



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Matias Kangasniemi

Puurankarunkoisen hallirakennuksen kokonaisjäykistys

Laskentapohja jäykistysten mitoittamiseen

Opinnäytetyö

Kevät 2022

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka

Tekijä: Matias Kangasniemi

Työn nimi: Puurankarunkoisen hallin kokonaisjäykistys

Ohjaaja: Petri Koistinen

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 72

Liitteiden lukumäärä: 0

Opinnäytetyön aiheena on puurankarunkoisen harjaristikoin kootun hallirakennuksen kokonaisjäykistys. Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää toimeksiantajan tehokkuutta kyseisten hallirakennusten suunnittelussa laskentapohjalla, joka mitoittaisi tarkasti ja nopeasti hallin eri jäykistysrakenteet.

Opinnäytetyössä tutkitaan oleellisia kuormituksia hallirakennuksen jäykistykselle. Kuormien pohjalta tutustutaan erilaisiin rakenteiden jäykistysvaihtoehtoihin sekä niiden laskentakaavoihin.

Lopputuloksena saatiin laskentapohja, joka mitoittaa nopeasti ja tarkasti NR-yläpohjan ja seinien jäykistykset muutamalla eri menetelmällä sekä mitoittaa seinille tarvittavan ankkuroinnin perustuksiin.

¹ Asiasanat: jäykistys, tuulikuorma, nurjahdus, kattoristikko, seinät

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Construction Engineering

Specialisation: Building Construction

Author: Matias Kangasniemi

Title of thesis: Total bracing of a timber-framed building

Supervisor: Petri Koistinen

Year: 2022

Number of pages: 72

Number of appendices: 0

The subject matter of the thesis is the total bracing of a timber-framed building with ridge trusses. The primary objective was to improve the design efficiency of the client with a calculation program. The calculation program would calculate different bracings precisely and rapidly.

The thesis includes all relevant loads for a building total bracing. The thesis studied different bracing methods and their formulas based on all relevant loads.

The result of the thesis was a calculation program, which could calculate precisely and rapidly bracings for a building. The program can calculate bracings for different structures with a few methods. The program also calculates necessary anchoring for walls.

¹ Keywords: bracing, wind load, columnar deflection, roof truss, walls

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet	9
1 JOHDANTO	10
2 YLEISTÄ RAKENNUSTEN JÄYKISTÄMISESTÄ.....	11
2.1 Erilaisia kokonaisjäykistykseen menetelmiä	11
2.2 Jäykistysuunnittelu hallirakennuksissa yleisesti	12
3 KUORMITUKSET	14
3.1 Omapaino	14
3.2 Lumikuorma	15
3.3 Tuulikuorma	18
3.3.1 Voimakeroimenetelmä	21
3.3.2 Osapainemenetelmä	22
3.4 Kuormitusyhdistelmät	26
3.5 Puurakenteiden materiaaliominaisuudet mitoituksessa	27
4 NR-RISTIKOIN TOTEUTETUN RANKARUNKOISEN HALLIN KOKONAIJÄYKISTYS	28
4.1 Vesikattotason jäykistys	28
4.1.1 Vesikattotason kuormitus	29
4.1.2 Yläpaarteen nurjahdustuenta	31
4.1.3 Nurjahduksen ensimmäinen muoto	32
4.1.4 Nurjahduksen toinen muoto	34
4.1.5 Kattoruoteiden mitoitus	36
4.2 Vesikattotason kuormien johtaminen yläpohjatasolle	40
4.3 Yläpohjataso jäykistys	41
4.3.1 Vinolaudoitus yläpohjatasolla	44

4.3.2	Levyjäykistys yläpohjatasolla	45
4.4	Seinien jäykistys	51
5	LASKENTAPOHJAN ESITTELY.....	58
5.1	Kuormitukset	59
5.2	Vesikattotason jäykistys	60
5.3	Vesikattotason kuormien johtaminen yläpohjatasolle	65
5.4	Yläpohjataso jäykistys	67
5.5	Seinien jäykistys	69
5.6	Seinien ankkurointi perustuksiin	70
6	YHTEENVETO	71
	LÄHTEET	72

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Mastojäykistys, levyjäykistys ja kehäjäykistys	12
Kuvio 2. Periaatepiirros vaakakuormien siirtämisestä perustuksille	13
Kuvio 3. Lumen ominaisarvot maan pinnalla	16
Kuvio 4. Harjakaton lumikuorman kuormituskaaviot	17
Kuvio 5. Maastoluokkien kuvaukset.....	19
Kuvio 6. Puuskanopeuspaineen ominaisarvo eri maastoluokissa	20
Kuvio 7. Tuulen nopeuspaineen funktiot korkeuden (z) arvolla eri maastoluokissa	20
Kuvio 8. Pystyseiniä koskeva vyöhykekaavio	24
Kuvio 9. Kitkakuorman vaikutusal	30
Kuvio 10. Esimerkki tuentavoimien siirtymisestä suljetussa jäykistyssysteemissä: ensimmäinen muoto, jossa paarteet kaartuvat yhteen suuntaan	33
Kuvio 11. Esimerkki tuentavoimien siirtymisestä ns. S-nurjahduksessa.....	34
Kuvio 12. S-nurjahduksen estäminen jäykällä tuuletuslankulla	36
Kuvio 13. Ruoteiden limittäminen tai jatkoslaudan käyttö	39
Kuvio 14. Ristikkoyläpohjan jäykistys vinolaudoituksella.....	41
Kuvio 15. Kuormien jakaantuminen puurunkoisissa symmetrisissä halleiss.....	43
Kuvio 16. Kuormien jakaantuminen levykentässä.....	43
Kuvio 17. Esimerkki kuormia siirtävästä kiinnityspuusta sivuräystäällä.	45
Kuvio 18. Leikkausvoimien jakaantuminen ylä- tai välipohjissa.....	50
Kuvio 19. Mahdollisia tapoja vetopaarteen jatkoksen toteuttamiseen.	51

Kuvio 20. Kuormien jakaantuminen jäykistävällä seinällä	52
Kuvio 21. Seinän levyjäykistys.....	55
Kuvio 22. Nosto-ovellisen päätyseinän mahdollinen jäykistys vinolaudoin.	56
Kuvio 23. NR-pukkien mahdollinen asennustapa, vaakaleikkaus.	57
Kuvio 24. Nosto-ovellisen päädyn jäykistys NR-pukeilla.	57
Kuvio 25. Laskentapohjan tietojen syöttösivu.	58
Kuvio 26. Osa voimakertoimen laskentaketjusta.....	59
Kuvio 27. Tuulikuormien yhteenveto.	60
Kuvio 28. Ruoteiden mitoitustarkastelu.....	62
Kuvio 29. Nurjahdustukina toimivien ruoteiden jousijäykkyyden tarkistus.	63
Kuvio 30. Vesikattotason kuormitusyhdistelmät pituusyksikköä kohti.....	64
Kuvio 31. NR-pukin määrittäminen.	66
Kuvio 32. Vinolautaparien mitoitustarkastelu	67
Kuvio 33. Vinolautojen jatkosten mitoitus.....	68
Kuvio 34. Vetopaarteen normaalivoiman määrittäminen.	69
Taulukko 1. Naulalevykannattimien ohjeellisia vähimmäiskuormituksia.	15
Taulukko 2. Lumikuorman muotokertoimet, kun lunta ei estetä liukumasta katolta	18
Taulukko 3. Voimakertoimen arvoja huomioiden rakennuksen mittasuhteiden ja hoikkuuden vaikutus	22
Taulukko 4. Ulkopuolisen paineen kertoimet pohjaltaan suorakulmaisten rakennusten pystysuurille seinille.....	23

Taulukko 5. Kitkakertoimen arvoja eri katemateriaaleilla	26
Taulukko 6. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskertoimen arvoja.....	27

Käytetyt termit ja lyhenteet

Kiinteä kuorma	Kiinteästi rakenteeseen jakautunut kuorma, jonka suuruus ja suunta on yksikäsitteisesti määritetty koko rakenteelle.
Muuttuva kuorma	Kuorma, jonka jakautuminen rakenteelle saattaa vaihdella.
Dynaaminen kuorma	Kuorma, jolla on kiihtyvyyttä. Esimerkiksi siltanosturi, joka kiihtyy tai hidastuu aiheuttaa dynaamista kuormaa.
Paarre	Ristikkorakenteen uloin sauva, ei kuitenkaan pystysauvat. Yleensä tarkoitetaan ylä- tai alapaarretta.
Nurjahdus	Sauvan stabiliteetin menettäminen puristavasta voimasta.
Laajarunkoinen	Rakennus, jonka kattokannattajat ovat tehdasvalmisteiset ja jänneväliltään vähintään 18 metriä tai paikalla valmistetut ja jänneväliltään vähintään 15 metriä.
NR-rakenne	Naulalevyliitoksin koottuja kattokannattajia tai jäykistäviä rakenneosia.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda nopea ja tarkka laskentapohja puurankarunkoisten NR-ristikoin kootun hallirakennuksen kokonaisjäykistysten laskentaan. Työn toimeksiantajana on A-Insinöörit Oy. A-Insinöörit Oy on kiinteistö- ja rakennusalalla toimiva suunnittelu- ja konsulttitalo. Toimeksiantajalla on kasvava suunnittelutarve puurankarunkoisille hallirakennuksille.

Laskentaohjelmaksi valikoitui Mathcad, koska se on toimeksiantajalla laajasti käytössä, sekä opinnäytetyö antoi mahdollisuuden opetella kyseisen ohjelman käyttöä. Mathcad antaa selkeät tulosteet laskennasta, ja jokainen laskentavaihe on näkyvillä. Työssä on käytetty pääosin Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n teoksia sekä Puuinfon erilaisia laskentaesimerkkejä ja koulutusmateriaaleja.

Laskentapohja sisältää laskentaketjut NR-yläpohjan jäykistykseen erilaisilla jäykistysvaihtoehdoilla. Laskentapohjassa pystytään mitoittamaan myös rakennuksen seinien jäykistykset ja perustuksiin ankkuroinnit muutamalla eri menetelmällä. Jäykistysmenetelminä on käytetty jäykistystä rakennuslevyillä, NR-jäykisteristikoilla ja vinolaudoituksilla. Kyseisiä menetelmiä voi valita rakennekohtaisesti ja myös yhdistelemään pienellä vaivalla, jos esimerkiksi kattolevytyksen jäykistyskapasiteetti ei riitä. Työssä käydään läpi jäykistykseen teoriaa kirjallisuuden avulla sekä lopuksi esitellään varsinaista laskentapohjaa.

2 YLEISTÄ RAKENNUSTEN JÄYKISTÄMISESTÄ

Rakennukset on suunniteltava siten, että niiden lujuus ja vakaus säilyy koko niille määritetyn käyttöiän (Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista 477/2014). Rakennusten suunnittelussa tulee huomioida rakennusten käytöstä johtuvat erilaiset haitalliset vaikutukset, kuten muodonmuutokset, halkeamat, värähtelyt ja painumat. Rakennusvaiheessa rakenteiden lujuus ja vakaus tulee olla vähintään sama kuin käyttötilanteessa. Rakennusvaiheessa kuormitukset voivat olla erilaisia kuin käyttötilanteessa. Nämä tulee huomioida erilaisina mitoitustilanteina. Esimerkkinä hallirakennus saattaa tarvita yläpohjatasoon asennusaikaista jäykistystä ennen sisäkattolevytystä.

Rakennusten suunnittelu Suomessa tapahtuu pääosin eurokoodien ja niitä tarkentavien ympäristöministeriön antamien asetusten sekä ohjeiden perusteella (Ympäristöministeriö (YM), 2016, s. 7). Eurokoodeissa ja ympäristöministeriön asetuksien kansallisilla valinnoilla rakenteiden kuormituksille annetaan erilaisia vähimmäisarvoja ja vaatimuksia, joita on noudatettava. Suomessa rakennuksia voidaan suunnitella myös muilla suunnittelujärjestelmillä. Nämä ovat aina tapauskohtaisia ja rakennusvalvonnan päätettävissä. Edellytyksenä eri suunnittelujärjestelmän käytölle on vähintään samantasoinen rakenteiden luotettavuus kuin eurokoodeilla saavutetaan.

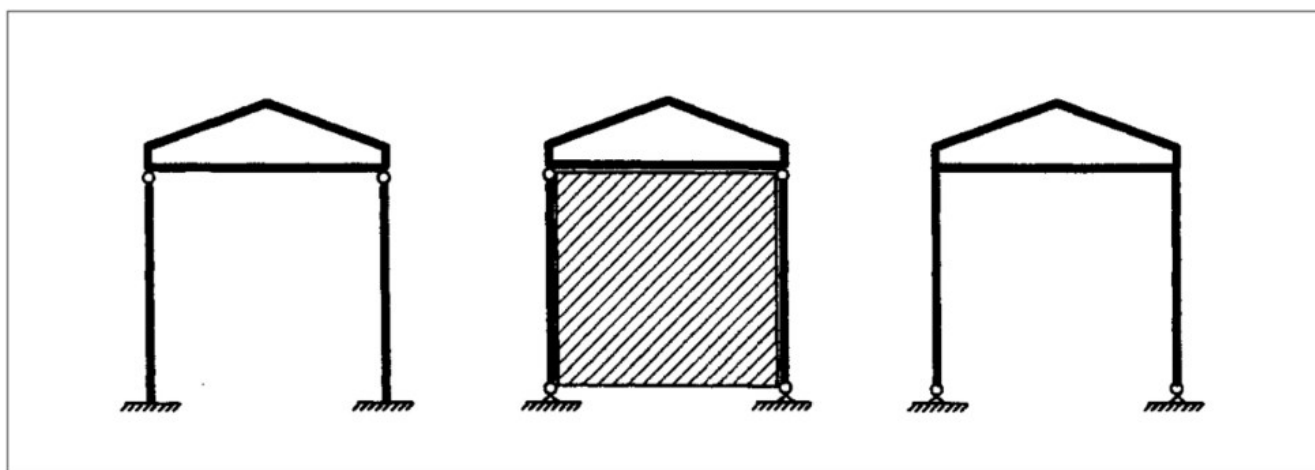
Rakennuksen jäykistyksen tavoitteena on säilyttää rakenteiden stabiilius ja siirtää rakennukseen kohdistuvat ulkoiset vaakakuormat perustuksien kautta maaperään (RIL-248-2013, 2013, s. 9). Yleisimpiä jäykistysten kautta siirrettäviä vaakakuormituksia ovat tuuli-kuorma, rakenteiden vinoudesta ja epäkeskisyydestä aiheutuvat vaakakuormat sekä kiepahdus- ja nurjahdustuennan kuormat.

2.1 Erilaisia kokonaisjäykistyksen menetelmiä

NR-yläpohjallarakenteella varustetun puurankarunkoisen rakennuksen yleisin jäykistystapa on muodostaa levymäisiä jäykistekenttiä rakennuslevyjä, erilaisia NR-rakenteita ja vinolaudoituksia käyttäen (RIL-248-2013, 2013, s. 9). Jokainen kokonaisjäykistykseen osallistuva rakenne jäykistetään levykentäksi ja kentän kuormitukset siirretään liitososia hyödyntämällä seuraavalle jäykistekentälle, kunnes kaikki rakennukseen kohdistuvat

vaakakuormat ovat siirtyneet perustuksille. Levyjäykistyksessä jäykisteet siirtävät vaakakuormat, joten rakennuksen runko siirtää vain pystykuormat perustuksille.

Muita jäykistystapoja ovat esimerkiksi mastojäykistys tai kehäjäykistys (RIL-248-2013, 2013, s. 9–10). Mastojäykistyksessä rungon alapään liitos perustuksiin on momenttijäykkä ja siirtää vaakakuormat suoraan perustuksille. Kehäjäykistyksessä rungon pysty- ja vaakarakenne liitetään momenttijäykästi. Tässä työssä keskitytään tutkimaan ensisijaisesti levyjäykistysmenetelmää, joka on yleinen NR-yläpohjalla toteutetuissa puurankarunkoisissa halleissa. Kuviossa 1 on esitetty edellä mainittuja jäykistystapoja.



Kuvio 1. Mastojäykistys, levyjäykistys ja kehäjäykistys (RIL-248-2013, 2013, s. 10).

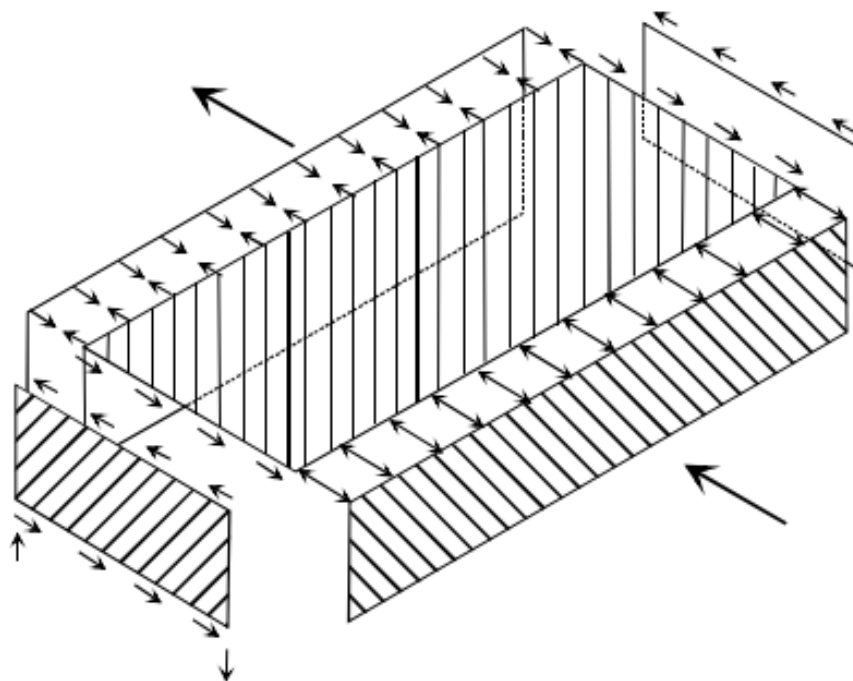
2.2 Jäykistys suunnittelu hallirakennuksissa yleisesti

Kokonaisjäykistys tarkoitus on siirtää vaakasuuntaiset kuormat rakenteiden avulla perustuksille, jotka johtavat ne maaperään (VTT, 2006, s. 4) Rakennesuunnittelua toteuttaessa rakennesuunnittelijan tulisi koota selkeä ja yksinkertainen selostus, kuinka rakennuksen kokonaisjäykistys toteutetaan. Selostuksessa olisi suositeltavaa olla myös selkeä kuva, josta selviää rakennuksen jäykistävät rakenteet.

