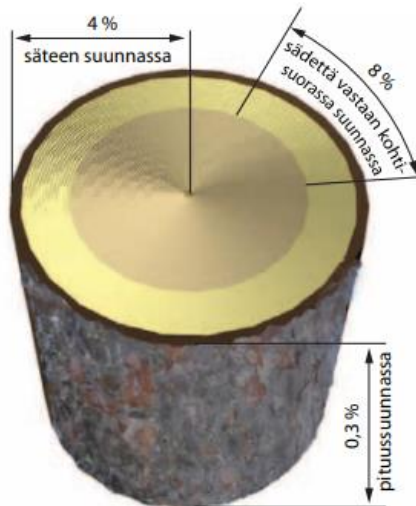
Hirsirakenteen mitoituksessa käytetään siten hirren lujuusluokan mukaisia ominaislujuuksia (taivutus-, veto-, puristus- ja leikkauslujuus), jäykkyysominaisuuksia (kimmo- ja liukumoduuli) sekä tiheyksiä. Ristiinlaminoidun hirren lujuusominaisuuksia määritettäessä tulee ottaa huomioon lamellien suunnat ja leikkauspinta-alat (SFS 5973:2022). Ristiinlaminoidun hirren pituus- ja pystysuuntaiset lamellit voivat olla eri lujuusluokkaa, ja mitoituksessa käytettävät lujuusominaisuudet tulee valita sen mukaan, kumman suuntaiset lamellit toimivat kuormaa kantavana tarkasteltavassa tilanteessa. Myös lamellihirren lamellit voivat olla eri lujuusluokkaa, jolloin lamellihirren lujuusluokka voi-

daan laskea lamellien lujuusluokkien keskiarvona, jossa on huomioitu lamellien paksuudet.

3.2 Hirren kosteuskäyttäytyminen

Puu ja siten myös hirsi on hygroskooppinen materiaali, joka sitoo ympäröivän ilman vesihöyryä tai luovuttaa sitä takaisin ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden vaihdeltaessa. Hirren kosteus siis vaihtelee eri vuodenaikoina ympäröivässä ilmassa olevan suhteellisen kosteuden mukaan. Kosteusvaihtelut tapahtuvat hirren molemmin puolin noin 5 cm:n paksuisessa pintapuukerroksessa, joten paksussa hirressä sisäosassa kosteus pysyy lähes vakiona hirren saavutettua tasapainokosteuden. (RT 82-11168 2014; Hirsitaloteollisuus ry n.d.).

Kuivuessaan hirsi luovuttaa vesihöyryä ympäristöönsä, joka aiheuttaa kutistumista. Kutistumista tapahtuu säteen, poikkileikkauksen kehän, sekä syiden suunnassa. Syynsuuntainen kutistuminen on pientä muihin suuntiin verrattuna. Kuivumiskutistuma kehän suunnassa on noin 8 % ja säteen suunnassa noin 4 %, kun puu kutistuu kosteasta täysin kuivaksi. Puun kutistumista eri suunnissa on esitetty kuvassa alempana (kts. Kuva 9). Kehän suuntainen kutistuminen on kaksinkertaista säteen suuntaiseen kutistumiseen verrattuna, mikä aiheuttaa kuivuvaan puuhun jännityksiä. Näiden jännitysten ylittäessä puun vetolujuuden puu halkeaa. Halkeamien kokoon vaikuttaa puun kosteus ja koko. Halkeamia esiintyy enemmän massiivihirsissä kuin lamellihirsissä. Halkeaman leveys vaihtelee ilman suhteellisen kosteuden mukaan. Kun hirren kosteus on pieni, halkeama on suurimmillaan. Halkeamilla ei kuitenkaan ole vaikutusta hirren lämmönjohtumis- tai lujuusominaisuuksiin. Nykyisin hirsiaihiot kuivataan halkeamien vähentämiseksi, useimmiten uunikuivatuksella. Halkeilua voidaan myös ohjata hirteen työstävillä urilla. (RT 82-11168 2014; Hirsitaloteollisuus ry n.d.).



Kuva 9. Puun kuivumiskutistuminen eri suunnissa (RT 82-11168 2014).

3.3 Painuma

Hirsirakenteiden yksi huomioon otettava erityispiirre on painuminen, joka johtuu puun kuivumiskutistumisesta, rakenteisiin kohdistuvasta kuormituksesta aiheutuvasta kokoonpuristumasta, puun virumisesta pitkäaikaisesta kuormituksesta johtuen, sekä hirsikertojen välisten saumojen tiivistymisestä. Painuminen on voimakkainta rakennuksen valmistumisesta seuraavan kahden vuoden ajan. Rakenteen painuman suuruus riippuu hirsityypistä, ja se vaihtelee ollen noin 10–50 mm seinän korkeusmetriä kohden. Pyöröhirrestä valmistetut rakenteet painuvat eniten. Painuminen on vähäisempää, kun hirret ovat hyvin kuivatettuja ja työstettyjä sekä tarkasti asennettuja. Hirsiväliseinät rakennuksen sisällä painuvat kuivumisesta johtuen ulkoseiniä enemmän, sillä niiden kosteuspitoisuus asettuu ulkoseiniä matalammaksi. Jos rakennuksessa on tasoeroista johtuvia erikorkuisia hirsiseiniä, painuu korkeammat hirsiseinät matalampia enemmän. (Mylly 2022; Puuinfo Oy 2020; Hirsitaloteollisuus ry n.d.).

Suuri osa hirsirakenteiden painumasta johtuu kosteusmuodonmuutoksesta eli hirren kuivumiskutistumasta. Kosteusmuodonmuutoksen aiheuttaman painuman suuruuteen vaikuttaa paljon hirsityyppi, sillä hirsityypeille on asetettu erilaiset vaatimukset hirren toimituskosteudelle. Toimituskosteus ilmoitetaan yleensä valmistuskosteutena, joka on hirren valmistuksen yhteydessä mitattu hirren kosteuspitoisuus. Valmiit hirret tulee olla varastoitu siten, että valmistamisen jälkeen kosteuspitoisuus pysyy toleranssien mukaisissa rajoissa. Kosteuspitoisuus saa olla pyöröhirrellä enintään 26 %, kulmikkaalla massiivihirrellä enintään 24 % ja lamellihirrellä enintään 18 %. (SFS 5973:2022). Hirren kosteuspitoisuus asettuu lämmitetyssä sisätallassa noin 8 %:iin ja ulkoseinässä noin 14 %:iin kuivapainosta (Hirsitaloteollisuus ry n.d.). Pyöröhirren kosteuspitoisuus siis muut-

tuu kaikkein eniten sen asettuessa rakennuksen kosteuspitoisuuden tasolle, ja siten kosteusmuodonmuutoksen aiheuttama painuma on pyöröhirrellä kaikkein suurin. Hirsiseinän painuman laskentaa on käsitelty kappaleessa 5.6, ja kappaleessa 5.6.3 on erikseen esitetty kosteusmuodonmuutoksen aiheuttaman painuman laskentaa.

Hirsirungon painuminen tulee huomioida, kun suunnitellaan painumattomien rakenteiden liittymiä hirsirunkoon. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi rankarakenteiset tai muuratut väliseinät, ikkunat ja ovet, koolaukset sekä pilarit. Painumattomien rakenteiden liittymät hirsirunkoon voidaan toteuttaa painumavaroilla, painuman sallivilla karapuilla, säätöjaloilla ja muilla liikkeen sallivilla kiinnikkeillä. Painuman sallivat liitokset tulee tarpeen mukaan lämpöeristää ja tiivistää. (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2020; Hirsitaloteollisuus ry n.d.).

Myös välipohjaa tuettaessa hirsirunkoon painuma täytyy ottaa huomioon. Välipohja tuetaan yhteen hirsikertaan, ja välipohjan tulee painua hirsirungon mukana, jotta rakenteiden väliset tiivistykset eivät repeä. (Lahtela 2021).

Hirsiseinien painuminen aiheuttaa myös niiden päältä kannatelluille kattorakenteille pysty- ja vaakasuuntaista liikettä. Katon painuminen on suurempaa harjalla kuin räystäällä, minkä seurauksena kattopalkit pyrkivät työntymään räystäällä ulospäin. Tämän vuoksi kattokannattajat tulee kiinnittää hirsiseiniin liukuman sallivilla kiinnikkeillä, jotta seinät eivät lähde taipumaan liikkeen mukana ulospäin. (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2020; RT 82-11168 2014).

Painumattomasta hirrestä valmistetuissa rakenteissa painuminen on niin vähäistä, että se on verrattavissa muuhun puurakentamiseen (Puuinfo Oy 2020). Siten myös painumattomasta hirrestä valmistettujen rakenteiden painuminen tulee kuitenkin huomioida, etenkin korkeita rakennuksia suunniteltaessa.

3.4 Tiiveys

Hirsirakenteen tulee olla tiivis, ja hirsirakennuksia koskevat samat rakennusvaipan ilmanpitävyysvaatimukset kuin muista materiaaleista valmistettuja rakennuksia. Rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} saa olla korkeintaan $4 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Vuosina 2012-2016 hirsitalotehtaiden hirsirakennuksille suorittamien ilmanpitävyysmittausten perusteella ilmanvuotoluvun keskiarvoksi saatiin $q_{50} = 1,6 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$, kun mittauksia oli satoja. (Puuinfo Oy 2016). Vuosina 2019–2023 tehtyjen mittausten ilmanvuotoluvun keskiarvoksi uusille hirsirakennuksille saatiin $q_{50} = 1,01 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$, kun mitattujen rakennusten määrä oli 2274 (Vertia Oy 2024). Vuoden 2023 aikana tehtyjen mittausten ilmanvuotoluvun keskiarvo uusille hirsipientaloille oli $q_{50} = 0,94 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ (Jokinen 2024). Hirsirakennuk-

sesta voidaan siis saada erittäin ilmanpitävä, ja hirsirakennusten tiiveys on mittausten mukaan parantunut huomattavasti.

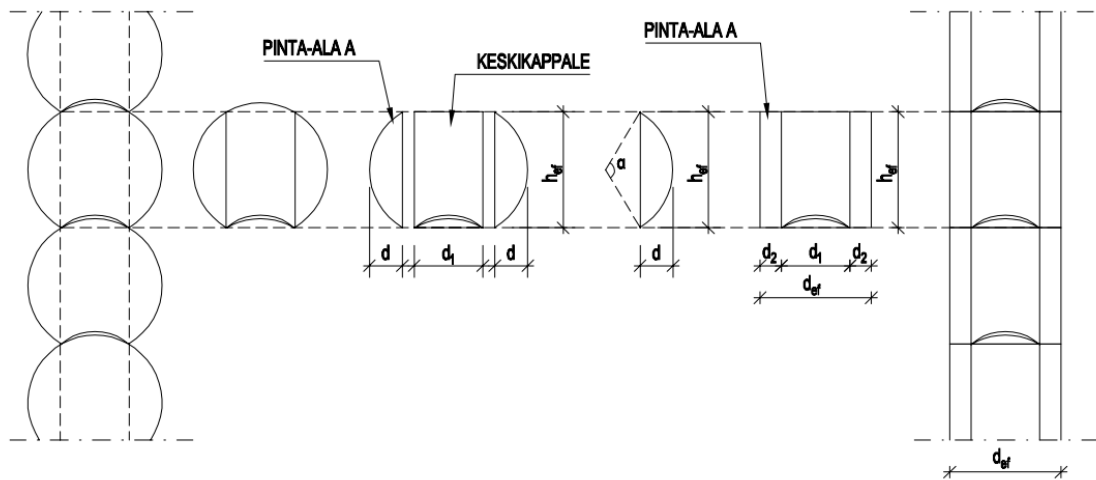
Tiiveysvaatimukset saavutetaan hirsien varausten muotoilulla sekä hirsien välisissä saumoissa käytettävillä tiivisteillä. Ilmatiiveyden kannalta kriittisimpiä paikkoja ovat ulkovaipan eri rakenneosien liitokset etenkin kohdissa, joissa tarvitaan painuma- tai liikevaraa. Rakenneosien liittymät tulee siten tiivistää soveltuvilla tuotteilla ja menetelmillä, jotta tiivisteet eivät rikkoudu rakenneosien liikkeessa. Myös läpiviennit ovat kriittisiä ilmatiiveyden kannalta, ja niiden tiivistämiseen suositellaan käytettävän laipallisia läpivientitiivisteitä. (Puuinfo Oy 2020; Puuinfo Oy 2016; RT 82-11168 2014).

3.5 Energiatehokkuus ja lämmöneristävyys

Hirsirakennusta tulee tarkastella energiatehokkuuden näkökulmasta kokonaisuutena, jossa huomioidaan myös hirsirakentamisen vähäinen ympäristökuormitus elinkaaren aikana (Puuinfo Oy 2016). Suomen rakentamismääräyksissä onkin annettu lievennetyt vertailuarvot massiivipuukurakennuksen energialuvulle (E-luku) sekä hirsirakenteiden lämmönläpäisykertoimelle (U-arvo). Hirsirakennuksen vaadittu E-luku riippuu rakennuksen käyttötarkoituksesta ja laajuudesta ja hirsirakenteiden vaadittu U-arvo rakennuksen käyttötarkoituksesta. Hirsirakennus poikkeaa ulkovaipan rakennetyyppien puolesta muista rakennuksista lähinnä vain ulkoseinän osalta, sillä ala- ja yläpohjat ovat usein samanlaisia kuin muissa rakennuksissa. Massiivisen lisälämmöneristämättömän hirsiseinän U-arvo on huonompi kuin tavanomaisen lämmöneristetyn seinän, mutta ulkoseinän suurempaa lämpöhäviötä pystytään kompensoimaan ala- ja yläpohjarakenteiden lämmöneristystä lisäämällä, ja siten niiden U-arvoja parantamalla. Massiivipuukurakenteisen ulkoseinän U-arvovaatimus, kun seinän keskimääräinen paksuus on vähintään 180 mm, on lämpimän tilan rakennukselle 0,40 W/(m²K) ja puolilämpimän tilan rakennukselle 0,60 W/(m²K). Loma-asumiseen suunnitellulle pientalolle U-arvovaatimus on 0,80 W/(m²K), ja seinän keskimääräinen paksuus tulee olla vähintään 130 mm. (Puuinfo Oy 2020; YMa 1010/2017; Puuinfo Oy 2016).

Massiivihirsiseinän U-arvo määritetään suorakulmaiselle hirrelle todellisen leveyden mukaan, eikä hirren särmien viisteitä, hirsien välisiä tilkkeitä tai hirren halkeamia tarvitse ottaa huomioon. Suorakulmaisen hirren paksuuden ollessa 270 mm päästään ulkoseinän lämmönläpäisykertoimeen $U = 0,41 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja hirren paksuudella 180 mm lämmönläpäisykertoimeen $U = 0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Pyöröhirsiseinälle U-arvo määritetään pyöröhirren tehollisen leveyden mukaan, joka lasketaan muuntamalla poikkileikkaus suorakulmaiseksi tasapaksuksi hirreksi ja määrittämällä muodostuneen poikkileikkauksen leveys (kts. Kuva 10). Pyöröhirren halkaisijalla 230 mm päästään lämmönläpäisy-

kertoimeen $U = 0,53 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Lisälämmöneristämätön massiivihirsiseinä on kosteusteknisesti turvallinen ja varma ratkaisu, jossa hirsiseinän kosteus vaihtelee ilman suhteellisen kosteuden mukaan. (Puuinfo Oy 2016; RT 82-11168 2014).



Kuva 10. Pyöröhirren tehollisen leveyden määrittäminen U -arvon laskemista varten.

Hirsiseinä voidaan toteuttaa myös lisäeristettynä. Ulkopuolinen lisälämmöneristys on kosteusteknisesti ongelmaton, sillä hirsi jää rakenteen lämpimälle ja kuivalle puolelle. Tällöin hirsi ei kuitenkaan jää näkyväksi julkisivupinnaksi, sillä hirsirakenne jää piiloon eristeen ja julkisivuverhouksen taakse. Hirren ulkopuolisessa lisälämmöneristyksessä tulee lämmöneristeen ja ulkoverhouksen väliin jättää riittävä ilmarako, jotta kosteus pääsee kuivumaan eikä ulkopuolinen kosteus pääse rakenteeseen. (RT 82-11168 2014).

Hirsirakenteen sisäpuolinen lämmöneristäminen on kosteusteknisesti monimutkaisempaa. Hirsi jää rakenteen kylmälle puolelle, jolloin lämmöneristeen ja hirren rajapintaan voi tiivistyä kosteutta, joka voi aiheuttaa hirteen home- ja lahovaurioita. Jos sisäpuolinen lämmöneriste on enintään 50 mm paksu, voidaan rakenne toteuttaa ilman höyrinsulkua, mutta rakenteen sisäpuolella täytyy olla ilmansulku. Lämmöneristeen paksuuden ollessa yli 50 mm, tulee käyttää höyrinsulkua. Tiivis höyrinsulku tekee rakenteesta tuulettumattoman, jolloin rakenteen kuivumiskyky on heikko. Se lisää rakenteen riskialttiutta rakennusaikaisen kosteuden ja satunnaisten vesivuotojen kannalta. Jos lämmöneristeen ja hirren väliin jätetään tuuletusrako, ei hirren lämmöneristävyttä voida hyödyntää rakennuksen lämmöneristyksessä. (RT 82-11168 2014; Keppo et al. 2001).

3.6 Palotekniset ominaisuudet

Rakennusmateriaalit luokitellaan palo-ominaisuuksiltaan sen mukaan, miten ne vaikuttavat palon syttymiseen ja leviämiseen, savuntuottoon sekä palavaan pisarointiin. Hir-

ren luokitus on D-s2,d0. Siinä D tarkoittaa, että materiaalin osallistuminen paloon on hyväksyttävissä; s2, että savuntuotto on vähäistä ja d0, että palavia pisaroita tai osia ei esiinny. Näkyvä puupinta luokitellaan siis paloon osallistuvaksi tekijäksi, mikä hankaloihtaa hirren käyttöä julkisissa rakennuksissa. (RT 82-11168 2014). Jos palomääräykset vaativat pinnoilta korkeampaa luokkaa kuin D-s2,d0, voidaan lievennyksiä luokkavaatimuksiin saada esimerkiksi automaattisella sammutuslaitteistolla (Puuinfo Oy 2020). Hirren palonsuojakäsittelyllä voidaan päästä luokitukseen B-s1,d0, joka useissa tapauksissa on riittävä. Luokitusta voidaan käyttää vain testatuille hirsityypeille, ja palonsuojakäsittelyn toteutus ja laadunvarmistus tulee tehdä palonsuoja-aineen valmistajan ohjeiden mukaisesti. (K69/2019; Nordtreat Finland Oy 2024). Myös verhoamalla hirsipinnat luokkavaatimukset täyttävällä suojaverhouksella saadaan palotekniset vaatimukset täytettyä. Yli 2-kerroksisissa hirsirakennuksissa (P2-paloluokan rakennus) suositeltavaa on käyttää toiminnallista palomitoitusta, jonka avulla hirsipintoja todennäköisesti pystytään jättämään näkyviin. (Puuinfo Oy 2020; Puuinfo Oy 2016). Lisätietoa puu- ja siten hirsirunkoisten rakennusten suunnittelusta paloturvallisuuden näkökulmasta löytyy Puuinfon julkaisemasta Paloturvallinen Puutalo -oppaasta (2021).

Hirsirakenteen palonkesto-ominaisuudet riippuvat hirsiprofiilin dimensioista, sauman muotoilusta ja tiivistemateriaalista. Palonkesto on sitä parempi, mitä paksumpaa hirttä käytetään. Hirsien välisen sauman tiivistemateriaali tulee olla sellainen, ettei se heikennä seinän palo-ominaisuuksia, esimerkiksi lasivillakaistale. Sauman muotoilulla pystytään vaikuttamaan siihen, saavuttaako hiiltymäkerros tiivistemateriaalia, ja siten osallistuuko tiivistemateriaali paloon. (Tiainen et al. 2017; RT 82-11168 2014).

Hirsi toimii palossa kuten muutkin puurakenteet, eli puun pintaan syntyvä hiilikerros alkaa suojaamaan puuta palamiselta (Puuinfo 2020). Suojaamaton hirsiseinä on massiivipuurakenne, ja sen hiiltymissyvyys voidaan määrittää eurokoodin SFS-EN 1995-1-2 mukaisella laskentamenetelmällä (Puuinfo 2016). Havupuusahatavaran yksidimensio-naalisen hiiltymisnopeuden mitoitusarvo on $\beta_0 = 0,65$ mm/min (RIL 205-2-2019). Tätä arvoa voidaan olettaa käytettävän myös hirsiseinälle. Hiiltymämitoituksen perusteella saadaan selville palotilanteen tehollinen poikkileikkaus, eli hirren poikkileikkauksen se osa, joka toimii kuormaa kantavana palotilanteessa. Tehollisen poikkileikkauksen avulla voidaan määrittää hirsiseinän palotilanteen kantavuus pysty- ja vaakakuormille. Hiiltyneen hirsiseinän mitoituksesta nurjahduksen suhteen ongelmallista tekee se, ettei hirsiseinälle ole yleisiä nurjahdusmitoitukskaavoja palomitoitukseen (Puuinfo Oy 2016).

Hirsiseinien palonkestävyys perustuukin siis koekuormituksiin. Vuonna 2006 VTT on antanut lausunnon hirsiseinien palonkestävyydestä. Siinä hirsiseinille on määritetty palonkestoluokat kantavuuden sekä osastoivuuden suhteen VTT:n suorittamien palon-

kestävyyskokeiden perusteella. Kokeessa seiniä kuormitettiin 9,4 kN/m keskeisellä kuormalla. Lausunnossa on siten määritetty hirsien sekä saumojen mitoille vähimmäisvaatimuksia kuhunkin palonkestoluokkaan eri hirsityypeille. (VTT-S-1274-06). Alla esitetyissä taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2) on esitetty lausunnon VTT-S-1274-06 mukaisia eri hirsityyppien palonkestävyyksiä eripaksuisille seinille eri tuentatapauksissa. Tuentatapaus 1 tarkoittaa lamellihirrelle, että tapitusväli on enintään 1000 mm ja terästankojen väli enintään 3000 mm, pyörähirillä tapitusväli saa olla korkeintaan 800 mm ja terästankojen väli korkeintaan 2400 mm ja lisäeristetyillä höylähirsiseinillä tapitusväli saa olla enintään 1000 mm ja terästankojen väli 2600 mm. Tuentatapauksessa 2 tapitusväli saa olla lamellihirrellä 1600 mm, pyöröhirrellä 1200 mm ja lisäeristetyillä höylähirrellä 1600 mm. Tuentatapauksessa 2 terästankojen seinää koossa pitävää vaikutusta ei huomioida. (VTT-S-1274-06).

Taulukko 1. Kantavien hirsiseinien palonkestävyys kantavuuden R ja osastoivuuden EI suhteen eripaksuisille seinille tuentatapauksessa 1. Seinän keskeinen kuorma enintään 9,4 kN/m. Myös sauman leveyden minimimitta on esitetty. (VTT-S-1274-06).

Hirsityyppi	Palonkestoluokka			
Lamellihirsi	R30	R60	R90	R120
leveys x korkeus (mm^2)	84 x 170	112 x h ¹⁾	145 x h ¹⁾	178 x 195
sauman leveys (mm)	62	90	123	154
	EI30	EI60	EI90	EI120
leveys x korkeus (mm^2)	84 x 170	122 x h ¹⁾	164 x h ¹⁾	-
sauman leveys (mm)	62	100	140	
Pyöröhirsi	R30	R60	R90	R120
hirren halkaisija (mm)	112	155	190	-
sauman leveys (mm)	60	83	102	
	EI30	EI60	EI90	EI120
hirren halkaisija (mm)	112	155	190	-
sauman leveys (mm)	60	83	102	
Höylähirsi	R30	R60	R90	R120
+ eriste				

+ hirsipaneeli				
leveys x korkeus (mm^2)	b x 170 ^{2),3)}	75 x 170 ³⁾	-	-
sauman leveys (mm)	b – 22	53		
	EI30	EI60	EI90	EI120
leveys x korkeus (mm^2)	b x 170 ^{2),3)}	75 x 170 ³⁾	-	-
sauman leveys (mm)	b – 22	53		
¹⁾ h = 170–195 mm ²⁾ Leveys b normaalilämpötilamitoituksen mukaan ³⁾ Höylähirsiseinän tulen puolella lisäksi eriste ja hirsipaneeli, kuorma keskeisesti hirteen nähden.				

Taulukko 2. Kantavien hirsiseinien palonkestävyys kantavuuden R ja osastoivuuden EI suhteen eripaksuisille seinille tuentatapauksessa 2. Seinän keskeinen kuorma enintään 9,4 kN/m. Myös sauman leveyden minimimitta on esitetty. (VTT-S-1274-06).

Hirsityyppi	Palonkestoluokka			
	R30	R60	R90	R120
Lamellihirsi				
leveys x korkeus (mm^2)	109 x 170	160 x h ¹⁾	202 x h ¹⁾	-
sauman leveys (mm)	87	138	180	
	EI30	EI60	EI90	EI120
leveys x korkeus (mm^2)	109 x 170	170 x h ¹⁾	221 x h ¹⁾	-
sauman leveys (mm)	87	148	199	
Pyöröhirsi				
hirren halkaisija (mm)	150	236	-	-
sauman leveys (mm)	81	127		
	EI30	EI60	EI90	EI120
hirren halkaisija (mm)	150	236	-	-
sauman leveys (mm)	81	127		
Höylähirsi				
	R30	R60	R90	R120

+ eriste				
+ hirsipaneeli				
leveys x korkeus (mm^2)	b x 170 ^{2),3)}	121 x 170 ³⁾	-	-
sauman leveys (mm)	b – 22	99		
	EI30	EI60	EI90	EI120
leveys x korkeus (mm^2)	b x 170 ^{2),3)}	121 x 170 ³⁾	-	-
sauman leveys (mm)	b – 22	99		
¹⁾ h = 170–195 mm ²⁾ Leveys b normaalilämpötilamitoituksen mukaan ³⁾ Höylähirsiseinän tulen puolella lisäksi eriste ja hirsipaneeli, kuorma keskeisesti hirteen nähden.				

Tuotevalmistajat ovat teettäneet palonkestokokeita myös uudemmille seinärakenteille ja hirsityypeille. Koetulosten perusteella palonkesto-ominaisuudet ovat lausunnon VTT-S-1274-06 mukaisia tai parempia. Eri hirsivalmistajien painumattomasta hirrestä valmistetuilla seinärakenteilla päästiin lausuntoa VTT-S-1274-06 parempiin palonkestävyystuloksiin. (VTT-S-02716-18; VTT-S-05407-15; Eurofins S-03468-18). Suunnittelussa voidaan siis käyttää taulukoiden 1 ja 2 mukaisia tietoja hirsiseinien palonkestävyyttä määritettäessä, mutta tarkemman palonkeston selvittäminen tietyille hirsityypille tuotevalmistajalta on suositeltavaa.

Palonkestokokeisiin perustuvat hirsiseinien palonkesto-ominaisuudet on määritetty 9,4 kN/m keskeiselle kuormitukselle, ja tämä tulee huomioida suunnittelussa. Siten hirsiseinälle kohdistuvan kuorman suuruus palotilanteen mukaisella murtorajatilan kuormitusyhdistelmällä ei saa olla yli 9,4 kN/m. Hirsiseinien pystykuorman kestävyys normaalitilanteessa on usein paljon tätä suurempi, joten palotilanne voi tulla siten mitoittavaksi kuormitustapaukseksi niiden hirsiseinien osalta, joilta vaaditaan kantavuutta tai osastoivuutta palotilanteessa.

3.7 Ääneneristävyys

Hirsiseinän ääneneristävyteen vaikuttaa hirsiseinän massa, varausten tiiveys sekä hirsiseinän jäykkyys, ja nämä paranevat hirren paksuuden kasvaessa (Puuinfo Oy 2020). Rakennusten ääneneristysvaatimusten täyttäminen puurakenteilla ei yleensä

onnistu yksikerrosrakenteena pelkällä massiivipuulla, sillä rakenteella ei ole tarpeeksi massaa massalain mukaisesti toimivaan ääneneristävyyteen. Siten ääneneristysvaatimusten täyttäminen vaatii yleensä monikerrosrakenteiden käyttämistä. (Puuinfo Oy 2016).

Eristämättömän hirsiseinärakenteen, eli yhdestä hirsikerroksesta koostuvan hirsiseinän laskennallinen ilmaääneneristävyytluku R_w vaihtelee 35–40 dB välillä, kun hirren paksuus vaihtelee 90–270 mm välillä (Puuinfo Oy 2020). Hirsivalmistajat ovat teettäneet omille hirsityypeilleen ääneneristävyytlaskelmia, ja esimerkiksi Honkarakenne Oy:n 270 mm paksuisen lamellihirren ilmaääneneristävyytluvuksi on saatu 44 dB (Helimäki Akustikot 2015). Ulkoseinien ääneneristävyyttä voidaan parantaa seinän ulko- tai sisäpuolisella levytyksellä ja lisäeristyksellä, jolloin kyseessä on akustisen toiminnan kannalta kaksinkertainen rakenne. Lisäeristuksen ja levytyksen avulla laskennallinen ilmaääneneristävyys vaihtelee 43–56 dB riippuen hirren ja eristeen paksuudesta sekä käytettävästä levytyksestä. (Puuinfo Oy 2020; RT 82-11168 2014).

Hirsirakennuksen huoneistojen väliset seinärakenteet saadaan täyttämään ääneneristysvaatimukset, kun ne toteutetaan kaksinkertaisena hirsirakenteena tai verhoillaan molemmilta tai toiselta puolelta rankarakenteisella levyseinällä. Kaksinkertaisessa hirsirakenteessa hirsikerrosten väli eristetään, jotta ääneneristävyys paranee. Rakenne on melko kallis ja voi muodostua siten kustannustekniseksi haasteeksi. (Puuinfo Oy 2020; Puuinfo Oy 2016). Lisätietoa puu- ja siten hirsirakennusten ääneneristävyyden suunnittelusta löytyy Puuinfon julkaisemasta Ääneneristys puutalossa -oppaasta (2021), joka sisältää tietoa esimerkiksi sivutiesiirtymien huomioon ottamisesta ja hirsien välisten saumojen tiiveyden vaikutuksesta ilmaääneneristävyyteen, sekä esimerkkejä kerroksellisista hirsirakenteista.

3.8 Hirren tuotesertifiointi

Hirsille ei ole olemassa harmonista eurooppalaista tuotestandardia (hEN), ja siten hirsistä ei ole välttämätöntä CE-merkitä. Hirret voidaan kuitenkin CE-merkitä eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) perusteella. ETA-dokumentit ovat valmistajakohtaisia, ja ne laaditaan soveltuvan eurooppalaiseen arviointiasiakirjaan (EAD) perustuen. Hirsien ETA-dokumentit laaditaan EAD 130022-00-0304 perusteella. Lisäksi hirsirakennuksien rakennussarjoille voidaan hakea ETA-arviointia ja siten CE-merkintää EAD 340308-00-0203 perusteella. ETA-menettely on valmistajalle vapaaehtoinen. (SFS 5973:2022; Puuinfo Oy 2020).

ETA-menettelyyn perustuva CE-merkinnän hakeminen on suositeltavaa etenkin sellaisille harmonisoituihin tuotestandardeihin kuulumattomille tuotteille ja tuotesarjoille, joita on aikomus myydä kotimaan lisäksi muualle EU-talousalueelle. Kun tuotteelle on myönnetty ETA, suorittaa sertifiointielin tuotannon laadunvalvonnan alkutarkastuksen, jonka täyttäessä vaatimukset myönnetään todistus suoritustason pysyvyydestä, eli CE-sertifikaatti. Kun sertifikaatti on myönnetty, tulee valmistajan laatia tuotteelle suoritustasoilmoitus (DoP) ja CE-merkitä tuote. Sertifikaatin voimassaolon edellytyksenä on tuotannon laadunvalvonnan jatkuva seuranta, ja siten sertifiointielin tekee seurantakäyntejä tuotantolaitokselle. Massiivihirsien osalta seurantakäyntejä tulee olla vähintään keran vuodessa, lamellihirsien osalta vähintään kaksi kertaa vuodessa. ETA:n hakeminen on valmistajalle vapaaehtoista, mutta jos ETA-dokumentti haetaan, on CE-merkintä ja suoritustasoilmoituksen laatiminen pakollista ETA:n ja CE-sertifikaatin myöntämisen jälkeen. (Hakkarainen 2022; SFS 5973:2022; Puuinfo Oy 2020).

Eurooppalaisten harmonisoitujen tuotestandardien piiriin kuulumattomien tuotteiden vaatimustenmukaisuus voidaan osoittaa myös kansallisia hyväksyntämenettelyjä noudattamalla. Kansallisen hyväksyntämenettelyn avulla voidaan osoittaa, että CE-merkinnän soveltamisalaan kuulumaton rakennustuote täyttää maankäyttö- ja rakennuslain asettamat vaatimukset. Rakennustuotteiden kansallisia hyväksyntämenettelyjä ovat tyyppihyväksyntä, varmennustodistus sekä valmistuksen laadunvalvonnan varmentaminen. Hirsirakenteille ei kuitenkaan ole olemassa tyyppihyväksynnän edellyttämää asetusta eikä varmennustodistuksen arviointiperusteita, joten hirsirakenteiden vaatimustenmukaisuus voidaan osoittaa näistä ainoastaan valmistuksen laadunvalvonnalla. (Puuinfo Oy 2020).

4. HIRSIRUNGON TOIMINTAPERIAATE

Hirsirakenteiset rakennusosat ovat massiivipuurakenteita, jotka voidaan toteuttaa pelkillä hirsillä ilman muita rakennekerroksia. Ne voivat muodostaa rakenteeseen sen sisäpinnan, kantavan rungon, äänen- ja lämmöneristyksen sekä ulkoverhouksen. Joissakin tapauksissa hirsirakenteisiin täytyy lisätä rakennekerroksia paloteknisten vaatimusten täyttämiseksi sekä ääneneristävyuden parantamiseksi. (Puuinfo Oy 2020).

Hirren pääasiallinen käyttökohde on seinissä, jossa hirret asennetaan päällekkäin vaakasuuntaan. Hirren poikkileikkauksen profiiliin ja nurkkasalvosten avulla päällekkäiset hirsikerrat liittyvät toisiinsa. (Puuinfo Oy 2020). Hirsiseinän enimmäispituus on aiemmin ollut noin 7 metriä johtuen saatavilla olevasta puustosta. Nykyisin teollinen valmistus, lamellihirsi sekä sormijatkaminen mahdollistavat paljon pidemmätkin hirret ja siten pidemmät hirsiseinät. Pitkissä hirsiseinissä tulee kuitenkin huomioida seinän riittävä poikittaisjäykistys. (Mylly 2022). Hirsirunko on kantavaseinäinen rakennusjärjestelmä, jossa kantavat seinät jatkuvat yleensä yläpohjaan asti yhtenäisenä, ja vaakarakenteet kiinnitetään seinien kylkeen. Vaakarakenteet voivat olla palkki-, ristikko- tai levyrakenteisia (esim. CLT-levy). (Puuinfo Oy 2020).