Hallirakennuksissa tyypillisin kokonaisjäykistysmenetelmä on levyjäykistys. Kyseisellä menetelmällä vaakasuuntaiset kuormat voidaan siirtää seuraavasti (VTT, 2006, s. 5): Rakennukseen kohdistuva tuulikuorma jakaantuu puoliksi ala- ja yläreunaan. Kattoon kohdistuva tuulikuorma johdetaan jäykistysrakenteilla seinän yläreunaan. Seinien yläreunassa oleva jäykistetty yläpohjataso siirtää ulkoiset kuormat jäykistävien seinien yläpäähän.

Yläpohjarakenteen liitoksen seiniin tulee kestää kyseisiin kohtiin kohdistuvat kuormat, jotta ne siirtyvät asianmukaisesti seinille. Seinät suunnitellaan jäykiksi rakenteiksi, jotka siirtävät ulkoiset kuormat perustuksille.

NR-rakenteisen yläpohjan jäykistys toteutetaan samoin. Ristikoiden yläpaarretaso jäykistään levykentäksi ja ristikoiden sivusuuntainen kaatuminen estetään tuennoilla. Kuviossa 2 on esimerkki rungon toimintaselosteeseen liitettävästä jäykistyspiirustuksesta.



Kuvio 2. Periaatepiirros vaakakuormien siirtämisestä perustuksille (VTT, 2006, s. 4).

3 KUORMITUKSET

Rakennuksen kuormat jaetaan erilaisiin luokkiin niiden aikaluokan mukaan (RIL-201-1-2017, 2017 s. 31). Luokkia ovat pysyvät, muuttuvat ja onnettomuuskuormat. Pysyviin kuormiin luokitellaan esimerkiksi rakenteiden omapaino ja kiinteiden laitteiden omapaino. Muuttuviin kuormiin luokitellaan rakennuksen hyötykuorma, lumikuorma sekä tuulikuorma. Onnettomuuskuormiin luokitellaan erilaisia onnettomuustilanteita, kuten törmäykset ja räjähdykset.

Opinnäytetyössä huomioidaan vain kokonaisjäykistykselle oleelliset kuormitukset. Näitä ovat omapaino, lumikuorma ja tuulikuorma. Rakenteiden omapaino aiheuttaa pystysuuntaista kuormitusta rungolle sekä lisävaakakuormitusta rakenteiden asennusvinouden takia. Lumikuormasta aiheutuu sekä pystysuuntaista kuormitusta että lisävaakakuormitusta.

Muita kokonaisjäykistykselle oleellisiä kuormia ovat hyötykuormat. Hyötykuorma on tilojen käytöstä aiheutuvaa kuormitusta. Siihen sisältyy esimerkiksi normaali henkilökäyttö, ajoneuvot, tavaroiden varastointi ja siirrettävät väliseinät (RIL-201-1-2017, 2017, s. 68). Hyötykuormat voivat olla staattisia tai dynaamisia. Dynaamisia hyötykuormia voivat muodostaa esimerkiksi siltanosturin liikkeistä aiheutuvat kiihdytys- ja jarrutusvoimat.

3.1 Omapaino

Omapaino luokitellaan pysyväksi ja kiinteäksi kuormaksi (RIL-201-1-2017, 2017, s. 63). Yleisesti rakenteiden omapainon laskennassa käytetään materiaalin tilavuuspainon ominaisarvoa sekä nimellismittoja, jotka saadaan rakennesuunnitelmista. Tilavuuspainon ominaisarvoja eri materiaaleille löytyy esimerkiksi teoksen RIL-201-1-2017 liitteestä A.

Rakennuksen jäykistykseen vaikuttavia rakenteiden omia painoja muodostuu esimerkiksi vesikatosta, yläpohjasta, ristikoista ja seinistä. Taulukosta 1 selviää Rakennustietokortin RT-85-10495 Puuristikot ja kehät mukaisia ohjeellisia vähimmäisarvoja rakennesan omapainoille.

Taulukko 1. Naulalevykannattimien ohjeellisia vähimmäiskuormituksia (Rakennustieto, 1993, s. 10).

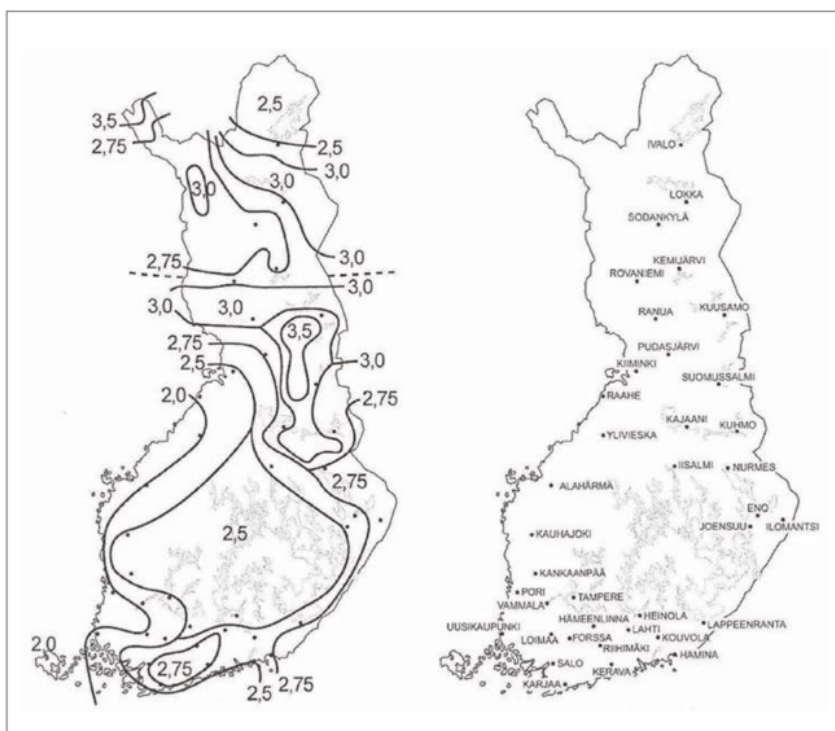
Naulalevykannattimen ohjeellisia vähimmäiskuormituksia kN/m².

Kuormitus	Yläpaarre	Alapaarre
Omapaino	0,05	0,05
Kate		
– kattotiili	0,55	
– betonikattotiili	0,55	
– kuitusementtilevy	0,30	
– bitumikermi	0,30	
– muotolevy	0,15	
– sileä ohutlevy	0,15	
Sisäkattoverhous ja lämmöneriste	0,30	0,30
Hyötykuorma		1,5 (käyttöullakko-kannattimelle)
Muut kuormat	Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B1 mukaan	
– lumikuorma		
– tuulikuorma		

3.2 Lumikuorma

Lumikuorman luokitus on muuttuva kiinteä kuorma (RIL-201-1-2017, 2017 s. 96–98). Lumikuorma vaihtelee rakennuksen maantieteellisen sijainnin perusteella. Kuviossa 3 on

esitetty lumikuorman ominaisarvoja maan pinnalla (s_k). Kuviossa 3 olevat arvot ovat lumikuorman arvoja, jotka toteutuvat keskimäärin kerran 50 vuoden aikana.



Kuvio 3. Lumen ominaisarvot maan pinnalla (RIL-201-1-2017, 2017, s. 98).

Lumikuorman mitoitussarvo lasketaan rakennuksen katolle edellä mainitusta ominaisarvosta maan pinnalla (s_k) (RIL-201-1-2017, 2017, s. 101). Lumikuorman määrään rakennuksen katolla vaikuttaa esimerkiksi katon muoto, pinnan karheus, ympäröivä maasto, tuulisuus ja lämpötilan vaihtelut. Katon lumikuorma määritetään kaavasta (RIL-201-1-2017, 2017, s. 100)

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

missä

μ_i on lumikuorman muotokerroin

s_k on lumikuorman ominaisarvo maan pinnalla [kN/m^2]

C_e on tuulensuojaiskerroin

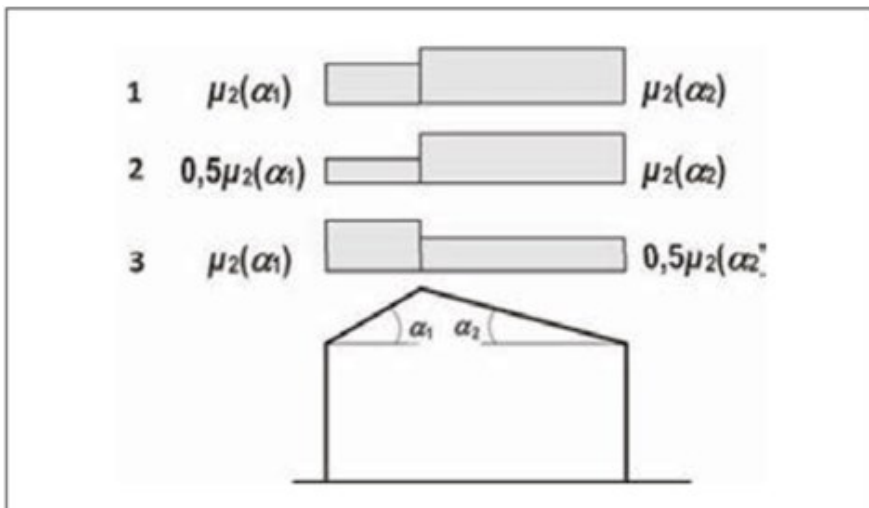
C_t on lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti on 1,0

Tuulensuojaisuuskerroin huomioi rakennuksen sijoituspaikan maastotyyppin suojaisuuden (RIL-201-1-2017, 2017, s.101). Maastotyypit jaetaan kolmeen luokkaan: tuulinen, normaali ja suojaisa. Tuulisella maastotyyppillä kerroin yleensä pienentää lumikuormaa, normaalilla ei vaikuta lumikuormaan ja suojaisalla se korottaa lumikuormaa. Normaalitilanteissa kaava yksinkertaistuu muotoon (RIL-201-1-2017, 2017, s. 100)

$$s = \mu_i s_k \quad (2)$$

Katon muotokerroin määräytyy pääosin katon kaltevuuskulman ja kattomuodon mukaan (RIL-201-1-2017, 2017, s. 101). Katon muotokertoimeen vaikuttavat myös erilaiset ulkoneumat ja esteet, joihin lumi voi kerääntyä, sekä katon vieressä olevat korkeammat rakennukset ja erilaiset kattojiirit.

Rakennusten lumikuorman laskennassa on huomioitava kattomuodon aiheuttamat erilaiset kinostumat ja niiden kuormituskaaviot (RIL-201-1-2017, 2017, s. 101). Kuviossa 4 selviää harjakattoisen rakennuksen erilaisia lumikuorman kuormituskaavioita.



Kuvio 4. Harjakaton lumikuorman kuormituskaaviot (RIL-201-1-2017, 2017, s. 102).

Taulukossa 2 on esitetty lumikuorman muotokertoimen laskentakaavoja katon kaltevuuden perusteella (RIL-201-1-2017, 2017, s. 102). Alla oleva taulukko 2 pätee, jos lunta ei estetä

liukumasta katolta lumiesteillä tai vastaavilla. Jos lunta estetään liukumasta, on muotokertoimen arvo oltava vähintään 0,8.

Taulukko 2. Lumikuorman muotokertoimet, kun lunta ei estetä liukumasta katolta (RIL-201-1-2017, 2017, s. 102).

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1, μ_2	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_3	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	1,6

3.3 Tuulikuorma

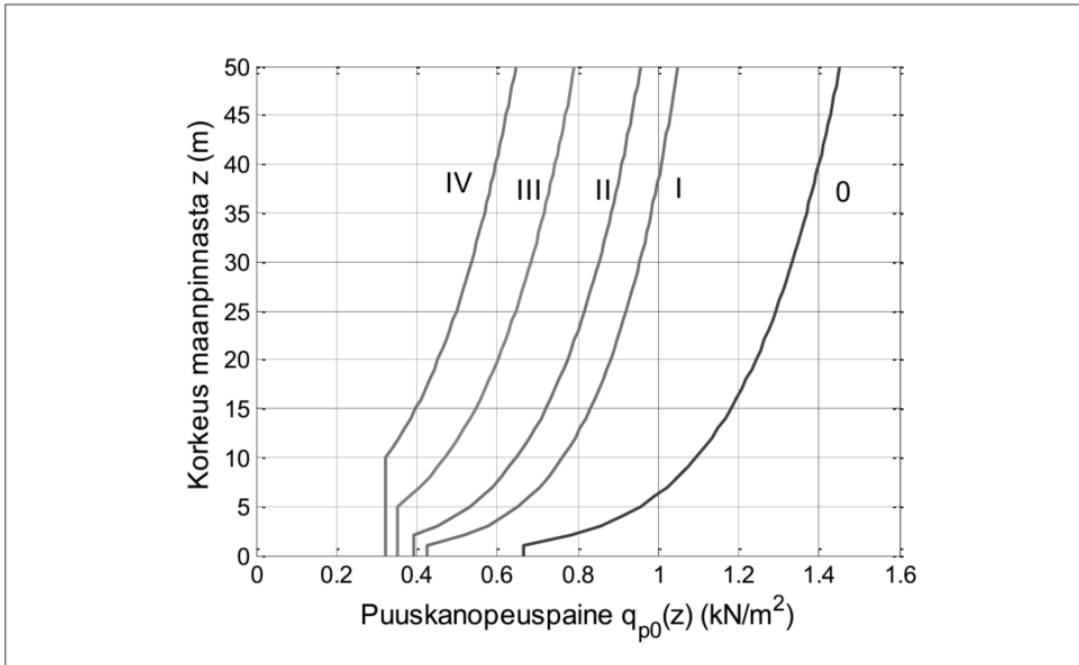
Rakennusten tuulikuorma luokitellaan muuttuvaksi kiinteäksi kuormaksi (RIL-201-1-2017, 2017, s. 127–129). Rakennuksen tuulikuormien yksinkertainen esitystapa esittää tuulen eri tuulenpainneiden ryhmänä, minkä vaikutuksen voimakkuutena oletetaan tuulenpaineryhmän suurimpien puuskien voima. Tuulikuorma voidaan määrittää joko tuulennopeuden tai nopeuspaineen perusarvoista, joiden suurin arvo toistuu keskimäärin 50 vuoden välein.

Tuulikuorman nopeuspaineen perusarvoon vaikuttaa rakennuksen korkeus sekä maastoluokka (RIL-201-1-2017, 2017, s. 130). Maastoluokan valintaan vaikuttaa rakennuksen sijainti ja sitä ympäröivän maaston rosoisuus. Maastoluokat jaetaan viiteen eri luokkaan. Kuvioista 5 selviää eri maastoluokkien vaatimukset. Suurimman tuulennopeuden perusarvon tuottaa maastoluokka 0, joka sijaitsee tyypillisesti rannikkoalueilla meren äärellä. Pienin tuulennopeuden perusarvo sadaan maastoluokasta IV.



Kuvio 5. Maastoluokkien kuvaukset (RIL-201-1-2017, 2017, s. 131).

Puuskanopeuden perusarvo määritetään maastoluokan ja rakennuksen korkeuden mukaan (RIL-201-1-2017, 2017, s. 130). Puuskanopeuden perusarvo voidaan määrittää tavallisissa tapauksissa kuvion 6 käyrästä.



Kuvio 6. Puuskanopeuspaineen ominaisarvo eri maastoluokissa (RIL-201-1-2017, 2017, s. 136).

Puuskanopeuspaineen valmiita arvoja eri maastoluokissa korkeuden perusteella löytyy myös esimerkiksi teoksesta RIL-201-1-2017. Interpoloimalla näitä arvoja pystytään määrittelemään tarkempi arvo tutkittavalle korkeudelle. Edellä mainitut tavat perustuvat kuvion 7 logaritmifunktioille. Jokaiselle maastoluokalle on oma logaritmifunktio, joka laskee puuskanopeuspaineen rakennuksen korkeuden perusteella.

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

Kuvio 7. Tuulen nopeuspaineen funktiot korkeuden (z) arvolla eri maastoluokissa (RIL-201-1-2017, 2017, s. 188).

Rakennuksen kokonaistuulivoima voidaan määrittää kahdella eri tavalla (RIL-201-1-2017, 2017, s. 138). Voimakerroinmenetelmässä tarkastellaan koko rakennukseen kohdistuvaa kokonaistuulivoimaa yhden voimakertoimen avulla. Osapainemenetelmässä lasketaan ensin rakennuksen ulkopintoihin eri osille vaikuttavia painekertoimia, jotka kerrotaan puuskanopeuspaineella. Kokonaistuulivoiman laskennassa osapainemenetelmällä ulkopintoihin kohdistuvaan tuulikuormaan lisätään vielä sisäisen paineen kertoimella kerrottu puuskanopeuspaine ja nämä summataan yhteen. Molemmissa tavoissa tulee ottaa huomioon tuulesta aiheutuva katon kitkakuorma. Voimakerroinmenetelmässä kitkakuorma sisältyy voimakertoimeen. Kitkakuorman määrittäminen on esitetty tarkemmin osapainemenetelmän määrittämisessä.