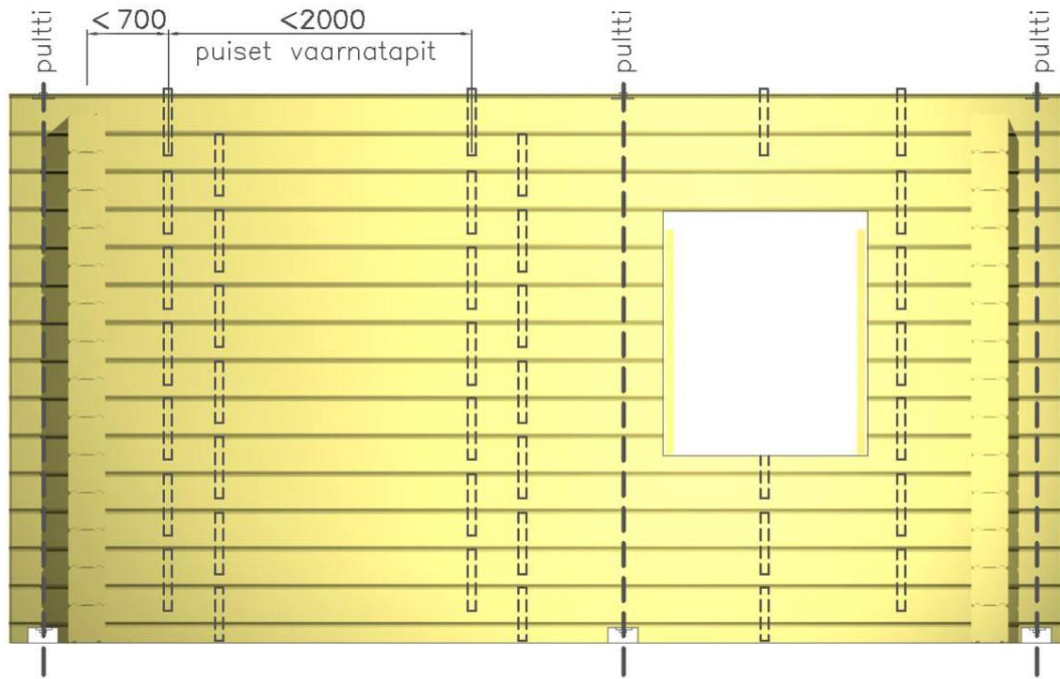
Hirsiseinät toimivat rakennuksessa niin pystykuormia kantavina kuin jäykistävinä rakennusosina, minkä vuoksi seinien tulisi sijaita samoilla kohdilla eri kerroksissa (Puuinfo Oy 2020). Kantavat hirsiseinät siirtävät pystykuormat rakennuksen perustuksille päällekkäisten hirsien välityksellä. Hirret ovat irrallisia päällekkäin pinottuja kappaleita, eikä seinä siten voi ottaa vastaan taivutusta sen pystysuunnassa. Seiniin kohdistuvat vaakakuormat (esim. tuulikuormat) välittyvät vaakasuuntaisten hirsien kautta jäykistäville poikittaisseinille. Hirsiseinän toimintaperiaate muistuttaa siis vaakaraudoitettua harkkoseinää. (Puuinfo Oy 2016).

4.1 Hirsiseinän tapitus ja pulttaus

Hirsiseinässä käytetään aina tapitusta. Tapit voivat olla puuta tai terästä, ja niiden sijasta voidaan käyttää myös ruuveja. Kun tapitus tehdään puu- tai terästapeilla, tapit ovat yleensä neliön muotoisia ja tapitusreikä pyöreä, jotta sovitus on riittävän tiukka eikä kitka estä seinän painumaa. Puutappeja käytettäessä tapin koko on yleensä 32 mm x 32 mm. Tapituksen tarkoituksena on sitoa päällekkäiset hirsikerrat toisiinsa, sekä seinän

pystytysvaiheessa ohjata seinä paikoilleen ja pitää päällekkäiset hirret paikoillaan pysty- ja sivusuunnassa ennen pulttien asennusta. Tapituksen avulla hirsiseinästä muodostuu yhtenäinen, painuman salliva levyrakenne. Tapitus tehdään yleensä nurkkasalvosten ja aukkojen läheisyyteen. Ensimmäisen tapitusrivin etäisyys salvoksesta saa olla enintään 700 mm ja tappirivien keskinäinen välimatka enintään 2000 mm. Tapitus tehdään kahdelle vierekkäiselle läpireiälle siten, että tapit vuorottelevat hirsikerroittain. Vaarnatapeissa tulee huomioida painumavara, eli tapin yläpäähän pitää olla selvästi hirren pintaa alempana, jotta hirsiseinän painumisen myötä tapit eivät ala kantaa pystykuormaa. Myös tappien välille on jätettävä painuman salliva väli. Tapitusta voidaan hyödyntää myös hirsiseinään kohdistuvan leikkausvoiman välittämiseen hirsien välillä, etenkin jos tapitus on tehty terästapeilla. Tappien leikkausvoimakestävyys on kuitenkin pieni ja leikkausvoiman siirtämiseen tarvittava vaarhaus hoidetaan yleensä muilla keinoin, kuten ruuvivaarnauksella. (Mylly 2022; Puuinfo Oy 2016; RT 82-11168 2014; Rakentajan tietokirjat 2006).

Läpipulttauksella tarkoitetaan koko seinän tai hirsipalkin korkeuden läpi ulottuvaa kiristettävää kierretankoa, jonka avulla rakenne sidotaan yhdeksi kokonaisuudeksi ja joka myös vahvistaa rakennetta. Kierretankojen molempiin päihin asennetaan aluslevy ja mutteri. Käytettävien kierretankojen koko vaihtelee valmistajakohtaisesti, yleisimmin välillä M10-M16. Kierretangot sijaitsevat hirsiseinässä yleensä vähintään nurkkasalvosten vieressä ulko- tai sisäpuolella ja lisäksi tarvittaessa aukkojen läheisyydessä tai pitkien seinien keskellä. Kierretankoja kiristetään hirsiseinän painuessa, ja kiristämällä vähennetään painumisesta aiheutuvaa hirsikehikon löystymistä. Kiristämistä varten seinään on jätettävä aukko, jos pulttia ei muuten voi jättää rakenteessa näkyviin. Painumattomista hirsistä valmistetuissa hirsiseinissä kierretangot eivät ole välttämättömiä. (Mylly 2022; Puuinfo Oy 2020; RT 82-11168 2014; Keppo et al. 2001). Kierretankoja ei huomioida hirsiseinässä kuormaa kantavina, joten niitä ei tarvitse huomioida hirsiseinän laskennallisessa mitoituksessa. Kierretangot kuitenkin vahvistavat rakennetta, joten niiden huomioiminen esimerkiksi seinän nurjahduskestävyyden määrittämisessä olisi perusteltua. Kierretankojen hirsiseinää vahvistavasta vaikutuksesta olisi siis jatkotutkimustarpeita. Tapituksen ja läpipulttauksen periaatetta on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 11).

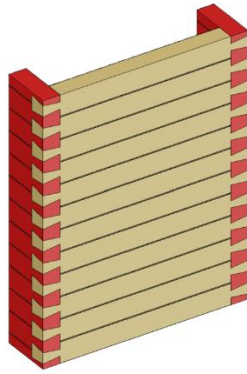


Kuva 11. Esimerkki hirsiseinän tapituksesta ja läpipulttauksesta (Hirsitaloteollisuus ry n.d.).

4.2 Hirsirungon toiminta pystykuormille

Hirsirungossa pystykuorman kantokykyä rajoittaa useimmiten seinän nurjahduskestävyys. Hirsiseinän nurjahduskestävyyttä voidaan kasvattaa hirttä leventämällä. (Puuinfo Oy 2020). Koska hirsiseinällä ei ole taivutuskestävyyttä pystysuunnassa, seinän nurjahdusmitoitus on haasteellista. Eurokoodissa ei ole ohjeita hirsiseinän nurjahdusmitoitukseen, ja hirsiseinän pystykuormien kantokyky ja mitoitussuositukset perustuvatkin pääasiassa koekuormituksista saatuun tietoon. Hirsiseinien pystykuormien kantokyky on kuitenkin hyvä, eikä se ole este esimerkiksi monikerrosrakentamiselle. (Puuinfo Oy 2016).

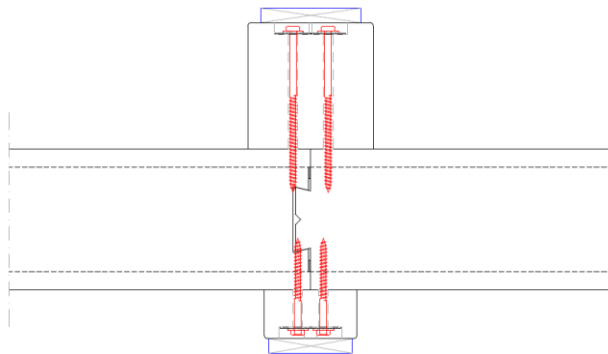
Jotta hirsiseinä voi toimia pystykuormia kantavana rakenteena, se tarvitsee vaakasuuntaisen tuennan. Seinän vaakasuuntainen tuenta eli poikittaisjäykistys voidaan toteuttaa poikittaisilla seinillä (kts. Kuva 12) tai seinäkaistoilla sekä tukipuilla eli följäreillä. Poikittaistukien välimatkalla on merkittävä vaikutus seinän nurjahduskestävyyteen. (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2020).



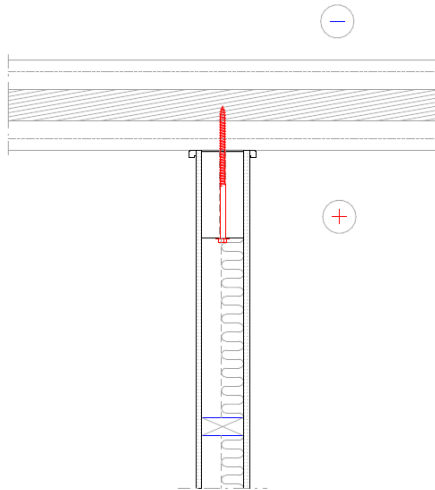
Kuva 12. Poikittaisilla seinillä tuettu hirsiseinä (Puuinfo Oy 2020).

4.2.1 Följärit

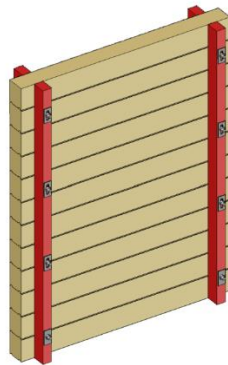
Tukipuulla eli följäriellä tarkoitetaan pystysuuntaista puuta, jota käytetään hirsiseinien nurjahtamisen estämiseen. Följäreillä voidaan siis toteuttaa hirsiseinän poikittaistuenta ilman, että seinää tarvitsee tukea poikittaisella seinällä. Tämä mahdollistaa pidemmät hirsiseinät esimerkiksi avoimissa tiloissa, missä tilaa ei haluta rikkoa väliseinillä. Följärit voidaan sijoittaa seinän molemmin puolin tai vain seinän toiselle puolelle. Jos följärit asennetaan seinän molemmin puolin, voidaan ne pultata toisiinsa kiinni seinän läpi tai kiinnittää suoraan hirsikehikkoon, mikä on nykyisin läpipulttausta yleisempää. Yksipuoleinen följäri kiinnitetään suoraan hirsikehikkoon. Följären kiinnitys hirsikehikkoon voidaan tehdä esimerkiksi kansiruuveilla (kts. Kuva 13 ja Kuva 14). Uusissa hirsirakennuksissa yksipuoleisen följären käyttö on kaksipuoleista yleisempää. Molemmissa tapauksissa kiinnityksen tulee olla painuman salliva, sillä följäri ei painu hirsiseinän mukana. Painumattomissa hirsirakenteissa följäreiden kiinnityksissä ei tarvitse huomioida painumavaraa. (Valkonen 2024; Mylly 2022; Puuinfo 2020). Alempana olevassa kuvassa (Kuva 15) on esitetty följäreillä tuettu hirsiseinä.



Kuva 13. Följärit seinän molemmin puolin, kiinnitys ruuveilla suoraan hirsikehikkoon (Valkonen 2024).



Kuva 14. Följäri vain seinän toisella puolen, kiinnitys ruuveilla suoraan hirsikehikkoon (Valkonen 2024).



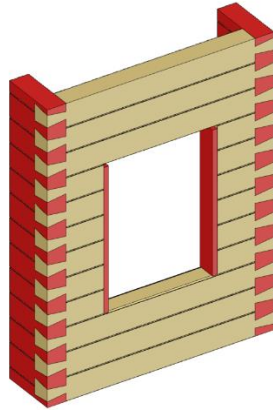
Kuva 15. Följäreillä tuettu hirsiseinä, jossa följärit seinän molemmilla puolilla (Puuinfo Oy 2020).

4.2.2 Karapaut

Hirsiseinässä aukkojen pielillä on iso merkitys pysty- ja vaakakuormituksen näkökulmasta. Aukkojen pielten tulee olla riittävän leveitä, jotta seinän pieliosa voidaan huomioida nurjahduskestävyydessä. Aukkojen pielten nurjahdustuentaan hyödynnetään aukkojen pielissä olevia karapuita. Karapaut toimivat myös ikkuna- ja ovikarmien kiinnityspintana. (Lahtela 2021). Aukon pielille ei ole kuitenkaan annettu minimimittaa, jonka täyttyessä pielen leveyttä voidaan hyödyntää nurjahduskestävyyden määrittämisessä. Karapaut asennetaan aukon pieleen hirren päätyihin tehtyyn uraan, ja niiden tehtävänä on estää hirsien sivuttainen siirtyminen (Puuinfo Oy 2020). Karapaut eivät painu hirsiseinän tavoin, joten niiden yläpään tulee jättää painumavara. Painumattomista hirsistä kootussa hirsiseinässä matalissa aukoissa ei käytetä karapuita, ja ovet ja ikkunat voidaan kiinnittää tällöin suoraan hirren päähän (Löf 2024). Mikäli painumattoman hir-

ren yhteydessä aukon pielessä käytetään karapuuta, ei painumavaraa tarvitse huomioida.

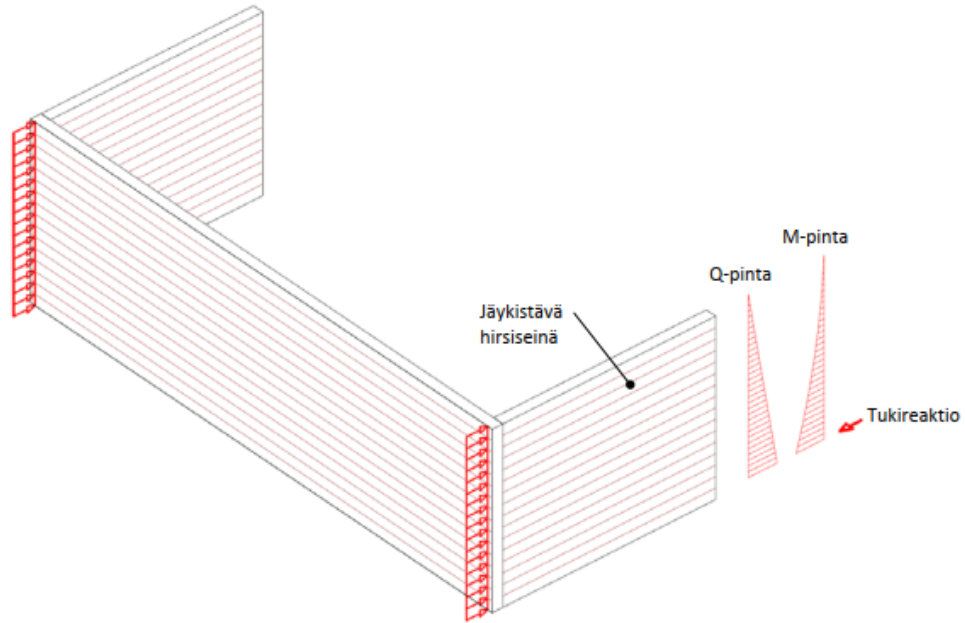
Karapuut toimivat seinään kohdistuvien vaakakuormien osalta siten, että ne toimivat palkin tavoin ja siirtävät vaakakuorman aukon ala- ja yläpuolen hirsiseinille, joiden kautta vaakakuormat siirtyvät edelleen poikittaisille seinille (Puuinfo Oy 2016). Karapuut toimivat vaakakuormille yksiaukkoisena, päistään nivelellisesti tuettuina palkkeina, joiden mitoitus voidaan tehdä eurokoodin mukaisilla palkin mitoituskaavoilla. Karapuita hyödynnetään myös hirsiseinän nurjahdustuennassa, ja karapuun poikkileikkauksen tulee olla riittävän suuri, jotta karapuun jäykkyys riittää tukemaan seinää nurjahdusta vastaan (VTT-S-05041-17). Alla olevassa kuvassa (Kuva 16) on esitetty hirsiseinä, jossa aukon pielet on tuettu karapuilla.



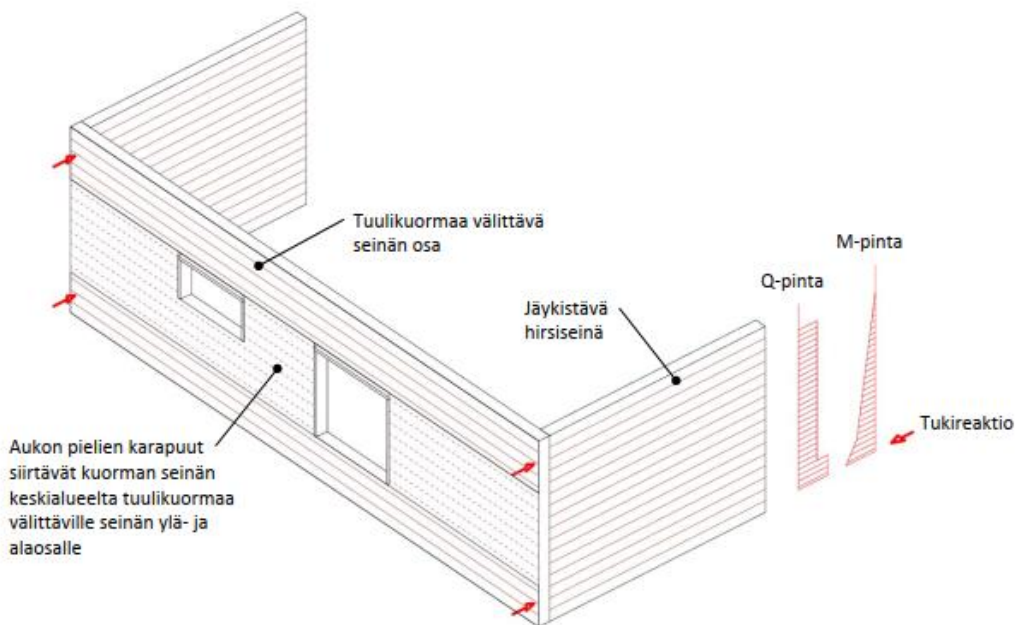
Kuva 16. Karapuut estävät aukon pielten nurjahdamisen (Puuinfo Oy 2020).

4.3 Hirsirakennuksen jäykistys

Hirsirakennuksen jäykistys toteutetaan yleensä kantavien hirsiseinien sekä rankarunkoisten väliseinien avulla. Hirsirakennuksen jäykistys toimii siten, että vaakakuormaa vasten kohtisuora hirsiseinä siirtää kuorman seinää tukeville poikittaisille seinille. Vaakakuormaa vasten kohtisuoran seinän hirret toimivat rinnakkaisina palkkeina, joiden mitoitus voidaan tehdä eurokoodin mukaisilla palkin mitoituskaavoilla. Näiden rinnakkaisina palkkeina toimivien hirsien tukina toimivat jäykistävät poikittaiset seinät, joille vaakakuormat siirtyvät. Jos vaakakuormaa vasten kohtisuorassa seinässä on aukkoja, aukon pielten karapuut toimivat palkin tavoin ja siirtävät kuorman seinän ala- ja yläosille, joiden kautta vaakakuormat siirtyvät edelleen poikittaisille jäykistäville seinille. Mikäli rankarunkoisia väliseiniä hyödynnetään jäykistyksessä, ne toimivat levyjäykisteinä, jolloin myös väliseinän ankkurointi tulee huomioida. (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2020; Puuinfo Oy 2016). Vaakakuormien jakautumista jäykistäville seinille on esitetty alla olevissa kuvissa (Kuva 17 ja Kuva 18).



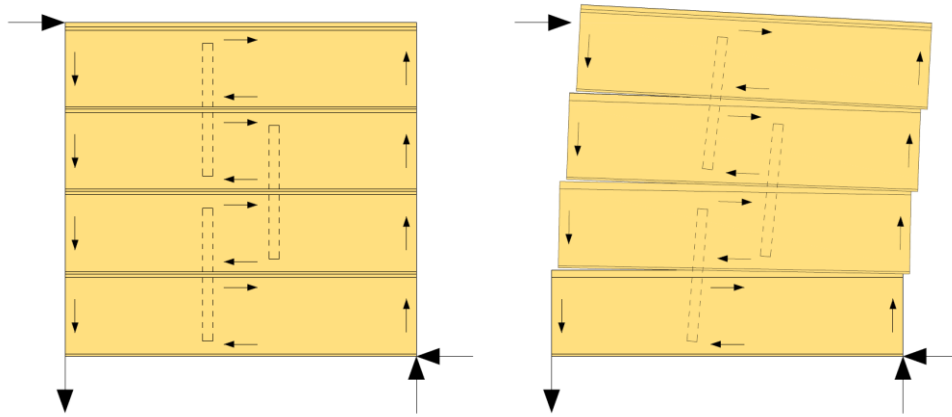
Kuva 17. Vaakakuormaa vasten kohtisuora hirsiseinä siirtää kuorman jäykistävälle poikittaisseinille (Puuinfo Oy 2016).



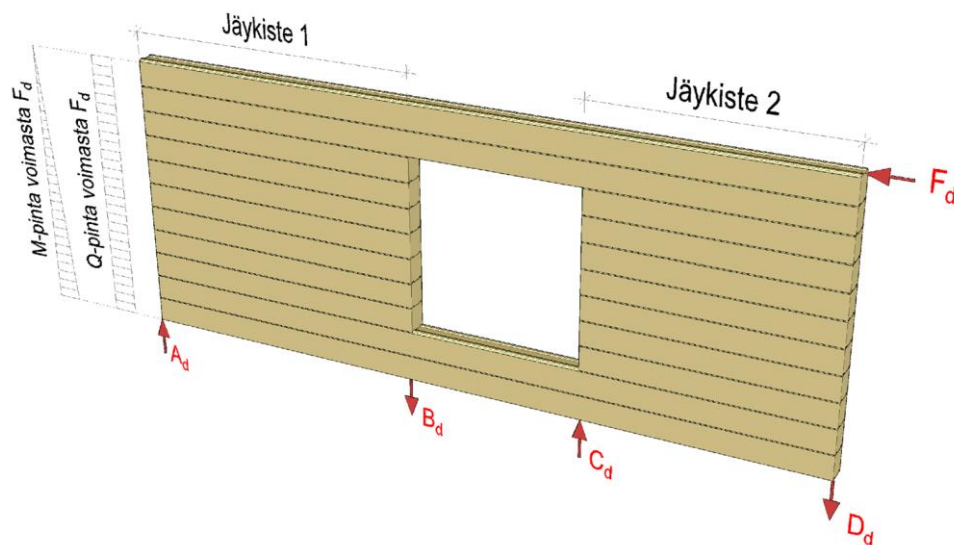
Kuva 18. Kun seinässä on aukkoja, vaakakuorma siirtyy jäykistävälle seinille aukon ylä- ja alapuolisten seinäosien kautta (Puuinfo Oy 2016).

Hirsiseinät toimivat jäykistävänä siten, että hirret on kiinnitetty toisiinsa ruuveilla, vaar-noilla, tai muulla vastaavalla tavalla, joiden avulla vaakavoimat välittyvät hirreltä toiselle ja edelleen perustuksille. Kuormien siirtymistä on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 19). Hirsiseinän mahdollinen painuminen täytyy huomioida vaarnauksen suunnittelus-sa. Usein väli- ja yläpohja eivät toimi jäykistävinä rakenteina hirsirakennuksessa.

Myöskään hirsiseinän aukkojen kohdat eivät toimi jäykistävänä, ja aukot jäykistävässä seinässä jakavat seinän erillisiin jäykistäviin osiin (kts. Kuva 20). (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2020; Puuinfo Oy 2016). Aukollista jäykistävää hirsiseinää voisi mahdollisesti tarkastella myös kehämäisenä rakenteena, jolloin ankkurointitarve perustuksiin voisi olla pienempi.



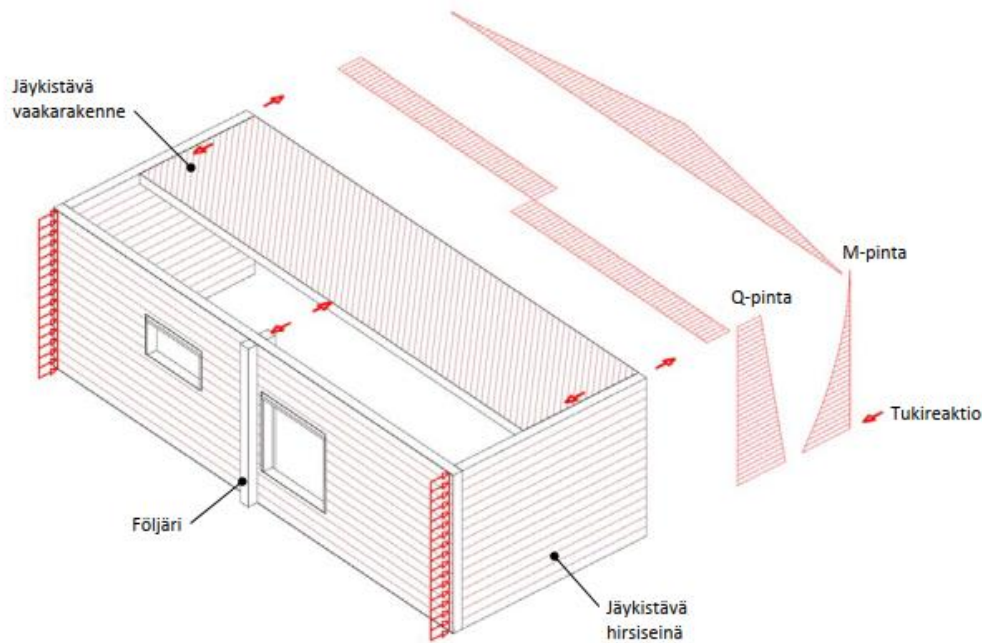
Kuva 19. Vaakakuorma aiheuttaa jäykistävälle seinälle vaaka- ja pystysuuntaisia voimia (Lahtela 2021).



Kuva 20. Aukko jakaa jäykistävän seinän kahteen jäykistävään osaan (Lahtela 2021).

Myös följäriä voidaan hyödyntää seinän vaakasuuntaisessa tuennassa, jolloin följärin yläpään tukireaktio siirretään jäykistäville seinille jäykistävän vaakarakenteen, kuten välipohjan, avulla (kts. Kuva 21). Följärin ja vaakarakenteen liitoksen tulee tällöin olla pystysuuntaisen siirtymän salliva, sillä seinä ja vaakarakenne painuvat, mutta följäri ei.

Painumattoman hirren yhteydessä följäriin ja vaakarakenteen liitoksessa ei tarvitse huomioida painumavaraa. (Puuinfo Oy 2016).



Kuva 21. Vaakakuormien siirtämisessä on hyödynnetty följäriä, jonka yläpään tukireaktio siirtyy jäykistävän vaakarakenteen kautta jäykistävälle seinille (Puuinfo Oy 2016).

4.3.1 Hirsiseinän leikkausvoimakestävyys

Vaakakuorma aiheuttaa jäykistävälle hirsiseinälle leikkausvoiman myötä vaaka- ja pystysuuntaisia voimia (kts. Kuva 19). Hirsiseinän leikkausvoimakestävyys ja siten jäykistyskapasiteetti määritetään hirren paneelileikkauskestävyyden ja hirsien välisen vaarnauksen leikkauskestävyyden perusteella. Näistä mitoittavaksi muodostuu yleensä vaarnauksen kestävyys. Vaarnaus voidaan toteuttaa esimerkiksi puu- tai terästäpituksellä, osakierteisillä ruuveilla tai painumattoman hirren tapauksessa vino- tai ristiruuvauksella. Joissain tapauksissa myös nurkkasalvosta voidaan hyödyntää leikkausvoiman siirtoon hirsien välillä. Usein nurkkasalvosten leikkauskestävyyttä ei kuitenkaan huomioida, sillä esimerkiksi lohenpyrstönurkalla se on lähes olematon. (Puuinfo Oy 2024; Puuinfo Oy 2017; Puuinfo Oy 2016; Lahtela 2021).

4.3.2 Hirsiseinän ankkurointi

Jäykistävälle seinälle kohdistuva vaakakuorma aiheuttaa seinälle myös pystysuuntaisia voimia (kts. Kuva 19). Ne aiheuttavat seinän päähän ankkurointivoiman, jos seinällä ei ole riittävästi omaa painoa kumoamaan tätä voimaa. Jotta ankkurointivoimat saataisiin mahdollisimman pieniksi, tulisi jäykistävien seinien olla mahdollisimman pitkiä, ja niille

tulisi ohjata mahdollisimman paljon omaa painoa esimerkiksi väli- ja yläpohjarakenteiden avulla. Jos ankkurointivoimat saadaan kumottua, eli seinä pysyy kokonaan puristettuna, ei seinää tarvitse ankkuroida. Muussa tapauksessa seinä tulee ankkuroida tätä nostavaa voimaa vastaan esimerkiksi kierretangoilla. Ankkurointiin käytettävää rakennusosaa tulee olla mahdollista kiristää jälkikäteen, sillä se löystyy hirsiseinän painuman vaikutuksesta. (Lahtela 2021; Puuinfo Oy 2016).

5. HIRSIRAKENTEIDEN KANTAVUUDEN ANALYSOINTI

Suomessa Maankäyttö- ja rakennuslaki, ympäristöministeriön asetukset ja ohjeet, kunnallinen rakentamisen ohjaus sekä alan standardit ja ohjeet ohjaavat rakenteiden suunnittelua. Ensisijaisena suunnittelujärjestelmänä Suomessa toimii eurokoodipohjainen suunnittelu, johon kuuluu myös eurokoodien kansalliset liitteet. Kansalliset liitteet koostuvat ympäristöministeriön asetusten ja ohjeiden teksteistä. (RIL 205-1-2017). Puurakenteiden suunnittelun osalta noudatetaan eurokoodi 5:ta eli standardeja SFS-EN 1995-1-1 ja SFS-EN 1995-1-2. Näistä ensimmäinen käsittää puurakenteiden suunnittelun yleiset säännöt sekä rakennuksia koskevat säännöt ja toinen puurakenteiden palomitoitusta. Nämä eurokoodit käsittävät myös hirsirakenteet, ja hirsirakenteiden suunnittelu tulisikin suorittaa eurokoodien ohjeiden mukaisesti. Eurokoodit eivät kuitenkaan anna erillistä ohjeistusta hirsirakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen, eivätkä kaikki puurakenteita yleisesti koskevat ohjeet sovellu sellaisenaan hirsirakenteiden suunnitteluun. Tämän vuoksi hirsirakenteiden suunnittelu perustuu eurokoodien lisäksi koekuormituksista saatuun tietoon hirsirakenteiden kestävydestä.

Tässä kappaleessa pyritään kokoamaan saatavilla olevasta aineistoista ohjeistus hirsiseinien kantavuuden analysointiin laskennallisesti. Ohjeistus käsittää teollisesti valmistetut hirret eli massiivi-, pyörö- ja lamellihirret sekä ristiinlaminoidut hirret. Mitoitusohjeistuksen oletuksena on, että rakenteisiin kohdistuvat kuormat ja kuormitusyhdistelmät sekä siten rasitukset on määritetty eurokoodien SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet ja SFS-EN 1991 Kuormat mukaisesti.

5.1 Materiaaliominaisuuksien mitoitusarvot

Mitoituksessa tarkasteltavan ilmiön materiaaliominaisuuden mitoitusarvo lasketaan SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti kaavalla

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M}, \quad (1)$$

jossa

X_k on lujuusominaisuuden tai kestävyuden ominaisarvo

k_{mod} on kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioon ottava muunnoskerroin ja

γ_M on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku.

Lujuusominaisuuden tai kestävyuden ominaisarvona X_k käytetään valitun hirren lujuusluokan mukaista arvoa. Hirren lujuusluokka tulee tarkistaa valmistajakohtaisesti.

Käytettävän muunnoskerroimen k_{mod} arvoon vaikuttaa rakenteen käyttöluokka sekä kuorman aikaluokka. Rakenteet jaotellaan ympäristöolosuhteiden mukaan käyttöluokkiin 1, 2 ja 3. Karkeasti puurakenteet jakautuvat eri käyttöluokkiin siten, että käyttöluokan 1 rakenteet ovat sisäkuivia, käyttöluokan 2 rakenteet ulkona suojassa ja käyttöluokan 3 rakenteet ulkona suojaamattomina. (RIL 205-1-2017).

Kuorman aikaluokka kertoo miten pitkään kyseinen kuorma rakenteeseen vaikuttaa. Pysyvä kuorman vaikutusaika on yli kymmenen vuotta ja siten siihen kuuluu esimerkiksi rakenteiden oma paino. Keskipitkän aikaluokan kuorma vaikuttaa muutaman kuukauden, kuten esimerkiksi lumikuorma. Tuulikuorma taas on esimerkki hetkellisestä kuormasta. Jos kuormitusyhdistelmässä on eri aikaluokkiin kuuluvia kuormia, valitaan muunnoskerroimelle k_{mod} arvo, joka edustaa lyhytkestoisinta kuormaa. (RIL 205-1-2017). Alla olevassa taulukossa (Taulukko 3) on esitetty muunnoskerroimen k_{mod} arvot, jotka koskevat hirsirakenteita. Hirsi luokitellaan muunnoskerroimien yhteydessä sahatavaraksi, ellei valmistajien ETA-dokumenteissa ilmoiteta toisin (EAD 130022-00-0304 2015).

Taulukko 3. Muunnoskerroimen k_{mod} arvoja (RIL 205-1-2017).

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka		
		Pysyvä	Keskipitkä	Hetkellinen
Sahatavara, pyöreä puutavara, liimapuu, LVL, vaneri, CLT	1	0,60	0,80	1,10
	2	0,60	0,80	1,10
	3	0,50	0,65	0,90

Hirsi voidaan olettaa luokiteltavan sahatavaraksi siten myös materiaalin osavarmuusluvun osalta. Sahatavaralle käytettävän jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien materiaalin osavarmuusluvun γ_M arvo on peruskuormitusyhdistelmissä 1,3 ja onnettomuusyhdistelmissä 1,0 (RIL 205-1-2017).

5.2 Hirsiseinän pystykuorman kestävyys

Hirsiseinän mitoitus pystykuormalle on haasteellista, sillä hirsiseinällä ei ole pystysuuntaista taivutuskestävyyttä. Eurokoodissa SFS-EN 1995-1-1 ei ole erillistä ohjeistusta hirsiseinän nurjahdusmitoitukseen, eikä eurokoodin mukainen puristetun sauvan nurjahdusmitoitus sovellu suoraan hirsiseinän mitoitukseen. Hirsiseinien pystykuormien kantokyvyn määrittäminen perustuu siten koekuormitukseen ja niiden perusteella tehtyihin mitoitussuositukseen. (Puuinfo Oy 2016).

Hirsitalovalmistajilta saadun tiedon mukaan nurkkaliitosten kestävyys on sisällytetty seinän pystykuorman kestävyden laskentaan, eikä nurkkaliitoksen kestävyttä tarkastella tai määritetä siten erikseen.

VTT Rakennustekniikka on vuonna 2000 tehnyt neljän hirsiseinän koekuormituksen, jonka perusteella on esitetty mitoitussuositus hirsiseinän pystykuorman kantokyvyn määrittämiseen. Tutkittavat hirsiseinät oli poikittaistuettu 600 mm pituisilla ristinurkilla, eli kyseessä oli pitkänurkkasalvos. Seinän pituus ristinurkkien välillä oli 4 metriä eli koko seinän pituus oli 4,6 metriä. Tutkittavista seinistä kaksi oli valmistettu massiivihirrestä, yksi pyöröhirrestä ja yksi kulmikkaasta lamellihirrestä. Seiniä kuormitettiin tasaisella kuormalla murtoon asti. Kaikki tutkittavat seinät nurjahtivat kokonaisuutena sivulle, ja kyseessä oli kimmainen nurjahdus, jossa kuormituksen loppuvaiheessa siirtymät kasvoivat voimakkaasti ilman kuorman kasvamista. Yhdessäkään seinässä ei tapahtunut paikallista murtoa, kuten esimerkiksi yhden hirren siirtymistä paikoiltaan. (RTE3718/00).

Tutkimustulosten perusteella VTT Rakennustekniikka on esittänyt seuraavanlaisen varmallalla puolella olevan mitoitussuosituksen hirsiseinien pystykuorman kantokyvyn määrittämiseen

$$F_{c,k} = F_{cc} + F_w, \quad (2)$$

jossa

$F_{c,k}$ on hirsiseinän nurjahduskestävyyden ominaisarvo (N),

F_{cc} on nurkkien puristuskestävyyden ominaisarvo (N), ja

F_w on seinäosan puristuskestävyyden ominaisarvo (N) (RTE3718/00).