3.3.1 Voimakerroinmenetelmä

Voimakerroinmenetelmä jaetaan erikseen matalille ja korkeille rakennuksille (RIL-201-1-2017, 2017, s. 140). Jotta voidaan käyttää voimakerroinmenetelmää matalille rakennuksille, on rakennuksen korkeuden oltava pienempi kuin sen leveys tai pienempi kuin 15 metriä. laskentapohjassa keskitytään vain matalien rakennusten laskentaan. Matalille rakennuksille oletetaan vain yksi tuulenopeuspaine, joka määritetään rakennuksen harjan korkeudelle. Kokonaistuulivoiman kaava on yleensä muotoa (RIL-201-1-2017, 2017, s. 140).

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

missä

F_w on kokonaistuulivoima [kN]

$c_s c_d$ on rakennekerroin, matalille rakennuksille 1

c_f on voimakerroin, sisältää tuulen kitkakuorman vaikutukset

$q_p(h)$ on puuskanopeuden harjan korkeudella [kN/m²]

A_{ref} on tuulikuorman vaikutuspinta-ala [m²]

Voimakerron (c_f) määritetään rakennuksen tehollisen hoikkuuden (λ) ja sen sivusuhteiden mukaan. Tehollisen hoikkuuden kaava matalille rakennuksille on (RIL-201-1-2017, 2017, s. 140).

$$\lambda = 2h / b \quad (4)$$

missä

h on rakennuksen korkeus

b on rakennuksen tuulen vastainen sivumitta

Taulukosta 3 ilmenee voimakertoimen arvoja tehollisen hoikkuuden ja sivusuhteen mukaan. Sivusuhteessa (d) tarkoitetaan tuulen suuntaista sivua ja (b) tuulen vastaista sivua. Voimakertoimen väliarvot voidaan interpoloida taulukon arvoista (Puuinfo, 2020, s. 13).

Taulukko 3. Voimakertoimen arvoja huomioiden rakennuksen mittasuhteiden ja hoikkuuden vaikutus (RIL-201-1-2017, 2017, s. 141).

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

3.3.2 Osapainemenetelmä

Osapainemenetelmällä kokonaistuulivoima jaetaan ulkoiseen kuormaan, sisäiseen kuorman ja kitkakuormaan. Rakennuksen kokonaistuulivoima on siis näiden kolmen summa. Ulkoisen kuorman kaava on (RIL-201-1-2017, 2017, s. 143).

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe} \quad (5)$$

missä

w_e on yksittäisen pinnan ulkoinen kuorma korkeudella z_e [kN/m²]

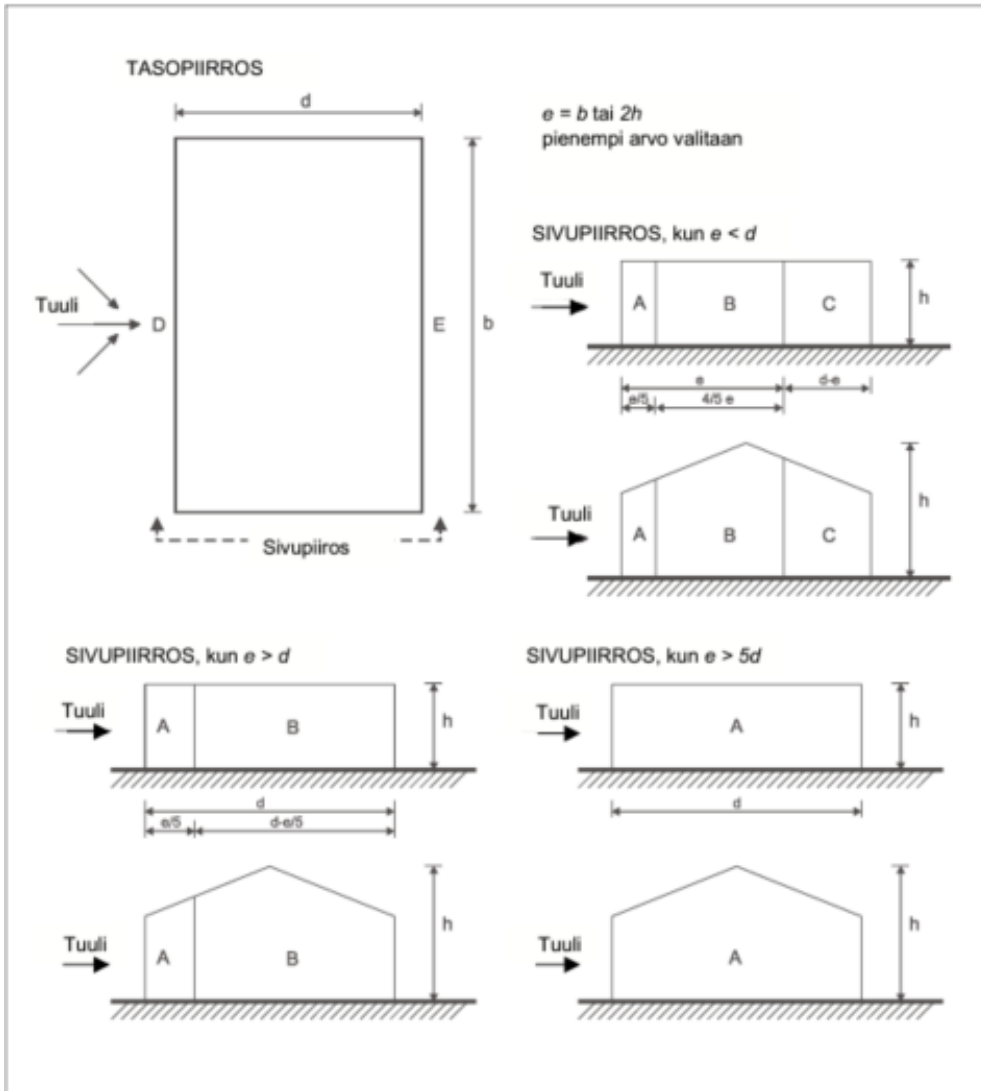
$q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine korkeudella z_e [kN/m²]

c_{pe} on ulkoisen paineen kerroin

Ulkaisen paineen kerroin pohjaltaan suorakulmaisille rakennuksille muodostuu taulukon 4 arvoista rakennuksen korkeuden ja tuulen suuntaisen sivun suhteen mukaan. Osapainemenetelmässä rakennukseen muodostetaan erilaisia lohkoja kuvion 8 mukaan.

Taulukko 4. Ulkopuolisen paineen kertoimet pohjaltaan suorakulmaisten rakennusten pystysuorille seinille (RIL-201-1-2017, 2017, s.150).

Vyöhyke	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
≥ 5 ^{*)}	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	



Kuvio 8. Pystyseiniä koskeva vyöhykekaavio (RIL-201-1-2017, 2017, s. 150).

Kerroin c_{pe} muodostetaan logaritmisesta interpolointifunktiosta kyseisen lohkon pinta-alan perusteella. Interpolointifunktio on muotoa (RIL-201-1-2017, 2017, s. 148).

$$c_{pe} = c_{pe1} - (c_{pe1} - c_{pe10}) \log_{10} A \quad (6)$$

missä

c_{pe1} on ulkoisen paineen kertoimen taulukkoarvo alle 1m^2 vaikutusalalle

c_{pe10} on ulkoisen paineen kertoimen taulukkoarvo yli 10m^2 vaikutusalalle

A on lohkon vaikutusalan pinta-ala [m^2]

Taulukkoarvoja voi joutua interpoloimaan korkeuden ja tuulen suuntaisen sivun suhteen ennen kuin arvot syötetään funktioon.

Sisäisen kuorman painekertoimeen vaikuttaa rakennuksen ulkoseinissä olevien aukkojen lukumäärä, koko ja jako (RIL-201-1-2017, 2017, s. 163). Lähes neliön muotoisille rakennuksille voidaan sisäisen paineen kerroin valita kahdesta arvosta $c_{pi} = 0,2$ ja $c_{pi} = -0,3$. Se arvo valitaan, joka tuottaa epäedullisemmän vaikutuksen. Sisäisen paineen kertoimen valinnassa tulee huomioida kuorman suunnat. Positiivinen arvo on painetta ja negatiivinen arvo imua. Sisäisen kuorman kaava on muotoa (RIL-201-1-2017, 2017, s. 143).

$$w_i = q_p(z_i)c_{pi} \quad (7)$$

missä

w_i on yksittäisen pinnan sisäinen kuorma korkeudella z_i [kN/m²]

$q_p(z_i)$ on puuskanopeuspaine korkeudella z_i [kN/m²]

c_{pi} on sisäisen paineen kerroin

Rakennuksen kitkakuorma muodostuu tuulen edetessä rakennuksen pinnalla (RIL-201-1-2017, 2017, s. 143, 169). Rakennuksen kitkakuorma ei ole yleensä merkittävä pienissä rakennuksissa. Pitkissä rakennuksissa kitkakuorman vaikutus tulee huomioida. Kitkakuorma kasvaa rakennuksen kitkapinta-alan kasvaessa. Rakennuksen kitkakuorma riippuu katemateriaalista, kattopinta-alasta sekä erilaisista ikkunasyvennyksistä ja kohoumista. Taulukossa 5 on kitkakertoimen arvoja eri katemateriaaleille. Rakennuksen kitkakuorma muodostuu kitkakertoimen ja puuskanopeuspaineen tulosta.

Taulukko 5. Kitkakertoimen arvoja eri katemateriaaleilla (RIL-201-1-2017, 2017, s. 169).

Pinta	Kitkakerroin c_{fr}
sileä (teräs, sileä betoni)	0,01
karhea (karhea betoni, kattohuopa)	0,02
hyvin karhea (aalto-, ripa- tai poimuprofilointi)	0,04

3.4 Kuormitusyhdistelmät

Rakenteiden tarkastelussa käytettävät kuormitusyhdistelmät voidaan jakaa murtorajatilan ja käyttörajatilan yhdistelmiin (RIL-201-1-2017, 2017, s. 40). Murtorajatilan kuormitusyhdistelmä muodostuu yllä lasketuista kuormista ja varmuutta lisäävistä osavarmuuskertoimista. Tavallisesti pysyvissä kuormissa osavarmuuskerroin on 1,15. Jos kuormitusyhdistelmässä on vain pysyviä kuormia, käytetään kerrointa 1,35. Jos pysyvä kuorma vähentää muiden kuormien haitallista vaikutusta kertoimeksi muodostuu 0,9. Muuttuvilla kuormilla osavarmuuskerroin on 1,5. Kun muuttuvia kuormia on enemmän kuin yksi, vähennetään muiden ei-määräävien kuormien vaikutusta yhdistelykertoimilla ($\psi_{0,i}$). Eri kuormilla on erilaiset yhdistelykertoimet, ja tämän takia tulee käydä läpi kaikki tarvittavat kuormitusyhdistelmät epäedullisimman kuormituksen löytämiseksi.

Kuormitusyhdistelmiin kuuluu myös seuraamusluokan (CC) luoma kuormakerroin (k_{Fi}) (RIL-201-1-2017, 2017, s. 26–27). Seuraamusluokat jakaantuvat kolmeen luokkaan (CC1, CC2 ja CC3). Luokassa CC1 voidaan vähentää kuormaa luvulla 0,9, CC3-luokassa kuormia korotetaan luvulla 1,1 ja luokassa CC2 kuormakerroin on 1,0. Luokat perustuvat rakenteiden vaurioitumisen aiheuttamiin seuraamuksiin. CC1-luokkaan kuuluu vähäpätöisiä rakennuksia, kuten varastot ja maatalousrakennukset, joissa vaurioitumisen seuraamukset ovat vähäiset. CC3-luokkaan kuuluvat suuren riskin rakennukset, kuten korkeat kerrostalot ja monet julkiset rakennukset. Jos rakennus ei kuulu kumpaankaan näistä luokista, se kuuluu CC2-luokkaan.

3.5 Puurakenteiden materiaaliominaisuudet mitoituksessa

Puurakenteiden kestävyden mitoituksessa käytetään puun materiaaliominaisuuden osavarmuuslukua (γ_M) ja kuorman keston sekä kosteusvaikutuksen huomioivaa muunnoskerrointa (k_{mod}) (RIL-205-1-2017, 2017, s. 48). Sahatavaralle materiaaliominaisuuden osavarmuuslukuna käytetään 1,3. Liimapuun ollessa kyseessä kerroin on 1,25. Puurakenteiden naulaliitoksien tartuntalujuuksille on myös oma osavarmuuskerroin, joka on 1,3. k_{mod} -kerroin huomioi kosteuden vaikutuksen kolmella eri käyttöluokalla. Käyttöluokassa 1 puurakenne on lämpimässä sisätilassa, jossa kosteusvaihtelu on pientä. Käyttöluokassa 2 rakenne voi olla ulkotiloissa, mutta ei suoraan säälle alttiina. Käyttöluokassa 3 puurakenne on ulkona kosteudelle alttiina. Taulukosta 6 selviää k_{mod} kertoimia eri käyttöluokissa ja kuorman aikaluokissa eri materiaaleilla.

Taulukko 6. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroimen arvoja (RIL-205-1-2017, 2017, s. 48).

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkelinen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri, CLT	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lastulevy P4 ¹⁾ ja P5, OSB/2 ¹⁾ , Kova kuitulevy	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Lastulevy P6 ¹⁾ ja P7, OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA ¹⁾ , MBH.HLS, MDF.LA ¹⁾ ja MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,45	0,80

¹⁾ Saadaan käyttää vain käyttöluokassa 1.

4 NR-RISTIKOIN TOTEUTETUN RANKARUNKOISEN HALLIN KOKONAI SJÄYKISTYS

Työssä käydään läpi vesikattotason jäykistys, kuormien siirtäminen vesikattotasolta yläpohjatasolle, yläpohjataso n jäykistys, seinien jäykistys sekä seinien ankkurointi perustuksiin. Työ rajattiin NR-rakenteisilla harjaristikoilla ja puurankarungolla toteutetun hallin kokonaisjäykistykseen. Teoksen RIL- 205-1-2017 sivun 98 mukaan rakennuksen ja yksittäisten rakenteiden vaakasiirtymä ei aiheuta yleensä haittaa, joten vaakasiirtymätarkastelu on jätetty työstä pois. Vaakasiirtymä tulee kuitenkin huomioida laajarunkoisten hallirakennusten jäykistystarkasteluissa. Raja-arvoksi vaakasiirtymälle RIL antaa $H/300$, missä H on rakennuksen kokonaiskorkeus.

Kattoristikon uumasauvan nurjahdustuenta liittyy oleellisesti NR-yläpohjan jäykistykseen. Tämän mitoituksen tekee kuitenkin aina NR-suunnittelija ristikkosuunnittelun yhteydessä. Siksi uumasauvan nurjahdustuenta ei erikseen käsitellä työssä. Nurjahdusilmiötä käsitellään myöhemmin vesikattotason jäykistuksen yhteydessä yläpaarteen kannalta.

4.1 Vesikattotason jäykistys

NR-rakenteisen yläpohjan vesikattotason tyypillisiä jäykistystapoja ovat esimerkiksi NR-jäykisteristikot, vinolaudoitukset ja levyjäykistys sekä näiden yhdistelmät (RIL-248-2013, 2013, s. 26).

NR-jäykisteristikot ovat yläpaarteiden väliin asennettavia suorakaiteenmuotoisia NR-ristikorakenteita, joiden tarkoitus on ottaa vastaan ulkoiset ja sisäiset kuormat sekä jäykittää yläpohjataso. Tämä jäykistysmenetelmä sopii hyvin harja- ja pulpettiristikoille. Jäykisteristikot mitoitetaan yläpaarteen tasossa vaikuttavalle vaakakuormalle. Yleensä jäykisteristikot asennetaan rakennuksen päätyihin, mutta pitkissä rakennuksissa voidaan tarvita myös rakennuksen keskellä jäykisteristikoita. NR-suunnittelija mitoittaa jäykisteristikot rakennussuunnittelijan antamilla lähtötiedoilla.

Vesikattotason vinolaudoitus voidaan asentaa kattoristikon yläpaarteen kumpaankin pintaan. Laudoituksen asennuskulma on tyypillisesti 45 astetta, jotta ne vastaanottavat ja

siirtävät kuormitukset tehokkaasti. Laudoituksen kiinnitys tapahtuu naulaamalla. Tätä menetelmää käytetään yleisesti pienemmissä rakennuksissa. Mitoitettavia kohtia kyseisellä menetelmällä on laudan nurjahduskestävyys ja liittimien leikkauskestävyys.

Levyjäykistyksessä jäykistävänä levynä voidaan käyttää rakenteellisia levyjä, kuten vaneeria, lastulevyä, kuitulevyä tai korkeaprofiilista peltikatetta. Peltikatteen mitoitus jäykistäväksi rakenteeksi on työläin. Mitoitukset tapahtuvat kunkin levyn levyjäykistysohjeiden mukaisesti.

NR-jäykisteristikoiden ja vinolaudoituksen tapauksessa tulee ottaa huomioon rakennuksen seuraamusluokka. Eurokoodi 1:n osassa 1–7 vaaditaan CC2- ja CC3-luokan rakennuksissa vähintään kahta jäykistekenttää (RIL-248-2013, 2013, s. 26). Tyypillisesti jäykistysrakenteita sijoitetaan rakennuksen kumpaankin pätyyn, jolloin vaatimus toteutuu. Tämä huomioi onnettomuustilanteen ja estää jatkuvan sortumisen, jos toisen puolen jäykistekenttä vaurioituu.