Ristinurkkien puristuskestävyyden ominaisarvo lasketaan kaavalla 3

$$F_{cc} = n * f_{c,90,k} * 600 \text{ mm} * b_{ef}, \quad (3)$$

jossa

- n on ristinurkkien lukumäärä (yleensä 2) ja
- $f_{c,90,k}$ on hirren ominaispuristuslujuus, jolle käytetään arvoa $1,0 (N/mm^2)$,
- b_{ef} on hirren tehollinen leveys (mm). Kulmikkaalle hirrelle $b_{ef} = 0,75b$, jossa b on kulmikkaan hirren leveys (mm) ja pyöröhirrelle $b_{ef} = 0,5b$, jossa b on pyöröhirren halkaisija (mm) (RTE3718/00).

Seinäosan puristuskestävyyden ominaisarvo lasketaan kaavalla 4

$$F_w = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{c,90,k} * L * b_{ef} \\ f_{c,90,k} * 4000 \text{ mm} * b_{ef} \end{array} \right. \quad (4)$$

jossa

- $f_{c,90,k}$ on hirren ominaispuristuslujuus, jolle käytetään arvoa $1,0 (N/mm^2)$,
- L on seinän vapaa pituus eli nurkkien väli (mm), ja
- b_{ef} on hirren tehollinen leveys (mm), joka on määritetty kuten kaavassa 3 (RTE3718/00).

Hirsiseinän nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $F_{c,d}$ määritetään lopuksi kaavan 1 mukaisesti nurjahduskestävyyden ominaisarvon $F_{c,k}$ avulla. Hirsiseinän nurjahduskestävyys on siis nurkkien ja seinäosuuden kestävyyksien summa. Mitoitusehto hirsiseinälle on siten

$$N_d \leq F_{c,d}, \quad (5)$$

jossa

- N_d on seinän puristuskuorma murtorajatilassa (N), ja
- $F_{c,d}$ on seinän nurjahduskestävyyden mitoitusarvo (N).

Mitoitussuosituksessa on kuitenkin käyttöä rajoittavia ehtoja, minkä vuoksi seinän nurjahduskestävyyden määrittäminen on haasteellista olemassa olevasta mitoitussuosituksesta huolimatta. Mitoitussuosituksen käytön edellytykset ovat seuraavat:

- seinän korkeus saa olla korkeintaan 3 metriä,
- ristinurkkien pituus tulee olla vähintään 600 mm, mutta suurempaa pituutta ei kuitenkaan hyödynnetä laskelmissa ja
- ristinurkkien väli eli seinän vapaa pituus saa olla korkeintaan 8 metriä. (RTE3718/00).

Tämän lisäksi RT-kortissa 82-11168 on annettu kaavojen käytölle lisäehto, jonka mukaan massiivihirren hirren paksuus tulee olla vähintään 70 mm ja pyöröhirren vähintään 130 mm (RT 82-11168 2014).

Mitoitussuositus ei siten sovellu esimerkiksi monikerrosrakennusten tai avoimien tilojen seinien mitoitukseen, jos seinien korkeus on yli 3 metriä tai pituus yli 8 metriä. On myös epäselvää, soveltuuko mitoitustapa muille nurkkatyypeille kuin ristinurkalle, ja miten mitoitussuositusta tulisi soveltaa seinälle, jossa on aukkoja.

Hirsitaloalvalmistajat ovat lisäksi teettäneet koekuormituksia omille hirsityypeilleen ja niistä valmistetuille hirsiseinille. Esimerkiksi Kontiotuote Oy:n lamellihirsille ja painumattomille hirsille teetettyjen koekuormitusten ja lausuntojen mukaan VTT Rakennustekniikan lausunnon RTE3718/00 mukainen mitoitustapa soveltuu myös näille testatuille hirsityypeille (VTT-S-03337-17; VTT-S-03756-14).

Puurakennussarjojen eurooppalaisessa arviointiasiakirjassa EAD 340308-00-00203, jonka perusteella hirsitaloalvalmistajat voivat hakea ETA-dokumentteja hirsirakennusten rakennussarjoilleen, on esitetty sama edellä esitetty mitoitustapa hirsiseinien pystykuorman kestävyuden määrittämiseen. Saman EAD:n mukaan myös muille nurkkatyypeille sekä poikittaistuentatavoille kuin ristinurkalle voidaan määrittää pystykuorman kestävyys kaavan 3 mukaisesti. (EAD 340308-00-00203).

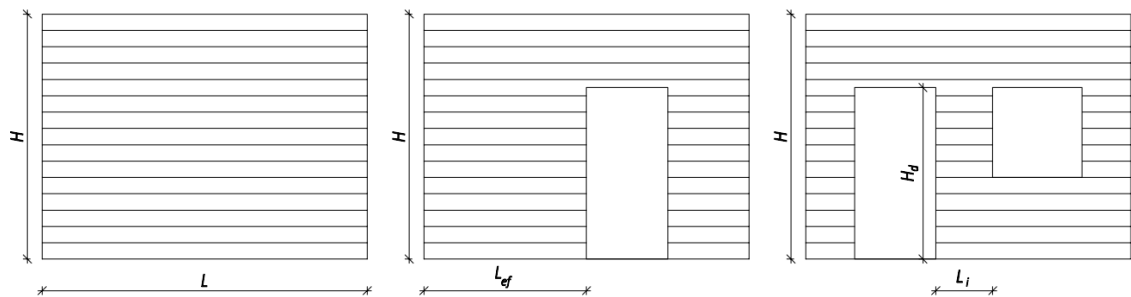
Saatavilla olevien tuotevalmistajien ETA-dokumenttien mukaan hirsiseinien pystykuormien kantavuus voidaan määrittää yllä esitetyllä tavalla, kun seinät on poikittaistuettu sekä hirret kiinnitetty toisiinsa puu- tai terästapeilla sekä kierretangoilla valmistajan ohjeiden mukaisesti. Osassa ETA-dokumenteista annetaan myös lisäohjeita ja tarkennuksia mitoitussuositukseen. Esimerkiksi Honkarakenne Oyj:n ETA-dokumentissa on esitetty samat yllä esitetyt seinien pystykuorman kestävyuden mitoituskavat, joita on kuitenkin tarkennettu seuraavasti:

- ristiinlaminoidusta hirrestä valmistetuille seinille nurkkien kestävyys on $F_{cc} = 0 N$ ja
- ristiinlaminoidusta hirrestä valmistetuille seinille käytetään seinän puristuskestävyyttä määritettäessä ominaispuristuslujuuden arvoa $f_{c,90,k} = 1,5 N/mm^2$ (ETA-03/0015 2015).

Aukollisen seinän pystykuorman kestävyuden tarkastelun voisi mahdollisesti suorittaa edellä esitetyillä kaavoilla siten, että seinän pituutena L huomioidaan vain seinän ehjät osat, eli aukkojen leveydet vähennetään seinän pituudesta. Vaatimuksena tälle oletukselle olisi, että aukon pielen karapuut ovat valmistajan ohjeiden mukaiset ja ne jäykis-

tävät aukon pielen siten, ettei nurjahdusta pääse tapahtumaan aukon pielessä. Aukon pielen leveydelle tulisi tällöin olla määritetty jokin minimimitta, jotta se voitaisiin olettaa kuormaa kantavaksi. Tälle laskentatavalle ei ole kuitenkaan mitään tutkimuspohjaa, eikä se siten sovi mitoitusperiaatteeksi ilman jatkotutkimuksia.

Hirsiseinän nurjahdusmitoitukseen voisi mahdollisesti soveltaa eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 mukaista puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitus tapaa, eli mitoittaa hirsiseinäkaistaleita pilareina. Bedon et al. (2017) on tutkinut hirsiseinien nurjahdusta ja tehnyt ehdotuksen standardisoidusta hirsiseinien nurjahdusmitoitustavasta, joka pohjautuu eurokoodin mukaisen puristetun sauvan nurjahdusmitoituksen soveltamiseen hirsiseinälle. Siinä tarkasteltavalle hirsiseinälle määritetään kriittinen nurjahduskuorma, jota pienennetään nurjahduskertoimella nurjahduskestävyyden ja siten sallitun pystykuorman määrittämiseksi. Mitoitustapa soveltuu aukottomalle hirsiseinälle sekä hirsiseinälle, jossa on yksi tai kaksi aukkoa. Nurjahduskestävyyden määrittämisessä seinän tarkasteltava leveys riippuu seinän aukotuksesta. (Bedon et al. 2017). Kriittistä nurjahduskuormaa määritettäessä aukotonta hirsiseinää ja hirsiseinää, jossa on yksi aukko, käsitellään ohuen laatan teorialla (Bedon et al. 2015). Hirsiseinän, jossa on kaksi aukkoa, kriittinen nurjahduskuorma määritetään kuten pilarille (Bedon et al. 2017). Alla olevassa kuvassa (Kuva 22) on esitetty mitoitus tavalla tarkasteltavat hirsiseinät sekä jäljempänä esitetyissä kaavoissa tarvittavia mittoja.



Kuva 22. Bedon et al. (2017) mukaisen mitoitus tavalla tarkasteltavat hirsiseinät ja kaavoissa esiintyviä mittoja.

Kriittisen nurjahduskuorman kaava aukottomalle ja hirsiseinälle, jossa on yksi aukko, on kaavan 6 mukainen

$$N_{cr,0}^{(E)} = k_{\sigma} \frac{\pi^2 b^3}{12L} * \frac{E_{90}}{\left(1 - \left(\frac{E_{90}}{2G} - 1\right)^2\right)}, \quad (6)$$

jossa

$N_{cr,0}^{(E)}$ on hirsiseinän kriittinen nurjahduskuorma (N),

- k_σ on nurjahduskerroin, joka on aukottomalle seinälle $k_\sigma = 6,97$ ja seinälle, jossa on yksi aukko $k_\sigma = 1,277$,
- b on hirren poikkileikkauksen leveys (mm),
- L on seinän pituus (mm), joka on aukottomalle seinälle seinän vapaa väli ja seinälle, jossa on yksi aukko, mitta nurkasta aukon reunaan (L_{ef}) (kts. Kuva 22),
- E_{90} on hirren lujuusluokan mukainen kimmomoduuli syysuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa (N/mm^2), ja
- G on hirren lujuusluokan mukainen liukumoduuli (N/mm^2) (Beton et al. 2017).

Laattateoriassa nurjahduskertoimeen k_σ vaikuttaa laatan reunojen tuenta. Aukottoman hirsiseinän nurjahduskerroin $k_\sigma = 6,97$ olettaa laatan eli hirsiseinän olevan neljältä sivulta tuettu, kun taas hirsiseinän, jossa on yksi aukko, nurjahduskerroin $k_\sigma = 1,277$ olettaa laatan kolmelta sivulta tuetuksi ja yhdeltä sivulta vapaaksi (Beton et al. 2015).

Kriittisen nurjahduskuorman määrittäminen hirsiseinälle, jossa on kaksi aukkoa, on esitetty kaavassa 7

$$N_{cr,0}^{(E)} = \frac{\pi^2(EI_{ef})}{H_0^2}, \quad (7)$$

jossa

- EI_{ef} on seinäkaistaleen ja aukon pielten jäykisteiden yhteen laskettu tehollinen taivutusjäykkyys (Nmm^2) (kaava 8), ja
- H_0 on aukon pielen nurjahduspituus (mm), $H_0 = 0,7H_d$, kun H_d on korkeamman aukon korkeus (mm) (kts. Kuva 22) (Beton et al. 2017).

$$EI_{ef} = E_{90} \frac{b^3 L_i}{12} + 2E_{steel} I_{steel}, \quad (8)$$

jossa

- L_i on kahden aukon välisen seinäkaistaleen leveys (mm) (kts. Kuva 22),
- E_{steel} on aukon pielissä käytettävien teräsputkijäykisteiden kimmomoduuli (N/mm^2), ja
- I_{steel} on aukon pielissä käytettävien teräsputkijäykisteiden neliömomentti (mm^4) (Beton et al. 2017).

Muut merkinnät ovat kaavassa 6 esiintyvien merkintöjen mukaisia. Bedon et a. (2017) mukaan hirsiseinän nurjahduskestävyyden mitoitusehto voitaisiin esittää kaavan 9 muodossa.

$$N_{sd} \leq k_c(N_{cr,0}^{(E)})_d, \quad (9)$$

jossa

N_{sd} on hirsiseinään kohdistuvan kuormitusyhdistelmän mukaisen pystykuorman resultantti (N),

k_c on nurjahduksen pienennyskerroin (kaava 12), ja

$(N_{cr,0}^{(E)})_d$ on kaavalla 6 tai 7 laskettu kriittisen nurjahduskuorman mitoitusarvo (N), jossa on käytetty kimmomoduulin ja liukumoduulin mitoitusarvoja.

Kimmomoduulin ja liukumoduulin mitoitusarvot lasketaan kaavoilla 10 ja 11

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M}, \quad (10)$$

$$G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_M}, \quad (11)$$

jossa

E_d on kimmomoduulin mitoitusarvo (N/mm^2),

E_{mean} on kimmomoduulin keskiarvo (N/mm^2),

G_d on liukumoduulin mitoitusarvo (N/mm^2),

G_{mean} on liukumoduulin keskiarvo (N/mm^2), ja

γ_M on materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_M = 1,3$ (SFS-EN 1995-1-1).

Nurjahduksen pienennyskerroin määritetään kaavalla 12 SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}, \quad (12)$$

jossa

k on kerroin, joka lasketaan kaavalla 13, ja

λ_{rel} on muunnettu hoikkuus.

$$k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - \beta_0) + \lambda_{rel}^2), \quad (13)$$

jossa

β_C on seinän kaarevuuden ja yläreunan tuennan jäykkyyden huomioon otta-
va kerroin, ja

$$\beta_0 = 0,3 \quad (\text{Bedon et al. 2017}).$$

Kerroin β_C riippuu seinän kaarevuudesta sekä seinän yläreunan tuennasta. Jos kaare-
vuus on enintään $H/400$, jossa H on seinän korkeus, niin on $\beta_C = 0,25$ seinän yläreu-
nan tukeutuessa jäykkään väli- tai yläpohjatasoon ja $\beta_C = 0,3$ seinän yläreunan tukeu-
tuessa joustavaan väli- tai yläpohjatasoon. Seinän kaarevuuden ollessa enintään
 $H/300$, on $\beta_C = 0,5$ seinän yläreunan jäykälle tuennalle ja $\beta_C = 0,6$ seinän yläreunan
joustavalle tuennalle. (Bedon et al. 2017).

Muunnettu hoikkuus lasketaan kaavalla 14

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,90,k}}{E_{90}}}, \quad (14)$$

jossa

$f_{c,90,k}$ on hirren lujuusluokan mukainen ominaispuristuslujuus syysuuntaa vas-
taan kohtisuorassa suunnassa (N/mm^2), ja

λ on hoikkuusluku (Bedon et al. 2017).

Muut merkinnät ovat ylempänä esitetyn mukaisia. Hoikkuusluku lasketaan kaavalla 15

$$\lambda = L_0 \sqrt{\frac{A}{I}}, \quad (15)$$

jossa

L_0 on nurjahduspituus (mm),

A on tarkasteltavan seinäkaistaleen poikkileikkauksen pinta-ala (mm^2), ja

I on tarkasteltavan seinäkaistaleen poikkileikkauksen neliömomentti (mm^2)
(Bedon et al. 2017).

Nurjahduspituudeksi L_0 voidaan valita seinän korkeus aukottomalle seinälle ja seinälle,
jossa on yksi aukko. Seinälle, jossa on kaksi aukkoa, nurjahduspituudeksi voidaan vali-
ta korkeamman aukon korkeus. Tarkasteltavan poikkileikkauksen pinta-ala ja neliömo-
mentti voidaan laskea kaavoilla 16 ja 17

$$A = b * L, \quad (16)$$

$$I = \frac{L * b^3}{12}, \quad (17)$$

jossa

b on hirren poikkileikkauksen leveys (mm), ja

L on tarkasteltavan seinäkaistaleen pituus (mm).

Seinäkaistaleen pituus L on aukottomalle seinälle seinän vapaa pituus eli nurkkien väli. Seinälle, jossa on yksi aukko, seinäkaistaleen pituus on mitta nurkasta aukon reunaan (L_{ef}), ja seinälle, jossa on kaksi aukkoa, aukkojen välisen ehjän seinäkaistaleen leveys (L_i) (kts. Kuva 22).

Edellä esitetty mitoitus tapa olettaa hirsiseinän monoliittiseksi rakenteeksi (Bedon et al. 2015). Se ei siten huomioi hirsiseinän pinottua rakennetta tai hirsien välisiä saumoja. Tämä oletus on todennäköisesti epävarmalla puolella, sillä hirsiseinä ei ole yhtenäinen rakenne, vaikka kierretangot ja hirsien välinen tapitus tai muu vaarlaus sitoo rakenteen yhdeksi kappaleeksi. Kyseinen mitoitus tapa on osoitettu vain höylä- ja lamellihirrelle, sillä siinä huomioidaan puun syysuuntaa vastaan kohtisuorat lujuusominaisuudet, mutta kaavoja voisi soveltaa ristiinlaminoidulle hirrelle käyttämällä puun syysuuntaisia lujuusominaisuuksia, kuten Eurokoodissa SFS-EN 1995-1-1 puristetun sauvan nurjahdusmitoituksessa. Hirren poikkileikkauksen leveydenä b tulisi tällöin huomioida vain ristiinlaminoidun hirren pystysuuntaisten lamellien yhteenlaskettu leveys. Mitoitus tapa ei ota huomioon myöskään k_{mod} -kerrointa, mutta sen huomioiminen ja lisääminen mitoitukseen on helppoa. Mitoitustavassa ei ole esitetty rajoituksia hirsiseinän korkeudelle tai pituudelle, vaikka voisi olettaa, etteivät kaavat sellaisenaan sovellu äärettömän korkealle tai pitkälle seinälle. Hirsiseinälle, jossa on kaksi aukkoa, mitoitus tapa huomioi aukon pielten jäykisteet, mutta tutkimuksissa ne on toteutettu teräspuikprofiileilla, mikä ei ainakaan Suomessa tule kyseeseen kylmäsilan ja kondenssiriskin vuoksi, ja siten jatkotutkimuksia tarvittaisiin puisten karapuujäykisteiden osalta. Tehollisen taivutusjäykkyyden kaava 8 myös olettaa täydellisen liittovaikutuksen seinäkaistaleen ja teräksisten karapuujäykisteiden välille, mikä on epätodennäköistä. Mitoitustapaa ei ole edelleenkaan standardisoitu, eikä se siten ole yleisesti käytössä. Aiheesta ei myöskään ole julkaistu enempää jatkotutkimuksia.

Työhön aineistoksi saadun materiaalin perusteella myös Honkarakenne Oyj määrittää aukollisten hirsiseinien nurjahduskestävyyden seinäpilareina, joiden nurjahdusmitoitustapahtuu kuten eurokoodissa SFS-EN 1995-1-1 puristetulle puusauvalle, kun hirsityyppinä on lamellihirsi tai ristiinlaminoitu hirsi. Nurjahdusmitoituksessa käytettävä puristuslujuuden ominaisarvo ja kimmomoduuli valitaan sen mukaan, onko kyseessä painumaton hirsi vai lamellihirsi. Pilarin muunnettu hoikkuus määritetään syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuslujuuden ja kimmomoduulin arvoilla, kun kyseessä on lamellihirsi ja syysuuntaisen puristuslujuuden ja kimmomoduulin arvoilla painumattomalle hirrelle.

Myös mitoituksessa huomioitava hirren tehollinen leveys määräytyy hirsityypin mukaan. Mitoitustavassa hoikkuusluvun laskemiseen tarvittavat, seinäpilareille määritettävät neliömomentit riippuvat käytettävästä hirsityypistä sekä siitä, onko seinäpilari jäykistetty sivusuunnassa nurkilla, poikittaisseinillä, aukon pielten karapuilla vai följäreillä. Neliömomenttien määrittäminen perustuu hirsiseinille teetettyihin koekuormituksiin ja tutkimustuloksiin. (VTT-S-05041-17). Neliömomenttien määrittämistä lukuun ottamatta seinäpilarin nurjahdusmitoitus tehdään kuten eurokoodissa SFS-EN 1995-1-1, jossa puristuslujuuden mitoitusarvoa pienennetään nurjahduskertoimella. Jää epäselväksi, huomioidaanko lausunnon VTT-S-05041-17 mitoitustavassa neliömomentin määrittämisessä lainkaan itse seinäpilaria, vai pelkästään jäykiste. Ainakin karapuu- ja följärijäykisteiden tapauksessa tarkasteltavan seinäpilarin neliömomentti määritetään pelkästään jäykisteen neliömomenttina. Mikäli neliömomentti määritetään vain jäykisteen perusteella, seinän kapasiteetti nurjahdusta vastaan jää huomattavasti pienemmäksi kuin tapauksessa, jossa neliömomentissa huomioitaisiin sekä jäykisteen että tarkasteltavan seinäpilarin jäykkyys. Seinäpilarin poikkileikkaus on huomioitu kuitenkin pinta-alassa A , joka esiintyy hoikkuuden kaavassa neliöjuuren sisällä (kuten kaavassa 15). Mitoituksessa seinäpilarin nurjahduspituutena käytetään aina seinän korkeutta tai kerroskorkeutta, vaikka voisi olettaa, että esimerkiksi kahden aukon välisen seinäpilarin nurjahduspituus olisi pienempi, esimerkiksi aukon korkeus.

Kyseessä on Honkarakenne Oyj:n yrityskohtainen mitoitusohje, ja lisäksi se pätee vain ohjeessa mainituille hirsityypeille ja niille osittain kokeellisesti määritetyille mitoitusparametreille. Siten tämäkään mitoitusperiaate ei sovellu yleiseen käyttöön. Selvästi on kuitenkin näyttöä siitä, että hirsiseinien nurjahdus- ja puristuskestävyyden määrittäminen pilarina on mahdollista, ja sen suhteen lisätutkimukselle on tarvetta, jotta aukollisten hirsiseinien mitoitukselle voitaisiin muodostaa yleinen mitoitusperiaate ja -ohje.

Liitteessä 1 on esitetty vertailulaskelmia hirsiseinän nurjahduskestävyyden määrittämisestä. Vertailulaskelmissa on sovellettu tässä kappaleessa esitettyä kolmea eri mitoitustapaa hirsiseinän nurjahduskestävyyden määrittämiseen. Kappaleessa 6.1 on esitetty johtopäätelmiä ja pohdintoja vertailulaskelmista ja mitoitustapojen soveltuvuudesta yleiseen käyttöön.

5.3 Tukipaine

Tukipainemitoitus tulee hirsiseinien osalta kyseeseen esimerkiksi silloin, kun kattorakenteita tuetaan hirsiseinän päältä. Tukipaineen mitoitus riippuu hirsityypistä, sillä lamelli- ja massiivihirrelle kyseessä on syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus ja ristiinlaminoidulle hirrelle syysuuntainen puristus.

Ristiinlaminoidussa hirressä puristus otetaan vastaan vain hirren pystysuuntaisilla lamelleilla, jolloin kyseessä on syysuuntainen puristus. Syysuuntaisen puristuksen mitoitusehto on SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} , \quad (18)$$

jossa

$\sigma_{c,0,d}$ on syysuuntaisen puristusjännityksen mitoitusarvo (N/mm^2) ja

$f_{c,0,d}$ on puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaisessa puristuksessa (N/mm^2).

Puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaisessa puristuksessa lasketaan kaavan 1 mukaan, ja puristuslujuuden ominaisarvo määräytyy ristiinlaminoidun hirren pystysuuntaisten lamellien lujuusluokan perusteella. Lujuusluokka tulee tarkistaa valmistajakohtaisesti.

Syysuuntaisen puristusjännityksen mitoitusarvo lasketaan kaavan 19 mukaisesti

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{P_{c,0,d}}{A} , \quad (19)$$

jossa

$P_{c,0,d}$ on syysuuntaisen puristavan kuorman mitoitusarvo (N), ja

A on tehollisen kosketuspinnan pinta-ala (mm^2).

Ristiinlaminoidulle hirrelle tehollisen kosketuspinnan pinta-ala lasketaan kaavalla 20

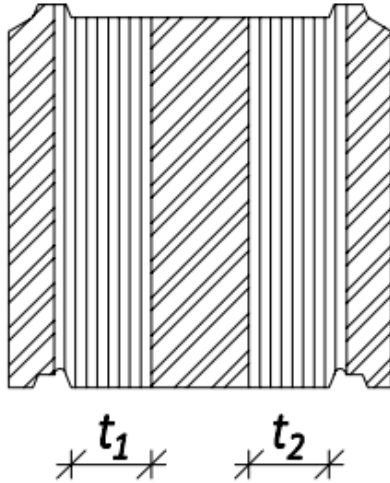
$$A = l * t_{ef} , \quad (20)$$

jossa

l on kosketuspinnan pituus hirren pituussuunnassa (mm), esimerkiksi kattopalkin poikkileikkauksen leveys, ja

t_{ef} on hirren poikkileikkauksen tukipinnan leveys (mm).

Ristiinlaminoidun hirren tapauksessa poikkileikkauksen tukipinnan leveys t_{ef} on pystysuuntaisten lamellien yhteenlaskettu leveys, josta on kuitenkin vähennetty mahdollinen varauksen osuus pystysuuntaisten lamellien leveydestä. Alla olevassa kuvassa (Kuva 23) on esitetty esimerkki ristiinlaminoidusta hirrestä ja ne osuudet pystysuuntaisten lamellien leveyksistä, jotka huomioidaan tukipainemitoituksessa.



Kuva 23. Esimerkki ristiinlaminoidusta hirrestä, jonka tehollisena leveytenä tukipainemitoituksessa huomioidaan pystysuuntaisten lamellien leveyksistä osuudet t_1 ja t_2 .

Lamelli-, massiivi- ja pyöröhirrelle tukipaineen osalta on kyseessä syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus, jonka mitoitusehto on SFS-EN 1995-1-1 ja RIL 205-1-2017 lisäohjeiden mukaisesti

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} f_{c,90,d}, \quad (21)$$

jossa

$\sigma_{c,90,d}$ on syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen mitoitusarvo (N/mm^2),

$f_{c,90,d}$ on puristuslujuuden mitoitusarvo syitä vastaan kohtisuorassa puristuksessa (N/mm^2), ja

$k_{c,\perp}$ on tukipainekerroin.

Puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaa vastaan kohtisuorassa puristuksessa lasketaan kaavan 1 mukaan, ja syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuslujuuden ominaisarvo määräytyy käytettävän hirren lujuusluokan mukaan, joka tulee tarkistaa valmistajakohtaisesti.

Tukipainekertoimen $k_{c,\perp}$ arvo lasketaan RIL 205-1-2017 mukaisesti kaavalla 22

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} k_{c,90}, \quad (22)$$

jossa

l on kosketuspinnan pituus hirren pituus- eli syysuunnassa (mm), esimerkiksi kattopalkin poikkileikkauksen leveys,

$l_{c,90,ef}$ on kosketuspinnan tehollinen pituus (mm), ja

$k_{c,90}$ on kuorman sijainnin, puun halkeamismahdollisuuden ja puristuman suuruuden huomioon ottava kerroin.

Kosketuspinnan tehollinen pituus $l_{c,90,ef}$ lasketaan kaavan 23 mukaisesti

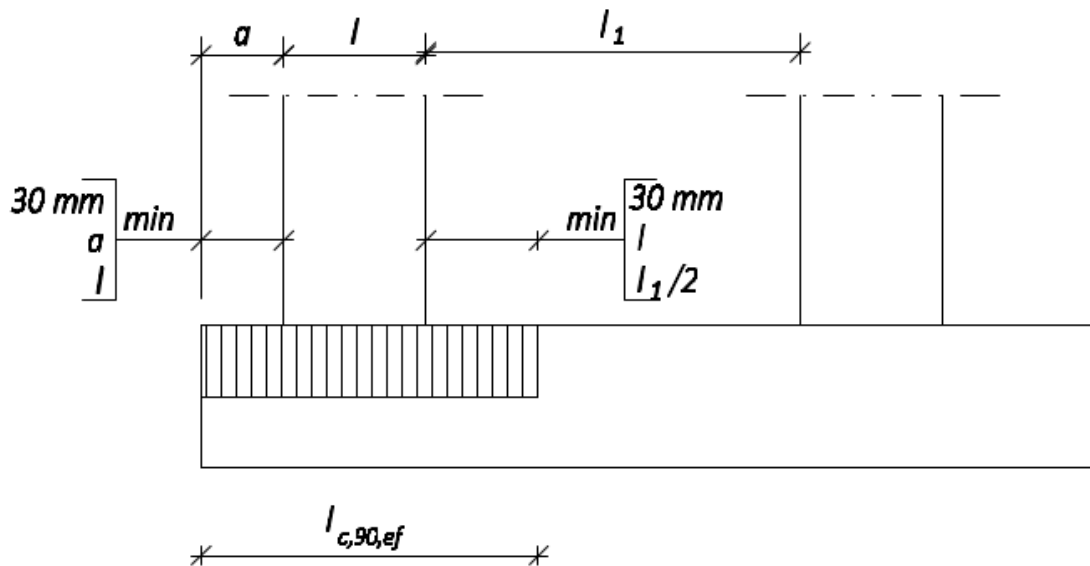
$$l_{c,90,ef} = \min\left(30 \text{ mm}, a, l, \frac{l_1}{2}\right) + l + \min\left(30 \text{ mm}, a, l, \frac{l_1}{2}\right), \quad (23)$$

jossa

a on etäisyys kuormituksen reunasta hirren päätyyn (mm) ja

l_1 on kuormien välinen etäisyys (mm).

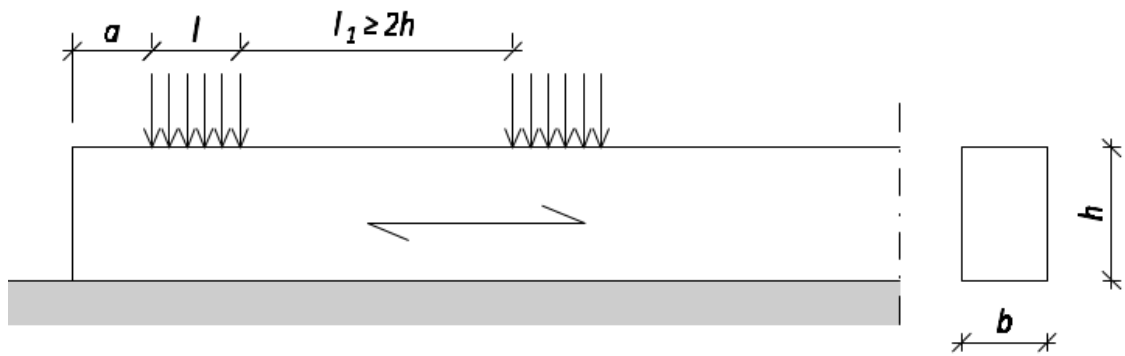
Kosketuspinnan pituuteen lisätään siis sen molemmille puolille pienin mitoista 30 mm, a , l ja $\frac{l_1}{2}$. (RIL 205-1-2017). Tehollisen kosketuspinnan pituuden määrittämisessä käytetyt merkinnät on esitetty myös alla olevassa kuvassa (Kuva 24).



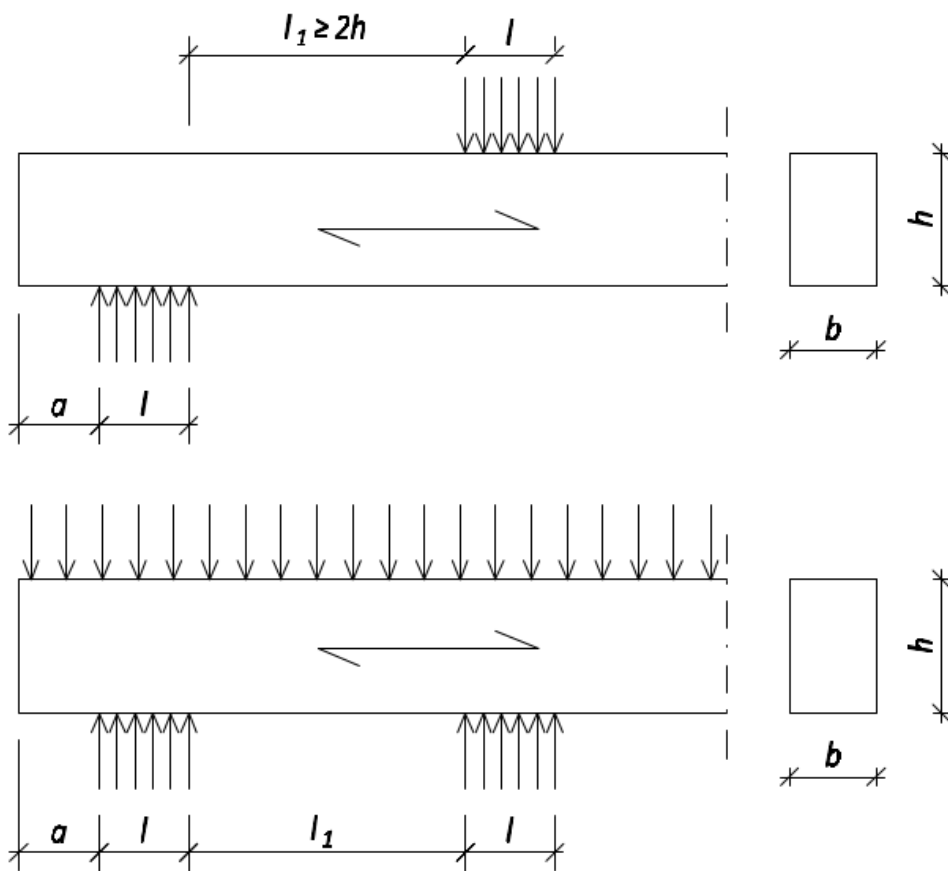
Kuva 24. Tehollisen kosketuspinnan määrittämisessä käytetyt merkinnät (RIL 205-1-2017).

Kertoimelle $k_{c,90}$ käytetään arvoa 1,0, paitsi seuraavissa tilanteissa:

- jos palkki on jatkuvalla tuella ja kuormien välimatka $l_1 \geq 2h$ (h on palkin korkeus), jolloin sahatavaralle $k_{c,90} = 1,25$ (kts. Kuva 25), tai
- jos palkki on erillisillä tuilla ja palkilla on jatkuva kuorma tai pistekuromia, jotka vaikuttavat kauempana tuelta kuin $l_1 = 2h$ (kts. Kuva 26). Tällöin sahatavaralle $k_{c,90} = 1,5$. (SFS-EN 1995-1-1).



Kuva 25. Palkki jatkuvalla tuella ja kuormien etäisyys $l_1 \geq 2h$, joten voidaan käyttää kerrointa $k_{c,90} = 1,25$.



Kuva 26. Tilanteet, jossa voidaan käyttää kerrointa $k_{c,90} = 1,5$. Ylempänä piste-kuorman etäisyys tuelta $l_1 \geq 2h$ ja alempana palkilla jatkuva kuorma.

Hirren tukipainemitoituksessa kerroin $k_{c,90} = 1,25$ tulee kyseeseen esimerkiksi kattopalkkien hirsiseinälle aiheuttamien pistemäisten puristuskuormien kohdalla.

Syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristusjännityksen mitoitusarvo lasketaan kaavan 24 mukaisesti

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{P_{c,90,d}}{A}, \quad (24)$$

jossa

$P_{c,90,d}$ on syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristavan kuorman mitoitusarvo (N),
ja

A on tehollisen kosketuspinnan pinta-ala (mm^2).