4.1.1 Vesikattotason kuormitus

Rakennuksen vesikattotasolle oleellisia kuormituksia ovat tuulikuorma, rakenteiden omasta painosta ja lumesta johtuvat lisävaakavoimat sekä NR-ristikon yläpaarteen nurjahduksesta aiheutuvat stabiloivat voimat (RIL-248-2013, 2013, s. 21–24). Rakennuksen lisävaakavoimille ei puurakenteiden eurokoodissa ole varsinaista ohjetta. Lisävaakavoimat muodostuvat pystykuormituksesta ja mahdollisesta asennusvinoudesta. Tyypillisesti näitä ei huomioitaisi kuin betoni- ja teräsrakenteissa niiden suuren omapainon takia. Teos RIL-248-2013 kuitenkin suosittelee ottamaan nämä kuormat puurakenteissakin huomioon erityisesti suurissa hallirakennuksissa. Vesikattotason tuulikuorma muodostuu voimakerronmenetelmää käyttämällä kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 22)

$$q_{w,k} = \frac{q_p(h)}{B} (c_f A_{yp} + c_{fr} A_{fr} (1 - \frac{A_{yp}}{A_{fr}})) \quad (8)$$

missä

$q_p(h)$ on tuulen nopeuspaine [kN/m²]

B on rakennuksen leveys [m]

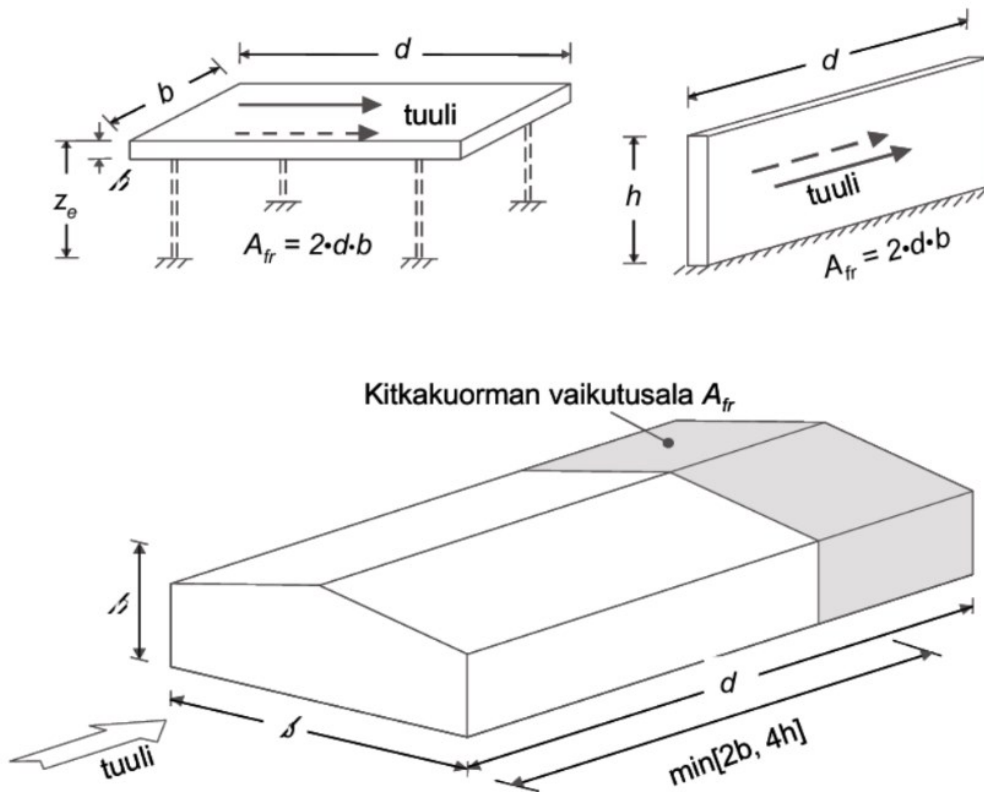
c_f on tuulen voimakerroin

A_{yp} on puolet kattoristikon projektiopinta-alasta [m²]

c_{fr} on tuulen kitkakerroin

A_{fr} on rakennuksen katon pinta-ala [m²]

Vesikattotaso ottaa vastaan vain osan rakennuksen päädylle tulevasta kuormasta. Tuulen kitkakuorma otetaan kokonaan huomioon. Teoksen RIL-201-1-2017 sivulla 170 esitetyn kuvion 9 mukaan kitkakuormaa voitaisiin pienentää rakennuksen pituuden suhteessa. Lyhyissä rakennuksissa ei kitkakuormaa edes kuvan perusteella tarvitse huomioida ollenkaan.



Kuvio 9. Kitkakuorman vaikutusala (RIL-201-1-2017, 2017, s. 170).

Rakennuksen asennusvinoudesta aiheutuville kuormille on oma kaavansa teoksessa RIL-201-1-2017 (RIL-248-2013, 2013, s. 26). Rakennuksen lisävaakavoiman kaava lyhyemmässä suunnassa on muotoa (RIL-201-1-2017, 2017, s. 79).

$$H_{Bk} = \frac{N_k}{150} \quad (9)$$

ja pidemmässä suunnassa

$$H_{Lk} = \frac{B}{L} \frac{N_k}{250} \geq \frac{N_k}{150} \quad (10)$$

missä

N_k on lisävaakavoiman aiheuttaman kuorman ominaisarvo [kN]

B on rakennuksen leveys [m]

L on rakennuksen pituus [m]

Lisävaakavoimien suunta valitaan määräävän vaikutuksen mukaan stabiliteetin suhteen.

4.1.2 Yläpaarteen nurjhdustuenta

NR-rakenteita suunniteltaessa tulee huomioida puristettujen paarteiden nurjhdustuenta (RIL-248-2013, 2013, s. 14). NR-ristikot suunnitellaan jäykäksi rakenteen tason suunnassa, eli NR-ristikko ei nurjahda tasonsa suuntaisesti. Tasoja vastaan kohtisuorassa suunnassa NR-ristikon sauvat tulee tarkistaa nurjahduksen varalta. Yleisesti nurjhdustuettavia sauvoja on yläpaarre, uumasauvat ja esimerkiksi kaksiosaisten ristikoiden vaakaosat. Tyypillisesti NR-suunnittelija määrittää nurjhdustuettavat sauvat ja tukien paikat. Rakennesuunnittelijan on huomioitava kuitenkin yläpaarteen nurjhdustuenta ja siitä syntyvät stabiloivat kuormat.

Paarteiden nurjahduksen aiheuttaa niissä vaikuttava puristava normaalivoima, joka aiheutuu paarteiden päällä olevista pystysuuntaisista kuormista, kuten rakenteen omasta

painosta ja lumikuormasta (RIL-248-2013, 2013, s. 14). Yläpaarten keskimääräinen puristusvoima saadaan NR-suunnitelmista tai voidaan johtaa maksimimomentin kaavasta ristikon keskimääräisellä korkeudella. Puristavan normaalivoiman kaava on (Lahtela, 2020)

$$N_k = \frac{k \cdot g_k \cdot L^2}{8 \cdot a} \quad (11)$$

missä

k on ristikkojako [m]

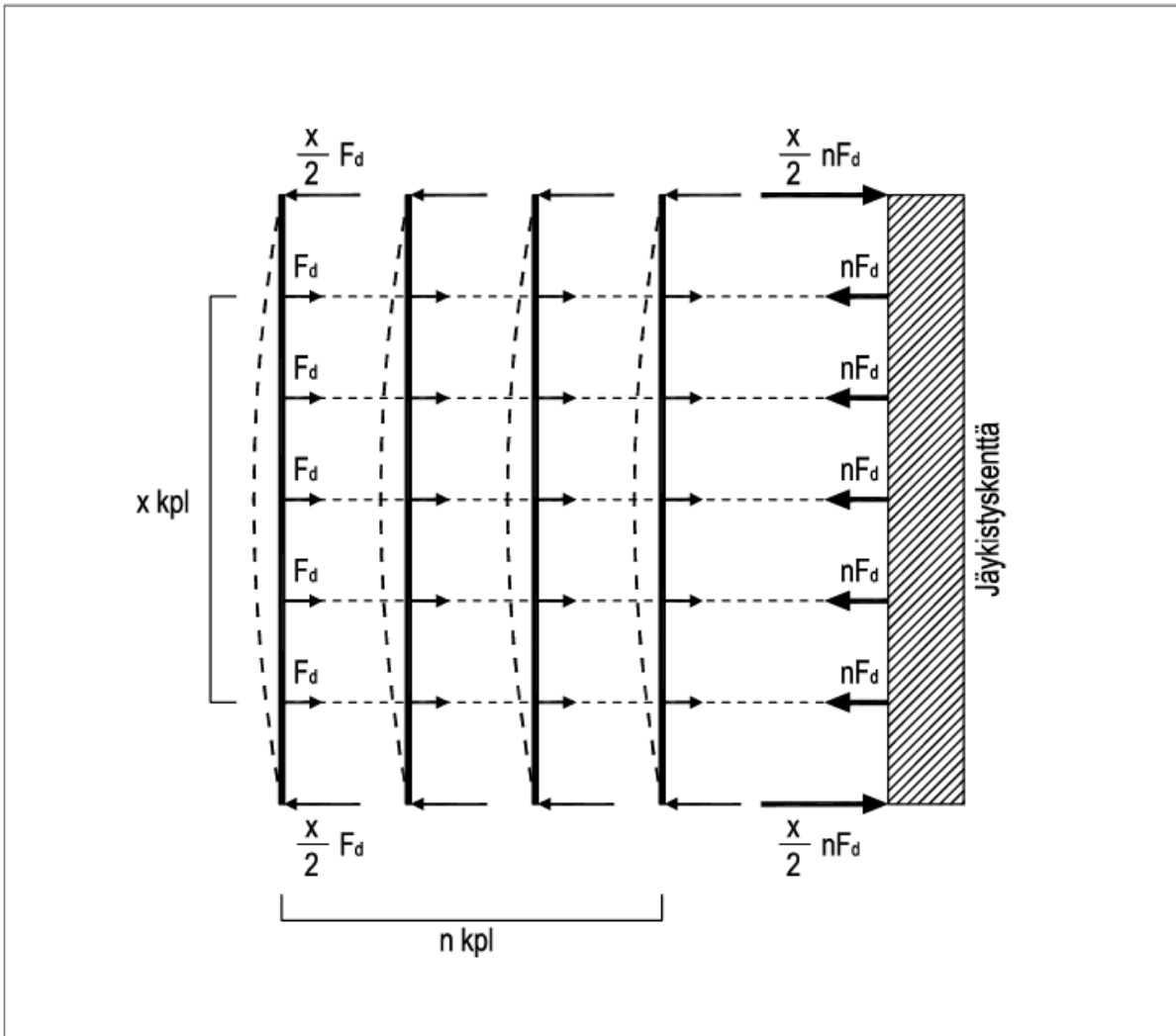
g_k on pystykuorman ominaisarvo [kN/m²]

L on ristikon jänneväli [m]

a on ristikon keskimääräinen korkeus [m]

4.1.3 Nurjahduksen ensimmäinen muoto

Ristikon yläpaarre voi nurjahtaa kahteen muotoon (Lahtela, 2020; RIL-248-2013, 2013, s. 14). Nurjahduksen ensimmäinen muoto tarkoittaa, että paarre taipuu yhteen suuntaan kiinnityspisteidensä välillä, kuten kuvio 10 selventää. Sivuttaistukien kuormitus jakaantuu tasan jäykistysjärjestelmän tukipisteille. Näitä tukipisteille ohjautuvia stabiloivia kuormia ei tarvitse viedä perustuksille asti, jos tukipisteet mitoitetaan toimimiaan molempiin suuntiin. Käytännössä tämä tarkoittaa yleensä lisäruoteiden mitoittamista jäykistysjärjestelmän päihin. Tätä menetelmää kutsutaan suljetuksi jäykistysysteemiksi, kun stabiloivat kuormat pidetään tasossa eikä johdeta eteenpäin.



Kuvio 10. Esimerkki tuentavoimien siirtymisestä suljetussa jäykistyssysteemissä: ensimmäinen muoto, jossa paarteet kaartuvat yhteen suuntaan (RIL-248-2013, 2013, s. 14).

Nurjahduksen ensimmäisestä muodosta aiheutuu jäykistysjärjestelmälle tasainen kuormitus, joka saadaan kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 22)

$$q_k = k_L \frac{nN_k}{50L} \quad (12)$$

missä

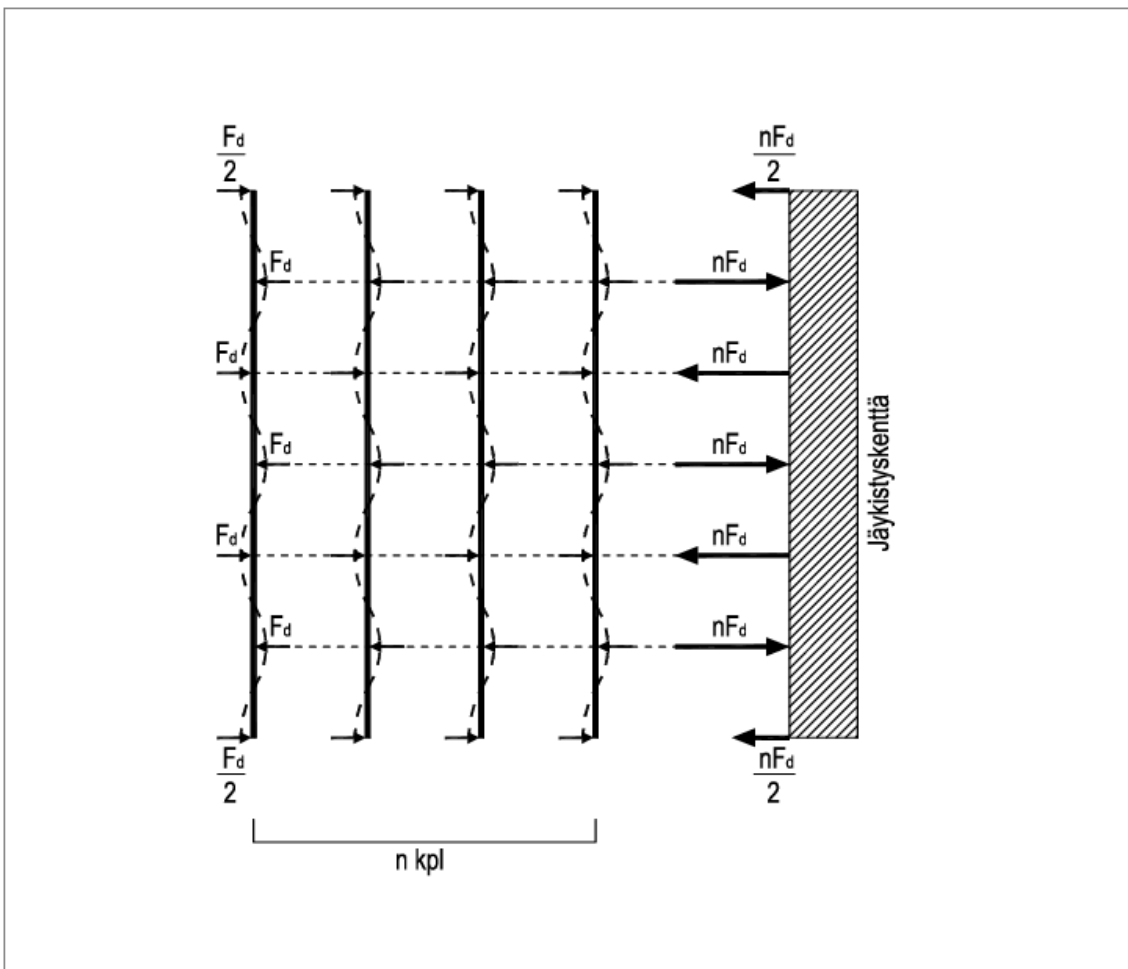
n on ristikkojen lukumäärä jäykistekentässä

k_L on pienennyskerroin, joka huomioi yli 15 metriä pitkien paarteiden erilaiset asennustoleranssit, jotka saadaan kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 22)

$$k_L = \begin{cases} 1 \\ \sqrt{\frac{15}{L}} \end{cases} \quad (13)$$

4.1.4 Nurjahduksen toinen muoto

Nurjahduksen toisessa muodossa, jota myös S-muodoksi kutsutaan, parre pyrkii taipumaan vastakkaisiin suuntiin kuvion 11 mukaan. (RIL-248-2013, 2013, s. 15).



Kuvio 11. Esimerkki tuentavoimien siirtymisestä ns. S-nurjahduksessa (RIL-248-2013, 2013, s. 15).

Jos kattoruoteet eivät toimi puristettuina sekä vedettyinä sauvoina, eivätkä parretason muut rakenteet kuten levytys, peltikate tai tuuletusrima pysty siirtämään tuentapisteiden kuormia viereisille ruoteille, nurjahdusmuoto saattaa muuttua S-muotoon (RIL-248-2013, 2013, s. 15). Tällöin jäykistysjärjestelmän kuormitus tulee tarkistaa myös kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 44)

$$q_k = \frac{nkN_k}{100a} \quad (14)$$

missä

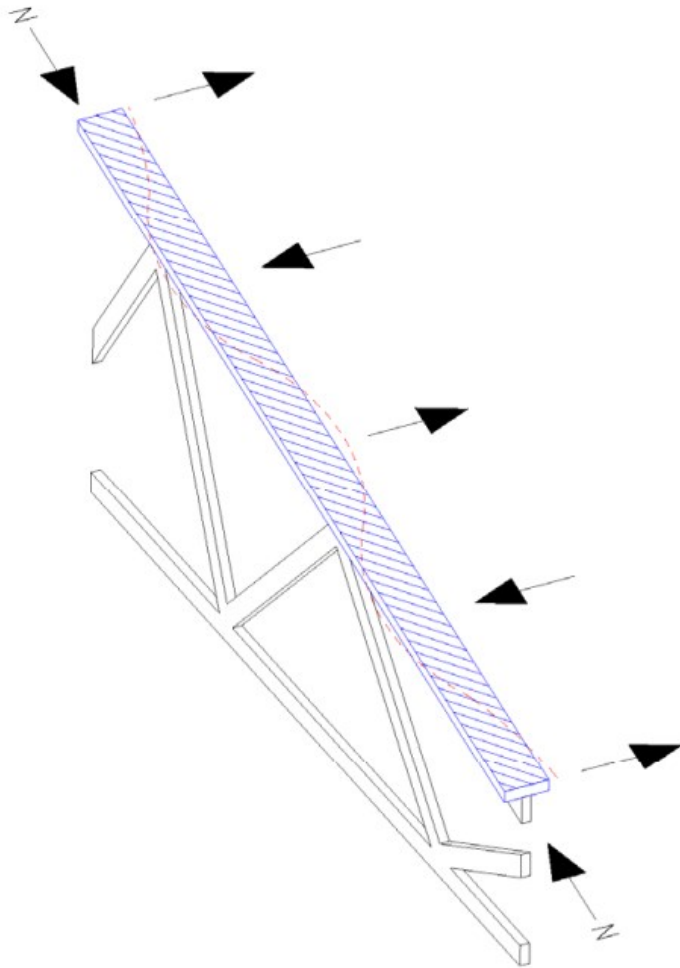
k , ruodevälin a mukainen paarteen nurjahduksen käyttöaste, joka saadaan NR-suunnitelmasta

a , ruodejako [m]

Suuremman kuormituksen antanut stabiloiva kuormitus valitaan määrääväksi.

S-nurjahduksesta aiheutuva kuormitus voi olla mitoittava tietyissä tapauksissa ja vaikuttaa merkittävästi vesikattotason jäykistykseen. Teoksessa RIL-248-2013 mainitaan, että peltikatteen tulisi olla vähintään 45 mm korkealla profiililla ja ainevahvuus oltava vähintään 0,7 mm, jotta peltikatetta voidaan käyttää katon jäykistyksessä. Tästä ei kuitenkaan ole varsinaista mitoitusohjetta, eikä profiilipeltikatteen ominaisuutta siirtää kuormia ole tarkemmin perusteltu. Jos peltikatetta käytetään S-nurjahduksen estämiseen, tulee peltikatteen kiinnitys mitoittaa myöhemmin esitetylle kuormalle $F_{P,d}$.

S-nurjahduksen voisi estää myös tarpeeksi jäykällä tuuletuslankulla, joka estää paarteen nurjahduksen kuvion 12 mukaan (Lahtela, 2020). Tässä menetelmässä lankku mitoitetetaan S-nurjahduksen voimille, jotka käydään läpi tarkemmin ruoteiden mitoituksen yhteydessä. Ideana on, että lankku on tarpeeksi jäykkä kestämään vaakasuuntaiset voimat ja estää S-nurjahduksen ristikkokohtaisesti. Muut rakenteet, kuten ruoteet, siirtävät tuulikuormat ja lisävaakavoimat jäykisteille.



Kuvio 12. S-nurjahduksen estäminen jäykällä tuuletuslankulla (Lahtela, 2020).

4.1.5 Kattoruoteiden mitoitus

Kattoruoteet määräytyvät yleensä vesikattomateriaalin mukaan tietylle k-jaolle (RIL-248-2013, 2013, s. 33). Vesikatteen vaatima ruodejako saattaa olla suurempi tai pienempi kuin NR-suunnitelmassa annettu yläpaarteen nurjahdustukiväli. Tämä tulee huomioida varsinaista ruodejakoa määrittäessä. Tyypillinen ruodekoko peltikatteelle on sahatavaralla 32x100 k300-400. Kiinnitykset yläpaarteeseen tai tuuletusrimaan tapahtuu yleensä naulaamalla. Naulausta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon pääty- ja reunaetäisyydet sekä NR-ristikon rajoitteet naulaukseen. Näitä rajoituksia ja etäisyyksiä löytyy tarkemmin esimerkiksi teoksesta RIL-205-1-2017.

Ruoteiden valintaan vaikuttaa myös se, käytetäänkö niitä siirtämään ja tasaamaan vesikatotason kuormituksia. Tällöin ruoteet tulee mitoittaa asianmukaisesti oikeille kuormituksille

(RIL-248-2013, 2013, s. 51). Ruoteet siirtävät paarteiden nurjahdustuennasta aiheutuvat kuormat, lisävaakavoimista aiheutuvat kuormat ja tuulikuormat päätyjen jäykisteille. Teoksen RIL-248-2013 mukaan hetkellinen aikaluokka ei mitoita ruoteita, vaan ne mitoitetaan keskipitkässä aikaluokassa omasta painosta ja lumesta aiheutuville nurjahduskuormille sekä lisävaakavoimille. Huomiona tästä, että em. teoksessa erikseen mainitaan ruoteiden siirtävän myös tuulikuormia. Jos tuulikuorma otettaisiin mukaan, muuttuisi aikaluokka hetkelliseksi ja muunnoskerroin k_{mod} kasvaisi, mikä tarkoittaisi parempaa laskennallista kestävyttä ruoteille ja ruoteiden liitoksille.

Ruoteiden kestävyystarkastelussa tarkistetaan nurjahduskuormien aiheuttama puristus ja veto sekä pystykuormista aiheutuva momentti. Ruoteet ovat tyypillisesti yli neljä ja puoli metriä pitkiä, joten mitoitukset tarkistetaan kaksi- ja kolmiaukkoisina palkkeina. Vedon ja taivutuksen yhteistarkastelu tehdään suurimman momentin kohdalla, joka on normaalisti tuella. Puristuksen ja taivutuksen yhteistarkastelu suoritetaan taas suurimman aukkomentin kohdalla, koska puristuskestävyys perustuu ruoteen nurjahdukseen, mitä ei tuella pääse tapahtumaan.

Ruoteiden liitokset kattoristikon paarteisiin tulee mitoittaa kuviossa 10 esiintyvälle kuormitukselle $F_{p,d}$ (RIL-248-2013, 2013, s. 51). Kyseinen kuorma on yhden kattoristikon nurjahduksesta aiheutuva tuentavoima, joka saadaan kaavalla (RIL-248-2013, 2013, s. 19)

$$F_{p,d} = k_n \cdot \frac{N_{p,d}}{50} \quad (15)$$

missä

k_n on ristikkosuunnitelmassa käytetyn ruodevälin vastaava paarteen nurjahduksen käyttöaste, joka saadaan ristikkosuunnitelmasta

$N_{p,d}$ on paarteen keskimääräisen puristusvoiman mitoitusarvo [N]

Tämä kuormitus vastaa NR-suunnitelmassa ilmoitettua nurjahdustukiväliä. Todellinen ruodejako voi olla pienempi, joten kuormitusta voidaan vähentää todellisen ruodejaon mukaiseksi näiden mittojen suhteella (Puuinfo, 2010, s. 114).

Ruoteiden alla käytetään tyypillisesti tuuletusrimaa, joten ruoteet eivät ole suoraan kiinni yläpaarteessa (RIL-248-2013, 2013, s. 51). Tällöin tuuletusriman kiinnityksen jako tulee mitoittaa kaavalla (RIL-248-2013, 2013, s. 50)

$$s = \frac{aF_{p,d}}{R_d} \quad (16)$$

missä

a on ruodejako [mm]

R_d on käytettävän naulan leikkauskestävyyden mitoitusarvo [N]

Jos ruoteet mitoitetaan toimimaan molempiin suuntiin, tulee niiden jatkokset ja päätyliitokset mitoittaa edellä esitetylle kuormalle $F_{p,d}$ sekä lisävaakavoimille. Ruoteen jatkosvoiman kaava on muotoa (RIL-248-2013, 2013, s. 51)

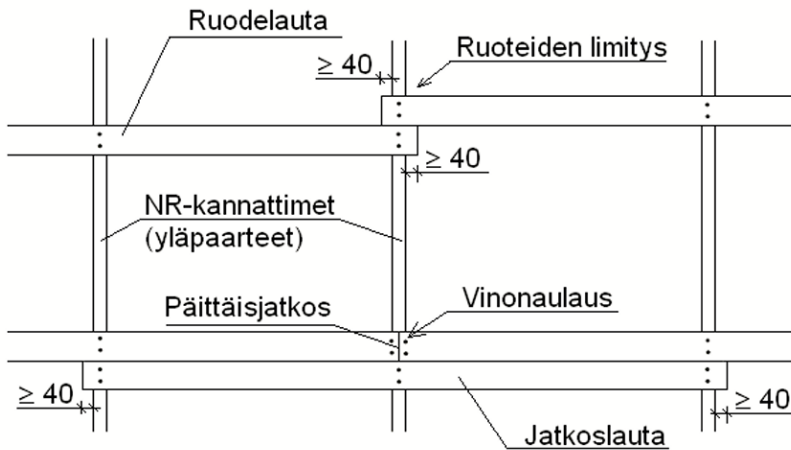
$$F_{n,p,d} + q_{H,d}a = a(q_d + q_{H,d}) \geq F_{p,d} + q_{H,d}a \quad (17)$$

missä

$q_{H,d}$ on lisävaakavoiman mitoitusarvo pituusyksikköä kohden [kN/m]

q_d on nurjahduksen 1. muodon aiheuttaman tuentavoiman mitoitusarvo [kN/m]

Kuviosta 13 selviää tyypillisiä ruoteiden jatkoksia.



Kuvio 13. Ruuteiden limittäminen tai jatkoslaudan käyttö (RIL-248-2013, 2013, s. 35).

Yllä mainitut mitoitusarvot eivät välttämättä ole määrääviä, koska ruuteiden ja peltikatteen kiinnitys tulee mitoittaa vielä tuulen imukuormitukselle (RIL-248-2013, 2013, s. 49). Seuraavaksi määritetään suurin tuulen imukuormitus harjakatolle osapainemenetelmällä sekä mitoitetaan peltikatteen ja ruuteiden kiinnitys kyseiselle imuvoimalle.

Eurokoodi 5:n Suomen kansallisessa liitteessä edellytetään, että jokaisella nurjahdustuella on oltava tietty jäykkyysarvo, jota kutsutaan jousivakioksi (RIL-248-2013, 2013, s. 17). Jäykkyysarvo saadaan kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 17)

$$C \geq \left(2 + 2 \cos \frac{180^\circ}{m}\right) \frac{N_d}{a} \quad (18)$$

missä

a on ruodejako [m]

N_d on paarteen puristusvoiman mitoitusarvo [kN]

m on välein a poikittaistuettujen kenttien lukumäärä (≥ 2)

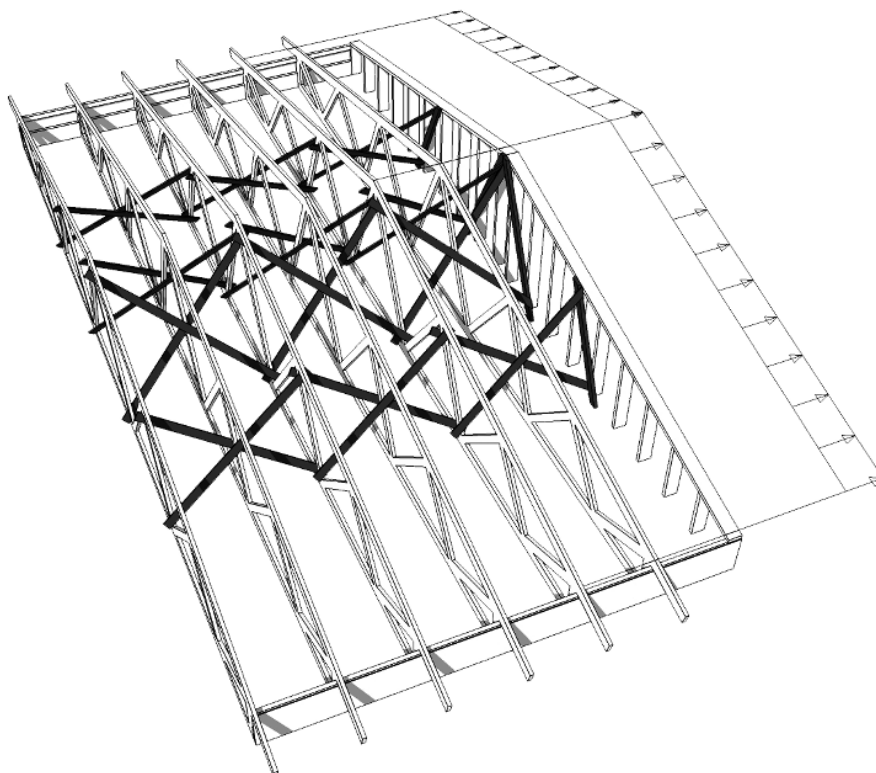
Nurjahdustuen, eli tässä tapauksessa ruuteen jousijäykkyyden, arvo muodostuu tuen liitoksesta, ruuteesta ja tukivoiman aiheuttamista taipumista (RIL-205-1-2017, 2017, s. 171). Tästä esitetään laskelma laskentapohjan läpikäynnin yhteydessä.

4.2 Vesikattotason kuormien johtaminen yläpohjatasolle

Vesikattotason jäykistyksestä aiheutuvat kuormat tulee johtaa erillisillä pystysuuntaisilla jäykistysrakenteilla yläpohjatason jäykistekenttään (RIL-248-2013, 2013, s. 26). Siirrettäviä kuormia ovat tuulikuormat ja lisävaakavoimat. Stabiiloiva kuormitus, eli yläpaarteiden nurjahdustuennasta syntyvä kuormitus, pidetään yleensä vesikattotasossa, kuten luvun 4.1.3 alussa on mainittu. Kuormien siirtämisessä käytettäviä yleisiä menetelmiä ovat pystysuuntaiset NR-pukit ja erilaiset pystysuuntaiset vinolaudoitukset.

NR-pukkeja käytetään NR-jäykisteristikkojen yhteydessä, ja ne asennetaan yleensä jäykisteristikon päihin, jolloin pukin kuormitus on yhtä suuri kuin jäykisteristikon tukireaktio (RIL-248-2013, 2013, s. 27, 54). NR-pukkien vaakasuuntaiset voimat aiheuttavat pystysuuntaista kuormitusta pukin dimensioiden suhteessa, mikä tulee huomioida kattoristikoita suunniteltaessa. Kuormituksen ollessa suuri voidaan pystykuormitus ottaa vastaan erillisellä kattoristikolla. NR-pukit suunnitteleva NR-suunnittelija mitoittaa pukit rakennesuunnittelijan antamilla mitoilla ja kuormituksilla. Rakennesuunnittelijan tehtäväksi jää mitoittaa pukkien kiinnitys. Pukkien kiinnitys mitoitetaan pystysuuntaiselle kuormitukselle, joka saadaan pukin vaakasuuntaisesta voimasta kertomalla se pukin korkeuden ja leveyden suhteella.

Pystysuuntaisia vinolaudoituksia voidaan käyttää vesikattotason kuormien siirtämiseen yläpohjatasolle (Puuinfo, 2010 s. 120–122). Pystysuuntaisia vinolaudoituksia käytetään yleisimmin vesikattotason vinolaudoitusten yhteydessä. Vesikattotason kuormitus jaetaan vinolaudoituksille niiden kappalemäärän mukaan. Vinolautojen asennus tapahtuu tyypillisesti kuvion 14 mukaisella tavalla. Kuvion 14 poiketen vinolautaparien päiden välille asennetaan vielä vaakasuuntaiset laudat tasaamaan kuormia vinolautojen välillä. Vinolaudoituksen mitoituksessa huomioidaan lautojen puristuskestävyys sekä liittimien leikkauskestävyys.



Kuvio 14. Ristikkoyläpohjan jäykistys vinolaudoituksella (RIL-248-2013, 2013, s. 73).

4.3 Yläpohjatasen jäykistys

Yläpohjatasen jäykistyksen tehtävänä on ottaa vastaan ulkoiset kuormitukset sekä vesikattotason jäykistyksestä aiheutuvat voimat ja siirtää ne turvallisesti rakennuksen jäykistäville seinille (Gyproc, 2021, s. 454; RIL-248-2013, 2013, s. 61). Yläpohjataso jäykistetään toimimaan jäykkänä tasorakenteena, jolloin ulkoiset kuormat siirtyvät seinille. Vesikattotason kuormat tuodaan yläpohjatasolle kohdan 4.2 mukaisesti. Muut yläpohjatasossa vaikuttavat kuormitukset ovat tuulikuorma ja lisävaakavoimat. Muita kuormituksia voisi olla esimerkiksi vaakasuuntainen hyötykuorma ja nosturin aiheuttamat dynaamiset vaakavoimat. Rakennuksen yläpohjatasen jäykistys tarkistetaan yleensä vain kahdelle tuulen suunnalle, päädyn ja sivun suunnalle. Päädyn suunnassa rakennuksen tuulen vastainen projektiopinta-ala on usein suurempi kuin sivun suunnassa, mutta tällöin ei vesikattotason jäykistyskuormia tarvitse huomioida.