Tehollisen kosketuspinnan pinta-ala lasketaan kaavalla 25

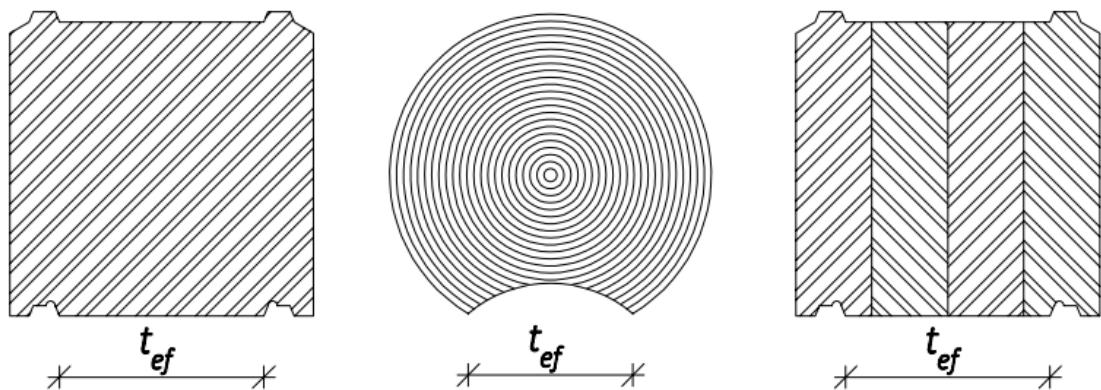
$$A = l * t_{ef}, \quad (25)$$

jossa

l on kosketuspinnan pituus hirren pituussuunnassa (mm), ja

t_{ef} on hirren tukipinnan leveys (mm).

Lamelli- sekä massiivihirrelle tukipinnan leveys t_{ef} on se osuus hirren leveydestä, josta on vähennetty varaukset, pyöröhirren tehollisena leveytenä voidaan pitää varauksen leveyttä (kts. Kuva 27).



Kuva 27. Massiivi-, pyörö- ja lamellihirren tehollinen leveys tukipainemitoituksessa.

5.4 Följärit

Följäreillä eli pystysuuntaisilla tukipuilla voidaan toteuttaa hirsiseinän poikittaistuenta ilman, että seinää tarvitsee tukea kokonaisella poikittaisseinällä. Följäreillä pitkä seinä voidaan myös jakaa lyhyempiin osiin niin, että kappaleessa 5.2 esitettyä seinän pystykuorman kestävyden kaavoja voidaan edelleen käyttää.

Följäreiden mitoittamisesta on saatavilla melko vähän tutkimusaineistoa tai muuta julkista tietoa. Ehoniemi et al. (1989) on esittänyt hirsirakenteiden kestävyttä käsittelevän tutkimuksen tutkimusraportissaan, että tukipuiden voidaan katsoa vastaavan kiinteää tukea hirsiseinälle, kun ne täyttävät kaavan 26 mukaisen ehdon:

$$B = 3 * b * \frac{h}{2500 \text{ mm}} \geq 210 \text{ mm} \quad (26)$$

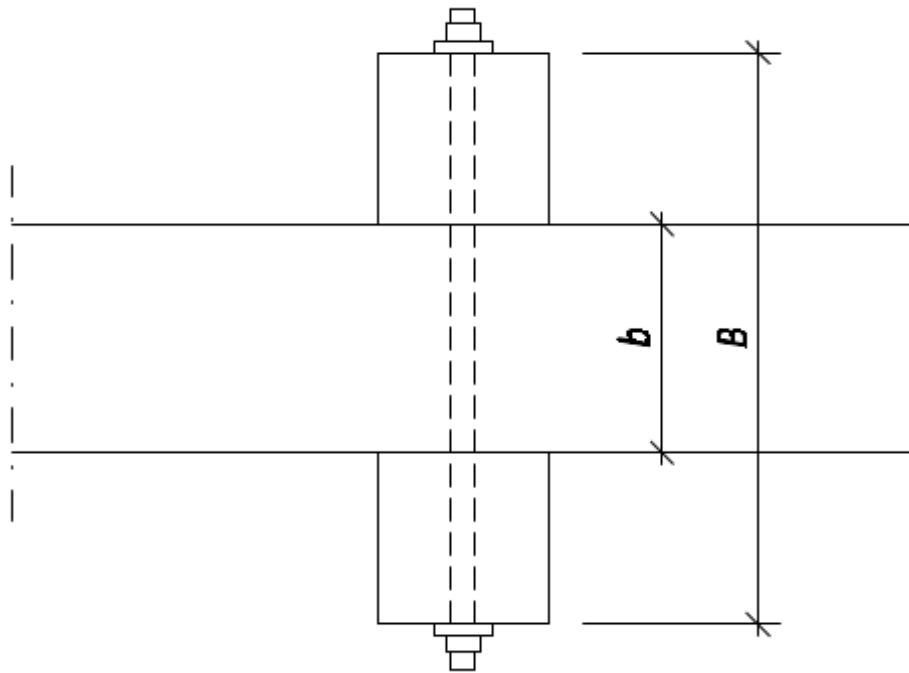
jossa

B on följäreiden ja hirsiseinän yhteen laskettu leveys (mm),

b on hirsiseinän leveys (mm), ja

h on hirsiseinän korkeus (mm).

Merkinnät on esitetty myös alla olevassa kuvassa (Kuva 28). Kaavassa 26 esitetty ehto on määritetty läpipultatuille, seinän molemmin puolin asennetuille följäreille. Se ei siis päde vain seinän yhdelle puolelle asennetulle följärille, tai seinän molemmin puolin asennetuille följäreille, joiden kiinnitys tehdään suoraan hirsikehikkoon esimerkiksi ruuvein (kts. Kuva 13 ja Kuva 14). Tämä ehto ei aseta vaatimuksia myöskään följärin mitalle hirsiseinän pituussuunnassa. Lisäksi nykyaikaisilla, leveillä hirsiprofiileilla kaavan mukaisten följäreiden vaaditut mitat olisivat melko suuret.



Kuva 28. Seinän läpipultatun följärin minimimitan määrittämisessä käytetyt merkinnät (Ehoniemi et al. 1989).

Honkarakenne Oyj:n teettämässä lausunnossa VTT-S-05041-17 hirsiseinien nurjahduskestävyys määritetään seinäpilareina, joiden mitoitus tehdään eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 mukaisilla puristetun sauvan nurjahduskestävyyden kaavoilla. Lausunnon mukaan seinäpilarin, jonka poikittaisjäykisteenä toimii följäri tai följäreitä, neliömomentti määritetään pelkästään följärin/följäreiden neliömomenttien avulla, eikä hirsiseinäkais-taleen poikkileikkausta huomioida neliömomentissa lainkaan. Hoikkuuden laskennassa

tarvittava poikkileikkauksen pinta-ala sen sijaan määritetään seinäpilarin poikkileikkauksesta. Jos följärin neliömomentti on riittävä siihen, että seinäpilarille sen avulla määritetty hoikkuus, muunnettu hoikkuus sekä nurjahduskerroin ja edelleen seinäpilarin nurjahduskestävyys on riittävä, katsotaan että följärin mitoitus on kunnossa. Jos seinäpilarin nurjahduskapasiteetti ei riitä, tulee följäriä kasvattaa, jotta neliömomenttia saadaan suuremmaksi. (VTT-S-05041-17). Mitoitustapa soveltuu vain lausunnon mukaisille Honkarakenne Oyj:n hirsityypeille, joten yleisesti följäreitä ei voi kyseisellä tavalla mitoittaa.

Följärit toimivat hirsiseinän nurjahdustukena, joten voidaan olettaa, että niihin syntyy vaakasuuntaista tuentavoimaa pystykuormasta. Lisäksi följäreillä voidaan siirtää hirsiseinään kohdistuvaa ulkoista vaakakuormaa, kuten tuulikuormaa, jäykistävän vaakarakenteen kautta jäykistäville hirsiseinille, kuten esitetty kappaleessa 4.3. Följäreiden voisi siis ajatella toimivan palkkina, jota kuormittaa tuulikuorma, lisävaakavoima sekä nurjahdustuentana toimimisesta syntyvä vaakakuorma. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin nurjahdustuentavoiman määrittäminen, följärin tuentatapa sekä kiinnitysten huomioiminen, joihin ei löydy tutkimustietoa tai muuta aineistoa.

Följäreiden mitoittamiseen liittyen ilmenee siis selvästi lisätutkimustarpeita. Koska följäreiden mitoittamiseen ei pystytä esittämään soveltuvaa yleistä mitoitusmenetelmää, tulee suunnittelijan selvittää följäreiden tarve sekä niiden koot hirsivalmistajilta kohdekohtaisesti.

5.5 Hirsipalkki

Yhdestä tai useammasta hirrestä koostuva palkkirakenne tulee kyseeseen esimerkiksi hirsiseinässä aukon ylityksessä. Useasta hirrestä koostuvaa palkkia voidaan tarkastella joko mekaanisin liittimin koottuna palkkina tai kytkemättömistä osista koottuna palkkina, jolloin osia tarkastellaan irrallisina päällekkäisinä kappaleina, joille kuormitus jakautuu niiden jäykkyyksien suhteessa (Kontiotuote Oy 2017). Molemmissa tapauksissa palkkia tarkastellaan yksiaukkoisena ja molemmista päistään nivelellisesti tuettuna. Kytkemällä hirret yhteen liittimillä kootuksi palkiksi, saadaan hirsipalkille suurempi kestävyys (Lauharo 2002). Hirsipalkin osalta tässä työssä käsitellään taivutus- ja leikkausmitoitus sekä palkin taipuma. Kiepahdusta ei tarkastella, sillä hirsipalkin kohdalla se ei yleensä ole rajoittava tapaus mitoituksessa.

Hirsipalkin kestävyyttä määritettäessä huomioidaan mitoituksessa hirren pituussuuntaiset poikkileikkauksen osat, eli lamelli- ja massiivihirren osalta koko poikkileikkaus ja ristiinlaminoidun hirren osalta hirren pituussuuntaiset lamellit. Pyöröhirren tapauksessa

voidaan tehdä varmalla puolella oleva yksinkertaistus ja käsitellä sitä suorakaidepoikkileikkauksena, jonka leveys on varauksen leveys ja korkeus hirren nousukorkeus (kts. Kuva 29).

5.5.1 Kytkemättömistä osista koottu hirsipalkki

Kun päällekkäisiä hirsiiä ei sidota toisiinsa kiinnittimillä, ne käyttäytyvät irrallisina kappa-leina, joille kuormitus jakautuu niiden jäykkyyksien suhteessa. Aukon päällä oleviin hirsiiin tulisi välttää tekemästä reikiä esimerkiksi vaarnatapeille, jotta reikiä ei tarvitse huomioida mitoituksessa. Ristiinlaminoidun hirren tapauksessa reikiä voidaan tehdä pystysuuntaisiin lamellikerroksiin, tällöin reikien minimietäisyys tulee olla vähintään 200 millimetriä. (Kontiotuote Oy 2017).

Kytkemättömistä osista kootun hirsipalkin jokaiselle osalle tulee ensin määrittää tehollinen neliömomentti ja tehollinen taivutusvastus. Palkin osan neliömomentti lasketaan suorakaidepoikkileikkaukselle kaavalla 27 ja taivutusvastus kaavalla 28

$$I_{ef,y,i} = \frac{b_{ef,i} \cdot h_{ef,i}^3}{12}, \quad (27)$$

$$W_{ef,y,i} = \frac{b_{ef,i} \cdot h_{ef,i}^2}{6}, \quad (28)$$

jossa

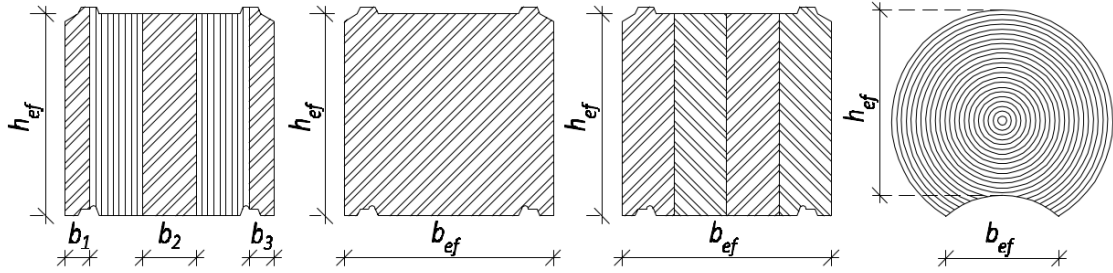
$I_{ef,y,i}$ on osan tehollinen neliömomentti (mm^4),

$W_{ef,y,i}$ on osan tehollinen taivutusvastus (mm^3),

$b_{ef,i}$ on osan tehollinen leveys (mm) ja

$h_{ef,i}$ on osan tehollinen korkeus (mm).

Osan tehollinen leveys $b_{ef,i}$ on lamelli- ja massiivihirren tapauksessa koko poikkileikkauksen leveys ja ristiinlaminoidun hirren tapauksessa hirren pituussuuntaisten lamellien yhteen laskettu leveys. Osan tehollisena korkeutena $h_{ef,i}$ voidaan käyttää hirren nousukorkeutta. Pyöröhirren tapauksessa voidaan tehdä varmalla puolella oleva yksinkertaistus ja käsitellä sitä suorakaidepoikkileikkauksena, jonka leveys on varauksen leveys ja korkeus nousukorkeus. Eri hirsityyppien poikkileikkauksen tehollisten mittojen määräytyminen on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 29).



Kuva 29. Eri hirsityyppien tehollisten poikkileikkausmittojen määräytyminen hirsipalkin tapauksessa. Vasemmalta lukien painumaton hirsi, massiivihirsi, lamellihirsi ja pyöröhirsi.

Palkin yhdelle osalle kohdistuva rasitus lasketaan kaavalla 29, joka huomioi osien mahdolliset jäykkyyserot

$$X_{d,i} = \frac{I_{ef,y,i}}{\sum I_{ef,y,i}} * X_d, \quad (29)$$

jossa

$X_{d,i}$ on osalle kohdistuva rasitus tai kuorma (esimerkiksi taivutusmomentti, leikkausvoima),

$I_{ef,y,i}$ on tarkasteltavan osan tehollinen neliömomentti (mm^4),

$\sum I_{ef,y,i}$ on palkin osien tehollisten neliömomenttien summa (mm^4) ja

X_d on koko palkille kohdistuva rasitus (Kontiotuote Oy 2017).

Kun osalle kohdistuva osuus rasituksesta on tiedossa, voidaan osan kestävyys laskea tavanomaisesti palkin mitoitusehtoien mukaan SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti. Hirsipalkin jokaisen osan kestävyys tulee tarkastaa erikseen, eikä rasitus saa missään osassa ylittää kyseisen osan kestävyyttä.

Yhden akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa SFS-EN 1995-1-1 mukainen taivutuksen mitoitusehto, ja siten hirsipalkin osan taivutuskestävyyden mitoitusehto, voidaan esittää kaavan 30 mukaisessa muodossa

$$\sigma_{m,y,d,i} \leq f_{m,d}, \quad (30)$$

jossa

$\sigma_{m,y,d,i}$ on osaan kohdistuva taivutusjännityksen mitoitusarvo (N/mm^2) ja

$f_{m,d}$ on hirren taivutuslujuuden mitoitusarvo (N/mm^2).

Taivutuslujuuden mitoitusarvo $f_{m,d}$ lasketaan kaavan 1 mukaan, jossa taivutuslujuuden ominaisarvona käytetään valitun hirren lujuusluokan mukaista arvoa. Taivutusjännityksen mitoitusarvo $\sigma_{m,y,d,i}$ palkin osalle lasketaan kaavalla 31

$$\sigma_{m,y,d,i} = \frac{M_{y,d,i}}{W_{ef,y,i}}, \quad (31)$$

jossa

$M_{y,d,i}$ on kaavan 29 mukaisesti laskettu palkin osalle kohdistuva taivutusmomentin mitoitusarvo (Nmm) ja

$W_{ef,y,i}$ on kaavan 28 mukaisesti laskettu palkin osan tehollinen taivutusvastus (mm^3).

Hirsipalkin osan leikkauskestävyyden mitoitusehto on kaavan 32 mukainen

$$\tau_{d,i} \leq f_{v,d}, \quad (32)$$

jossa

$\tau_{d,i}$ on osaan kohdistuva leikkausjännityksen mitoitusarvo (N/mm^2) ja

$f_{v,d}$ on hirren leikkauslujuuden mitoitusarvo (N/mm^2) (SFS-EN 1995-1-1).

Leikkauslujuuden mitoitusarvo $f_{v,d}$ lasketaan kaavan 1 mukaan, jossa leikkauslujuuden ominaisarvona käytetään valitun hirren lujuusluokan mukaista arvoa.

Leikkausjännityksen mitoitusarvo $\tau_{d,i}$ palkin osalle lasketaan kaavalla 33, kun tarkastellaan suorakaidepoikkileikkausta

$$\tau_{d,i} = \frac{3}{2} * \frac{V_{d,i}}{A_{ef,i}}, \quad (33)$$

jossa

$V_{d,i}$ on kaavan 29 mukaan laskettu palkin osalle kohdistuva leikkausvoima (N) ja

$A_{ef,i}$ on tehollinen poikkileikkaus leikkauksessa (mm^2).

Tehollinen poikkileikkaus leikkauksessa lasketaan kaavalla 34

$$A_{ef,i} = k_{cr} * b_{ef,i} * h_{ef,i}, \quad (34)$$

jossa

k_{cr} on halkeamien vaikutuksen huomioon ottava kerroin,

$b_{ef,i}$ on osan tehollinen leveys (mm) ja

$h_{ef,i}$ on osan tehollinen korkeus (mm).

Osan tehollinen leveys ja tehollinen korkeus määritetään kuten aiemmin esitetty tässä kappaleessa (kts. Kuva 29). Hirsi voidaan olettaa lukeutuvan sahatavaraksi myös halkeilukertoimen osalta. Sahatavaralle halkeilukerroin lämmitetyissä sisätiloissa tai vastaavissa olosuhteissa on $k_{cr} = 0,67$ ja pysyvästi käyttöluokkaa 2 tai 3 vastaavissa kosteusoloissa $k_{cr} = 1,0$ (RIL 205-1-2017). Yleisesti siis hirsiseinän tapauksessa, jossa hirsipinta toimii rakennuksen ulkoverhouksena, voidaan halkeilukertoimelle käyttää arvoa $k_{cr} = 1,0$. Halkeilukerroin voi olla myös valmistajakohtainen, tällöin halkeilukertoimen arvo tulisi olla esitettynä valmistajan ETA-dokumentissa.

Hirsipalkille lasketaan hetkellinen taipuma ja kokonaistaipuma. Hirsipalkin taipuma lasketaan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmällä ja kuormitustavan mukaisilla taipuman kaavoilla erikseen pysyvälle kuormalle sekä muuttuville kuormille. Yleensä hirsipalkkia kuormittaa tasainen kuorma. Kytkemättömistä osista kootun palkin kuormitus jakautuu palkin osille niiden jäykkyysien suhteessa, jolloin jokaisen palkin osan taipuma on sama, ja siten riittää tarkastella taipumat vain yhdelle palkin osalle (Kontiotuote Oy 2017).

Hirsipalkin osan hetkellisen taipuman mitoitusehto on kaavan 35 mukainen

$$w_{inst,i} \leq \frac{L}{400}, \quad (35)$$

jossa

$w_{inst,i}$ on palkin osan hetkellinen taipuma (mm), ja

L on palkin pituus (mm) (RIL 205-1-2017).

Hirsipalkin osan hetkellinen taipuma lasketaan kaavan 36 mukaisesti

$$w_{inst,i} = w_{inst,g,i} + \sum w_{inst,q,i}, \quad (36)$$

jossa

$w_{inst,g,i}$ on pysyvän kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma (mm), ja

$w_{inst,q,i}$ on muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma (mm) (RIL 205-1-2017).

Kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma palkin osalle lasketaan kaavalla 37, kun palkkia rasittaa tasainen kuorma

$$w_{inst,p,i} = \frac{5}{384} * \frac{p_{k,i} * L^4}{E_{0,mean} * I_{ef,y,i}}, \quad (37)$$

jossa

- $w_{inst,p,i}$ on pysyvän tai muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma palkin osalle (mm),
- $p_{k,i}$ on palkin osalle kohdistuva osuus pysyvästä tai muuttuvasta kuormasta käyttörajatilan kuormitusyhdistelmän mukaisesti (kN/m),
- L on palkin pituus (mm),
- $E_{0,mean}$ on hirren kimmomoduuli syysuunnassa (N/mm^2), ja
- $I_{ef,y,i}$ on palkin osan neliömomentti (mm^4), joka on laskettu kaavalla 27.

Palkin osalle kohdistuva osuus pysyvästä tai muuttuvasta kuormasta lasketaan kaavan 29 mukaan, jossa termin X_d kohdalle sijoitetaan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmän mukainen pysyvän tai muuttuvan kuorman arvo. Kimmomoduulin $E_{0,mean}$ arvona käytetään valitun hirren lujuusluokan mukaista arvoa. Hirren lujuusluokka tulee tarkistaa valmistajakohtaisesti.

Hirsipalkin osan kokonaistaipuma lopputilassa lasketaan hetkellisten taipumien avulla. Hirsipalkin lopputilan kokonaispainuman mitoitusehto on esitetty kaavassa 38

$$w_{fin,i} \leq \frac{L}{300}, \quad (38)$$

jossa

- $w_{fin,i}$ on hirsipalkin osan lopputilan kokonaistaipuma (mm), ja
- L on palkin pituus (mm) (RIL 205-1-2017).

Hirsipalkin osan lopputilan kokonaistaipuma lasketaan kaavan 39 mukaan

$$w_{fin,i} = w_{inst,g,i}(1 + k_{def}) + w_{inst,q1,i}(1 + \psi_2 k_{def}) + \sum w_{inst,q,i}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def}), \quad (39)$$

jossa

- $w_{inst,g,i}$ on pysyvän kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma hirsipalkin osalle (mm),
- $w_{inst,q1,i}$ on kuormitusyhdistelmän mukaisen määräävän muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma hirsipalkin osalle (mm),
- $w_{inst,q,i}$ on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma hirsipalkin osalle (mm),
- k_{def} on virumaluku,
- ψ_2 ja $\psi_{2,i}$ on muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuuden yhdistelykerroin, ja

$\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman ominaisyhdistelyssä käytettävä kerroin (RIL 205-1-2017).

Virumaluku k_{def} riippuu rakenteen käyttöluokasta sekä materiaalista. Hirsi luokitellaan sahatavaraksi myös virumaluvun yhteydessä, ellei valmistajien ETA-dokumenteissa ilmoiteta toisin (EAD 130022-00-0304 2015). Virumaluvun k_{def} arvot sahatavaralle on esitetty taulukossa alla (Taulukko 4).

Taulukko 4. Virumaluvun arvot k_{def} sahatavaralle (RIL 205-1-2017).

Materiaali	Käyttöluokka		
	1	2	3
Sahatavara, pyöreä puu	0,60	0,80	2,00

Yhdistelykertoimilla otetaan huomioon muuttuvien kuormien esiintyminen yhtäaikaaisesti kuormitustapauksissa. Eurokoodin Suomen kansallisen liitteen mukaisia muuttuvan kuorman yhdistelykertoimia on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 5).

Taulukko 5. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet Suomen kansallisen liitteen mukaisesti (RIL 205-1-2017).

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, esim. autotallit	0,7	0,7	0,6 **)
Luokka G: liikennöitävät tilat, raskaat ajoneuvot	0,7	0,5	0,3 **)
Luokka H: vesikatot (kunnossapito)	0	0	0
Jääkuorma (huurtumisesta, jäätävästä sateesta tai räntäsateesta)	0,7	0,3	0
Lumikuorma *) kun			

$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipaloissa)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset, tukien painumat	1,0	1,0	1,0
<p>^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä.</p> <p>Huom! Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.</p> <p>^{**)} Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$.</p>			

5.5.2 Mekaanisin liittimin koottu hirsipalkki

Jos hirret sidotaan yhtenäiseksi palkiksi mekaanisten liittimien avulla, tulee liitossiirtymän vaikutus ottaa huomioon (RIL 205-1-2017). Mekaanisin liittimin koottu palkki voi koostua kolmesta yhteen sidotusta erillisestä kappaleesta. Palkin mitoitus voidaan tällöin tehdä eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 liitteen B mukaisilla kootun palkin mitoitusohjeilla. Kyseessä on yksinkertaistettu laskentamenetelmä, joka perustuu lineaariseen kimmoteoriaan ja seuraavanlaisiin oletuksiin:

- Palkit ovat vapaasti tuettuja jännevälin ollessa l . Jatkuville palkeille kaavoja voidaan soveltaa käyttämällä tarkasteltavan jännevälin mittana $0,8l$ ja ulokepalkeille ulokkeen kaksinkertaista arvoa $2l$.
- Yksittäiset osat ovat täysimittaisia tai sormijatkettuja.
- Osien kiinnitys toisiinsa tehdään mekaanisilla liittimillä, joiden siirtymäkerroin on K .
- Liitinväli s on vakio, tai muuttuu leikkausvoiman mukaisesti välillä s_{min} ja s_{max} siten, että $s_{max} \leq 4s_{min}$.
- Kuorma aiheuttaa sinimuotoisen tai parabolisen momenttijakauman ja leikkausvoiman. (SFS-EN 1995-1-1).

Mekaanisin liittimin kootulle palkille lasketaan tehollinen taivutusjäykkyys $(EI)_{ef}$, jonka avulla poikkileikkaukselle lasketaan jännityksen mitoitusarvoja. Kootun palkin tehollinen taivutusjäykkyys lasketaan kaavalla 40

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2), \quad (40)$$

jossa

E_i on palkin osan kimmomoduulin keskiarvo (N/mm^2),

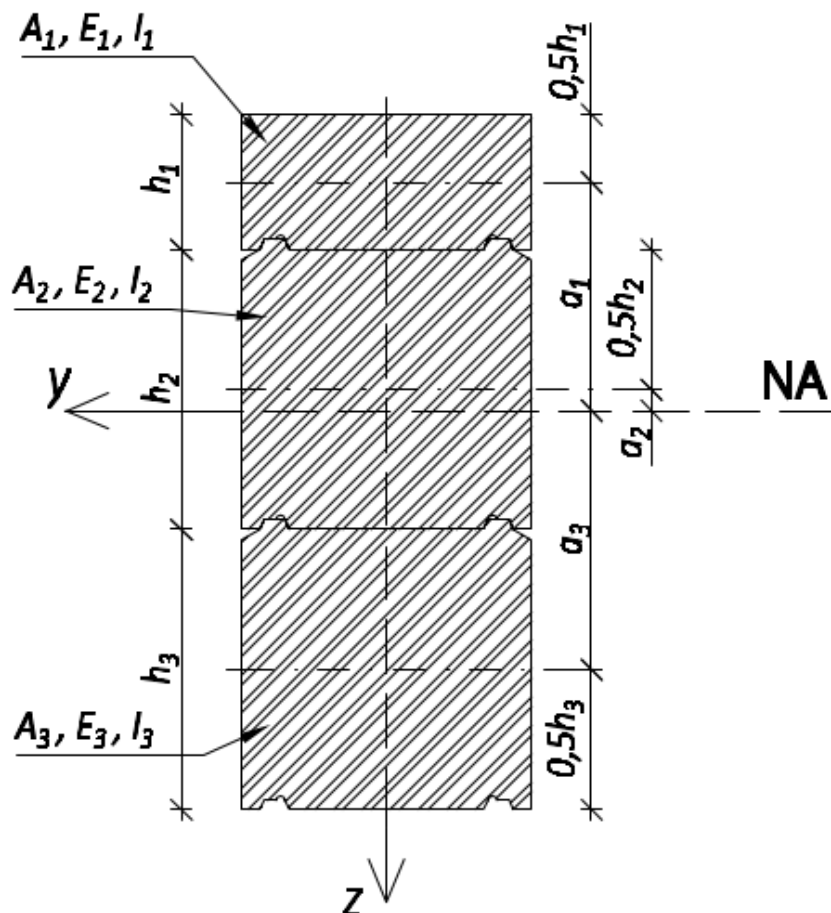
I_i on palkin osan neliomomentti (mm^4), $I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$,

A_i on palkin osan pinta-ala (mm^2), $A_i = b_i h_i$

γ_i on kerroin, jolla huomioidaan liukumien vaikutus yhdistetyn rakenteen toimintaan ja

a_i on palkin osan pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista (mm) (SFS-EN 1995-1-1).

Palkin osan neliomomenttia ja pinta-alaa määrittäessä laskennassa huomioitava hirsien poikkileikkauksen leveys b_i ja korkeus h_i määritetään kuten irrallisista osista koostuvassa hirsipalkissa (kts. Kuva 29). Alla olevassa kuvassa (Kuva 30) on esitetty esimerkin omaisesti kolmesta hirrestä mekaanisin liittimin kootun palkin poikkileikkaus, jossa on selvennetty yllä esitettyjä merkintöjä.



Kuva 30. Kolmesta osasta koostuvan hirsipalkin merkintöjä. Ylin hirsi on muita matalampi.

Kerroin γ_i määritetään seuraavasti:

$$\gamma_2 = 1 \text{ ja}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i^2}{K_i l^2}}, \text{ kun } i = 1 \text{ tai } i = 3, \quad (41)$$

jossa

s_i on liitinjako (mm)

K_i on liitoksen siirtymäkerroin (N/mm) ja

l on palkin jänneväli (mm) (SFS-EN 1995-1-1).

Liitoksen siirtymäkertoimelle käytetään käyttörajatilatarkasteluissa arvoa $K_i = K_{ser,i}$ ja murtorajatilatarkasteluissa arvoa $K_i = K_{u,i}$ (RIL 205-1-2017). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kertoimet γ_i ja siten kootun palkin tehollinen taivutusjäykkyys $(EI)_{ef}$ tulee määrittää erikseen murtorajatila- ja käyttörajatilatarkasteluita varten. Puikkoliittimille siirtymäkertoimet K_{ser} voidaan määrittää alla olevan taulukon (Taulukko 6) mukaan.

Taulukko 6. Siirtymäkertoimen K_{ser} arvot puikkoliittimille (N/mm), ρ_m on puun keskimääräinen tiheys (kg/m^3) ja d on liittimen paksuus (mm) (RIL 205-1-2017).

Liitintyyppi	K_{ser}
Tappivaarnat	$\rho_m^{1,5} d/23$
Pultit *)	
Ruuvit	
Naulat, kun esiporaus	
Naulat ilman esiporaus	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
*) Reiän välys on lisättävä pulttiliitoksen siirtymään	

Murtorajatilassa vaikuttavan liitoksen keskimääräinen siirtymäkerroin lasketaan SFS-EN 1995 mukaisesti kaavalla 42

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser}. \quad (42)$$

Kootun palkin keskimmäisen osan ($i = 2$) pintakeskiön etäisyys kootun palkin neutraaliakselista määritetään SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti kaavalla 43

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i}, \quad (43)$$

jossa merkinnät ovat edempänä mainittujen mukaisia. Osan 2 pintakeskiön etäisyys kootun palkin neutraaliakselista eli mitta a_2 on positiivinen, kun neutraaliakseli sijaitsee osan 2 pintakeskiön yläpuolella ja negatiivinen, kun neutraaliakseli sijaitsee osan 2 pintakeskiön alapuolella.

Jos kootun palkin osien poikkileikkaukset ovat suorakaiteen muotoisia, voidaan ylimmän osan ($i = 1$) pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista laskea kaavalla 44

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 \quad (44)$$

ja alimman osan ($i = 3$) pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista kaavalla 45

$$a_3 = \frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2} + a_2. \quad (45)$$

Koska etäisyyden a_2 laskemiseen käytetään kertoimia γ_i ja siten niihin vaikuttaa liitoksen siirtymäkerroin K_i , tulee myös mitat a_i määrittää erikseen murto- ja käyttörajatilan tarkasteluita varten.

Koottu palkki voi koostua myös vain kahdesta osasta. Tällöin kaavoista jätetään pois termit, joissa $i = 3$.

Näiden määriteltyjen arvojen avulla kootun palkin osille voidaan laskea kuormituksesta aiheutuvat jännitykset, palkin taipuma sekä liittimiin kohdistuva leikkausvoima. Taivutusmomentin aiheuttaman jännityksen mitoitusehto palkin osalle i on esitetty kaavassa 46

$$\sigma_i + \sigma_{m,i} \leq f_{m,d,i}, \quad (46)$$

jossa

σ_i on taivutusmomentin aiheuttaman normaalijännityksen mitoitusarvo palkin osassa i (N/mm^2),

$\sigma_{m,i}$ on taivutusmomentin aiheuttaman taivutusjännityksen mitoitusarvo palkin osassa i (N/mm^2), ja

$f_{m,d,i}$ on palkin osan i taivutuslujuuden mitoitusarvo (Porteous et al 2013).

Palkin osan taivutuslujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 1, ja siinä käytetään hirsien lujuusluokan mukaista taivutuslujuuden ominaisarvoa. Hirsipalkin osalta mekaanisin liittimin koottu palkin osat ovat hirsitä, joiden lujuusominaisuudet ovat samanlaiset keskenään. Siten mitoitusehto riittää tarkistaa vain sille kootun palkin hirrelle, jonka mitoitusjännitys on suurin.

Taivutusmomentin aiheuttama normaalijännitys palkin osassa i lasketaan SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti kaavalla 47

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M_{ed}}{(EI)_{ef}}, \quad (47)$$

jossa

M_{ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo tarkasteltavassa poikkileikkauksessa (Nmm).

Muut merkinnät ovat aiemmin tässä kappaleessa esitetyn mukaisia. Palkin osan normaalijännitys aiheutuu palkin osien välisen suhteellisen liukuman synnyttämästä aksiaaliseen rasituksesta taivutettaessa (Porteous et al. 2013).

Taivutusmomentin aiheuttama taivutusjännitys palkin osassa i lasketaan SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti kaavalla 48

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M_{ed}}{(EI)_{ef}}, \quad (48)$$

jossa

$\sigma_{m,i}$ on palkin osassa i vaikuttava taivutusjännityksen mitoitusarvo (N/mm^2).

Kaavan 48 muut merkinnät ovat aiemmin tässä kappaleessa esitetyn mukaisia. Palkin osan taivutusjännitys aiheutuu taivutusmomentin siitä osuudesta, joka kohdistuu kyseiselle palkin osalle (Porteous et al. 2013).

Kootun palkin suurin leikkausjännitys sijaitsee poikkileikkauksessa, jossa normaali- ja taivutusjännitys on nolla. Leikkausjännitys saa suurimman arvonsa neutraaliakselilla, eli palkin osassa $i = 2$. (Porteous et al. 2013). Leikkausjännityksen maksimiarvo voidaan laskea SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti kaavalla 49

$$\tau_{max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (EI)_{ef}} V_{ed}, \quad (49)$$

jossa

τ_{max} on leikkausjännityksen mitoitusarvo (N/mm^2),

$h = \frac{h_2}{2} + a_2$ (mm), eli etäisyys osien 2 ja 3 saumasta neutraaliakseliin ja

V_{ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo tarkasteltavassa poikkileikkauksessa (N).

Muut merkinnät kaavassa 49 ovat aiemmin tässä kappaleessa esitetyn mukaisia. Jos koottu palkki koostuu vain kahdesta osasta, h on etäisyys kootun palkin alapinnasta neutraaliakselille.

Mitoitusehto leikkaukselle on esitetty kaavassa 50

$$\tau_{max} \leq f_{v,d}, \quad (50)$$

jossa

$f_{v,d}$ on kaavan 1 mukaan määritetty hirren leikkauslujuuden mitoitusarvo (N/mm^2) (SFS-EN 1995-1-1).

Kun koottua palkkia rasittaa tasainen kuorma, lasketaan palkin hetkelliset taipumat kappaleessa 5.5.1 esitetyllä kaavalla 37, jossa termin $E_{0,mean} * I_{ef,y,i}$ tilalla käytetään kootun palkin tehollista taivutusjäykkyyttä $(EI)_{ef}$, jonka määrittäminen on esitetty aiemmin tässä kappaleessa kaavassa 40. Täytyy huomioida, että taipumatarkastelu tehdään käyttörajatilassa, ja tehollisena taivutusjäykkyytenä käytetään käyttörajatilan mukaista arvoa. Palkin lopputaipuma lasketaan edelleen kuten kappaleessa 5.5.1 kaavassa 39 on esitetty. Taipumarajat hetkelliselle taipumalle sekä lopputaipumalle ovat samat kuin esitetty kappaleessa 5.5.1 kaavoissa 35 ja 38.

Kootun palkin yhteen liittimeen kohdistuva leikkausvoima lasketaan kaavalla 51

$$F_{i,d} = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i}{(EI)_{ef}} V_{ed}, \quad (51)$$

jossa

$F_{i,d}$ on liittimeen kohdistuvan leikkausvoiman mitoitusarvo (N), ja

i on 1 tai 3, riippuen tarkasteltavasta liitossaumasta (SFS-EN 1995-1-1).

Muut merkinnät ovat aiemmin tässä kappaleessa esitetyn mukaisia. Liittimille pätee mitoitusarvo, joka on esitetty kaavassa 52

$$F_{i,d} \leq R_{v,d}, \quad (52)$$

jossa

$R_{v,d}$ on liittimen kestävyysmitoitusarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti (N).

Liittimen kestävyysmitoitusarvo lasketaan kaavalla 1, jossa liitoksen materiaali-osavarmuuslukuna γ_M käytetään arvoa 1,3 (RIL 205-1-2017). Liittimen kestävyysmitoitusarvon määrittäminen tehdään puikkoliitosteoriolla eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti. Kootun palkin liittiminä voidaan käyttää esimerkiksi ruuveja tai pultteja. Ristiinlaminoidusta hirrestä valmistettu koottu palkki voidaan sitoa yhteen myös vinoruuveilla. Täytyy huomioida, että mikäli samalla liittimellä sidotaan yhteen kootun palkin 3 osaa, liitos on kaksileikkeinen ja liitoksen mitoitus tulee tehdä kaksileikkeisen liitoksen

mitoitusohjeiden mukaisesti. Kaksileikkeisen liitoksen liittimeen kohdistuvan leikkausvoiman mitoitusarvo on suurempi kaavalla 51 lasketuista arvoista $F_{1,d}$ ja $F_{3,d}$.

Painuvan hirren yhteydessä mekaanisin liittimin kootussa hirsipalkissa tulisi huomioida hirren kuivumisesta johtuva kutistuma, ja sen vaikutus mekaanisin liittimin kootun hirsipalkin toimintaan, liittimien suunnitteluun ja mitoitukseen. Mekaanisin liittimin kootun palkin toiminta ja soveltuvuus käytännössä on epävarmaa, ja sitä voitaisiinkin tutkia lisää kokeellisesti. Liitteessä 2 on esitetty vertailulaskelmat kytkemättömistä osista kootulle sekä mekaanisin liittimin kootulle hirsipalkille, ja tuloksia on pohdittu kappaleessa 6.2.

5.6 Painuma

Hirsiseinän painuma koostuu hirsien vaakasaumojen välisten rakojen tiivistymisestä, kuormituksen aiheuttamasta hirsiseinän kokoonpuristumasta, puun virumisesta pitkäaikaisesta kuormituksesta johtuen, sekä hirsien kosteuspitoisuuden muutoksesta johtuvasta kuivumiskutistumasta (Mylly 2022). Hirsiseinän painuma lasketaan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmillä, ja kyseessä on palautumaton käyttörajatila. Painumattoman hirsiseinärakenteen pitkäaikainen muodonmuutos viruma huomioiden saa olla enintään 0,2 % hirsiseinärakenteen suunnitellusta korkeudesta (SFS5973:2022). Muille hirsityypeille kuin painumattomalle hirrelle painumalle ei ole annettu raja-arvoa, mitä se ei saisi ylittää. Lasketun painuman avulla voidaan kuitenkin arvioida ja suunnitella esimerkiksi painumattomien rakenteiden painumavaroja ja painuman sallivia kiinnikkeitä.

5.6.1 Vaakasaumojen välisten rakojen aiheuttama painuma

Vaakasaumojen väliset raot poistuvat rakenteesta yleensä jo rakennusvaiheessa rakenteiden oman painon vaikutuksesta (Kontiotuote Oy). Hirsien välisten vaakasaumojen rakojen tiivistymisestä aiheutuva painuma voidaan laskea kaavalla 53

$$u_s = n_s * \Delta_s, \quad (53)$$

jossa

u_s on vaakasaumojen tiivistymisestä aiheutuva painuma (mm),

n_s on hirsiseinän hirsien välisten vaakasaumojen lukumäärä, ja

Δ_s on yhden vaakasauman välilyönti asennusvaiheessa (mm) (Kontiotuote Oy 2017).

Hirsien välisten vaakasaumojen lukumäärä n_s on

$$n_s = n - 1, \quad (54)$$

jossa n on hirsikertojen lukumäärä.

Yhden vaakasauman välys asennusvaiheessa on valmistaja- ja seinäkohtainen. Painuman suuruutta voi arvioida välyksen arvolla $\Delta_s = 0,5 \text{ mm}$ (Kontiotuote Oy 2017).

5.6.2 Hirsiseinän kokoonpuristuma

Kuormituksesta aiheutuva hirsiseinän hetkellinen kokoonpuristuma lasketaan erikseen pysyville ja muuttuville kuormille. Hetkellinen kokoonpuristuma on näiden summa, joka lasketaan kaavalla 55

$$u_{inst} = u_{inst,g} + \sum u_{inst,q}, \quad (55)$$

jossa

u_{inst} on seinän hetkellinen kokoonpuristuma (mm),

$u_{inst,g}$ on pysyvän kuorman aiheuttama hetkellinen kokoonpuristuma (mm), ja

$u_{inst,q}$ on muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen kokoonpuristuma (mm).

Kuorman aiheuttama hetkellinen kokoonpuristuma lasketaan Hooken lakiin perustuvala kaavalla 56

$$u_{inst,i} = \frac{\sigma_{c,d}}{E_{mean}} * H, \quad (56)$$

jossa

$u_{inst,i}$ on hetkellinen kokoonpuristuma (mm) (pysyvstä TAI muuttuvasta kuormasta),

$\sigma_{c,d}$ on pysyvän tai muuttuvan kuorman aiheuttama puristusjäännitys (N/mm^2),

E_{mean} on hirren lujuusluokan mukainen kimmomoduuli (N/mm^2), ja

H on seinän korkeus (mm).

Kimmomoduuliksi E_{mean} valitaan lujuusluokan mukainen syysuuntaisen kimmomoduulin arvo $E_{mean,0}$ ristiinlaminoidulle hirrelle ja syysuuntaa vastaan kohtisuoran kimmomoduulin arvo $E_{mean,90}$ lamelli-, massiivi- sekä pyöröhirrelle.

Puristusjäännityksen mitoitusarvo $\sigma_{c,d}$ lasketaan kaavalla

$$\sigma_{c,d} = \frac{P_k}{A_{eff}}, \quad (57)$$

jossa

P_k on käyttörajatilan ominaisyhdistelmän mukainen pysyvän tai muuttuvan kuorman arvo (N),

A_{eff} on tehollinen pinta-ala kokoonpuristumassa (mm^2).

Tehollinen pinta-ala kokoonpuristuman yhteydessä lasketaan kaavan 58 mukaan

$$A_{eff} = t_{ef} * L, \quad (58)$$

jossa

t_{ef} on poikkileikkauksen tehollinen leveys (mm), ja

L on seinän pituus (mm).

Poikkileikkauksen tehollinen leveys t_{ef} lasketaan kuten tukipaineen osalta, eli ristiinla-
minoidulle hirrelle t_{ef} on pystysuuntaisten lamellien yhteenlaskettu leveys ilman va-
rauksia, lamelli- ja massiivihirrelle t_{ef} on poikkileikkauksen leveys ilman varauksia ja
pyöröhirrelle t_{ef} on poikkileikkauksen varauksen leveys (kts. Kuva 29).

Viruman huomioiva seinän loppukokoonpuristuma lasketaan hetkellisten painumien
avulla kaavalla 59

$$u_{fin} = u_{inst,g}(1 + k_{def}) + u_{inst,q,1}(1 + \psi_2 k_{def}) + \sum u_{inst,q,i}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def}), \quad (59)$$

jossa

u_{fin} on seinän lopputilassa vallitseva kokoonpuristuman aiheuttama painuma
(mm),

$u_{inst,g}$ on pysyvän kuorman aiheuttama hetkellinen painuma (mm),

$u_{inst,q,1}$ on kuormitusyhdistelmän mukaisen määräävän muuttuvan kuorman ai-
heuttama hetkellinen painuma (mm),

$u_{inst,q,i}$ on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen pai-
numa (mm),

k_{def} on virumaluku,

ψ_2 ja $\psi_{2,i}$ on muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuuden yhdistelykerroin, ja

$\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman ominaisyhdistelyssä käytettävä kerroin (SFS-EN
1995-1-1).

Virumaluku sekä yhdistelykertoimet määräytyvät kuten hirsipalkin taipuman määrittä-
misessä. Virumaluvun k_{def} ja yhdistelykertoimien arvoja on esitetty aiemmin työssä (kts.
Taulukko 4 ja Taulukko 5).

5.6.3 Kosteusmuodonmuutoksen aiheuttama painuma

Lamelli-, massiivi- ja pyöröhirrellä kosteusmuodonmuutoksen myötä tapahtuva kuivumiskutistuma aiheuttaa suurimman osan hirsiseinän painumasta. Ristiinlaminoidun hirren kosteusmuodonmuutos ja siten sen aiheuttama painuma on hyvin pieni, johtuen pystysuuntaisista lamelleista. Kosteusmuodonmuutoksesta aiheutuvaa seinän painumaa voidaan arvioida kaavalla 60

$$u_m = \Delta M * \frac{\Delta_m}{100 \%} * H, \quad (60)$$

jossa

- u_m on kosteusmuodonmuutoksen aiheuttama seinän painuma (mm),
 ΔM on hirren kosteuspitoisuuden muutos ($\% - yksikkö$),
 Δ_m on hirren poikkileikkauksen korkeuden muutos ($\%/ \% - yksikkö$), ja
 H on seinän korkeus (mm) (Kontiotuote Oy 2017).

Havupuusahatavaran poikkileikkauksen mittamuutoksille voidaan käyttää arvoa $\Delta_m = 0,25 \%/ \% - yksikkö$ (Puuinfo Oy 2020). Oletettavasti tätä arvoa voidaan siten käyttää hirren poikkileikkauksen korkeuden muutokselle lamelli-, massiivi- ja pyöröhirren tapauksessa. Havupuusahatavaran pituuden mittamuutokselle voidaan käyttää arvoa $\Delta_m = 0,02 \%/ \% - yksikkö$ (Puuinfo Oy 2020). Ristiinlaminoidun hirren poikkileikkauksen korkeuden muutokselle voidaan siten käyttää tätä arvoa painumaa laskettaessa. Ero ristiinlaminoidun hirren ja muiden hirsityyppien välillä johtuu siitä, että ristiinlaminoidussa hirressä pystysuuntaisten lamellien syysuunta on hirren poikkileikkauksen korkeuden suuntainen, ja puun kosteuseläminen syysuunnassa on hyvin pientä verrattuna säteen tai tangentin suuntaiseen kosteuselämiseen, joka taas tulee kyseeseen lamelli-, massiivi- ja pyöröhirren kosteusmuodonmuutosta arvioitaessa.

Puurakennussarjoja koskevassa eurooppalaisessa arviointiasiakirjassa EAD 340308-00-00203 on myös annettu laskentatapa hirsiseinien hirsien kuivumiskutistumasta johtuvan painuman arviointiin. Sen mukaan hirsiseinän painuma korkeusmetriä kohti voidaan laskea kaavalla 61

$$u = k * \Delta M, \quad (61)$$

jossa

- k on painumakerroin ($mm / (m * \% - yksikkö)$), ja
 ΔM on hirren kosteuspitoisuuden muutos ($\% - yksikkö$) (EAD 340308-00-00203).

Painumakertoimelle k voidaan käyttää pyöröhirrelle arvoa $k = 3 \text{ mm}/(m * \% - \text{yksikkö})$ ja massiivi- sekä lamellihirrelle arvoa $k = 2,5 \text{ mm}/(m * \% - \text{yksikkö})$, jos tarkempaa arviota ei ole tehty valmistajakohtaisesti (EAD 340308-00-00203). EAD:ssa ei ole annettu ristiinlaminoidun hirren painumakertoimen arvoa. Koko hirsiseinän kosteusmuodonmuutoksesta aiheutuva painuma voidaan laskea vielä kaavalla 62

$$u_m = u * H, \quad (62)$$

jossa H on seinän korkeus (m).

Kaavoilla 60 ja 62 lasketuille hirsiseinän painumille saadaan sama kosteusmuodonmuutoksen aiheuttama painuma massiivi- ja lamellihirren tapauksessa. Pyöröhirsiseinälle saadaan suurempi painuma kaavalla 62 laskettuna, sillä laskentatavassa pyöröhirrelle on annettu oma, isompi painumakerroin, kun taas kaavassa 60 pyöröhirren poikkileikkauksen korkeuden muutosta arvioidaan samalla arvolla kuin lamelli- ja massiivihirrellä. Pyöröhirsiseinän painumaa arvioidessa on suositeltavaa käyttää kaavaa 62, jotta saadaan varmemmalla puolella oleva arvio painuman suuruudesta.

5.6.4 Kokonaispainuma

Hirsiseinän lopputilan kokonaispainuma lasketaan edellä esitettyjen painumien summana kaavalla 63

$$u_{tot} = u_s + u_{fin} + u_m, \quad (63)$$

jossa

u_{tot} on hirsiseinän lopputilan kokonaispainuma (mm),

u_s on vaakasaumojen tiivistymisestä aiheutuva painuma (mm),

u_{fin} on seinän lopputilassa vallitseva kokoonpuristuman aiheuttama painuma (mm), ja

u_m on kosteusmuodonmuutoksen aiheuttama seinän painuma (mm) (Kontiotuote Oy 2017).

Kokonaispainumasta vaakasaumojen tiivistymän aiheuttama painuma tapahtuu pääasiassa jo rakennusaikana. Myös loput painumasta tapahtuu pääosin ensimmäisen kahden vuoden aikana rakennuksen valmistumisesta. Ajan myötä hirsiseinän painuminen vähenee ja lopulta loppuu kokonaan. Hirsiseinän korkeus kuitenkin vaihtelee kosteuden muutosten mukaan koko rakenteen elinkaaren ajan. (Mylly 2022, Kontiotuote Oy 2017)

5.7 Jäykistävän hirsiseinän mitoitus

Hirsiseinän jäykistyskapasiteetti ja vaakakuorman kestävyys määritetään hirren paneelileikkauskestävyyden ja vaarnauksen leikkauskestävyyden perusteella. Lisäksi jäykistävän hirsiseinän mitoituksessa tulee tarkastella seinän ankkurointitarve sekä seinän yläpään vaakasiirtymä. Hirsiseinän toimintaa jäykistävänä rakenteena on selvitetty kappaleessa 4.3. Jäykistävän hirsiseinän mitoitukseen on tehty Excel-pohjainen mitoitusohjelma, joka on päivitetty versioon 1.3 keväällä 2024. Mitoitusohjelma on saatavilla Puuinfon verkkosivuilla. Mitoitusohjelma mitoittaa jäykistävän hirsiseinän huomioiden hirren paneelileikkauskestävyyden, hirsien välisten vaakasaumojen vaarnauksen leikkauskestävyyden, seinän ankkurointitarpeen alapuoliseen rakenteeseen ja jokaisessa hirsisaumassa, sekä seinän yläpään vaakasiirtymän käyttörajatilassa. Ohjelma esittää mitoitustulokset alapalkissa, josta voidaan tarkistaa, onko mitoitus kunnossa. Mitoitus perustuu eurokoodiin SFS-EN 1995-1-1. (Puuinfo Oy 2024). Ohjelma soveltuu rakennesuunnittelijan käyttöön jäykistävää hirsiseinää suunniteltaessa. Tässä työssä perehdytään teoriaan jäykistävän hirsiseinän mitoituksen taustalla ja esitellään mitoitusohjelman toimintaperiaatetta. Lisäksi työhön on tehty esimerkkilaskelma jäykistävän hirsiseinän mitoituksesta tällä mitoitusohjelmalla. Esimerkkilaskelma löytyy liitteestä 3, ja laskennan etenemistä on esitetty kappaleessa 6.3. Lisätietoa jäykistävän hirsiseinän mitoituksesta löytyy Puuinfon koulutusmateriaaleista ja esimerkkilaskelmista. Aiheesta on tehty myös useampia opinnäytetöitä. Mitoitusohjelma ei käsittele aukollisen jäykistävän seinän mitoitusta, joka voisi olla seuraava jatkokehitystarve ohjelman kehityksessä.

5.7.1 Mitoitusohjelmaan syötettävät perustiedot

Mitoitusohjelmaan tulee syöttää rakenteesta seuraavat perustiedot: rakenteen käyttöluokka, seinän vaarnatyypin sekä edelleen käytettävä vaarna, hirsityyppi, hirsikertojen lukumäärä ja vaakarakenteiden (välipohja, yläpohja) lukumäärä. Hirsikertojen lukumäärä on rajattu 60 hirsikertaan ja vaakarakenteita voi valita enintään 4 kappaletta. Seinän pituus voi olla korkeintaan 10 metriä. Mitoitusohjelman hirsiprofiilikirjasto koostuu usean eri hirsivalmistajan tuotteista. (Puuinfo Oy 2024).

Kuormitustietoihin ohjelmassa syötetään seinän yläpään sallittu siirtymä millimetreinä, kuormakerroin seuraamusluokan mukaan, katon projektion tuulikuorma (pistekuorma, yksikkö kN), seinään kohdistuva tuulikuorma (metrikuorma, yksikkö kN/m), sekä vaakarakenteiden omapainon resultantit. Kaikki kuormat syötetään ominaisarvoina, ja mitoitusohjelma yhdistelee kuormat eurokoodin mukaisesti mitoitustarkasteluihin. (Puuinfo Oy 2024).

5.7.2 Hirren paneelileikkauskestävyys

Mitoitusohjelma laskee hirren paneelileikkauskestävyyden eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 leikkausta koskevan mitoitusohjeen mukaisesti. Leikkausjännityksen mitoitusarvo lasketaan seinään kohdistuvalla maksimileikkausvoimalla. Leikkautuva pinta-ala lasketaan hirren tehollisen leveyden b_{ef} ja leikkautuvan pituuden L_v tulona, ja laskennassa huomioidaan myös halkeilukerroin k_{cr} . Hirren poikkileikkauksen tehollinen leveys b_{ef} on lamelli- ja massiivihirren tapauksessa koko poikkileikkauksen leveys ja ristiinlaminoidun hirren tapauksessa hirren pituussuuntaisten lamellien yhteen laskettu leveys (kts. Kuva 29). Seinän leikkautuva pituus L_v on seinän vapaa pituus eli nurkkien väli. (Puuinfo Oy 2024).

Yleensä hirren paneelileikkauskestävyyden käyttöaste jää hyvin pieneksi, ja seinän leikkausvoimakestävyyttä rajoittaa vaarnauksen kestävyys.

5.7.3 Vaarnauksen leikkausvoimakestävyys

Mitoitusohjelmassa lamelli- ja massiivihirren vaarnaukseen voidaan valita käytettäväksi osakierteiset ruuvit tai teräspultilla toteutetut tappivaarnat. Molemmat vaarnatyypit ovat kohtisuorassa kulmassa (90 astetta) hirren pituussuuntaan nähden. Ristiinlaminoidulle hirrelle voidaan valita vaarnaustavaksi osakierteiset ruuvit tai täyskierreruuveilla toteutetut ristiruuviparit. Osakierteiset ruuvit ovat 90 asteen kulmassa ja ristiruuviparit 45 asteen kulmassa hirren pituussuuntaan nähden. Hirsivalmistajat ovat teettäneet ruuvi-vaarnaliitosten leikkauskestävyyksille koekuormituksia, joilla ruuveille on saatu parempi leikkauskapasiteetti kuin eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti laskemalla (Lahtela 2021). Mitoitusohjelmassa voidaan valita, määritetäänkö vaarnan kestävyys hirsivalmistajan teettämien koekuormitustulosten mukaisesti vai eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 mukaisesti laskemalla. Jos ohjelmassa valitaan hirsivalmistajan mukainen vaarnan leikkauskestävyys, se rajaa käytettävissä olevat hirsityypit vain kyseisen hirsivalmistajan hirsityyppeihin, joihin vaarnaustapa ja koetulokset soveltuvat. (Puuinfo Oy 2024).

Mitoitusohjelmaan tulee hirsi- ja vaarnatyypin valinnan jälkeen valita vaarnojen tai ristiruuviparien määrä yhtä hirttä kohden sekä lisäksi ruuvien tunkeuma hirsiiin. Terästappivaarnaukselle ohjelma määrittää itse tapin tunkeuman. (Puuinfo Oy 2024).

Valittujen tietojen perusteella ohjelma laskee yhden vaarnan leikkausvoimakestävyyden sekä koko hirsisauman leikkausvoimakestävyyden perustuen joko eurokoodiin SFS-EN 1995-1-1 tai hirsivalmistajan testituloksiin. Hirsisauman leikkausvoimakestävyyden tulee olla suurempi kuin seinään kohdistuva maksimileikkausvoima.

5.7.4 Seinän leikkaussiirtymä

Hirsiseinän leikkaussiirtymä eli vaakasiirtymä koostuu hirsien siirtymästä sekä hirsien välisten vaarnausten liitosiirtymästä. Terästappivaarnauksessa huomioidaan lisäksi välyksen aiheuttama vaakasiirtymä. Näistä yleensä hirren siirtymä on pieni, ja suurin osa vaakasiirtymästä koostuu vaarnausliitoksen siirtymästä (Lahtela 2021). Vaakasiirtymän laskenta tehdään käyttörajatilassa. Siirtymän laskemiseen voidaan käyttää hirsiseinään kohdistuvaa keskimääräistä leikkausvoimaa (Puuinfo Oy 2022). Mitoitusohjelma määrittää itse siirtymän laskennassa käytettävän leikkausvoiman arvon.

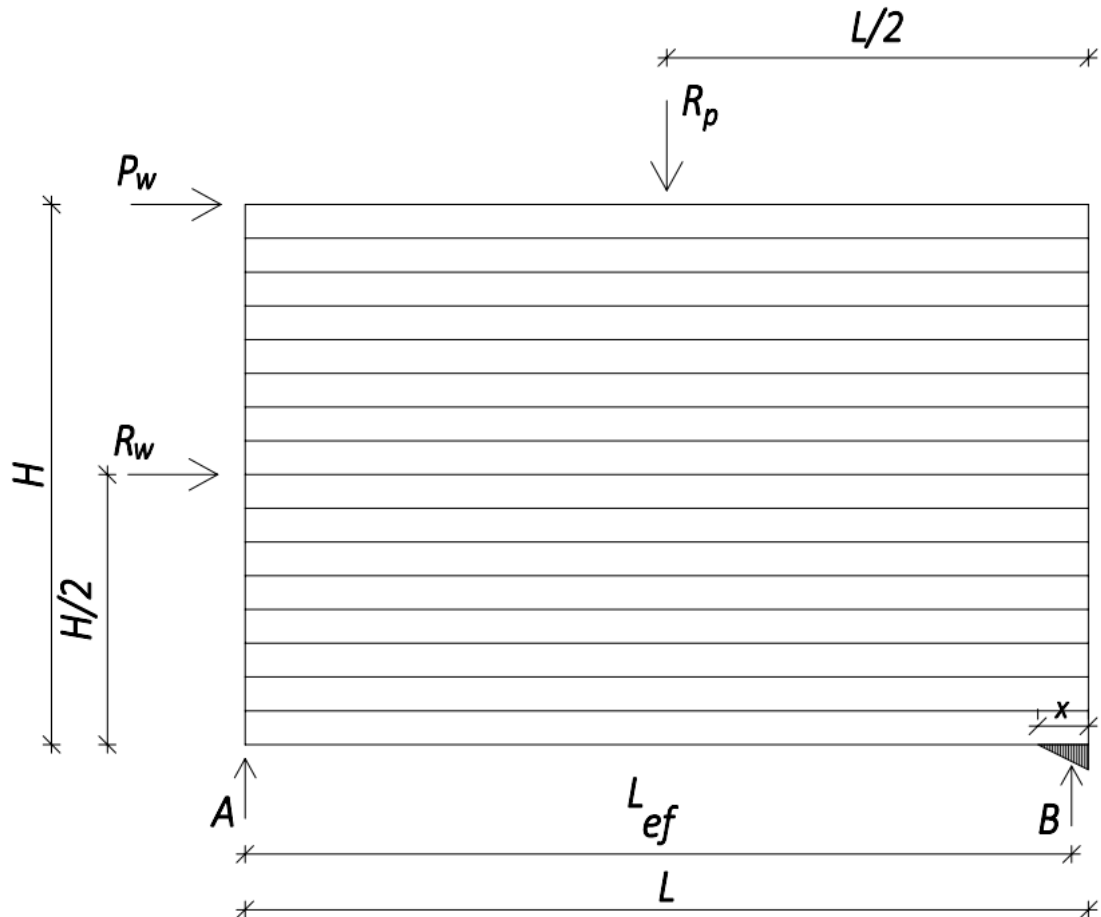
Mitoitusohjelma laskee hirsien aiheuttaman leikkaussiirtymän hirren leikkausjäykkyyden avulla, joka lasketaan edelleen hirren nousukorkeuden, leikkautuvan pinta-alan sekä hirren lujuusluokan mukaisen liukumoduulin avulla. Vaarnauksen aiheuttama seinän leikkaussiirtymä lasketaan vaarnan siirtymäkertoimen avulla, ja lisäksi vaarnauksen leikkaussiirtymään vaikuttaa vaarnauksen kulma hirren syysuntaan nähden. (Puuinfo Oy 2024).

Seinän yläpään vaakasuuntaisen leikkaussiirtymän mitoitusohjelma määrittää lopuksi laskemalla yhteen hirsien aiheuttaman seinän leikkaussiirtymän, vaarnauksen aiheuttaman seinän leikkaussiirtymän sekä mahdollisen vaarnan välyksen aiheuttaman seinän leikkaussiirtymän (Puuinfo Oy 2024). Jos yhteenlaskettu seinän yläpään vaakasiirtymä on pienempi kuin laskennan alussa määritetty sallittu siirtymä, mitoitus on sen osalta kunnossa.

5.7.5 Seinän ankkurointitarve

Jäykistävä hirsiseinä tulee ankkuroida kiinni perustuksiin, mikäli seinä ei pysy kokonaan puristettuna. Ankkurointitarve tulee tarkistaa myös jokaisessa hirsisaumassa. Hirsien välisten saumojen olisi hyvä pysyä puristettuna koko seinän korkeudelta, jotta vaarnausten ei tarvitsisi kestää yhdistettyä vetoa ja leikkausta. Ankkurointivoiman pienentämiseksi tulee jäykistävälle seinälle ohjata mahdollisimman paljon omapainoa vaakarakenteiden avulla. (Puuinfo Oy 2024; Kontiotuote Oy 2017; Puuinfo Oy 2016).

Hirsiseinän mahdollisen ankkurointivoiman määrittämiseksi tulee laskea seinän puristetun reunan tukipinnan leveys x tukireaktiolle B , sen jälkeen seinän tukireaktion A puoleisen nurkan momentin tasapainoyhtälön avulla tukireaktion B suuruus ja edelleen tukireaktion A suuruus (Puuinfo Oy 2022). Alla olevassa kuvassa (Kuva 31) on esitetty jäykistävän seinän ankkurointitarpeen määrittämisessä tarvittavia merkintöjä.



Kuva 31. Jäykistävän seinän ankkurointitarpeen määrittämisessä käytettäviä merkintöjä.

Tukireaktion B tukipinnan leveys x sekä tukireaktion B suuruus saadaan määritettyä seinän nurkan A ympäri muodostetuista momentin tasapainoyhtälöistä, ja tukireaktion A suuruus lopulta vertikaalisuuntaisten kuormaresultanttien (kts. Kuva 31 merkinnät A , B ja R_p) tasapainoyhtälöstä (Puuinfo Oy 2022). Jos tukireaktio A on vetoa, tulee hirsiseinä ankkuroida alapuoliseen rakenteeseen vähintään tälle voimalle.

Hirsisaumojen ankkurointitarve määritetään myös momentin ja normaalivoiman tasapainoyhtälöistä. Tukireaktion B_i suuruus hirsisaumassa seinän nurkan B puolella tasolla i määritetään seinän nurkan A puoleisen reunan ympäri muodostetun momentin tasapainoyhtälön avulla, jossa huomioidaan tasolla vaikuttava taivutusmomentti $M_{d,i}$ ja normaalivoiman resultantti $N_{d,i}$. Nurkan A puoleinen hirsisauman tukireaktio A_i määritetään vertikaalisuuntaisten kuormaresultanttien tasapainoyhtälöstä, jossa huomioidaan nyt A_i , B_i sekä $N_{d,i}$. (Kontiotuote Oy 2017). Jos tukireaktio A_i on vetoa, hirret tulee ankkuroida toisiinsa tälle voimalle. Hirsisaumojen tulisi pysyä puristettuna, jotta hirsien välistä vaarnausta ei tarvitsisi mitoittaa vedon ja leikkauksen yhteisvaikutukselle.

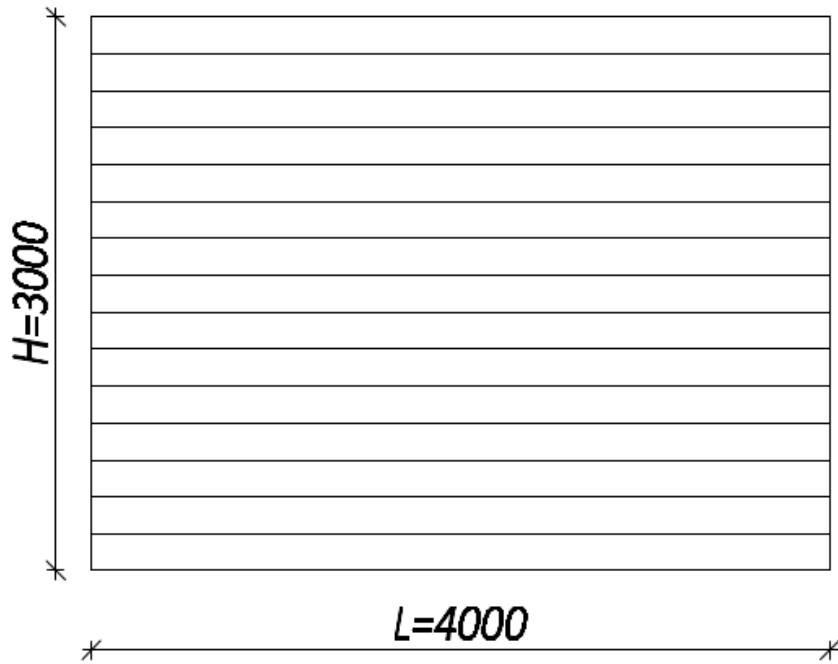
Mitoitusohjelma määrittää tukireaktiot sekä tarkistaa ankkurointitarpeen hirsisaumoissa edellä esitetyn mukaisesti. Mikäli tukireaktio A on vedolla, mitoitusohjelma ilmoittaa ankkurointivoiman suuruuden, ja seinän ankkurointi tulee suunnitella siten, että se kestää vähintään tämän voiman. (Puuinfo Oy 2024).

6. SOVELLUSLASKELMAT

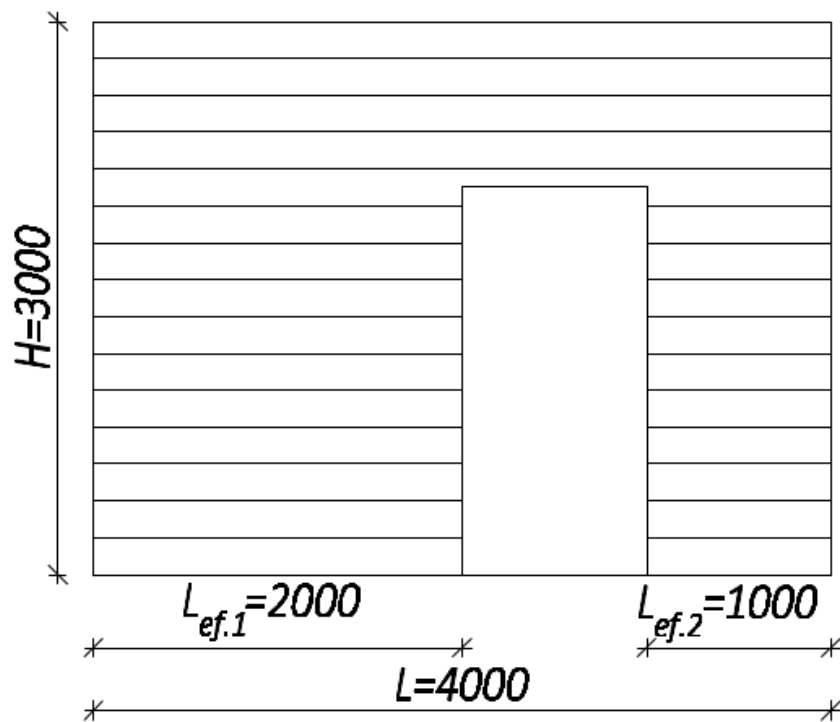
Tässä kappaleessa on esitelty työn liitteeksi tehtyjen sovellus- ja vertailulaskelmien tuloksia, johtopäätelmiä ja pohdintoja. Laskelmat löytyvät työn liitteistä. Laskelmissa on sovellettu kappaleen 5 mukaisia mitoitusehtoja ja -oletuksia.

6.1 Nurjahduskestävyys

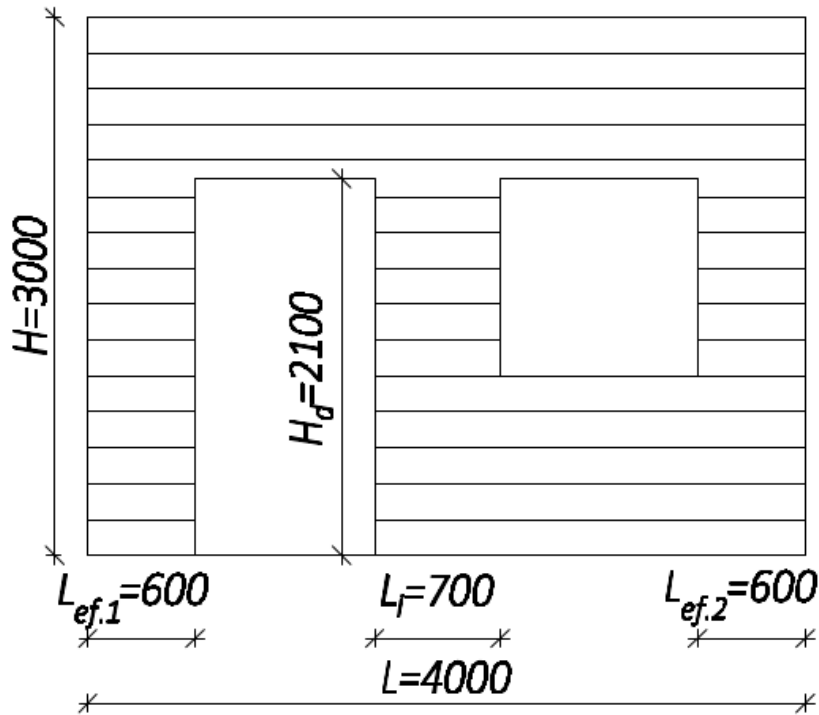
Nurjahduskestävyyden sovelluslaskelmat toteutettiin vertailemalla kappaleessa 5.2 esitettyä kolmea eri mitoitus tapaa. Mitoitustavat olivat VTT Rakennustekniikan (2000) lausunnon RTE3718/00 mukainen yleisesti käytössä oleva hirsiseinien pystykuorman kestävyden mitoitus tapa, Bedon et al. (2017) tutkimus ja standardisoiduksi mitoitus tavaksi ehdottama hirsiseinien nurjahduskestävyyden mitoitusperiaate sekä Honkarakenne Oyj:n yrityskohtainen VTT-S-05041-17 (2017) lausunnon mukainen mitoitus tapa hirsiseinien nurjahduskestävyyden määrittämiseen. Laskelmissa tarkasteltiin kolme eri tapusta: aukoton hirsiseinä (kts. Kuva 32), hirsiseinä, jossa on yksi aukko (kts. Kuva 33), sekä hirsiseinä, jossa on kaksi aukkoa (kts. Kuva 34). Tarkasteltavan seinän pituus oli 4 metriä ja korkeus 3 metriä. Hirsityypiksi valittiin Honkarakenne Oyj:n lamelli-hirsi MLL204, jotta laskelmissa voitiin tarkastella myös lausunnon VTT-S-05041-17 mukainen mitoitus tapa. Hirren lujuusluokka oli C22, mutta seinän puristuskestävyyttä määritettäessä lujuusominaisuuksina voitiin käyttää lujuusluokan C24 mukaisia arvoja (VTT-S-05041-17). Koska tarkasteltiin lamellihirttä, puristuslujuutena ja kimmomoduulina käytettiin syysuuntaa vastaan kohtisuoran lujuuden mukaisia arvoja, mikäli mitoitustavassa näitä tarvittiin.