Yläpohjatasen kuormitukset lasketaan lisävaakavoimien osalta samoin kuin kohdassa 4.1.1 määritetty. Yläpohjatasen tuulikuorma pituusyksikköä kohti muodostuu sivun suunnassa kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 61)

$$q_{w.L.k} = q_p(h)c_f\left(\frac{h_2+h_3}{4} + \frac{h_1}{2}\right) \quad (19)$$

missä

$q_p(h)$ on tuulen nopeuspaine [kN/m²]

c_f on tuulen voimakerroin

h_1 on seinän korkeus [m]

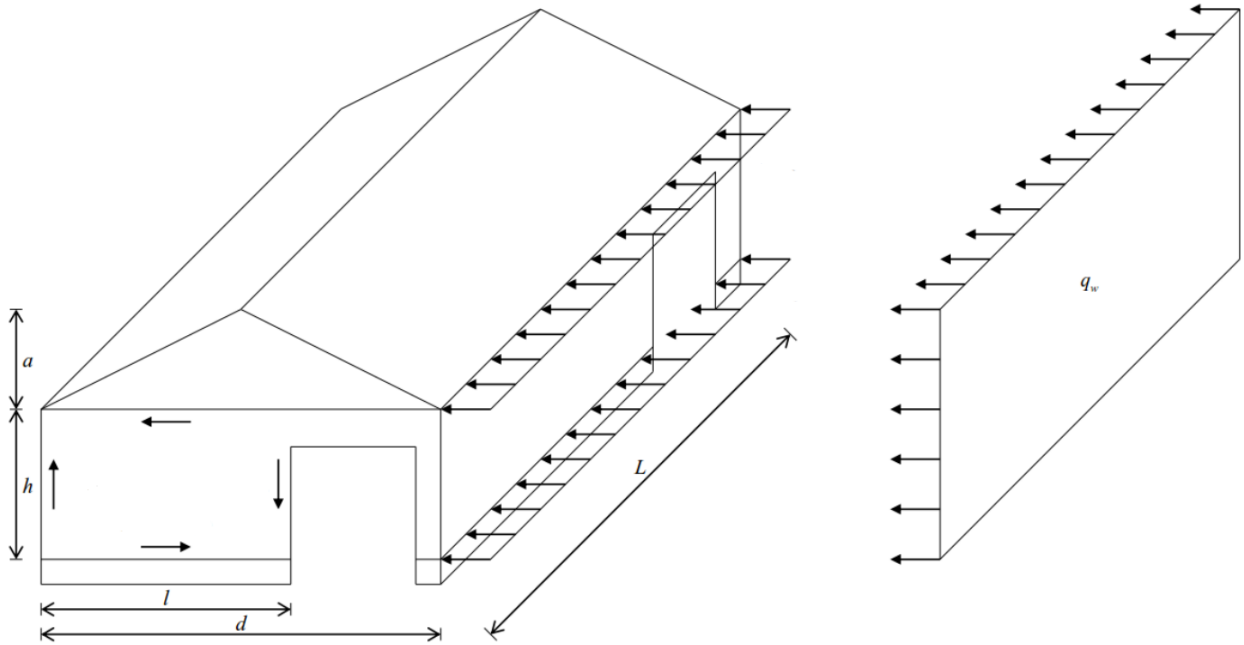
h_2 on kattoristikon harjakorkeus [m]

h_3 on kattoristikon tukikorkeus [m]

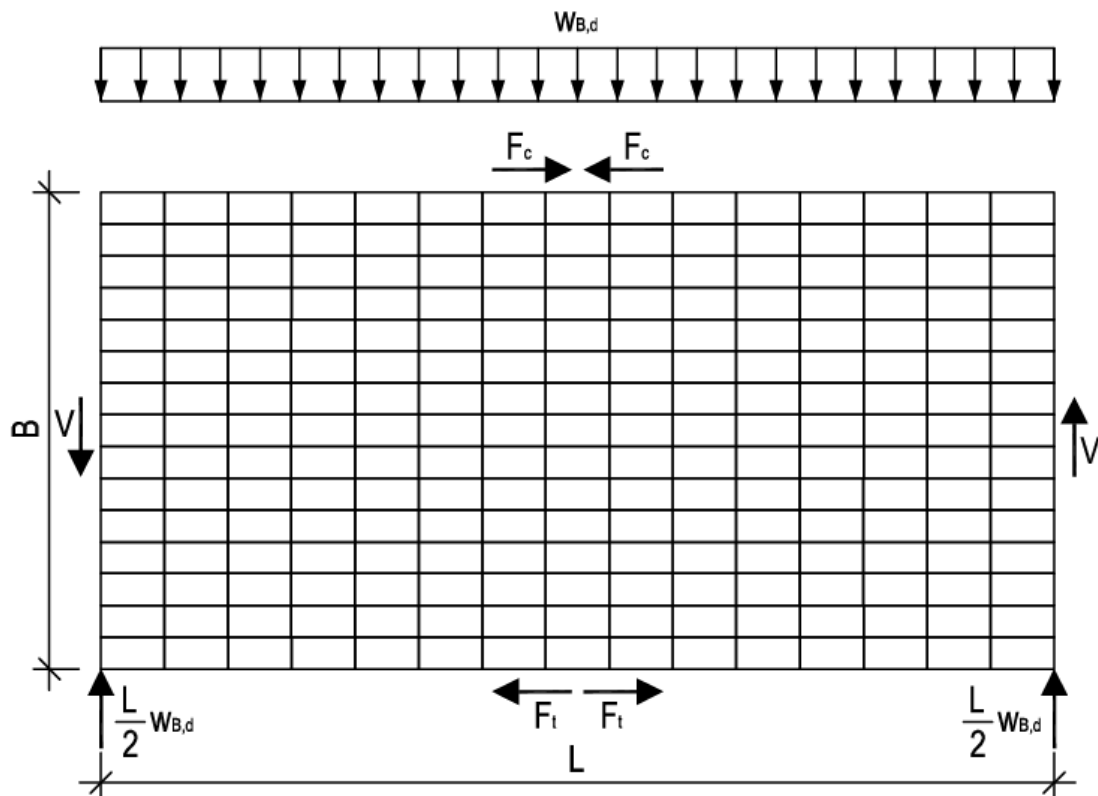
ja päädyn suunnassa kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 61)

$$q_{w.B.k} = q_p(h)c_f\left(h_2 + \frac{h_1}{2}\right) \quad (20)$$

Sivun suuntaiseen jäykistyskuormaan lisätään vielä vesikattotason jäykistyksestä aiheutuvat voimat riippuen siitä, miten jäykistys on suunniteltu toimivaksi. Tyypillisesti ne huomioidaan pistekuormana tuennan varsinaisessa kohdassa. Kuviossa 15 näkyy tuulikuormien jakaantuminen hallirakennukselle päädyn suunnassa. Puolet tuulikuormasta jakaantuu siis suoraa seinän ja perustuksen liitokselle. Kuvioista 16 selviää kuormien jakaantuminen yläpohjakentässä.



Kuvio 15. Kuormien jakaantuminen puurunkoisissa symmetrisissä halleissa (Gyproc, 2021, s. 454).



Kuvio 16. Kuormien jakaantuminen levykentässä (RIL-248-2013, 2013, s. 62).

4.3.1 Vinolaudoitus yläpohjatasolla

Rakennuksen yläpohjataso voidaan jäykistää alapaarteeseen kiinnitettävillä vinolaudoilla (Puuinfo, 2010, s.120–122). Laudoitus mitoitetaan toimimaan vedettynä ja puristettuna rakenteena. Tästä johtuen mitoitukset tehdään vain puristuksen suhteen, koska laudan vetolujuus on suurempi kuin puristuslujuus nurjahduksessa. Mitoitus tapahtuu leikkaavalle voimalle V_d , joka saadaan päädyn suunnassa yksiaukkoisen palkin kaavasta (Puuinfo, 2010, s. 120)

$$V_d = \frac{q_d L}{2} \quad (21)$$

missä

q_d on yläpohjatason mitoituskuorma, joka sisältää tuulen ja lisävaakavoimien vaikutuksen ja mahdolliset vesikattotason johdetut kuormat [kN/m]

L on tuulen vastaisen sivun pituus [m]

Tyypillinen asennustapa on asentaa vinolaudoitus alapaarteeseen 45 asteen kulmassa harjan suhteen symmetrisesti. Vinolaudoituksen puristuskestävyys perustuu tässä tapauksessa laudan nurjahdukseen ristikkoväleissä. Laudan nurjahduskestävyys määritetään ja muutetaan vastaamaan yllä määritettyä mitoittavaa leikkausvoimaa kosinilauseetta hyödyntämällä. Kaava on muotoa (Puuinfo, 2010, s. 122)

$$V_{Rd} = N_{Rd} \cos \alpha \quad (22)$$

missä

V_{Rd} on laudan kestävyys nurjahduskestävyyden perusteella [kN]

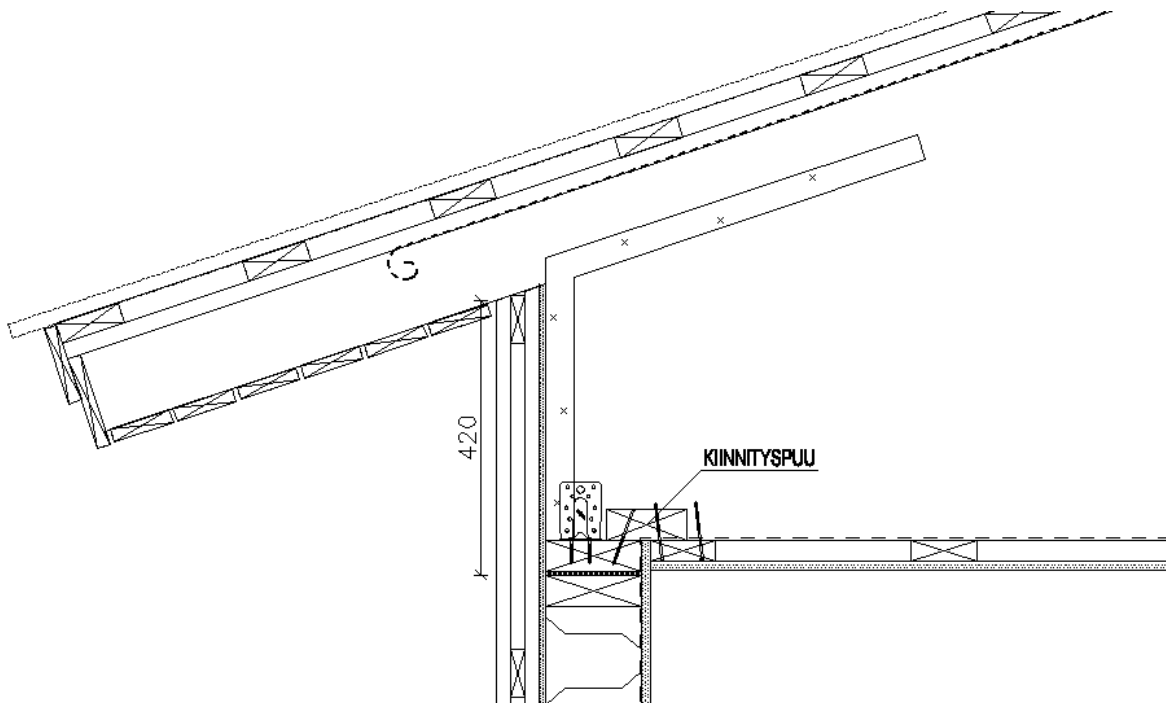
N_{Rd} on laudan nurjahduskestävyys [kN]

α on vinolautojen asennuskulma [°]

Vinolautojen naulaukset mitoitetaan voimalle V_d . Lautojen jatkokset ja päätyliitokset tulee mitoittaa voimalle N_d , joka saadaan myös kosinilauseen avulla voimasta V_d . Lautojen päät tulee ankkuroida asianmukaisesti, jotta levykentän kuormat siirtyvät seinille.

4.3.2 Levyjäykistys yläpohjatasolla

Yläpohjataso voidaan jäykistää erilaisia rakennuslevyjä, kuten kipsi-, vaneri- ja puukuitulevyjä, käyttäen (RIL-205-1-2017, 2017, s. 154). Levytys asennetaan alapaarteen alapinnan koolauspuihin. Levyt voidaan asentaa harjan suuntaisesti tai harjan suunnan vastaisesti. Rakennuslevyillä jäykistäessä tulee kuormat saattaa seinille tarvittaessa erillisillä kiinnityspuilla (RIL-248-2013, 2013, s. 30). Kuviossa 17 on esitetty yksi vaihtoehto levykentän kuormien siirtämiseen. Vähäisillä kuormituksilla kattoristikot ja niiden kiinnitykset voivat siirtää levykentän kuormat suoraa seinälle. NR-rakenteisessa yläpohjassa päädyille vaaditaan lähes aina erillinen kiinnityspuu, jonka naulaus mitoitetaan voimalle V_d .



Kuvio 17. Esimerkki kuormia siirtävästä kiinnityspuusta sivuräystäällä.

Teos RIL-205-1-2017 antaa levyjäykistykseen kaksi erilaista mitoitusmenetelmää, yksinkertaistetun analyysin ja levyjäykistykseen yleisen mitoitusmenetelmän (RIL-205-1-2017, 2017, s. 154, 159). Yksinkertaistetulla menetelmällä määritetään yksittäisen levyn vaakaleikkausvoimakestävyys liittimen leikkauskestävyyden, liitinjon ja levyn mittojen suhteiden

avulla. Yksittäisen levyn vaakaleikkausvoimakestävyys saadaan kaavasta (RIL-205-1-2017, 2017, s. 157)

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} b_i c_i}{s} \quad (23)$$

missä

$F_{f,Rd}$ on yksittäisen liittimen leikkausvoimakestävyuden mitoitusarvo [N]

b_i on levyn leveys [mm]

s on liitinjako [mm]

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{kun } b_i \geq \frac{h}{2} \\ \frac{2b_i}{h}, & \text{kun } b_i < \frac{h}{2} \end{cases}$$

RIL-205-1-2017 yksinkertaistettua menetelmää käyttäessä tulee kuitenkin huomioida sen soveltamisen rajoitteet. Esimerkiksi kuorman tulee olla tasan jakautunutta, jolloin levykentän analysointi ei onnistu rakennuksen sivun suunnassa, koska vesikatolta tuodaan pisteittäisiä kuormia yläpohjan levykentälle. Myös levykentän jännevälin L tulee olla välillä $2B \leq L \leq 6B$, missä B on levykentän leveys ja h on levyn korkeus. Rakennuksen sivun suuntaisia kuormituksia voidaan kuitenkin tarkastella pelkästään yläpohjatason nähden, jolloin tuulikuorman huomioidaan koko ristikon projektiopinta-ala sekä puolet seinän korkeudesta. Tällöin oletetaan koko ristikkoyläpohjan olevan jäykkä ja saadaan tasainen kuorma yläpohjatasolle.

Levyjäykistyksen yleisellä mitoitusmenetelmällä mitoitus perustuu liittimien kiinnitystapa-kertoimiin, liittimien liitossiirtymiin ja levyn jäykkyyserktoimiin (RIL-205-1-2017, 2017, s. 154). Yksittäisen levyn jäykkyyserroin saadaan kaavasta (RIL-205-1-2017, 2017, s. 159)

$$C_{iv} = \frac{1}{\beta_i \frac{s_i h_i^2}{K_{ser,i} b_i^3} + \frac{h_i}{b_i G_{mean,i} t_i}} \quad (24)$$

missä

β_i on levyn kiinnitystapakerroin, taulukkoarvo RIL-205-1-2017 s. 161

s_i on liitinjako [mm]

h_i on levyn korkeus [mm]

b_i on levyn leveys [mm]

t_i on levyn paksuus [mm]

$G_{mean,i}$ on levyn liukumoduuli paneelileikkauksessa [N/mm²]

$K_{ser,i}$ on liittimen siirtymäkerroin [N/mm]

Yksittäisen levyn vaakavoima jakaantuu levyjen jäykkyyksien suhteen, joten yksittäisen levyn vaakavoima saadaan kaavasta (RIL-205-1-2017, 2017, s. 160)

$$F_{i,v,Ed} = \left(\frac{C_{i,v}}{\sum C_{i,v}} \right) F_{v,Ed} \quad (25)$$

missä

$F_{v,Ed}$ on levyjonoa kuormittava vaakavoima [kN]

$C_{i,v}$ on yksittäisen levyn jäykkyyserroin

$\sum C_{i,v}$ on levyjonossa olevien levyjen jäykkyyserroimien summa

Vastaava yksittäisen levyn leikkauskestävyys muodostetaan kaavasta (RIL-205-1-2017, 2017, s. 160)

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} b_i}{\gamma_i s_i} \quad (26)$$

missä

$F_{f,Rd}$ on yksittäisen liittimen leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo [N]

b_i on levyn leveys [mm]

s_i on liitinjako [mm]

γ_i on levyn kiinnitystapakerroin, taulukkoarvo RIL-205-1-2017 s.161

Molemmissa menetelmissä levyn lommahdus tulee ottaa huomioon, jos ehto $b_{net}/t \leq 100$ ei täyty (RIL-205-1-2017, 2017, s. 154). Kaavassa b_{net} on tolppien välinen vapaa väli ja t on levyn paksuus. Tämä ehto ei kuitenkaan tule usein määrääväksi tyypillisimmillä runkojaoilla. Esimerkiksi runkoväli yhdeksän millimetrin levyllä ja 48 mm runkopuulla tulisi olla yli 900 mm, jotta ehto ei täyty.

Levyjäykistys voidaan toteuttaa myös lineaariseen kimmoteoriaan perustuvalla laskentamenetelmällä (Leskelä, 2005, s. 20–21). Tässä laskentatavassa levyjen oletetaan toimivan leikkauksessa lineaarisen kimmoisesti ja runkopuut ovat jäykkiä sekä nivelellisesti kiinnitetty päistään. Liitinvälin tulee olla tasainen ja liittimien oletetaan toimivan lineaarisen kimmteisesti ennen leikkausmurtumista. Menetelmässä levyjen oletetaan toimivan levyuumaisena palkkina siirtäen levykentän kuormitukset seinille tai jäykistävien seinien tapauksessa perustuksille.

Lineaarisen kimmoteorian mukaisessa menetelmässä lasketaan yhden liittimen leikkausvoima käyttäen kiinnitystapakertoimia. Nämä kiinnitystapakertoimet eivät kuitenkaan ole samat kuin teoksen RIL-205-1-2017 menetelmissä. Liittimen leikkausvoiman kaavan kiinnitystapakerroin α saadaan kaavasta (Leskelä, 2005, s. 25)

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{x_{max}}{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right)^2 + \left(\frac{y_{max}}{\sum_{i=1}^n y_i^2}\right)^2} \quad (27)$$

missä

x_{max} on yksittäisen ruuvin x -koordinaatti ($B / 2$) levyn nurkassa

y_{max} on yksittäisen ruuvin y -koordinaatti ($H / 2$) levyn nurkassa

$\sum_{i=1}^n x_i^2$ on n kpl ruuvien x -koordinaattien neliöiden summa

$\sum_{i=1}^n y_i^2$ on n kpl ruuvien y -koordinaattien neliöiden summa

Kyseiselle kertoimelle on valmis laskuri Laskentapalvelut.fi sivustolla.

Yksittäisen liittimen leikkausvoima ylä- ja välipohjan tapauksessa saadaan kaavasta (Leskelä, 2005, s. 31)

$$F_{vd} = \frac{\alpha H L w_d}{2n} \quad (28)$$

missä

α on yllä määritetty kiinnitystapakerroin [-/mm²]

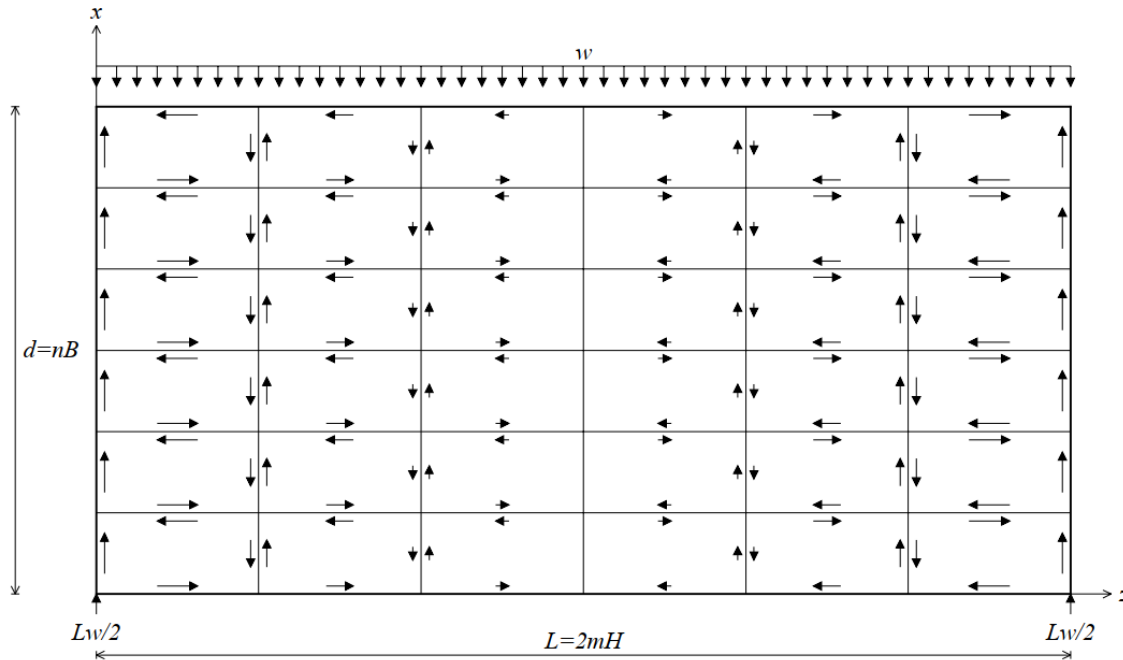
H on levyn korkeus [mm]

L on levykentän leveys [mm]

w_d on levykentän mitoituskuorma pituusyksikölle [kN/m]

n on levyjen määrä kuormituksen suunnassa

Levyn asennussuunnasta riippuen kaavassa vaihdetaan levyn korkeus H levyn leveyteen B . Kuviosta 18 näkyy levyjen asettelu sekä leikkauskuormituksen jakaantuminen kentän eri levyille.



Kuvio 18. Leikkausvoimien jakaantuminen ylä- tai välipohjissa (Leskelä, 2005, s. 31).

Teoksen RIL-205-1-2017 antamilla yksinkertaistetulla sekä yleisellä mitoitusmenetelmällä voidaan mitoittaa vain puulevyjä (RIL-205-1-2017, 2017, s. 154). Teoksessa mainitaan, että huokoisia kuitulevyjä tai muita kuin puulevyjä käyttäessä tulee mitoitus tehdä kyseisen levyn valmistajan tyyppihyväksytyn ohjeen mukaan. Lineaarisen kimmoteorian menetelmä toimii levytyypistä riippumatta, koska se perustuu liittimien leikkauskestävyyteen ja erilaisiin ruuvauskaavioihin eikä nojaudu leikkauskestävyyden määrittämisessä levyn ominaisuuksiin.

Yläpohjan jäykistystavasta riippumatta yläpohjakentän vetopaarre ja sen jatkoksien kestävyys tulee mitoittaa (RIL-248-2013, 2013, s. 64–65; Leskelä, 2005, s. 42). Vetopaarteena toimii yleensä seinän yläjuoksu tai elementtirakenteisissa halleissa yläsidepuu. Vetopaarteen normaalivoima lasketaan kaavasta (Leskelä, 2005, s. 42)

$$N_{td} = \frac{L^2 w_d}{8d} \quad (29)$$

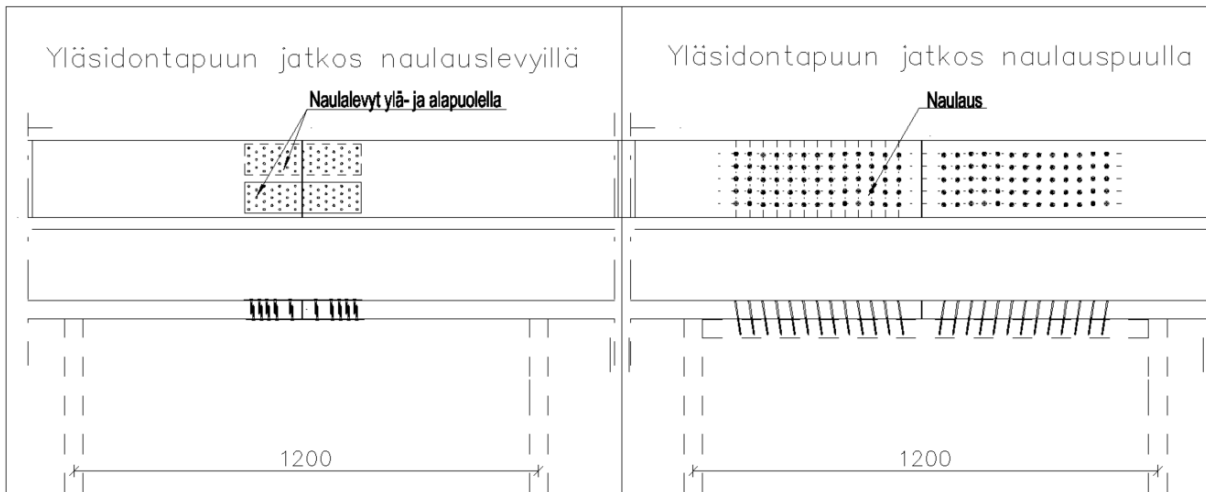
missä

L on yläpohjakentän leveys [m]

w_d on yläpohjatasen mitoituskuorma [kN/m²]

d on yläpohjakentän pituus [m]

Vetopaarteen mitoitus vedolle tehdään em. kuormalle, kuten myös liitoksen mitoitus. Kuviossa 19 on kaksi tapaa toteuttaa vetopaarteen jatkos.



Kuvio 19. Mahdollisia tapoja vetopaarteen jatkoksen toteuttamiseen.

4.4 Seinien jäykistys

Rakennuksen seinät tulee jäykistää siten, että ne siirtävät yläpohjatasolta tulevat kuormat hallitusti perustuksille (RIL-205-1-2017, 2017, s. 156; Gyproc, 2021, s. 454). Yläpohjan vaakasuuntainen kuorma jakaantuu jäykistäville seinille niiden sijaintien mukaan. Tavallisesti suorakaiteen muotoisissa rakennuksissa seinän yläpään mitoituskuorma muodostuu kaavasta (Gyproc, 2021, s. 454)

$$F_d = \frac{Lw_d}{2} \quad (30)$$

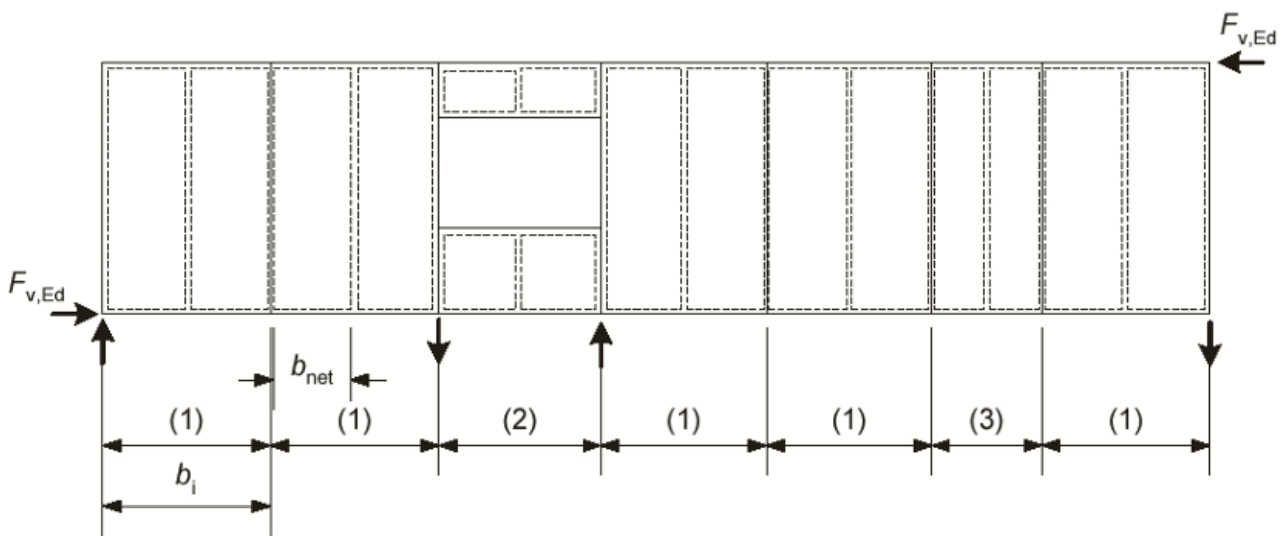
missä

L on tuulta kohtisuoraa olevan sivun pituus [m]

w_d on yläpohjatasen mitoituskuorma [kN/m]

Jos rakennuksessa on ulkoseinien lisäksi muitakin jäykistäviä seiniä, tulee kuormitus jakaa seinien sijaintien suhteen. Tässä tapauksessa yläpohjan on oletettava toimivan notkeana tasossaan.

Jäykistysseinän kuormitukset on esitetty kuviossa 20. Seinän yläpään yläpohjalta kohdistuva pistekuorma aiheuttaa seinän alareunaan kyseisen suuruisen vastakkaissuuntaisen voiman (RIL-205-1-2017, 2017, s. 158). Jäykistysseinä tulee ankkuroida alareunaan perustuksiin vaakavoimalle F_d . Seinän yläreunan pistekuorma aiheuttaa myös nostetta jäykistävien seinälohkojen reunimmaisiin runkotolppiin. Jäykistävät seinälohkot tulee ankkuroida reunimmaisista runkotolpistaan vaakavoimasta aiheutuvalla nosteella.



Kuvio 20. Kuormien jakaantuminen jäykistävällä seinällä (RIL-205-1-2017, 2017, s.158).

Tyypillisimpiä seinien jäykistystapoja on levyjäykistys ja vinolautajäykistys. Työssä käydään vielä näiden lisäksi läpi seinien jäykistys NR-pukkeja käyttämällä.

Jäykistystavasta riippumatta seinän alajuoksun kiinnitys vaakasuuntaista leikkausvoimaa F_d vastaan mitoitetaan samalla tavalla (RIL-248-2013, 2013, s. 66; Leskelä, 2005, s. 70). Alajuoksu voidaan kiinnittää perustuksiin esimerkiksi harjaterästartunnoilla, kemiallisesti injektoidavilla kierretangoilla tai kiila-ankkureilla. Käytettävän kiinnikkeen jakoväli saadaan kaavasta

$$s_{max} = \frac{R_d \cdot L_s}{F_d} \quad (31)$$

missä

R_d on käytettävän liittimen mitoitusleikkauskestävyys [N]

L_s on jäykistettävän seinän alajuoksun mitta (kts. kuvio 19) [mm]

Seinien jäykistyksessä voidaan hyödyntää kaikkia luvussa 4.3 määritettyjä levyjäykistysmenetelmiä (RIL-205-1-2017, 2017, s. 156, 159; Leskelä, 2005, s. 20, 21). Yhteistä näillä menetelmillä on vaatimus, että seinä tulee olla riittävästi ankkuroitu perustuksiin. Tyypillisesti seinien levyjäykistyksessä ei kestävyudessa huomioida aukollisia seinälohkoja. Näiden aukollisten lohkojen kuitenkin oletetaan siirtävän seinän kuormitukset seuraavalle jäykistävälle lohkolle. Kuviossa 20 lohko (2) ei lisää kyseisen seinän jäykistyskestävyyttä. Joissain tapauksissa voidaan aukollisetkin seinälohkot huomioida, jos ikkunan yllä tai alla on täysi levy. Tämä kuitenkin muuttaa jäykistystarkastelun luonnetta huomattavasti, eikä sen laskentaan ole suoraa ohjetta yleisesti saatavilla.

Lineaarisen kimmoteorian menetelmä seinien jäykistyksessä poikkeaa hieman yläpohjatason jäykistyslaskennasta (Leskelä, 2005, s. 43). Seinien jäykistyksessä yhden liittimen leikkausvoima saadaan kaavasta

$$F_{vd} = \frac{\alpha H F_d}{n} \quad (32)$$

missä

α on kiinnitystapakerroin [-/mm²]

H on levyn korkeus [mm]

F_d on seinän mitoituskuorma [kN]

n on levyjen määrä kuormituksen suunnassa

Levyjäykistetyssä seinässä voidaan hyödyntää rungon molemminpuolista levytystä (RIL-205-1-2017, 2017, s. 158). Molemminpuolisen levytyksen huomioimisessa on kolme eri vaihtoehtoa. Jos molemmat levyt ja niiden liittimet ovat samanlaiset ja -mittaiset, voidaan seinän vaakaleikkausvoimakkestävyys laskea näiden levytyksien summana. Jos levyt ovat erilaisia, mutta levyjen liittimien siirtymäkerroin K_{ser} on sama, lasketaan heikomman levytyksen kestävydestä 75 % mukaan koko kestävyuteen. Viimeisenä vaihtoehtona on, että levyt ja liittimet ovat erilaiset, jolloin heikomman levyn kestävydestä voidaan ottaa huomioon vain 50 %.

Lineaarisen kimmoteorian menetelmässä voidaan käyttää myös edellä mainittua siirtymäkertoimesta riippuvaa kerrointa. Tarkempi tapa kuitenkin on jakaa vaakaleikkauskuorma ulko- ja sisäpuolisille levyille niiden liittimien siirtymäkertoimien suhteessa.