Kuva 32. Tapaus 1: aukoton hirsiseinä.



Kuva 33. Tapaus 2: Hirsiseinä, jossa yksi aukko.



Kuva 34. Tapaus 3: Hirsiseinä, jossa kaksi aukkoa.

Jokaisella mitoitustavalla laskettiin tarkasteltaville tapauksille koko hirsiseinän nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b,Rd}$ sekä hirsiseinälle kohdistuva murtorajatilan kuormitusyhdistelmän mukainen sallittu metrikuorma q_d . Koko seinän nurjahduskestävyyden ja sallitun metrikuorman laskeminen on yksinkertaistus, sillä esimerkiksi Honkarakenne Oyj:n mitoitustavassa jokainen seinäpilari tarkastellaan omanaan, eikä samalla seinällä olevien seinäpilareiden kestävyksiä lasketa yhteen ja määritetä koko seinän sallittua kuormaa. Laskettaessa koko seinän nurjahduskestävyys tällä tavoin, oletetaan, että kuorma jakautuu seinäpilareille niiden kestävyyksien suhteessa. Määrittämällä koko seinän nurjahduskestävyys, saatiin laskelmista vertailukelpoiset tulokset eri mitoitustavoilla. Muita yksinkertaistuksia/mitoitusoletuksia olivat muun muassa: kuorman oletetaan vaikuttavan keskeisesti, seinän kaarevuus oletetaan olevan enintään $H/400$ (H on seinän korkeus), seinää tukevien poikittaisseinien pituus on vähintään 600 mm, nurkkatyyppi on ristinurkka, sekä seinät on tapitettu ja varustettu kierretangoilla. Yhteenveto vertailulaskelmien tuloksista on esitetty taulukossa alempana (Taulukko 7).

Seinän sallittu metrikuorma q_d on laskettu kaavalla 64

$$q_d = N_{b,Rd}/L, \quad (64)$$

jossa

$N_{b,Rd}$ on mitoitustavan mukaan määritetty koko seinän nurjahduskestävyyden mitoitusarvo (kN), ja

L on koko seinän pituus (m), jossa on mukana myös aukot.

Tällä tavoin lasketussa sallitussa metrikuormassa oletetaan, että aukkojen ylityspalkit kestävät vähintään saman kuorman.

Taulukko 7. Nurjahduskestävyyden sovelluslaskelmien tulosten yhteenveto.

Mitoitustapa	Tapaus 1		Tapaus 2		Tapaus 3	
	$N_{b,Rd}$ (kN)	q_d ($\frac{kN}{m}$)	$N_{b,Rd}$ (kN)	q_d ($\frac{kN}{m}$)	$N_{b,Rd}$ (kN)	q_d ($\frac{kN}{m}$)
Bedon et al. (2017)	1848	462	677	169	326	82
Honkarakenne Oyj/ VTT-S-05041-17 (2017)	492	123	453	113	313	78
VTT Rakennustekniikka (2000)	490	122	395	99	301	75

Taulukosta 7 nähdään, että VTT Rakennustekniikan (2000) ja Honkarakenne Oyj:n teettämän lausunnon VTT-S-05041-17 mukaisesti lasketut kestävyiden mitoitusarvot ovat hyvin lähellä toisiaan jokaisessa tarkastellussa tapauksessa. VTT Rakennustekniikan (2000) mukaisessa mitoitusohjeessa aukollisen seinän mitoitusta ei ole huomioitu, joten vertailulaskelmissa mitoitustapaa sovellettiin huomioimalla seinän pituutena ehjät seinäkaistaleet olettaen, että aukon pielten karapuut estävät aukon pielten nurjahduksen. Tämä oletus on iso yksinkertaistus ja lisäksi aukon pielten karapuut tulisi mitoittaa tarkasti, jotta tämä oletus voisi pitää paikkaansa.

Bedon et al. (2017) mukaan lasketut nurjahduskestävyyden arvot ovat aukottomalla seinällä, sekä seinällä, jossa on yksi aukko, huomattavasti suuremmat kuin kahdella muulla mitoitustavalla laskettuna. Tapauksessa 3, eli tarkastellessa seinää, jossa on kaksi aukkoa, kaikilla eri mitoitustavoilla saadut kestävyiden arvot ovat yllättävän lähellä toisiaan. Kun hirsiseinä on aukoton, tai siinä on yksi aukko, Bedon et al. (2017) mukainen mitoitustapa käsittää hirsiseinän ohuena laattana ja kriittinen nurjahduskuorma määritetään siten ohuen laatan teoriolla. Etenkin aukottomalle seinälle kriittisen nurjahduskuorman laskennassa käytettävä kerroin $k_\sigma = 6,97$ on suuri, minkä seurauksena kriittinen nurjahduskuorma ja edelleen nurjahduskestävyys saa suuren arvon muihin mitoitustapoihin verrattuna. Bedon et al. (2017) mukaan kerroin on määritetty oletuksella, että hirsiseinää tarkastellaan neljältä sivulta tuettuna laattana. Seinässä, jossa on

yksi aukko, kerroin on pienempi ($k_{\sigma} = 1,277$), ja siinä hirsiseinää tarkastellaan kolmelta sivulta tuettuna laattana. Siten kriittinen nurjahduskuorma sekä nurjahduskestävyys saavat jo selvästi pienemmän arvon ja on lähempänä kahdella muulla mitoitustavalla määritettyjä nurjahduskestävyyden arvoja. Bedon et al. (2017) mukaan hirsiseinän, jossa on kaksi aukkoa, tehollinen taivutusjäykkyys lasketaan kappaleessa 5.2 esitetyn kaavan 7 mukaan, kun aukon pielten jäykisteet ovat terästä. Vertailulaskelmissa aukon pielten karapuita ei huomioitu laskennassa, sillä puisilla karapuujäykisteillä ei voida olettaa syntyvän täydellistä liittovaikutusta hirsiseinäkaistaleen kanssa, kuten kaava olettaa teräksisten aukon pielten jäykisteiden osalta. Siten nurjahduskestävyyden määrittämisessä huomioidaan ainoastaan seinäkaistale. Jos karapuu huomioitaisiin laskennassa, kriittinen nurjahduskuorma ja siten seinän nurjahduskestävyys hieman kasvaisi, karapuiden koosta ja siten jäykyydestä riippuen.

Lausunnon VTT-S-05041-17 mukaan hirsiseinän, jossa on kaksi aukkoa, nurjahduskestävyyden määrittämisessä aukkojen välisen seinäpilarin neliömomentti lasketaan ainoastaan aukon pielten karapuiden neliömomentit huomioimalla. Vertailulaskelmassa karapuun kooksi valittiin poikkileikkaus $45 \times 145 \text{ mm}^2$. Karapuujäykisteen tehollinen neliömomentti jää siten melko pieneksi ja aukkojen välisen seinäpilarin nurjahduskestävyys on lähes olematon. Seinän nurjahduskestävyys koostuu siten suurimmaksi osin ristinurkkaisten poikittaisseinien jäykistämisestä seinäpilareista. Lausunnon VTT-S-05041-17 mukaan mitoituksessa oletetaan, että seinäpilarin kuormaa ottava leveys ulottuu korkeintaan kahden metrin etäisyydelle jäykistävästä elementistä, kuten poikittaisseinästä. Siten vertailulaskelmissa aukottoman hirsiseinän nurjahduskestävyys on määritetty kahtena kahden metrin levyisenä seinäpilarina, jolloin seinäpilarin leveys ei ulotu kahta metriä kauemmas jäykisteestä eli ristinurkkaisesta poikittaisseinästä. Myös tapauksessa 2, jossa hirsiseinässä on yksi aukko, seinäpilareiden jäykisteinä huomioidaan ainoastaan ristinurkalliset poikittaisseinät ja seinäpilareiden leveys on mitta nurkasta aukon pieleen. Aukon pielten karapuita ei siis tässä tapauksessa huomioida jäykistävinä tai nurjahduskestävyyttä kasvattavana.

Mitoitustavoista yksikään ei kuitenkaan sovellu yleiseksi mitoitustavaksi ilman lisätutkimuksia. Bedon et al. (2017) mukainen mitoitustapa huomioi hirsiseinärakenteen monoliittisena rakenteena, ja tarkastelee seinää ohuen laatan teoriolla, kun seinä on aukoton tai kun siinä on yksi aukko. Todennäköisesti tämä vie laskennan tuloksia epävarmaan suuntaan. Tapauksessa, jossa seinässä on kaksi aukkoa, taas huomioidaan ainoastaan aukkojen välinen seinäkaistale, vaikka todennäköisesti seinäkaistaleet nurkasta aukon pieleen sekä nurkan antama tuki lisäävät koko seinän nurjahduskestävyyttä. Toisaalta voidaan myös olettaa, että koko seinän nurjahduskestävyys on seinän heik-

koimman osan nurjahduskestävyyden suuruinen ja siten pelkän aukkojen välisen seinäkaistaleen huomioiminen on perusteltua.

VTT-S-05041-17 lausunnon mukainen mitoitus tapa taas on yrityskohtainen ja soveltuu vain lausunnon mukaisille Honkarakenne Oyj:n hirsityypeille ja seinän jäykistystavoille, joten niiden käyttö yleisenä mitoitusperiaatteena ei tule kyseeseen. Lisäksi on epäselvää, huomioiko mitoitus tapa lainkaan hirsiseinäkaistaleen jäykkyyttä neliömomenttia laskettaessa, vai pelkästään jäykisteen. Ainakin kahden aukon välistä seinäpilaria mitoitettaessa neliömomentti muodostuu pelkästään aukon pielten karapuiden neliömomenteista, eikä seinän poikkileikkausta huomioida lainkaan neliömomentissa. Mikäli hirsiseinäkaistaletta ei ole huomioitu seinäpilarin neliömomentin laskennassa, voisi olettaa osan nurjahduskestävyyskapasiteetista jäävän käyttämättä.

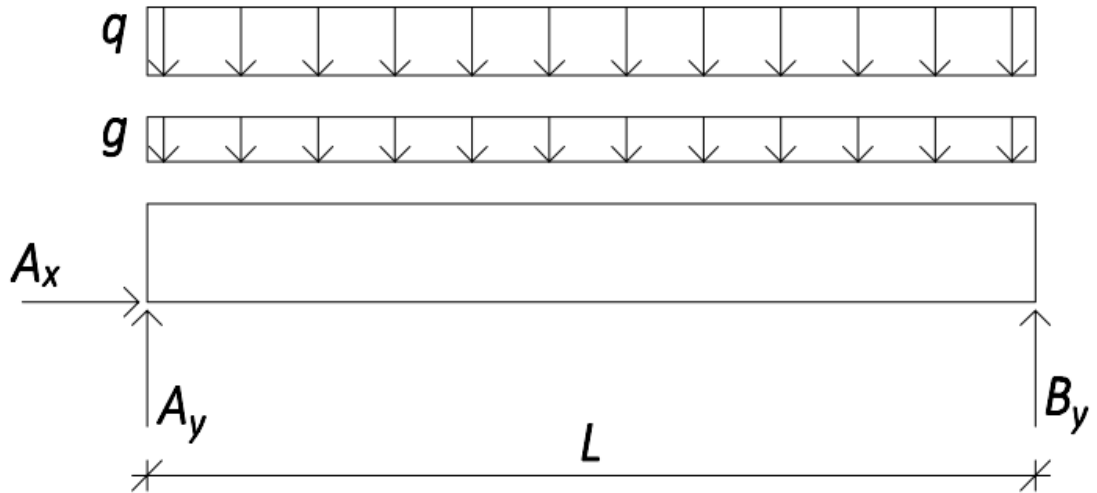
VTT Rakennustekniikan (2000) mukainen mitoitus tapa taas soveltuu sellaisenaan vain aukottomalle seinälle, sillä vertailulaskelmien mukaisia kaavojen sovelluksia ja oletuksia ei pystytä vahvistamaan ilman lisätutkimuksia.

Hirsiseinien nurjahdusmitoitus on siis edelleen haasteellista, sillä yleistä mitoitusohjetta ja -tapaa ei ole olemassa. Aiheeseen liittyen olisi selvästi jatkotutkimustarpeita, jotta laskennasta saataisiin tarkempi ja rakennesuunnittelijan käyttöön soveltuva.

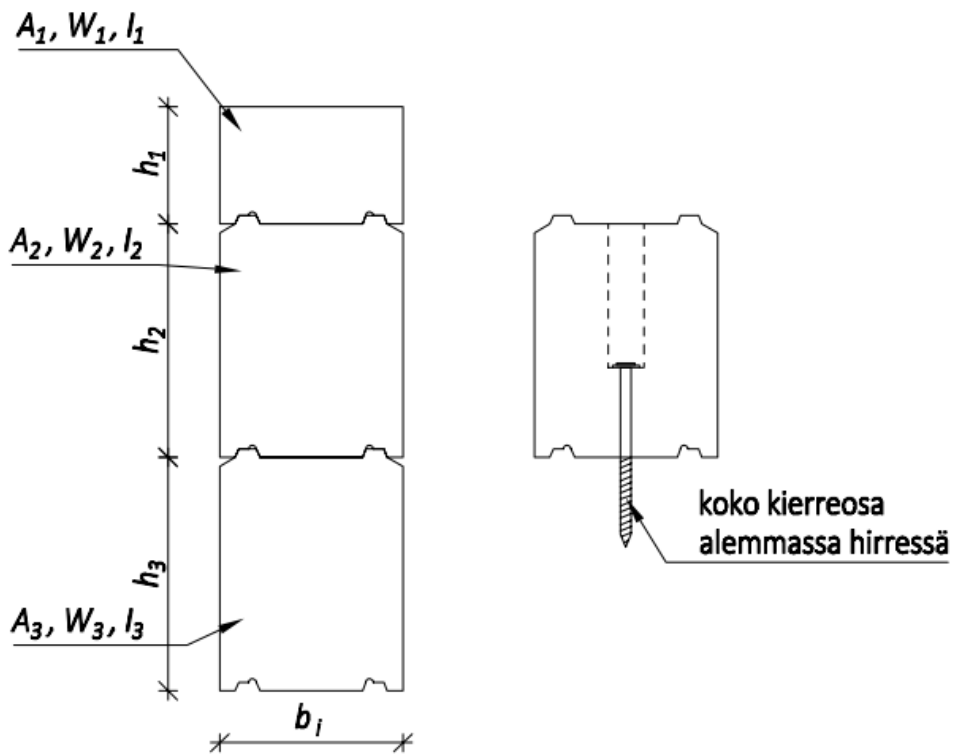
Hirsiseinien nurjahduskestävyyden vertailulaskelmat löytyvät työn liitteestä 1.

6.2 Hirsipalkki

Hirsipalkin osalta sovelluslaskelmat suoritettiin vertailemalla kytkemättömistä osista kootun hirsipalkin kapasiteettia mekaanisin liittimin kootun hirsipalkin kapasiteettiin. Tarkasteltava hirsipalkki oli yksiaukkoinen ja molemmista päistään nivelellisesti tuettu aukkopalkki. Palkin pituus oli 3 metriä. Palkkia kuormitti pysyvä kuorma $g = 10 \text{ kN/m}$ sekä muuttuva kuorma $q = 15 \text{ kN/m}$, molemmat tasaisesti jakautuneena metrikuormana. Palkin poikkileikkaus koostui kolmesta osasta, joista kaksi alinta oli kokonaisia hirsisiä ja ylin puolikas hirsi. Laskelmat suoritettiin Honkarakenne Oyj:n MLL204 lamellihirrelle, jonka lujuusluokka on C22 (VTT-S-05041-17). Alla olevissa kuvissa on esitetty tarkasteltavan palkin rakennemalli (Kuva 35) ja hirsipalkin poikkileikkaus (Kuva 36). Kootussa palkissa liittiminä käytettiin osakierteisiä ruuveja, joiden koko kierreosan tulee sijaita alemmassa hirressä (kts. Kuva 36).



Kuva 35. Tarkasteltavan aukkopalkin rakennemalli.



Kuva 36. Tarkasteltavan aukkopalkin poikkileikkaus ja osakierteisen ruuvien pystysuuntainen sijoittelu mekaanisin liittimin kootussa palkissa.

Tarkasteltaville hirsipalkeille laskettiin käyttöasteet taivutukselle, leikkaukselle sekä hetkelliselle taipumalle ja lopputilan kokonaistaipumalle. Taivutus ja leikkaus tarkasteltiin murtorajatilassa, taipumat käyttörajatilassa. Alla olevassa taulukossa on esitetty hirsipalkkien käyttöasteet tarkastelluissa tilanteissa (Taulukko 8).

Taulukko 8. Aukkopalkin käyttöasteet eri mitoitusilanteissa.

Tarkasteltava tilanne	Palkki irrallisista kappaleista	Mekaanisin liittimin koottu palkki
Taivutus	57,8 %	52,3 %
Leikkaus	29,0 %	28,3 %
Hetkellinen taipuma	55,4 %	45,7 %
Lopputilan kokonaistaipuma	58,8 %	48,5 %

Taulukosta 8 nähdään, että käyttöasteiden erot kytkemättömistä osista koostuvan palkin ja mekaanisin liittimin kootun palkin välillä ovat melko pieniä. Suurin ero käyttöasteissa on taipumatarkasteluissa. Erot voisivat kasvaa, jos tarkasteltaisiin pidempää palkkia, tai jos liittimet olisivat isompia tai tiheämmin sijoiteltuja. Nyt liittiminä käytettiin osakierteisiä ruuveja, joiden halkaisija oli 12 mm ja liitinväli 300 mm.

Vertailulaskelmista voidaan päätellä, että tavanomaisissa tilanteissa kytkemättömistä osista kootun palkin kapasiteetti on riittävä, eikä palkin sitominen yhdeksi kappaleeksi mekaanisten liittimien avulla ole välttämättä kannattavaa. Kytkemättömistä osista kootun palkin käyttöasteet jäivät tarkastellussa tilanteessa sen verran pieniksi, että kapasiteetti riittää myös pidempään tai kuormitetumpaan palkkiin.

Kootun palkin mitoittaminen on haastavampaa ja monimutkaisempaa kytkemättömistä osista kootun palkin mitoittamiseen verrattuna. Mekaanisin liittimin kootun palkin valmistaminen ja kokoaminen on myös työläämpää verrattuna kytkemättömistä osista koostuvaan palkkiin. Lisäksi on epävarmaa, miten mekaanisin liittimin koottu palkki toimii käytännössä painuvan hirren tapauksessa, kun hirressä tapahtuu kuivumiskutistumaa. Mekaanisin liittimin kootun palkin osalta tulee tarkastella myös liittimiin kohdistuva leikkausvoima. Tarkastellussa tilanteessa leikkausvoima, jolle liittimet tulisi mitoittaa, oli 4,71 kN. Liittimeen kohdistuva leikkausvoima on sen verran suuri, ettei liittimen mitoittamista voi sivuuttaa.

Mekaanisin liittimin kootun hirsipalkin kapasiteetti ei ole niin paljon suurempi, että sen suosiminen suunnittelussa ja toteutuksessa olisi kannattavaa yleisesti. Mekaanisin liittimin kootun palkin käyttö voisi olla perusteltua tilanteissa, joissa kytkemättömistä osista kootun palkin kapasiteetti ei riitä, mutta todennäköisesti silloin hirsipalkin korvaaminen esimerkiksi liimapuupalkilla voisi olla kannattavampaa.

Aukkopalkkien vertailulaskelmat löytyvät kokonaisina työn liitteestä 2.

6.3 Jäykistävä hirsiseinä

Jäykistävän hirsiseinän osalta tehtiin esimerkkilaskelma versioon 1.3 päivitetyllä jäykistävän hirsiseinän mitoitusohjelmalla. Mitoitusohjelma on saatavilla Puuinfon verkkosivuilla. Esimerkkilaskelmassa tarkasteltiin yksinkertaista perustilannetta, jonka tarkoituksena on esitellä laskentaohjelman toimintaperiaatetta.

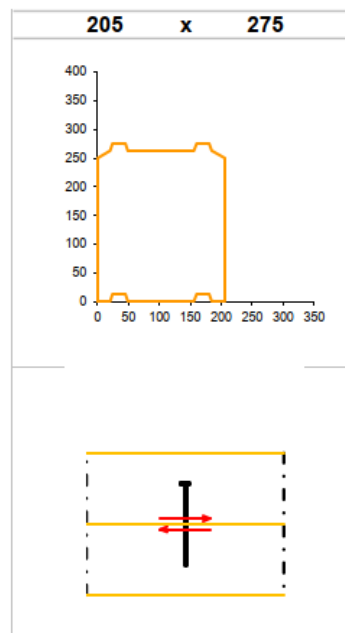
6.3.1 Rakenteen tiedot

Mitoitus tehtiin kaksikerroksiselle hirsiseinälle. Hirsityypiksi valittiin lamellihirsi, jonka leveys oli 205 mm ja korkeus 275 mm. Hirsikertoja valittiin 23 kappaletta, jolloin seinän kokonaiskorkeus oli 6049 mm. Seinän pituudeksi määritettiin 6000 mm. Vaakarakenteita valittiin 2 kappaletta, ja kerroskorkeudet olivat siten 3000 mm ja 3049 mm. Vaarnatyyppiä valittiin osakierteinen ruuvi, jonka kulma hirren pituussuuntaan nähden on 90 astetta. Ruuviksi valittiin Würth ASSY SK 3.0, jonka halkaisija oli 12 mm ja tunkeuma hirsiiin 150 mm. Liittimen mitoittavaksi valittiin EC5, eli ohjelma mitoittaa ruuvin tässä tapauksessa eurokoodin mukaisesti, ei hirsivalmistajien koekuormitustulosten perusteella. Vaarvoja eli ruuveja valittiin 10 kpl/hirsi. Tarkasteltavan seinän käyttöluokaksi määritettiin käyttöluokka 2, ja kuormituksen aikaluokka oli hetkellinen. Alla olevassa kuvassa on kuvakaappaus mitoitusohjelmasta, jossa on esitetty rakenteen tiedot (Kuva 37).

1.0 RAKENTEEN TIEDOT

Info

Käyttöluokka 2 / Hetkellinen aikaluokka	▼
Vaarnatyyppi: Ruuvi 90° (EC 5)	▼
Würth ASSY SK 3.0 / d = 12,0	▼
Hirsityyppi: Lamellihirsi 205x275	▼
Hirsikertoja 23 kpl	▼
Vaakarakenteita 2 kpl	▼
Vaarnamäärä	n = 10 kpl / hirsi
Ruuvin tunkeuma hirsiiin	ℓ_{er} = 150 mm
Seinän pituus	L = 6000 mm
Seinän korkeus	H = 6049 mm
Kerroskorkeus 1	H1 = 3000 mm
Kerroskorkeus 2	H2 = 3049 mm



Kuva 37. Tarkastellun jäykistävän hirsiseinän tiedot.

6.3.2 Kuormitus

Seuraavaksi laskentaohjelmaan tulee syöttää kuormitustiedot sekä seinän yläpään sallittu siirtymä käyttörajatilassa. Kuormat annetaan ominaisarvoina. Sallituksi siirtymäksi asetettiin 40 mm, joka vastaa enintään $h/150$ suuruista siirtymää. Katon projektion tuulikuormaksi määritettiin 7 kN ja seinän ominaistuulikuormaksi 3,0 kN/m. Vaakarakenneiden oman painon resultanteiksi määritettiin 30 kN. Ohjelmaan annetut kuormatiedot on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 38).

2.0 KUORMITUS

Seinän yläpään sallittu siirtymä käyttörajatilassa	$\omega =$	40 mm	->	$h / 150$
Kuormakerroin seuraamusluokan mukaan	$K_{FI} =$	1,0		
Katon projektion ominaistuulikuorma	$P_{w,k} =$	7,0 kN		
Seinän ominaistuulikuorma	$q_{w,k} =$	3,00 kN/m		
Seinän ominaistuulikuorman resultantti	$R_{q,w,k} =$	18,1 kN		
Vaakarakenteen 1 omapainon resultantti	$R1_{g,k} =$	30,0 kN		
Vaakarakenteen 2 omapainon resultantti	$R2_{g,k} =$	30,0 kN		

Kuva 38. Laskentaohjelmaan syötetyt kuormitustiedot.

6.3.3 Mitoitustulokset

Ohjelman ensimmäisen sivun alareunassa on nähtävillä mitoitustulokset tarkasteltavasta tilanteesta. Mitoitustuloksissa näytetään paneelileikkauskestävyys, vaarnauksen kestävyys, ankkurointi sekä yläpään vaakasiirtymä. Tuloksista on nähtävissä myös käyttöasteet paneelileikkauskestävyydelle, vaarnauksen kestävyydelle sekä yläpään vaakasiirtymälle. Mikäli joltain osin mitoitus ei ole kunnossa, tuloksissa lukee "VIRHE" kyseisen mitoitustarkastelun kohdalla. Jos hirsiseinä tulee ankkuroida, mitoitustuloksissa on ilmoitettu ankkuroitavan voiman suuruus. Esimerkkilaskelmassa kaikki mitoitustarkastelut olivat kunnossa. Paneelileikkauskestävyyden käyttöaste oli 1 %, vaarnauksen kestävyys 42,4 kN ja käyttöaste 89 %, yläpään vaakasiirtymä oli 8 mm ja käyttöaste 20 %. Ankkurointivoima oli 0,0 kN eli ankkurointia ei tarvita, sillä seinä pysyy kokonaan puristettuna. Mitoitustulokset on esitetty kuvassa alla (Kuva 39).

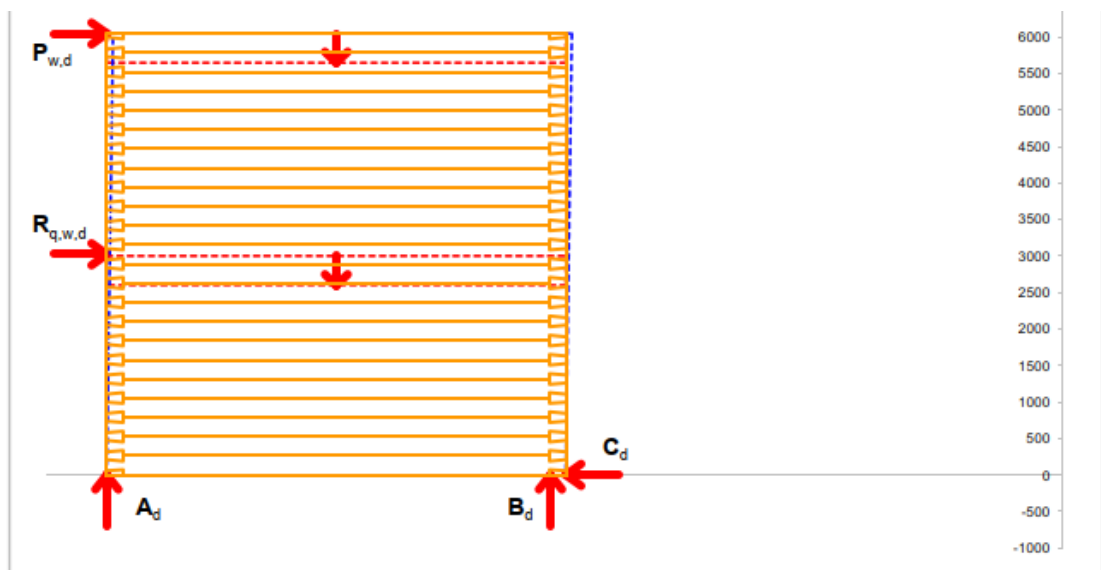
3.0 MITOITUSTULOKSET

Paneelileikkauskestävyys	Vaarnauksen kestävyys	Ankkurointi	Yläpään vaakasiirtymä
T_d	$\Sigma V_{R,d}$	F_d	u_{inst}
OK	42,4 kN	0,0 kN	8,0 mm
1 %	89 %	Ankkurointia ei tarvita	20 %

Kuva 39. Mitoitustulokset tarkastellusta tapauksesta.

Tarkemmin mitoitustarkastelut on esitetty laskentaohjelman seuraavilla sivuilla. Ohjelman toiselle sivulle piirretty tarkasteltavan seinän vapaakappalekuva, jossa näkyy syö-

tettyjen kuormitusten mukaiset kuormaresultanttien sekä tukireaktioiden sijainnit. Lisäksi sivulla on esitetty laskentaohjelman määrittämät seinän tukireaktioiden mitoitusarvot. Piirryneessä kuvassa näkyy myös vaakarakenteiden sijainti seinärakenteessa. Tarkastellun seinärakenteen pystysuuntainen tukireaktio seinän vasemmassa reunassa oli $A_{d,max} = 17,09 \text{ kN}$ ja oikeassa reunassa $B_{d,max} = 83,50 \text{ kN}$, sekä vaakasuuntainen tukireaktio oli $C_{d,max} = 37,72 \text{ kN}$. Alla olevassa kuvassa (Kuva 40) on esitetty mitoitusohjelman piirtämä tarkastellun seinärakenteen vapaakappalekuva sekä tukireaktiot.



Tukireaktiot

$A_{d,max}$	17,09	kN	Tukireaktioiden A_d ja B_d välisellä etäisyydellä	5800 mm
$B_{d,max}$	83,50	kN	Tukireaktioiden A_d ja B_d välisellä etäisyydellä	5763 mm
$C_{d,max}$	37,72	kN	Ulkoisista kuormista $P_{w,d}$ ja $R_{q,w,d}$	

Kuva 40. Tarkastellun hirsiseinän vapaakappalekuva sekä tukireaktiot.

Mitoitusohjelman kolmannella sivulla on esitetty tarkemmin hirren paneelileikkauskestävyyden, vaarnauksen leikkausvoimakestävyyden sekä seinän leikkaussiirtymän laskentaa, laskennassa käytettyjä lähtötietoja ja laskennan numeerisia arvoja. Esitettyjen tietojen avulla laskentaa on helppo tarkistaa sekä pohtia miten hirsiseinän jäykistyskapasiteettia pystyisi tarvittaessa kasvattamaan. Esimerkkilaskelmassa tarkastellun tapauksen mitoituslaskeluita on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 41).

Hirren paneelileikkauskestävyys

k_{mod}	1,10		Muunnoskerroin
γ_M	1,30		Hirren osavarmuusluku
V_d	37,72	N	Leikkausvoima (max)
L_v	5590,00	mm	Hirren leikkautuva pituus
$t_{ef,v}$	205,00	mm	Hirren leikkautuva leveys
k_{cr}	1,00		Halkeilukerroin
A_v	1145950,00	mm ²	Hirren leikkautuva pinta-ala
T_d	0,03	N/mm ²	Leikkajännitys
$f_{v,d}$	3,38		Leikkauslujuus
EHTO	0,01	< 1	

Ruuvivaarnauksen leikkausvoimakestävyys

k_{mod}	1,10		Muunnoskerroin
γ_M	1,30		Liitoksen osavarmuusluku
V_d	37,72	kN	Leikkausvoima (max)
Σn	10,00	kpl	Ruuvien yhteismäärä
d	12,00	mm	Ruuvien halkaisija (kierteen päältä)
l_{ef}	150,00	mm	Ruuvien tunkeuma hirsiiin
α	90,00	astetta	Ruuvien kulma syysuuntaan nähden
ρ_k	350,00	kg/m ³	Hirren ominaistiheys
$f_{t,k}$	13,62	N/mm ²	Reunapuristuslujuuden ominaisarvo
$M_{y,Rk}$	58000,00	Nmm	Ruuvien myötömomentin ominaisarvo
k_{ax}	-		Vinoruuvien ja syysuunnan huomioiva kerroin
$f_{ax,k}$	-	N/mm ²	Vinoruuvien ulosvetoparametri
$f_{sens,k}$	-	N	Vinoruuvien vetomurtokestävyys
n_{ef}	10,00	kpl	Ruuvien tehollinen määrä
$\gamma_{M,2}$	-		Ruuvien osavarmuusluku
$F_{ax,a,Rd}$	-	kN	Vinoruuvien ulosvetokestävyys
$F_{v,Rd}$	4,24	kN	Yhden vaarnan leikkausvoimakestävyys (EC 5-ohjeilla)
$\Sigma V_{R,d}$	42,37	kN	Vaarnauksen leikkausvoimakestävyys (EC 5-ohjeilla)
EHTO	0,89	< 1	

Seinän leikkaussiirtymä

G_{mean}	690,00	N/mm ²	Hirren liukumoduuli
ρ_{mean}	420,00	kg/m ³	Hirren keskitiheys
A_v	1145950,00	mm	Hirren leikkautuva pinta-ala
h_{ef}	263,00	mm	Hirren tehollinen korkeus
C_v	3006484,79	N/mm	Hirren leikkajäykkyys
K_{ser}	4490,84	N/mm	Vaarnan siirtymäkerroin
$u_{inst,log}$	0,13	mm	Hirsien aiheuttama seinän leikkaussiirtymä
$u_{inst,dow}$	7,87	mm	Vaarnauksen aiheuttama seinän leikkaussiirtymä
$u_{inst,dow}$	0,00	mm	Vaarnan välyksen aiheuttama seinän leikkaussiirtymä
Σu_{inst}	8,00	mm	Seinän yläpään vaakasuuntainen leikkaussiirtymä
EHTO	0,20	< 1	

Kuva 41. Esimerkkilaskelmassa tarkastellun tapauksen tarkempi mitoituslaskelu.

Jäykistävän hirsiseinän mitoitus laskentaohjelmalla on melko vaivatonta. Käyttöliittymä ja toimintaperiaate ovat yksinkertaisia, ja mitoituslaskelmuista on nähtävillä paljon numeerisia arvoja, joiden avulla laskentaa voi tarkastaa. Ensimmäisen sivun mitoituslaskelmissa näkee selkeästi, onko mitoitus kunnossa vai täytyykö jotain muuttaa, jotta hirsiseinän jäykistyskapasiteetti olisi riittävä. Mitoitusohjelma soveltuu perustilanteiden tarkasteluun, ja nopeuttaa suunnittelutyötä käsinlaskentaan verrattuna. Mitoi-

tusohjelmalla pystyy tarkastelemaan korkeaa hirsiseinää, ja seinän maksimipituus voi olla 10 metriä, joten hirsiseinän mittojen puolesta mitoitusohjelman rajoitukset eivät tule kovinkaan usein vastaan. Mitoitusohjelmalla ei kuitenkaan pysty tarkastelemaan esimerkiksi aukollista hirsiseinää ja siten sen jäykistyskapasiteettia. Mitoitusohjelman laajentaminen käsittelemään myös aukollista hirsiseinää olisikin varmasti tarpeellinen jatkokehitystarve.

Esimerkkilaskelma jäykistävän hirsiseinän mitoituksesta on esitetty liitteessä 3.

7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli perehtyä hirsirakenteiden rakennesuunnitteluun ja erityisesti hirsiseinien laskennalliseen mitoitukseen, sekä nostaa esiin tarpeellisia jatkotutkimustarpeita hirsiseinien mitoitukseen liittyen. Tutkimusmenetelmänä oli kirjallisuustutkimus. Aineistona työssä käytettiin yleisesti saatavilla olevien aineistojen, julkaisujen ja standardien lisäksi hirsivalmistajilta saatuja koekuormitusraportteja, mitoitusohjeita sekä muita lausuntoja. Työn tavoitteena oli koostaa kerätystä aineistosta mitoitusohjeistus, jonka avulla rakennesuunnittelija pystyisi tekemään vähintään urakkalaskentavaiheen tasoiset rakennesuunnitelmat hirsiseinistä. Työssä paneuduttiin erityisesti hirsiseinän nurjahdukseen. Lisäksi tarkasteltiin tukipainemitoitusta, hirsiseinän aukkopalkin mitoitusta, hirsiseinän följäreiden mitoitusta, hirsiseinän painuman laskentaa sekä jäykistävän hirsiseinän mitoitusta.

Hirsiseinien mitoitus tulisi tehdä puurakenteiden mitoitusta koskevan eurokoodien SFS-EN 1995-1-1 ja SFS-EN 1995-1-2 mukaisesti, mutta se ei kaikilta osin sellaisenaan sovellu hirsiseinän mitoitukseen. Hirsiseinien mitoitus ja suunnittelu perustuukin hyvin pitkälti koekuormituksista saatuun tietoon. Erityisesti hirsiseinän nurjahdusmitoitus on haasteellista johtuen hirsiseinän rakenteesta, jossa hirret ladotaan päällekkäin ja sidotaan yhtenäiseksi rakenteeksi vaarnauksen ja kierretankojen avulla. Hirsiseinän nurjahdusmitoitukseen löydettiin kolme erilaista mitoitus tapaa, joiden soveltuvuutta ja eroavaisuuksia pohdittiin sekä testattiin vertailulaskelmin. Tutkimustuloksena todettiin, ettei yksikään mitoitus tapa sovellu yleiseen käyttöön ilman jatkotutkimuksia, ja siten lisätutkimuksia hirsiseinän nurjahdusmitoitukseen tarvitaan. Etenkin aukollisen hirsiseinän mitoitukseen olisi jatkotutkimustarpeita, jotta hirsiseinän nurjahdusmitoituksesta pystyttäisiin muodostamaan yleinen mitoitusohje, joka soveltuu hirsiseinille seinän aukoksesta ja hirsivalmistajasta riippumatta. On kuitenkin selvästi näyttöä siitä, että hirsiseinää voitaisiin käsitellä nurjahduksen yhteydessä pilarin tavoin puristettuna sauvana, ja mitoitukseen voitaisiin soveltaa eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 mukaista mitoitus ehtoa puristetun sauvan nurjahdukselle.

Tukipaineen osalta eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 soveltaminen hirsirakenteille onnistuu melko vaivattomasti. Ristiinlaminoidulle hirrelle kyseessä on syysuuntainen puristus, muille hirsityypeille syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus. Siten mitoitus poikkeaa toisistaan hirsityyppien välillä.

Följäreiden mitoituksen osalta tutkimusaineisto oli suppea, eikä yleistä mitoitustentelmää pystytty muodostamaan. Följärit toimivat hirsiseinän nurjahdustukena, joten voisi olettaa, että niihin syntyy vaakasuuntaista tuentavoimaa pystykuormasta. Ongelmaksi muodostuu tämän nurjahdustuentavoiman määrittäminen ja följärin mitoittaminen kyseiselle voimalle, joita voitaisiin selvittää lisätutkimuksin.

Hirsipalkin osalta työssä käsiteltiin hirsipalkkia kytkemättömistä osista koottuna palkkina sekä mekaanisin liittimin koottuna palkkina. Näiden eroavaisuuksia testattiin vertailulaskelmin, joiden tuloksena todettiin, ettei mekaanisin liittimin kootulla palkilla saada niin suurta hyötyä hirsipalkin kapasiteettiin, että mekaanisin liittimin kootun palkin käyttö olisi kovinkaan kannattavaa. Molempiin tapauksiin pystyttiin kuitenkin löytämään aineistoa, jonka avulla hirsipalkin mitoitus on mahdollista.

Hirsiseinän painuma koostuu hirsikertojen välisten saumojen tiivistymisestä, puun kuivumiskutistumisesta, rakenteisiin kohdistuvasta kuormituksesta aiheutuvasta kokoonpuristumasta sekä puun virumisesta pitkäaikaisesta kuormituksesta johtuen. Näistä jokaisen suuruutta pystytään arvioimaan laskennallisesti työssä esitettyjen mitoituksaavojen avulla. Lasketun kokonaispainuman avulla pystytään suunnittelemaan painumattomien rakenteiden liittymistä painuviin hirsirakenteisiin. Painumattoman hirren osalta painuman laskemisella pystytään osoittamaan hirsirakenteen painumattomuus määritelmän mukaisesti.

Jäykistävän hirsiseinän mitoituksen osalta työssä käsiteltiin teoriaa jäykistävän hirsiseinän mitoituksen taustalla sekä esiteltiin Puuinfon versioon 1.3 päivitettyä Excel-pohjaista mitoitushjelmaa. Lisäksi työssä tehtiin esimerkkilaskelma mitoitushjelmaa käyttäen esitellen mitoitushjelman toimintaperiaatetta, sekä pohtien mitoitushjelman jatkokehitystarpeita. Jatkokehitystarpeena mitoitushjelmaan olisi laajentaa se käsittämään myös aukollista hirsiseinää.

Hirren käyttö rakennusmateriaalina on nousussa ja kiinnostusta hirsirakentamiseen on paljon. Lisäksi tahtotilaa hirsirakenteiden suunnittelun kehittämiseksi sekä standardisoinnille on selvästi olemassa myös hirsivalmistajilla. Tämän työn puitteissa todettiin, että tutkimustietoa, aineistoa, koekuormitustuloksia ja osaamista hirsiseinien laskennalliseen mitoitukseen on olemassa. Tutkimustyötä on kuitenkin vielä tehtävää, mikäli hirsirakenteiden mitoitukseen haluttaisiin muodostaa yksiselitteinen mitoitushje, joka soveltuu kaikille hirsityypeille hirsivalmistajasta riippumatta. Tämän diplomityön aikana ilmeni melko paljon jatkotutkimustarpeita, joita ovat muun muassa nurjahduskestävyys/pystykuorman kestävyys korkealle seinälle sekä aukolliselle seinälle, jäljäreiden mitoitus sekä nurjahdustuennasta jäljäreille aiheutuvan kuormituksen määrittäminen,

kierretankojen hirsiseinää vahvistava vaikutus ja sen huomioiminen mitoituksessa, mekaanisin liittimin kootun palkin toiminta käytännössä painuvan hirren tapauksessa, sekä jäykistävän hirsiseinän mitoitus tapauksessa, jossa hirsiseinässä on aukkoja.

LÄHTEET

Bedon, C., Fragiacom, M. (2015). Numerical and analytical assessment of the buckling behaviour of Blockhaus log-walls under in-plane compression, in: Engineering Structures, Vol. 82, pp. 134–150.

Bedon, C., Fragiacom, M. (2017). Derivation of buckling design curves via FE modelling for in-plane compressed timber log-walls in accordance with the Eurocode 5, in: European journal of wood and wood products, Vol. 75(3), pp. 449–465.

Den Finland Oy. (2024). Painumaton RYHTI-hirsi. Verkkosivu. Saatavissa (8.4.2024): <https://www.finnlamelli.fi/painumaton-hirsi/>

EAD 130022-00-0304. (2015). European Assessment Document, Monolithic or laminated beam and wall logs made of timber. EOTA. 22 s.

EAD 340308-00-0203. (2019). European Assessment Document, Timber building kits. EOTA. 43 s.

Ehoniemi, K., Lindberg, R. (1989). Hirsirakenteiden kestävyys, Raportti 37. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto.

ETA-03/0015. (2015). European Technical Assessment of ETA-03/0015 18.08.2015 for Honka Log House. VTT Expert Services LTD. 19 s.

Eurofins S-03468-18. (2018). Kantavan jiirinurkkaisen hirsiseinän palonkestävyyskoe. Eurofins Expert Services Oy.

Hakkarainen, J. (2022). Hirsiaihioiden ja hirsitalojen EADt ja ETAt. Eurofins Experts Services Oy. Saatavissa (28.2.2024): https://www.hirsikoti.fi/assets/images/Seminaarit_vuosikokous/2022/Hirsiaihioiden%20ja%20hirsitalojen%20EADt%20ja%20ETAt%2017.3.2022.pdf

Helimäki Akustikot. (2015). Statement 5928-3b, Sound insulation of structures, Honkarakenne Oyj. Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy.

Hirsitaloteollisuus ry. (Ei päivystä). Hirsirakentamisen perusteet. 29 s. Saatavissa (28.2.2024): https://www.hirsikoti.fi/assets/images/Koulutusmateriaali/Hirsirakentamisen_perusteet.pdf

Honkarakenne Oyj. (2022). FAQ: Kumpi hirsitaloon: mäntyhirsi vai kuusihirsi? Verkkosivu. Saatavissa (19.1.2024): <https://www.honka.fi/fi/blog/2022/08/29/mantyhirsivai-kuusihirsi/>

Jokinen, T. (2024). Hirsirakennusten tiiveys. Hirsitaloteollisuus RY:n seminaari 21.3.2024. Vertia Oy.

K69/2019. (2019). Classification of reaction to fire in accordance with EN 13501-1:2018. Forest and Wood Products Research and Development Institute Ltd.

Keppo, J., Jussila, A., Pikkujäämsä, P. & Päätaalo, H. (2001). Talonrakentajan käsikirja 6, Hirsitalon suunnittelu. Rakentajan tietokirjat. 73 s.

Kontiotuote Oy. (2017). Aukkopalkin kestävyys, CLL Log, Esimerkki 3. Saatavissa (29.2.2024): https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Moduuli_1_Esimerkki_8_Aukkopalkin-kest%C3%A4vyys_Kontio.pdf

Kontiotuote Oy. (2017). Aukkopalkin kestävyys, LH Log P, Esimerkki 3. Ei saatavissa.

Kontiotuote Oy. (2017). Jäykistävän seinän kestävyys, LH Log P, Esimerkki 2. Ei saatavissa.

Kontiotuote Oy. (2017). Seinän nurjahduskestävyys, CLL Log, Esimerkki 1. Saatavissa (29.2.2024): https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Moduuli_1_Esimerkki_6_Sein%C3%A4n-nurjahduskest%C3%A4vyys_Kontio.pdf

Kontiotuote Oy. (2017). Seinän nurjahduskestävyys, LH Log P, Esimerkki 1. Ei saatavissa.

Lahtela, T. (2021). Teollinen puurakentaminen. Opetusmateriaalia teollisen puurakentamisen koulutukseen. 2.3 Kantava massiivihirsirunko. Puuinfo Oy. Saatavissa (28.2.2024): https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2022/06/tPUUr_2.3-Kantava-massiivihirsirunko.pptx

Lahtela, T. (2021). Teollinen puurakentaminen. Opetusmateriaalia teollisen puurakentamisen koulutukseen. 4.7 Hirsirakenteet. Puuinfo Oy. Saatavissa (28.2.2024): https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2022/06/tPUUr_4.7-Hirsirakenteet.pptx

Lauharo, K. (2002). Hirsi rakennusaineena ja teollinen hirsitalo. Oy UNIPress Ab.

Löf, M. (2024). Sähköpostiviesti 24.4.2024. Vastaanottaja: Senni Vuolle. Kontiotuote Oy. (Viitattu 29.4.2024).

Mylly, M. (2022). Teollinen puurakentaminen. Opetusmateriaalia teollisen puurakentamisen koulutukseen. 7.4 Hirsirakenteiden valmistus. Puuinfo Oy. Saatavissa (28.2.2024): https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2022/06/tPUUr_7.4-Hirsirakenteiden-valmistus.pptx

Mylly, M. (2022). Teollinen puurakentaminen. 382 s. Saatavissa (28.2.2024): <https://www.lappia.fi/wp-content/uploads/2022/03/Teollinen-puurakentaminen-v1.0.pdf>

Nordtreat Finland Oy. (2024). Palosuojattujen puutuotteiden valmistajat. Verkkosivu. Saatavissa (29.4.2024): <https://www.nordtreat.com/fi/palvelut/palosuojattujen-puutuotteiden-valmistajat>

Oy Primapoli Ltd. (2024). Patentoitu painumaton hirsirakenne. Verkkosivu. Saatavissa (8.4.2024): <https://www.honkatalot.fi/know-how/painumaton-hirsi/>

Puuinfo Oy. (2016). TEKNINEN TIEDOTE. P2-PALOLUOKAN HIRSIRAKENNUS. 48 s. Saatavissa (28.2.2024): <http://www.puuinfo.fi/articles/p2-paloluokan-hirsirakennus>

Puuinfo Oy. (2017). Jäykistävän hirsiseinän mitoitusohjelma. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/jaykistavan-hirsiseinan-mitoitusohjelma/>

- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Ominaispiirteitä, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/ominaispiirteita/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Hirsityypit ja perusprofiilit, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/materiaalivaihtoehdot/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Hirsirakenteiden yksityiskohtia, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/hirsirakenteiden-yksityiskohtia/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Hirsirakenteet, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/hirsirakenteet/>
- Puuinfo Oy. (2020). Tekniset tiedotteet. Hirsiseinän tehollinen paksuus, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/hirsiseinan-tehollinen-paksuus/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Perustukset, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/perustukset/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Vaatimusten mukaisuuden osoittaminen, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/vaatimustenmukaisuuden-osoittaminen/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Seinän ominaisuudet, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/seinan-ominaisuudet/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Rungon toimintaperiaate, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/rungon-toimintaperiaate/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Soveltuvuus kantavana runkona, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/soveltuvuus-kantavana-runkona/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Seinien jäykistys, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/seinien-jaykistys/>
- Puuinfo Oy. (2020). Hirsirakenteet. Hirsirakentamisen määritelmiä, verkkosivu. Saatavissa (28.2.2024): <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/hirsirakentamisen-maaritelmia/>
- Puuinfo Oy. (2020). Tekniset tiedotteet. Puun kosteuskäyttäytyminen, verkkosivu. Saatavissa (5.3.2024): <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/>
- Puuinfo Oy. (2022). Esimerkkilaskelma, Jäykistävä hirsiseinä. Saatavissa (29.2.2024): https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2022/06/tPUUr_4.7-Jaykistava-hirsiseina.docx
- Puuinfo Oy. (2024). Jäykistävän hirsiseinän mitoitusohjelma. Saatavissa (8.4.2024): <https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/jaykistavan-hirsiseinan-mitoitusohjelma/>
- Porteous, J., Ross, P. (2013). Designers' Guide to Eurocode 5: Design of Timber Buildings, EN 1995 -1-1. ICE Publishing.
- Rakentajan tietokirjat. (2006). Talonrakentajan käsikirja 3, Hirsitalon rakentaminen. Espoo: Rakentajan tietokirjat. 139 s.

- RIL 205-1-2017. (2017). Puurakenteiden suunnitteluohje, eurokoodi EN 1995-1-1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 231 s.
- RIL 205-2-2019. (2019). Puurakenteiden palomitoitus, eurokoodi EN 1995-1-2. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 93 s.
- RT 82-11168. (2014). Hirsitalon suunnitteluperusteet. Rakennustietosäätiö. 16 s.
- RTE3718/00. (2000). Neljän hirsiseinän koekuormitus. VTT Rakennustekniikka.
- SFS 5973:2022. (2022). Rakennuksissa käytettävät massiivi- ja lamellihirret. Vaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 24 s.
- SFS-EN 1995-1-1:2004 + A1:2004 + A2:2014 + AC. (2014). Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 224 s.
- Tiainen, A-R., Pihlajaniemi, J. & Lakkala, M. (2017). Arkkitehdin hirsioapas. Oulun yliopisto. 80 s. Saatavissa (28.2.2024): <https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/36336/isbn978-952-62-1795-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Valkonen, J. (2024). Sähköpostiviesti 13.3.2024. Vastaanottaja: Senni Vuolle. Honkarakenne Oyj. (Viitattu 10.4.2024).
- Vertia Oy. (2024). Ilmatiiveys seinärakenteen mukaan, verkkosivu. Saatavissa (1.3.2024): <https://kanta.vertia.fi/data/avoimet-tilastot/>
- Vuolle-Apiala, R. (2012). Hirsitalo ennen ja nyt. Kustannusosakeyhtiö Moreeni. 192 s.
- VTT-S-02716-18. (2018). Lausunto Kontiotuote Oy:n lamellihirsiseinien palonkestävyydestä. VTT Expert Services Oy.
- VTT-S-03756-14. (2014). Research Report, Compression test of log wall. VTT Expert Services Oy.
- VTT-S-03337-17. (2017). Research Report, Compression test of LH 135x275 P and LH 205x275 P log walls. VTT Expert Services Oy.
- VTT-S-05041-17. (2017). Lausunto, Honkarakenne lamellihirsirakenteiden suunnitteluohje. VTT Expert Services Oy.
- VTT-S-05407-15. (2015). Statement of the fire resistance of log walls made of log types FXL N, VLL (T&G) or MLL (T&G) manufactured by Honkarakenne Oyj and on zero corner of FXL N log walls. VTT Expert Services LTD.
- VTT-S-1274-06. (2006). Lausunto hirsiseinien palonkestävyydestä. VTT.
- YMa 1010/2017. (2017) Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Saatavissa (28.2.2024): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

Vertailulaskelmat, hirsiseinän nurjahduskestävyys

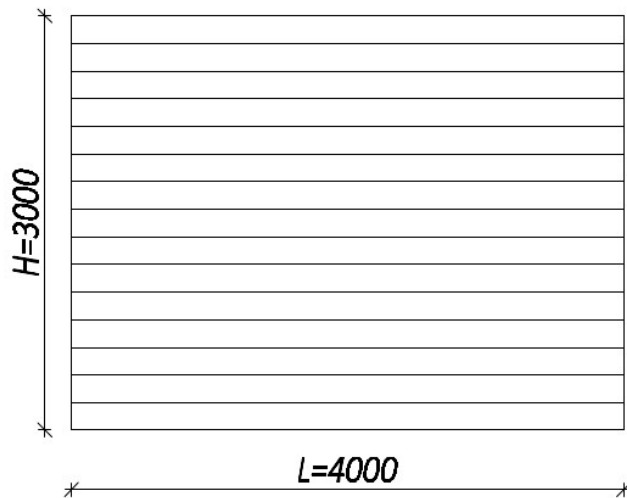
Tässä vertailulaskelmassa sovelletaan kolmea eri mitoitustapaa hirsiseinän nurjahduskestävyyden määrittämiseen. Mitoitusperiaatteet on esitelty työn teoriaosuudessa. Laskelmassa tarkastellaan kolme eri tapausta: aukoton, yksiaukkoinen (ovi), sekä kaksiaukkoinen (ovi ja ikkuna) hirsiseinä. Valitaan hirreksi Honkarakenne Oyj:n lamellihirsi MLL204, jonka lujuutena seinän puristuskestävyyden laskennassa voidaan käyttää lujuusluokan C24 arvoja (VTT-S-05041-17).

Hirsiseinän perustiedot:

$L := 4000 \text{ mm}$	Seinän vapaa pituus (nurkkien väli)
$H := 3000 \text{ mm}$	Seinän korkeus
$b := 204 \text{ mm}$	Hirren leveys, Honkarakenne Oyj MLL204 lamellihirsi
$E_{90} := 370 \frac{N}{\text{mm}^2}$	Kimmomoduuli syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa, sahatavara C24
$E_{90.05} := 0.67 \cdot E_{90} = 247.9 \frac{N}{\text{mm}^2}$	Kimmomoduulin alafraktiili syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa, sahatavara C24
$G := 690 \frac{N}{\text{mm}^2}$	Liukumoduuli, sahatavara C24
$f_{c.90.k} := 2.5 \frac{N}{\text{mm}^2}$	Ominaispuristuslujuus syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa, sahatavara C24
$\gamma_m := 1.3$	Materiaalin osavarmuusluku
$k_{mod} := 0.8$	Kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioiva muunnoskerroin (sahatavara, käyttöluokka 2)

Mitoitusoletuksia/yksinkertaistuksia:

- seinän kaarevuus max H/400
- kuorma vaikuttaa keskeisesti
- poikittaisseinät min 600mm pitkiä, ristinurkka
- seinät on tapitettu ja varustettu kierretangoilla
- lamellihirsi, jolloin käytetään puristuslujuutena syysuuntaa vastaan kohtisuoraa arvoa
- syytä vastaan kohtisuoran kimmomoduulin alafraktiili arvioidaan laskemalla $E_{90.05} := 0.67 \cdot E_{90}$

Tapaus 1: Aukoton seinäBedon & Fragiacomò (2017):

Seinä oletetaan monoliittiseksi rakenteeksi, jonka kriittinen nurjahduskuorma määritetään ohuen laatan teorialla.

$$E_d := \frac{E_{90}}{\gamma_m} = 284.615 \frac{N}{mm^2}$$

Kimmoduuli syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa, mitoitusarvo

$$G_d := \frac{G}{\gamma_m} = 530.769 \frac{N}{mm^2}$$

Liukumoduuli, mitoitusarvo

$$k_\sigma := 6.97$$

Aukottomalle seinälle käytettävä kerroin ("laatta" tuettu neljältä sivulta)

Kriittinen nurjahduskuorma, mitoitusarvo:

$$N_{cr,d} := k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot b^3}{12 \cdot L} \cdot \frac{E_d}{1 - \left(\frac{E_d}{2 G_d} - 1 \right)^2} = 7457.594 \text{ kN}$$

$$A_s := L \cdot b = (8.16 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Poikkileikkauksen pinta-ala

$$I_{min} := \frac{L \cdot b^3}{12} = (2.83 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Poikkileikkauksen neliömomentti

$$\lambda := H \cdot \sqrt{\frac{A_s}{I_{min}}} = 50.943$$

Hoikkuusluku

$$\lambda_{rel} := \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,90,k}}{E_{90,05}}} = 1.628$$

Muunnettu hoikkuus

$$\beta_0 := 0.3 \quad \beta_c := 0.3$$

Kertoimet, joustava välipohjataso seinän yläreunan tuentana

$$k := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \beta_0) + \lambda_{rel}^2) = 2.025$$

Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen

$$k_c := \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = 0.31$$

Nurjahduskerroin

$$N_{b.Rd} := k_{mod} \cdot k_c \cdot N_{cr.d} = 1847.638 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

$$q_d := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 461.91 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle

Honkarakenne Oyj / VTT-S-05041-17 (2017):

Aukoton seinä, jossa ristinurkalliset poikkaisseinäjykisteet. Yksi tarkasteltava seinäpilari saa ulottua enintään 2 metrin etäisyydelle jäykisteestä.

$$I_{ef} := 8.5 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \cdot b = (1.734 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Tehollinen neliömomentti, ristinurkallisella poikkaisseinällä jäykistetty seinäpilari

$$L_i := \min\left(\frac{L}{2}, 2 \text{ m}\right) = 2000 \text{ mm}$$

Yhden tarkasteltavan seinäpilari leveys (max 2m jäykisteestä = nurkasta)

$$\lambda := H \cdot \sqrt{\frac{L_i \cdot b}{I_{ef}}} = 46.018$$

Hoikkuusluku

$$\lambda_{rel} := \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 1.471$$

Muunnettu hoikkuus

$$\beta_c := 0.2$$

Kerroin, sahatavara

$$k := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2) = 1.699$$

Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen

$$k_c := \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = 0.392$$

Nurjahduskerroin

$$f_{c.90.d} := k_c \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{c.90.k}}{\gamma_m} = 0.604 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo, C24

$$N_{b.Rd.i} := f_{c.90.d} \cdot L_i \cdot b = 246.234 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, yksi seinäpilari

$$N_{b.Rd} := 2 \cdot N_{b.Rd.i} = 492.467 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, koko seinä (2kpl 2m seinäpilareita)

$$q_d := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 123.117 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle

VTT Rakennustekniikka (2000):

Yleisesti käytössä oleva mitoitustapa perustilanteisiin.

$$b_{ef} := 0.75 \cdot b = 153 \text{ mm}$$

Hirren tehollinen leveys, suorakaidepoikkileikkaus

$$f_{c,k} := 1.0 \frac{N}{mm^2}$$

Hirren ominaispuristuslujuus

$$n := 2$$

Nurkkien lukumäärä

$$F_{cc} := n \cdot 0.6 \text{ m} \cdot f_{c,k} \cdot b_{ef} = 183.6 \text{ kN}$$

Nurkkien puristuskestävyys

$$F_w := \min(L, 4 \text{ m}) \cdot f_{c,k} \cdot b_{ef} = 612 \text{ kN}$$

Seinäosan puristuskestävyys

$$N_k := F_{cc} + F_w = 795.6 \text{ kN}$$

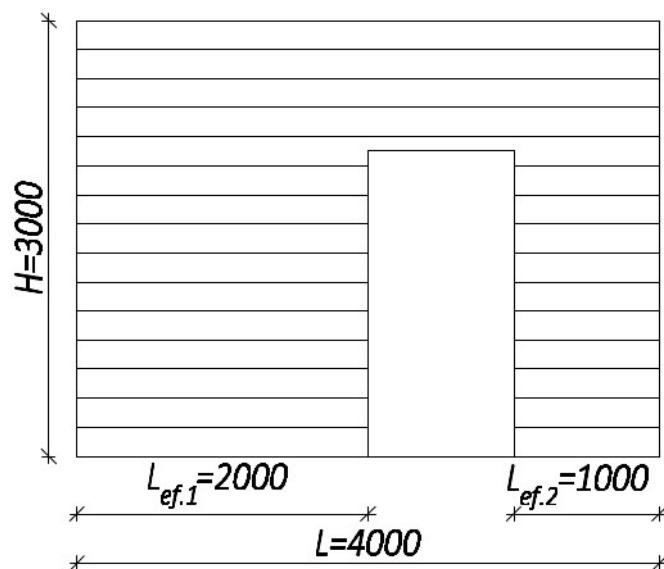
Koko seinän puristuskestävyyden ominaisarvo

$$N_{b,Rd} := k_{mod} \cdot \frac{N_k}{\gamma_m} = 489.6 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

$$q := \frac{N_{b,Rd}}{L} = 122.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle

Tapaus 2: Seinässä 1 aukko

$$L_{ef.1} := 2000 \text{ mm}$$

Ehjän seinän pituus aukon vasemmalla puolella

$$L_{ef.2} := 1000 \text{ mm}$$

Ehjän seinän pituus aukon oikealla puolella

Bedon & Fragiacomu (2017):

Mitoituksessa huomioidaan suurempi ehjä seinäkaistale, tarkastelu edelleen monoliittisena rakenteena ohuen laatan teoriolla.

$$k_{\sigma} := 1.277$$

1-aukkoiselle seinälle käytettävä kerroin
("laatta" tuettu kolmelta sivulta)

Kriittinen nurjahduskuorma:

$$N_{cr.d} := k_{\sigma} \cdot \frac{\pi^2 \cdot b^3}{12 \cdot L_{ef.1}} \cdot \frac{E_d}{1 - \left(\frac{E_d}{2 G_d} - 1 \right)^2} = 2732.668 \text{ kN}$$

$$I_{min} := \frac{L_{ef.1} \cdot b^3}{12} = (1.415 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Neliömomentti

$$\lambda := H \cdot \sqrt{\frac{L_{ef.1} \cdot b}{I_{min}}} = 50.943$$

Hoikkuus

$$\lambda_{rel} := \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 1.628$$

Muunnettu hoikkuus

$$\beta_0 := 0.3 \quad \beta_c := 0.3$$

Kertoimet, joustava välipohjataso seinän
yläreunan tuentana

$$k := 0.5 \cdot \left(1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \beta_0) + \lambda_{rel}^2 \right) = 2.025$$

Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen

$$k_c := \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = 0.31$$

Nurjahduskerroin

$$N_{b.Rd} := k_{mod} \cdot k_c \cdot N_{cr.d} = 677.026 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

$$q_d := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 169.256 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle (huom. koko
seinä)

Honkarakenne Oyj / VTT-S-05041-17 (2017):

Mitoituksessa huomioidaan molemmat ehjät seinäkaistaleet, jotka molemmat on jäykistetty ristinurkallisella poikittaisseinällä.

$$I_{ef} := 8.5 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \cdot b = (1.734 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Tehollinen neliömomentti, ristinurkallisella
poikittaisseinällä jäykistetty seinäpilari

$$L_{ef.1} = 2 \text{ m}$$

Seinäpilarin 1 leveys

$$L_{ef.2} = 1 \text{ m}$$

Seinäpilarin 2 leveys

$$\lambda_1 := H \cdot \sqrt{\frac{L_{ef.1} \cdot b}{I_{ef}}} = 46.018$$

Hoikkuusluku (seinäpilari 1)

$\lambda_2 := H \cdot \sqrt{\frac{L_{ef.2} \cdot b}{I_{ef}}} = 32.54$	Hoikkuusluku (seinäpilari 2)
$\lambda_{rel.1} := \frac{\lambda_1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 1.471$	Muunnettu hoikkuus (seinäpilari 1)
$\lambda_{rel.2} := \frac{\lambda_2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 1.04$	Muunnettu hoikkuus (seinäpilari 2)
$\beta_c := 0.2$	Kerroin, sahatavara
$k_1 := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.1} - 0.3) + \lambda_{rel.1}^2) = 1.699$	Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen (seinäpilari 1)
$k_2 := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.2} - 0.3) + \lambda_{rel.2}^2) = 1.115$	Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen (seinäpilari 2)
$k_{c.1} := \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel.1}^2}} = 0.392$	Nurjahduskerroin (seinäpilari 1)
$k_{c.2} := \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel.2}^2}} = 0.659$	Nurjahduskerroin (seinäpilari 2)
$f_{c.90.d.1} := k_{c.1} \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{c.90.k}}{\gamma_m} = 0.604 \frac{N}{mm^2}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo (seinäpilari 1)
$f_{c.90.d.2} := k_{c.2} \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{c.90.k}}{\gamma_m} = 1.014 \frac{N}{mm^2}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo (seinäpilari 2)
$N_{b.Rd.1} := f_{c.90.d.1} \cdot L_{ef.1} \cdot b = 246.234 \text{ kN}$	Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo (seinäpilari 1)
$N_{b.Rd.2} := f_{c.90.d.2} \cdot L_{ef.2} \cdot b = 206.952 \text{ kN}$	Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo (seinäpilari 2)
$N_{b.Rd} := N_{b.Rd.1} + N_{b.Rd.2} = 453.185 \text{ kN}$	Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, koko seinä
$q_d := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 113.296 \frac{kN}{m}$	Sallittu metrikuorma seinälle (huom. koko seinä)

VTT Rakennustekniikka (2000):

Sovelletaan yleistä mitoitusperiaatetta: huomioidaan mitoituksessa molemmat ehjät seinäkaistaleet olettaen, että aukon pielten karapuut jäykistävät ja tukevat aukon pieltä nurjahdukselta.

$$b_{ef} = 153 \text{ mm}$$

Hirren tehollinen leveys

$$f_{c.k} = 1 \frac{N}{mm^2}$$

Hirren ominaispuristuslujuus

$$n = 2$$

Nurkkien lkm

$$F_{cc} = 183.6 \text{ kN}$$

Nurkkien puristuskestävyys (pysyy samana kuin tapauksessa 1)

$$F_w := (L_{ef.1} + L_{ef.2}) \cdot f_{c.k} \cdot b_{ef} = 459 \text{ kN}$$

Seinäosan puristuskestävyys

$$N_k := F_{cc} + F_w = 642.6 \text{ kN}$$

Koko seinän puristuskestävyyden ominaisarvo

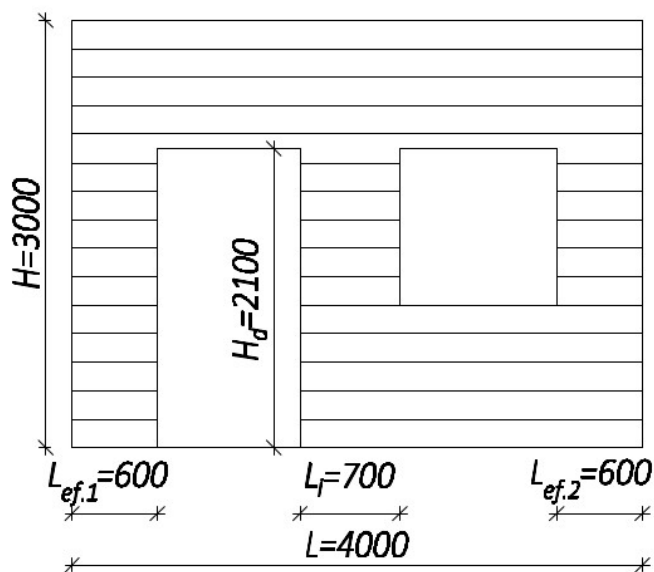
$$N_{b.Rd} := k_{mod} \cdot \frac{N_k}{\gamma_m} = 395.446 \text{ kN}$$

Puristuskestävyyden mitoitusarvo

$$q := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 98.862 \frac{kN}{m}$$

Sallittu metrikuorma (huom. koko seinä)

Tapaus 3: Seinässä 2 aukkoa



$$L_{ef.1} := 600 \text{ mm}$$

Ehjän seinän pituus aukon vasemmalla puolella

$$L_{ef.2} := L_{ef.1} = 600 \text{ mm}$$

Ehjän seinän pituus aukon oikealla puolella

$$L_i := 700 \text{ mm}$$

Aukkojen välisen seinäkaistaleen leveys

$$H_d := 2100 \text{ mm}$$

Korkeamman aukon korkeus

Bedon & Fragiacomu (2017):

Mitoituksessa huomioidaan vain aukkojen välinen seinäkaistale, jota tarkastellaan monoliittisena pilarina (kriittinen nurjahduskuorma lasketaan kuten pilarille).

$$EI_{ef} := E_d \cdot \frac{L_i \cdot b^3}{12} = (1.41 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Seinäkaistaleen taivutusjäykkyys, aukon pielten karapuita ei ole huomioitu

$$N_{cr.0.d} := \frac{\pi^2 \cdot (EI_{ef})}{(0.7 H_d)^2} = 643.77 \text{ kN}$$

Kriittinen nurjahduskuorma

$$I_{min} := \frac{L_i \cdot b^3}{12} = (4.952 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Seinäpilarin neliömomentti

$$\lambda := H_d \cdot \sqrt{\frac{L_i \cdot b}{I_{min}}} = 35.66$$

Hoikkuusluku, nurjahduspituutena aukon korkeus

$$\lambda_{rel} := \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 1.14$$

Muunnettu hoikkuus

$$\beta_0 := 0.3 \quad \beta_c := 0.3$$

Kertoimet, joustava välipohjataso seinän yläreunan tuentana

$$k := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \beta_0) + \lambda_{rel}^2) = 1.276$$

Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen

$$k_c := \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}}} = 0.507$$

Nurjahduskerroin

$$N_{b.Rd} := k_c \cdot N_{cr.0.d} = 326.158 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

$$q_d := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 81.539 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle

Honkarakenne Oyj / VTT-S-05041-17:

Huomioidaan kolme eri seinäpilaria: ristinurkallisilla poikittaisseinillä jäykistetyt seinäpilarit (2kpl) ja aukkojen välinen karapuilla jäykistetty seinäpilari.

Ristinurkallisilla poikittaisseinillä jäykistetyt seinäpilarit (2kpl):

$$I_{ef} := 8.5 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \cdot b = (1.734 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Tehollinen neliömomentti, ristinurkallisella poikittaisseinällä jäykistetty seinäpilari

$$L_{ef.1} := 600 \text{ mm}$$

Nurkalla jäykistettävän seinäpilarin leveys

$$\lambda_1 := H \cdot \sqrt{\frac{L_{ef.1} \cdot b}{I_{ef}}} = 25.205$$

Hoikkuusluku

$$\lambda_{rel.1} := \frac{\lambda_1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 0.806$$

Muunnettu hoikkuus

$$\beta_c := 0.2$$

Kerroin, sahatavara

$$k_1 := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.1} - 0.3) + \lambda_{rel.1}^2) = 0.875$$
 Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen

$$k_{c.1} := \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel.1}^2}} = 0.822$$

Nurjahduskerroin

$$f_{c.90.d.1} := k_{c.1} \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{c.90.k}}{\gamma_m} = 1.264 \frac{N}{mm^2}$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo, C24

$$N_{b.Rd.1} := f_{c.90.d.1} \cdot L_{ef.1} \cdot b = 154.757 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, yksi ristinurkalla jäykistetty seinäpilari

Karapuilla jäykistetty seinäpilari:

$$L_{ef.2} := L_i = 700 \text{ mm}$$

Karapuilla jäykistettävän seinäpilarin leveys

$$b_k := 45 \text{ mm}$$

Karapuun poikkileikkauksen leveys

$$h_k := 145 \text{ mm}$$

Karapuun poikkileikkauksen korkeus

$$I_{ef.k} := \frac{b_k \cdot h_k^3}{12} = (1.143 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Karapuun neliömomentti

$$E_0 := 11000 \frac{N}{mm^2}$$

Kimmokerroin, syysuunta, sahatavara C24

$$E_k := E_0$$

Karapuun lujuusluokan (sahatavara C24) mukainen kimmokerroin

$$I_{ef} := \frac{2 \cdot E_k \cdot I_{ef.k}}{E_0} = (2.286 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Karapuujäykisteen tehollinen neliömomentti, 2 karapuuta

$$\lambda_2 := H \cdot \sqrt{\frac{L_{ef.2} \cdot b}{I_{ef}}} = 237.084$$

Hoikkuusluku, nurjahduspituutena seinän korkeus

$$\lambda_{rel.2} := \frac{\lambda_2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.90.k}}{E_{90.05}}} = 7.579$$

Muunnettu hoikkuus

$$k_2 := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.2} - 0.3) + \lambda_{rel.2}^2) = 29.945$$
 Kerroin nurjahduskertoimen määrittämiseen

$$k_{c.2} := \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel.2}^2}} = 0.017$$

Nurjahduskerroin

$$f_{c.90.d.2} := k_{c.2} \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{c.90.k}}{\gamma_m} = 0.026 \frac{N}{mm^2}$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo, C24

$$N_{b.Rd.2} := f_{c.90.d.2} \cdot L_{ef.2} \cdot b = 3.729 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, karapuilla jäykistetty seinäpilari

Koko seinän kestävyys (2kpl nurkilla jäykistettyjä seinäpilareita ja yksi karapuilla jäykistetty seinäpilari):

$$N_{b.Rd} := 2 \cdot N_{b.Rd.1} + N_{b.Rd.2} = 313.243 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, koko seinä

$$q_d := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 78.311 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle

VTT Rakennustekniikka (2000):

Sovelletaan yleistä mitoitusperiaatetta: huomioidaan mitoituksessa kaikki ehjät seinäkaistaleet olettaen, että aukon pielten karapuuat jäykistävät ja tukevat aukon pieltä nurjahdukselta.

$$b_{ef} = 153 \text{ mm}$$

Hirren tehollinen leveys

$$f_{c.k} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hirren ominaispuristuslujuus

$$n := 2$$

Nurkkien lkm

$$F_{cc} = 183.6 \text{ kN}$$

Nurkkien puristuskestävyys

$$F_w := (L_{ef.1} + L_{ef.2} + L_i) \cdot f_{c.k} \cdot b_{ef} = 306 \text{ kN}$$

Seinäosan puristuskestävyys

$$N_k := F_{cc} + F_w = 489.6 \text{ kN}$$

Koko seinän puristuskestävyyden ominaisarvo

$$N_{b.Rd} := k_{mod} \cdot \frac{N_k}{\gamma_m} = 301.292 \text{ kN}$$

Puristuskestävyyden mitoitusarvo

$$q := \frac{N_{b.Rd}}{L} = 75.323 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sallittu metrikuorma seinälle

Vertailulaskelmat, aukkopalkin kestävyys

Tässä vertailulaskelmassa mitoitetaan hirsiseinän aukkopalkki kahdella eri tavalla. Ensin hirsipalkkia tarkastellaan kytkemättömistä osista koottuna palkkina ja sitten mekaanisin liittimin koottuna palkkina. Molemmat mitoitustavat on esitelty työn teoriaosuudessa. Palkki koostuu kahdesta kokonaisesta hirrestä ja yhdestä puolikkaasta hirrestä, joka on palkin ylin osa. Valitaan hirreksi Honkarakenne Oyj:n lamellihirsi MLL204, jonka lujuusluokka on C22 (VTT-S-05041-17).

Palkin perustiedot:

$$L := 3000 \text{ mm}$$

Palkin pituus/jänneväli

$$b_i := 204 \text{ mm}$$

Hirren leveys,
Honkarakenne Oyj MLL204 lamellihirsi

$$h_i := 260 \text{ mm}$$

Hirren nousukorkeus,
Honkarakenne Oyj MLL204 lamellihirsi

$$h_1 := \frac{h_i}{2} = 130 \text{ mm}$$

Palkin ylimmän hirren nousukorkeus

$$h_2 := h_i \quad h_3 := h_i$$

Palkin keskimmäisen ja alimman hirren nousukorkeus

$$E := 10000 \frac{N}{mm^2}$$

Syysuuntaisen kimmomoduulin keskiarvo,
sahatavara C22

$$f_{m.k} := 22 \frac{N}{mm^2}$$

Ominaistaivutuslujuus, sahatavara C22

$$f_{v.k} := 3.8 \frac{N}{mm^2}$$

Ominaisleikkauslujuus, sahatavara C22

$$\rho_m := 410 \frac{kg}{m^3}$$

Tiheyden keskiarvo, sahatavara C22

$$k_{mod} := 0.8$$

Kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioiva
muunnoskerroin (sahatavara, käyttöluokka 2)

$$\gamma_M := 1.3$$

Materiaalin osavarmuusluku

$$k_{def} := 0.8$$

Virumaluku (sahatavara, käyttöluokka 2)

$$k_{cr} := 1.0$$

Halkeilukerroin (sahatavara, käyttöluokka 2)

Mitoituslujuudet:

$$f_{m.d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m.k}}{\gamma_M} = 13.538 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitustaivutuslujuus, sahatavara C22

$$f_{v.d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v.k}}{\gamma_M} = 2.338 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusleikkauslujuus, sahatavara C22

Taipuman raja-arvot:

$$w_{inst.sall} := \frac{L}{400} = 7.5 \text{ mm}$$

Sallittu hetkellinen taipuma

$$w_{fin.sall} := \frac{L}{300} = 10 \text{ mm}$$

Sallittu lopputaipuma

Kuormitus:

$$g := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q := 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K_{FI} := 1.0$$

$$\psi_2 := 0.2$$

$$p_d := K_{FI} \cdot (1.15 \cdot g + 1.5 \cdot q) = 34 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_d := \frac{p_d \cdot L^2}{8} = 38.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_d := \frac{p_d \cdot L}{2} = 51 \text{ kN}$$

Pysyvä kuorma

Muuttuva kuorma (lumi)

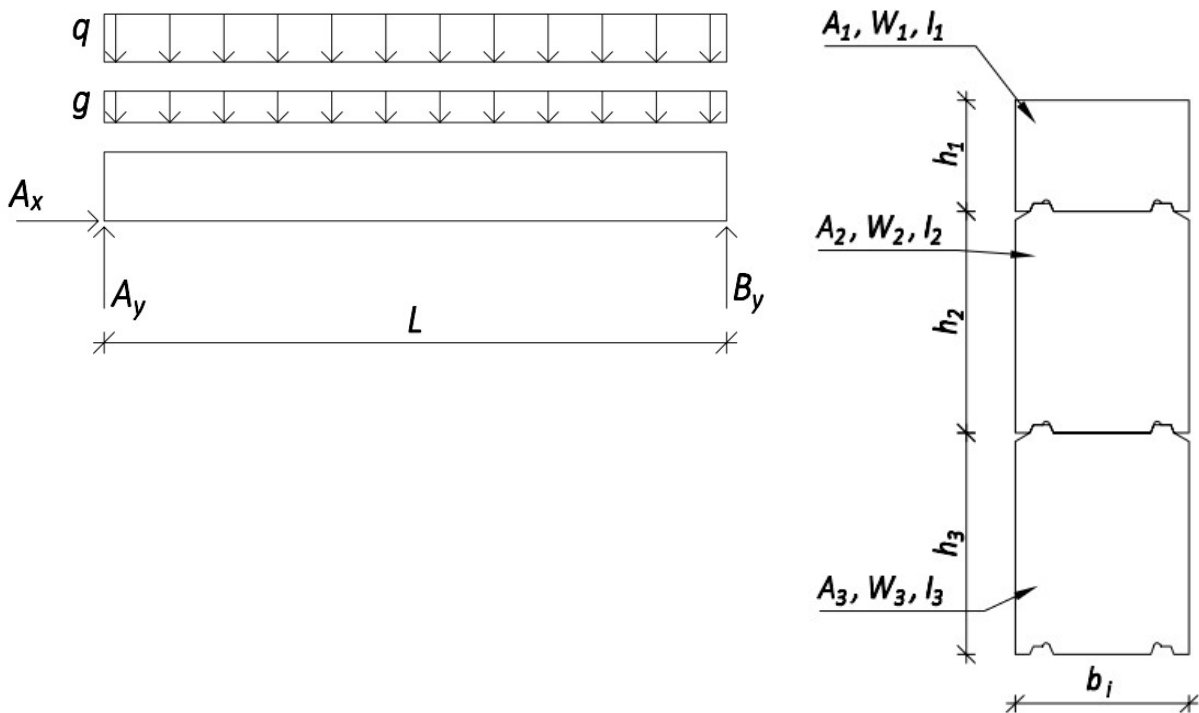
Kuormakerroin

Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (lumi)

Palkille kohdistuva metrikuorma murtorajatilassa

Palkille kohdistuva maksimitaivutusmomentti

Palkille kohdistuva maksimileikkausvoima

Rakennemalli ja palkin poikkileikkaus:

Poikkileikkaussuureet palkin osille:

$$A_1 := b_i \cdot h_1 = (2.652 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

Palkin ylimmän osan poikkileikkauksen pinta-ala

$$W_1 := \frac{b_i \cdot h_1^2}{6} = (5.746 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

Palkin ylimmän osan taivutusmomentti

$$I_1 := \frac{b_i \cdot h_1^3}{12} = (3.735 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Palkin ylimmän osan neliömomentti

$$A_2 := b_i \cdot h_2 = (5.304 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

Palkin keskimmäisen osan poikkileikkauksen pinta-ala

$$W_2 := \frac{b_i \cdot h_2^2}{6} = (2.298 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Palkin keskimmäisen osan taivutusmomentti

$$I_2 := \frac{b_i \cdot h_2^3}{12} = (2.988 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Palkin keskimmäisen osan neliömomentti

$$A_3 := A_2 = (5.304 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

Palkin alimman osan poikkileikkauksen pinta-ala

$$W_3 := W_2 = (2.298 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Palkin alimman osan taivutusmomentti

$$I_3 := I_2 = (2.988 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Palkin alimman osan neliömomentti

Kytkemättömistä osista koottu palkki:

Hirsiä tarkastellaan irrallisina päällekkäisinä kappaleina. Kuormitus jakautuu palkin osille niiden jäykkyyksien suhteessa.

Taivutus:

$$M_{d.1} := \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot M_d = 2.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Ylimmän hirren osuus taivutusmomentista

$$\sigma_{m.d.1} := \frac{M_{d.1}}{W_1} = 3.916 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ylimmän hirren taivutusjännitys

$$M_{d.2} := \frac{I_2}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot M_d = 18 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Keskimmäisen hirren osuus taivutusmomentista

$$\sigma_{m.d.2} := \frac{M_{d.2}}{W_2} = 7.832 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimmäisen hirren taivutusjännitys

$$M_{d.3} := \frac{I_3}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot M_d = 18 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Alimman hirren osuus taivutusmomentista

$$\sigma_{m.d.3} := \frac{M_{d.3}}{W_3} = 7.832 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Alimman hirren taivutusjännitys

$$\sigma_{m.d} := \max(\sigma_{m.d.1}, \sigma_{m.d.2}, \sigma_{m.d.3}) = 7.832 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ Suurin taivutusjännitys}$$

$$f_{m.d} = 13.538 \frac{N}{mm^2}$$

Taivutuslujuuden mitoitusarvo, sahatavara C22

$$\frac{\sigma_{m.d}}{f_{m.d}} = 57.847\%$$

Käyttöaste, taivutus

Leikkaus:

$$V_{d.1} := \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot V_d = 3 \text{ kN}$$

Ylimmän hirren osuus leikkausvoimasta

$$\tau_{d.1} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d.1}}{k_{cr} \cdot A_1} = 0.17 \frac{N}{mm^2}$$

Ylimmän hirren leikkausjännitys

$$V_{d.2} := \frac{I_2}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot V_d = 24 \text{ kN}$$

Keskimmäisen hirren osuus leikkausvoimasta

$$\tau_{d.2} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d.2}}{k_{cr} \cdot A_2} = 0.679 \frac{N}{mm^2}$$

Keskimmäisen hirren leikkausjännitys

$$V_{d.3} := \frac{I_3}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot V_d = 24 \text{ kN}$$

Alimman hirren osuus leikkausvoimasta

$$\tau_{d.3} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d.3}}{k_{cr} \cdot A_3} = 0.679 \frac{N}{mm^2}$$

Alimman hirren leikkausjännitys

$$\tau_d := \max(\tau_{d.1}, \tau_{d.2}, \tau_{d.3}) = 0.679 \frac{N}{mm^2}$$

Suurin leikkausjännitys

$$f_{v.d} = 2.338 \frac{N}{mm^2}$$

Leikkauslujuuden mitoitusarvo, sahatavara C22

$$\frac{\tau_d}{f_{v.d}} = 29.025\%$$

Käyttöaste, leikkaus

Taipuma:

Taipuman osalta riittää tarkastella vain yksi palkin osa. Kuormitus jakautuu palkin osille jäykkyyksien suhteessa, joten jokaisen palkin osan taipuma on sama. Tarkastellaan taipuma ylimmän palkin osan eli puolikkaan hirren avulla.

$$g_1 := \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot g = 0.588 \frac{kN}{m}$$

Ylimmän hirren kantama osuus pysyvästä kuormasta

$$q_1 := \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot q = 0.882 \frac{kN}{m}$$

Ylimmän hirren kantama osuus muuttuvasta kuormasta

$$w_{inst.g1} := \frac{5}{384} \cdot \frac{g_1 \cdot L^4}{E \cdot I_1} = 1.661 \text{ mm}$$

Ylimmän hirren hetkellinen taipuma pysyvstä kuormasta

$$w_{inst.q1} := \frac{5}{384} \cdot \frac{q_1 \cdot L^4}{E \cdot I_1} = 2.492 \text{ mm}$$

Ylimmän hirren hetkellinen taipuma muuttuvasta kuormasta

$$w_{inst.1} := w_{inst.g1} + w_{inst.q1} = 4.153 \text{ mm}$$

Ylimmän hirren hetkellinen taipuma

$$w_{inst.sall} = 7.5 \text{ mm}$$

Sallittu hetkellinen taipuma

$$\frac{w_{inst.1}}{w_{inst.sall}} = 55.37\%$$

Käyttöaste, hetkellinen taipuma

$$w_{fin} := w_{inst.g1} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst.q1} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) = 5.88 \text{ mm} \quad \text{Lopputilan kokonaistaipuma}$$

$$w_{fin.sall} = 10 \text{ mm}$$

Sallittu lopputaipuma

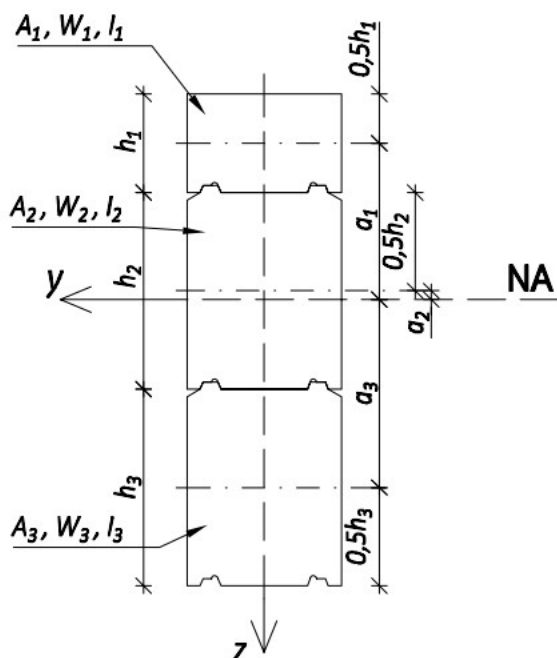
$$\frac{w_{fin}}{w_{fin.sall}} = 58.803\%$$

Lopputilan taipuman käyttöaste

Mekaanisin liittimin koottu palkki:

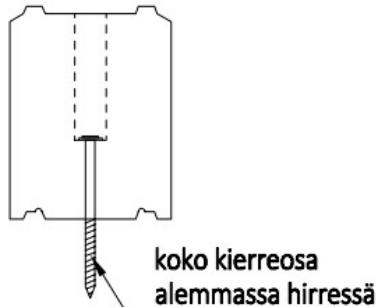
Palkki kootaan yhtenäiseksi rakenteeksi mekaanisten liittimien avulla. Palkille lasketaan tehollinen taivutusjäykkyys, joka ottaa huomioon liittosiirtymien vaikutukset. Tehollisen taivutusjäykkyyden avulla palkille lasketaan mitoitusjännitykset murtorajatilassa ja taipuma käyttörajatilassa. Mitoitus tehdään SFS-EN 1995-1-1 liitteen B mukaisesti.

Kootun palkin laskennassa käytettyjä merkintöjä ja mittoja:



Liittimet:

Liittiminä käytetään osakierteisiä ruuveja. Koko kierreosa tulee olla alemmassa hirressä (kts. kuva alla).



$$s := 300 \text{ mm}$$

Liitinjako

$$d := 12 \text{ mm}$$

Ruuvin halkaisija

$$K_{ser} := \left(\frac{\rho_m}{\frac{kg}{m^3}} \right)^{1.5} \cdot \frac{d}{23} \cdot \frac{N}{mm} = (4.331 \cdot 10^3) \frac{N}{mm}$$

Siirtymäkerroin, ruuvi, käyttörajatila

$$K_u := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = (2.888 \cdot 10^3) \frac{N}{mm}$$

Siirtymäkerroin, ruuvi, murtorajatila

Mekaanisin liittimin kootun palkin tehollinen taivutusjäykkyys murtorajatilassa:

Liukumien vaikutukset yhdistetyn rakenteen toimintaan huomioivat kertoimet murtorajatilassa:

$$\gamma_{1,uls} := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_1 \cdot s}{K_u \cdot L^2}} = 0.032 \quad \gamma_{2,uls} := 1 \quad \gamma_{3,uls} := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_3 \cdot s}{K_u \cdot L^2}} = 0.016$$

Palkin neutraaliakselin (NA) etäisyys osan 2 pintakeskiöstä:

$$a_{2,uls} := \frac{\gamma_{1,uls} \cdot E \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_{3,uls} \cdot E \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \cdot (\gamma_{1,uls} \cdot E \cdot A_1 + \gamma_{2,uls} \cdot E \cdot A_2 + \gamma_{3,uls} \cdot E \cdot A_3)} = -1.074 \text{ mm} \rightarrow \text{alaspäin osan 2 keskiöstä}$$

$$a_{1,uls} := \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_{2,uls} = 196.074 \text{ mm}$$

Osan 1 pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista

$$a_{3,uls} := \frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2} + a_{2,uls} = 258.926 \text{ mm}$$

Osan 3 pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista

$$EI_{ef,uls} := E \cdot (I_1 + \gamma_{1,uls} \cdot A_1 \cdot a_{1,uls}^2 + I_2 + \gamma_{2,uls} \cdot A_2 \cdot a_{2,uls}^2 + I_3 + \gamma_{3,uls} \cdot A_3 \cdot a_{3,uls}^2)$$

$$EI_{ef,uls} = (7.255 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Tehollinen taivutusjäykkyys murtorajatilassa

Mekaanisin liittimin kootun palkin tehollinen taivutusjäykkyys käyttörajatilassa:

Liukumien vaikutukset yhdistetyn rakenteen toimintaan huomioivat kertoimet murtorajatilassa:

$$\gamma_{1.sls} := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_1 \cdot s}{K_{ser} \cdot L^2}} = 0.047 \quad \gamma_{2.sls} := 1 \quad \gamma_{3.sls} := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_3 \cdot s}{K_{ser} \cdot L^2}} = 0.024$$

Palkin neutraaliakselin (NA) etäisyys osan 2 pintakeskiöstä:

$$a_{2.sls} := \frac{\gamma_{1.sls} \cdot E \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_{3.sls} \cdot E \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \cdot (\gamma_{1.sls} \cdot E \cdot A_1 + \gamma_{2.sls} \cdot E \cdot A_2 + \gamma_{3.sls} \cdot E \cdot A_3)} = -1.609 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{alaspäin osan 2 keskiöstä}$$

$$a_{1.sls} := \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_{2.sls} = 196.609 \text{ mm} \quad \text{Osan 1 pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista}$$

$$a_{3.sls} := \frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2} + a_{2.sls} = 258.391 \text{ mm} \quad \text{Osan 3 pintakeskiön etäisyys neutraaliakselista}$$

$$EI_{ef.sls} := E \cdot (I_1 + \gamma_{1.sls} \cdot A_1 \cdot a_{1.sls}^2 + I_2 + \gamma_{2.sls} \cdot A_2 \cdot a_{2.sls}^2 + I_3 + \gamma_{3.sls} \cdot A_3 \cdot a_{3.sls}^2)$$

$$EI_{ef.sls} = (7.693 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Tehollinen taivutusjäykkyys käyttörajatilassa}$$

Taivutus:

$$\sigma_1 := \frac{\gamma_{1.uls} \cdot E \cdot a_{1.uls} \cdot M_d}{EI_{ef.uls}} = 0.331 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Taivutusmomentin aiheuttama normaalijännitys palkin osassa 1}$$

$$\sigma_{m1} := \frac{0.5 \cdot E \cdot h_1 \cdot M_d}{EI_{ef.uls}} = 3.427 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Taivutusmomentin aiheuttama taivutusjännitys palkin osassa 1}$$

$$\sigma_{1.d} := \sigma_1 + \sigma_{m1} = 3.758 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Mitoitusjännitys palkin osassa 1}$$

$$\sigma_2 := \frac{\gamma_{2.uls} \cdot E \cdot |a_{2.uls}| \cdot M_d}{EI_{ef.uls}} = 0.057 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Taivutusmomentin aiheuttama normaalijännitys palkin osassa 2}$$

$$\sigma_{m2} := \frac{0.5 \cdot E \cdot h_2 \cdot M_d}{EI_{ef.uls}} = 6.853 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Taivutusmomentin aiheuttama taivutusjännitys palkin osassa 2}$$

$$\sigma_{2.d} := \sigma_2 + \sigma_{m2} = 6.91 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Mitoitusjännitys palkin osassa 2}$$

$$\sigma_3 := \frac{\gamma_{3.uls} \cdot E \cdot a_{3.uls} \cdot M_d}{EI_{ef.uls}} = 0.222 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Taivutusmomentin aiheuttama normaalijännitys palkin osassa 3}$$

$$\sigma_{m3} := \frac{0.5 \cdot E \cdot h_3 \cdot M_d}{EI_{ef.uls}} = 6.853 \frac{N}{mm^2}$$

Taivutusmomentin aiheuttama taivutusjännitys palkin osassa 3

$$\sigma_{3.d} := \sigma_3 + \sigma_{m3} = 7.076 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusjännitys palkin osassa 3

$$\sigma_d := \max(\sigma_{1.d}, \sigma_{2.d}, \sigma_{3.d}) = 7.076 \frac{N}{mm^2}$$

Suurin mitoitusjännitys

$$f_{m.d} = 13.538 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitustaivutuslujuus

$$\frac{\sigma_d}{f_{m.d}} = 52.264\%$$

Käyttöaste, taivutus

Leikkaus:

$$h_{leik} := \frac{h_2}{2} + a_{2.uls} = 128.926 \text{ mm}$$

Etäisyys osien 2 ja 3 saumasta neutraaliakseliin

$$\tau_{max} := \frac{\gamma_{3.uls} \cdot E \cdot A_2 \cdot a_{3.uls} + 0.5 \cdot E \cdot b_i \cdot h_{leik}^2}{b_i \cdot EI_{ef.uls}} \cdot V_d = 0.661 \frac{N}{mm^2} \text{ Maksimileikkausjännitys}$$

$$f_{v.d} = 2.338 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusleikkauslujuus

$$\frac{\tau_{max}}{f_{v.d}} = 28.276\%$$

Käyttöaste, leikkaus

Liittimeen kohdistuva leikkausvoima:

$$F_{1.d} := \frac{\gamma_{1.uls} \cdot E \cdot A_1 \cdot a_{1.uls} \cdot s}{EI_{ef.uls}} \cdot V_d = 3.513 \text{ kN}$$

Liittimeen kohdistuva leikkausvoima osien 1 ja 2 välisessä saumassa

$$F_{3.d} := \frac{\gamma_{3.uls} \cdot E \cdot A_3 \cdot a_{3.uls} \cdot s}{EI_{ef.uls}} \cdot V_d = 4.714 \text{ kN}$$

Liittimeen kohdistuva leikkausvoima osien 2 ja 3 välisessä saumassa

$$F_d := \max(F_{1.d}, F_{3.d}) = 4.714 \text{ kN}$$

Liittimeen kohdistuva maksimileikkausvoima

Kootun palkin liittimien, tässä tapauksessa osakierteisten ruuvien tulee kestää tämä leikkausvoima, eli yhden ruuvin mitoitusleikkauskestävyys tulee olla vähintään 4,71 kN. Tässä laskelmassa ei ole esitetty liittimien mitoitusta.

Taipuma:

$$w_{inst.g} := \frac{5}{384} \cdot \frac{g \cdot L^4}{EI_{ef.sls}} = 1.371 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta

$$w_{inst.q} := \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI_{ef.sls}} = 2.056 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvasta kuormasta

$$w_{inst} := w_{inst.g} + w_{inst.q} = 3.427 \text{ mm}$$

Hetkellinen kokonaistaipuma

$$w_{inst.sall} = 7.5 \text{ mm}$$

Sallittu hetkellinen taipuma

$$\frac{w_{inst}}{w_{inst.sall}} = 45.697\%$$

Hetkellisen taipuman käyttöaste

$$w_{fin} := w_{inst.g} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst.q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) = 4.853 \text{ mm} \quad \text{Lopputilan kokonaistaipuma}$$

$$w_{fin.sall} = 10 \text{ mm}$$

Sallittu lopputaipuma

$$\frac{w_{fin}}{w_{fin.sall}} = 48.53\%$$

Lopputilan taipuman käyttöaste

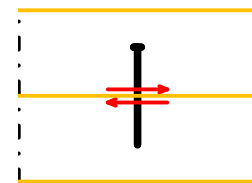
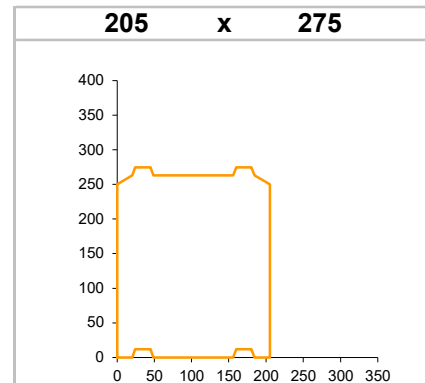
Suunnittelutoimisto	Työn nro	1	Sivu	1 / 3
	Päiväys	-		
Rakennuskohde	Sisältö			
Laskentaesimerkki	Jäykistävän hirsiseinän mitoitusohjelma (EC 5)			

1.0 RAKENTEEN TIEDOT

Info

Käyttöluokka 2 / Hetkellinen aikaluokka	▼
Vaarnatyyppi: Ruuvi 90° (EC 5)	▼
Wurth ASSY SK 3.0 / d = 12,0	▼
Hirsityyppi: Lamellihirsi 205x275	▼
Hirsikertoja 23 kpl	▼
Vaakarakenteita 2 kpl	▼

Vaarnamäärä	n =	10 kpl / hirsi
Ruuvien tunkeuma hirsiin	l_{ef} =	150 mm
Seinän pituus	L =	6000 mm
Seinän korkeus	H =	6049 mm
Kerroskorkeus 1	H1 =	3000 mm
Kerroskorkeus 2	H2 =	3049 mm



2.0 KUORMITUS

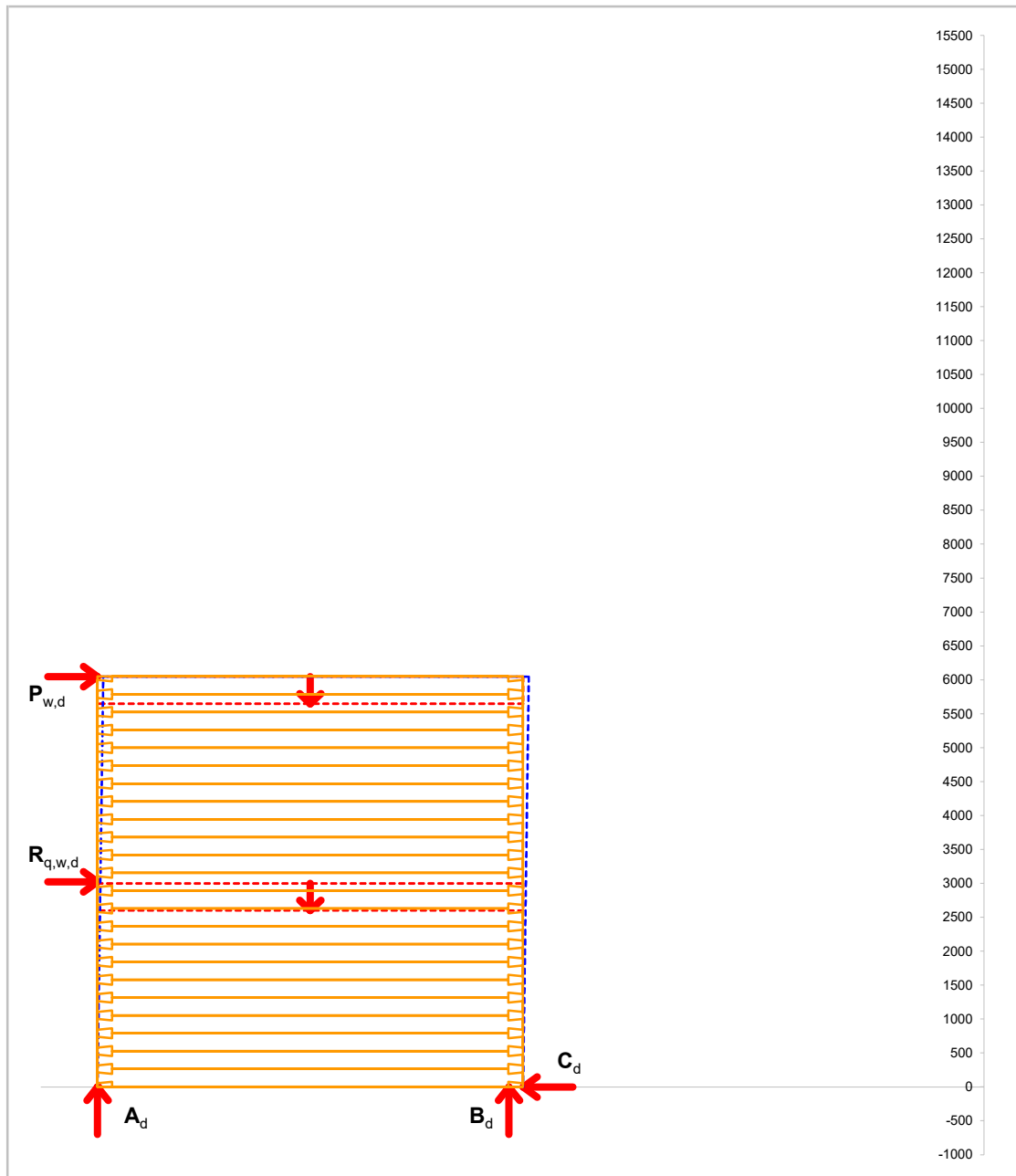
Seinän yläpään sallittu siirtymä käyttörajatilassa
 Kuormakerroin seuraamusluokan mukaan
 Katon projektion ominaistuulikuorma
 Seinän ominaistuulikuorma
 Seinän ominaistuulikuorman resultantti
 Vaakarakenteen 1 omapainon resultantti
 Vaakarakenteen 2 omapainon resultantti

ω =	40 mm	->	h / 150
K_{FI} =	1,0		
$P_{w,k}$ =	7,0 kN		
$q_{w,k}$ =	3,00 kN/m		
$R_{q,w,k}$ =	18,1 kN		
$R1_{g,k}$ =	30,0 kN		
$R2_{g,k}$ =	30,0 kN		

3.0 MITOITUSTULOKSET

Paneelileikkauskestävyys	Vaarnauksen kestävyys	Ankkurointi	Yläpään vaakasiirtymä
T_d	$\Sigma V_{R,d}$	F_d	U_{inst}
OK	42,4 kN	0,0 kN	8,0 mm
1 %	89 %	Ankkurointia ei tarvita	20 %

Suunnittelutoimisto	Työn nro	1	Sivu	2 / 3
	0 Päiväys	-		
Rakennuskohde	Sisältö			
Laskentaesimerkki	Jäykistävän hirsiseinän mitoitusohjelma (EC 5)			



Tukireaktiot

$A_{d,max}$	17,09	kN	Tukireaktioiden A_d ja B_d välisellä etäisyydellä	5800 mm
$B_{d,max}$	83,50	kN	Tukireaktioiden A_d ja B_d välisellä etäisyydellä	5763 mm
$C_{d,max}$	37,72	kN	Ulkoisista kuormista $P_{w,d}$ ja $R_{q,w,d}$	

Suunnittelutoimisto	Työn nro 0	1	Sivu 3 / 3
Rakennuskohde	Päiväys -	Tekijä SV	
Laskentaesimerkki	Sisältö Jäykistävän hirsiseinän mitoitusohjelma (EC 5)		

Hirren paneelileikkauskestävyys

K_{mod}	1,10		Muunnoskerroin
γ_M	1,30		Hirren osavarmuusluku
V_d	37,72	N	Leikkausvoima (max)
L_v	5590,00	mm	Hirren leikkautuva pituus
$t_{ef,V}$	205,00	mm	Hirren leikkautuva leveys
K_{cr}	1,00		Halkeilukerroin
A_v	1145950,00	mm ²	Hirren leikkautuva pinta-ala
T_d	0,03	N/mm ²	Leikkausjännitys
$f_{v,d}$	3,38		Leikkauslujuus
EHTO	0,01	< 1	

Ruuvivaarnauksen leikkausvoimakestävyys

K_{mod}	1,10		Muunnoskerroin
γ_M	1,30		Liitoksen osavarmuusluku
V_d	37,72	kN	Leikkausvoima (max)
Σn	10,00	kpl	Ruuvien yhteismäärä
d	12,00	mm	Ruuvien halkaisija (kierteen päältä)
l_{ef}	150,00	mm	Ruuvien tunkeuma hirsiiin
α	90,00	astetta	Ruuvien kulma syysuuntaan nähden
ρ_k	350,00	kg/m ³	Hirren ominaistiheys
$f_{h,k}$	13,62	N/mm ²	Reunapuristuslujuuden ominaisarvo
$M_{y,Rk}$	58000,00	Nmm	Ruuvien myötömomentin ominaisarvo
K_{ax}	-		Vinoruuvien ja syysuunnan huomioiva kerroin
$f_{ax,k}$	-	N/mm ²	Vinoruuvien ulosvetoparametri
$f_{tens,k}$	-	N	Vinoruuvien vetomurtokestävyys
n_{ef}	10,00	kpl	Ruuvien tehollinen määrä
$\gamma_{M,2}$	-		Ruuvien osavarmuusluku
$F_{ax,\alpha,Rd}$	-	kN	Vinoruuvien ulosvetokestävyys
$F_{v,Rd}$	4,24	kN	Yhden vaaran leikkausvoimakestävyys (EC 5-ohjeilla)
$\Sigma V_{R,d}$	42,37	kN	Vaarnauksen leikkausvoimakestävyys (EC 5-ohjeilla)
EHTO	0,89	< 1	

Seinän leikkaussiirtymä

G_{mean}	690,00	N/mm ²	Hirren liukumoduuli
ρ_{mean}	420,00	kg/m ³	Hirren keskitiheys
A_v	1145950,00	mm	Hirren leikkautuva pinta-ala
h_{ef}	263,00	mm	Hirren tehollinen korkeus
C_v	3006484,79	N/mm	Hirren leikkausjäykkyys
K_{ser}	4490,84	N/mm	Vaarnauksen siirtymäkerroin
$u_{inst,log}$	0,13	mm	Hirsien aiheuttama seinän leikkaussiirtymä
$u_{inst,dow}$	7,87	mm	Vaarnauksen aiheuttama seinän leikkaussiirtymä
$u_{inst,dow}$	0,00	mm	Vaarnauksen välyksen aiheuttama seinän leikkaussiirtymä
Σu_{inst}	8,00	mm	Seinän yläpäähän vaakasuuntainen leikkaussiirtymä
EHTO	0,20	< 1	