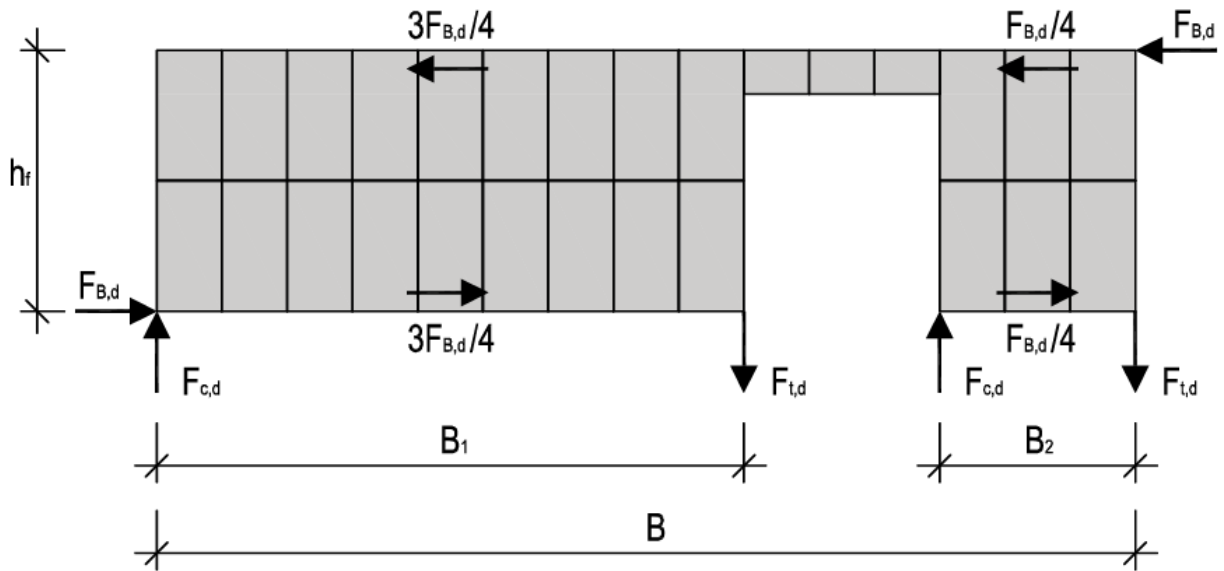
Levyjäykisteitä käyttämällä seinät tulee ankkuroida nostevoimalle jokaisen jäykistävän seinälohkon reunimmaisista runkotolpista (RIL-248-2013, 2013, s. 66, 69; Leskelä, 2005, s. 70). Ankkuroitava voima saadaan kaavasta (RIL-248-2013, 2013, s. 69)

$$F_{td} = \frac{F_d}{L_s} h_f \quad (33)$$

missä

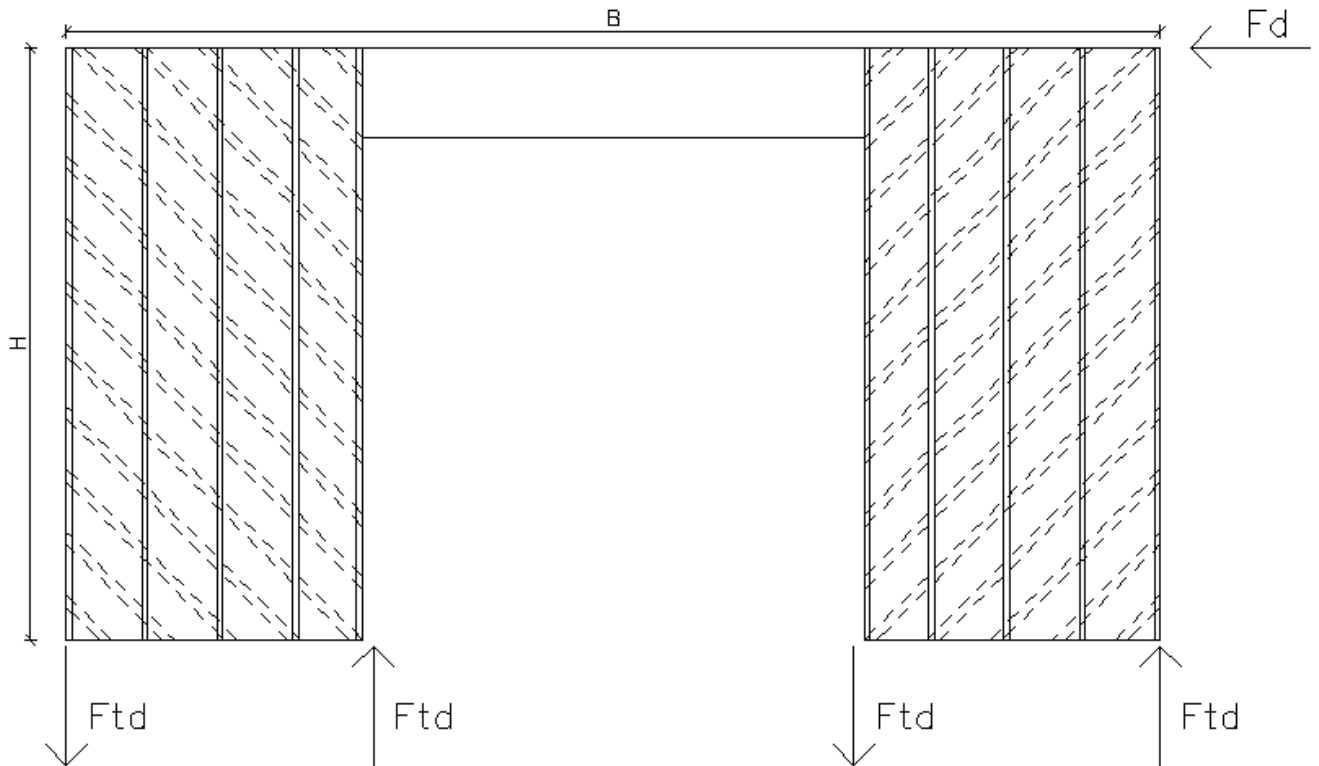
h_f on seinän korkeus [mm]

Kuviosta 21 selviää jäykistelohkot B_1 ja B_2 kyseisen seinän tapauksessa. Seinän perustuksiin liittyvää alajuoksua eli mittaa L_s on siis tässä tapauksessa $B_1 + B_2$. Seinien ankkurointi nosteelle toteutetaan esimerkiksi perustuksiin injektoiduilla kierretangoilla sekä tarkoitukseen sopivilla kiskoankkureilla.



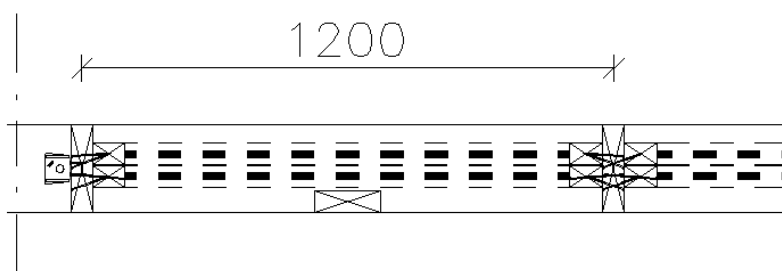
Kuvio 21. Seinän levyjäykistys (RIL-248-2013, 2013, s. 66).

Seinien lautajäykistys toteutetaan samalla tavalla kuin yläpohjataso vinolautajäykistys. Kuviossa 22 on esitetty yksi tapa jäykistää rakennuksen nosto-ovellinen päätyseinä kahdeksi eri jäykisteloheksi. Seinien vinolaudoituksen mitoitus toteutetaan edellä määritetyllä kuormalla F_d . Kuvan tapauksessa oletetaan, että nosto-oven yllä oleva osa siirtää kuormia jäykisteloheiden välillä. Laudoituksen mitoituskulku on selitetty luvussa 4.3.1. Vinolaudoituksen ankkurointi nostevoimalle toteutetaan kuten levyjäykistyksessä, eli ankkuroinnit asennetaan jäykisteloheiden päihin.

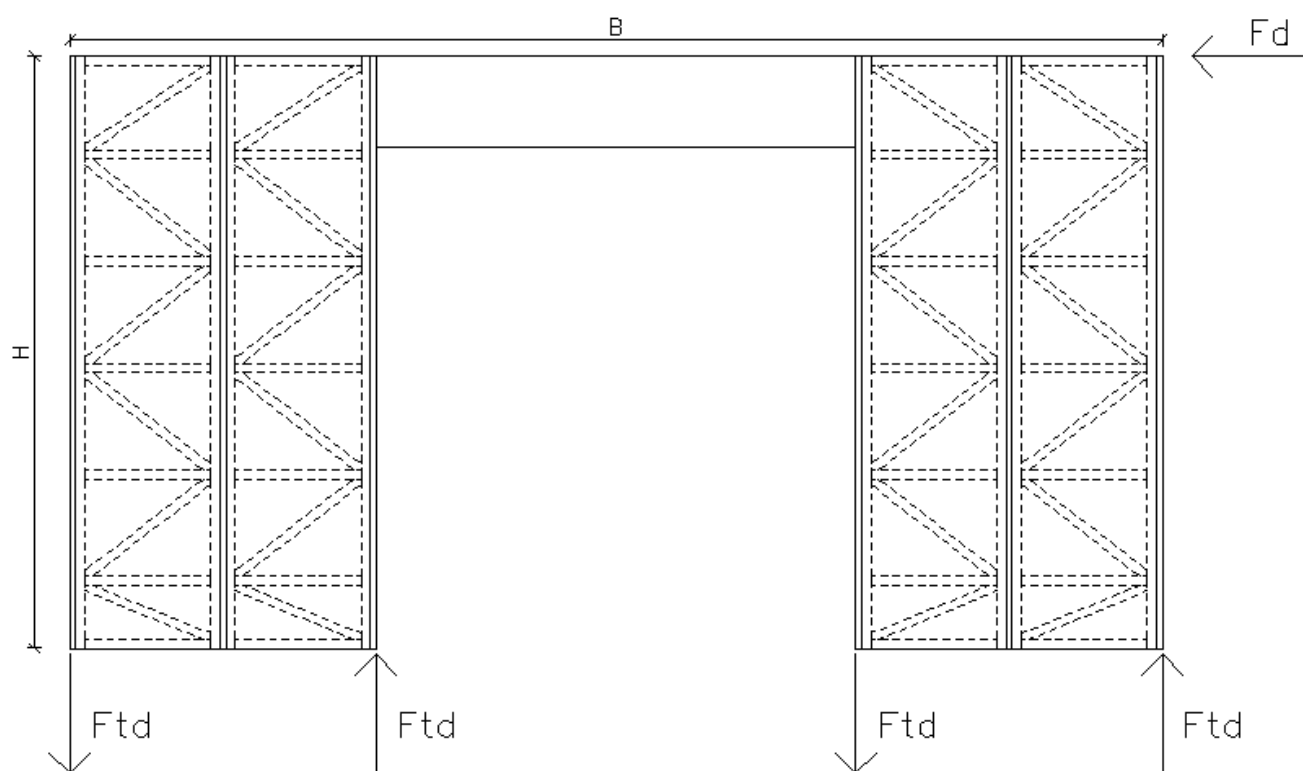


Kuvio 22. Nosto-ovellisen päätyseinän mahdollinen jäykistys vinolaudoin.

Seinien jäykistys NR-pukeilla seuraa samaa periaatetta kuin luvussa 4.2. NR-pukit asennetaan kuitenkin tässä tapauksessa seinien runkotolppien väliin. Runkoväliä tulee suurentaa yleensä k-jalolle 1200 mm, tai joka toinen runkotolppa voidaan asentaa pituussuuntaisesti seinään nähden kuvion 23 mukaisesti. Pituussuuntaisesti asennettu runkotolppa toimii myös mahdollisen levytyksen tukena. Kuviossa 24 on esimerkki, kuinka NR-pukit voi asentaa runkotolppien väliin. NR-suunnittelijalle annetaan pukin mitat ja kuormitukset, joiden perusteella hän mitoittaa pukit ja niiden tarvittavan lukumäärän. Rakennesuunnittelijalle jää pukkien kiinnityksen mitoitus sekä pukkiryhmien ankkurointi perustuksiin. Pukkien nostevoima määräytyy myös jäykistekentän leveyden ja seinän korkeuden perusteella kuten muillakin jäykistysmenetelmillä.



Kuvio 23. NR-pukkien mahdollinen asennustapa, vaakaleikkaus.



Kuvio 24. Nosto-ovellisen päädyn jäykistys NR-pukeilla.

5 LASKENTAPOHJAN ESITTELY

Työssä käytettiin esimerkkinä erästä toimeksiantajan asiakaskohdetta, joka suunniteltiin opinnäytetyön laskentapohjaa käyttäen. Kohde oli noin 130-neliöinen hallirakennus, joka toteutettiin elementtirakenteisena. Kohteen vesikaton jäykistys toteutettiin NR-jäykisteitä käyttämällä ja kuormat siirrettiin yläpohjatasolle pystysuuntaisilla NR-pukeilla. Yläpohjan ja seinien jäykistyksessä käytettiin kipsilevyjäykistystä, jotka mitoitettiin lineaarisen kimmo-teorian menetelmällä. Laskentapohjan mitoitukset on tehty pääosin teoksen RIL-248-2013 esimerkkejä seuraamalla ja soveltamalla.

Ensimmäisenä laskentapohjassa on kohteen tietojen syöttösivu. Tähän syötetään kohteen yleistiedot sekä rakennuksen erilaisia mittatietoja laskentaa varten.

Rakennuksen tietojen syöttösivu	
Kohteen tiedot:	
Osoite:	Hallitie 1
Paikkakunta:	04150 Martinkylä
Asiakas:	Raimo Rakennuttaja
Laskennan laatija:	Matias Kangasniemi RI OP
Rakennuksen käyttötarkoitus:	Varastohalli
Seuraamusluokka:	k_{fi} := Seuraamusluokka: CC2
Vesikate:	c_{fr} := Kate: Aalto-, ripa-, tai poimuprofiili
Rakennuksen mitta- ja massatiedot	
Sivun pituus:	$L := 14696 \cdot mm$
Päädyn leveys:	$B := 8722 \cdot mm$
Runkopaksuus:	$b_{runko} := 148 \cdot mm$
Seinän korkeus:	$h_{seinä} := 4720 \cdot mm$
Sokkelin korkeus:	$h_{perustus} := 600 \cdot mm$
Ristikön tukikorkeus:	$h_{tuki} := 520 \cdot mm$
Ristikön harjakorkeus:	$h_{harja} := 1976 \cdot mm$
Ristiköjako:	$k := 1200 \cdot mm$
Räystäspituus sivulla:	$r_1 := 600 \cdot mm$
Räystäspituus päädyllä:	$r_2 := 400 \cdot mm$
Ristiköiden lukumäärä:	$n_r := 13$
Ruodejako:	$k_r := 300 \cdot mm$
Yläpaarteen paksuus:	$b_{yp} := 42 \cdot mm$
Runkojako:	$k_{runko} := 600 \cdot mm$

Kuvio 25. Laskentapohjan tietojen syöttösivu.

5.1 Kuormitukset

Laskentapohjaan syötetään vesikatolle, yläpohjalle ja seinälle jokaiselle oman painon ominaisarvo. Vesikatolle ja yläpohjalle on myös erillinen kohta lisäkuormituksille. Näitä lisäkuormituksia voivat olla esimerkiksi aurinkopaneelit vesikatolla tai ripustuskuorma yläpohjassa. Lisäkuormituksen arvo saadaan esimerkiksi aurinkopaneelien tapauksessa laitteen valmistajalta. Pohjaan on liitetty taulukko 1, josta voi tarvittaessa poimia oman painon ohjeellisia vähimmäisarvoja.

Lumikuorman laskentaketjuun syötetään paikkakunta-kohtainen lumikuorman ominaisarvo maassa (s_k) sekä tieto mahdollisista lumiesteistä. Ketju laskee kattokaltevuuden huomioiden lumikuorman arvon katolla yksinkertaistetulla kaavalla (2).

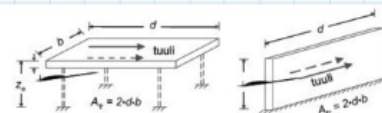
Tuulikuorman puuskanopeuspaineen laskentaan syötetään vain maastoluokka, ja pohja on automatisoitu valitsemaan oikea logaritmifunktio laskemaan puuskanopeuspaineen ominaisarvon rakennuksen kokonaiskorkeuden perusteella. Pohjaan on syötetty omat ketjunsä voimakerroinmenetelmälle sekä osapainemenetelmälle. Voimakertoimen (c_f) määrittämisessä pohja laskee rakennuksen sivusuhteet ja teholliset hoikkuudet rakennuksen päädyn ja sivun suunnassa. Tämän perusteella valitaan RIL-201-1-2017:n voimakerrontaulukosta oikeat arvot, joiden mukaan pohja interpoloi lineaarisesti voimakertoimen arvot kummallekin suunnalle. Kuviossa 26 on voimakertoimen laskennan syöttöruutu.

Täytä tiedot alla olevasta taulukosta esimerkin mukaan										Esimerkki			
λ	Sivusuhte d/b									ss_{min}	ss	ss_{max}	
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50	$Q_{1,1}$	Q_1	$Q_{2,1}$	
≤ 1	1,2	1,2	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54		cf		
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58	0,58	$Q_{1,2}$	Q_2	$Q_{2,2}$	
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63				
Esimerkki taulukon arvoilla ss on 1,723 ja λ on 1,336													
										1	1,723	2	
										1	1,28	Q_1	0,99
										1,336		cf	
										3	1,38	Q_2	1,07

$ss_{sivu.min} := 0.5$	$Q_{sivu11} := 1.37$	$ss_{pääty.min} := 1$	$Q_{pääty11} := 1.28$
$\lambda_{sivu.min} := 1.0$	$Q_{sivu12} := 1.48$	$\lambda_{pääty.min} := 1.0$	$Q_{pääty12} := 1.28$
$ss_{sivu.max} := 0.7$	$Q_{sivu21} := 1.44$	$ss_{pääty.max} := 2$	$Q_{pääty21} := 0.99$
$\lambda_{sivu.max} := 3.0$	$Q_{sivu22} := 1.55$	$\lambda_{pääty.max} := 1.0$	$Q_{pääty22} := 0.99$

Kuvio 26. Osa voimakertoimen laskentaketjusta.

Tuulikuorman osapainemenetelmän laskentaketju oli hyvin työläs määrittää. Seinien ja harjakaton ulkoisen paineen kertoimet muodostuvat kuitenkin automaattisesti kummallekin tuulensuunnalle alussa syötettyjen mittatietojen perusteella. Pohja huomioi eri lohkojen vaikutusalueet seinille ja katolle sekä antaa joka lohkolle oman painekertoimensa. Kuviossa 27 näkyy tuulikuormien yhteenvetosivu, jossa on tuulikuormat osapainemenetelmällä lohkoittain seinille ja katolle sekä voimakerroinmenetelmän antamat tuulikuorman arvot.

Sisäisen paineen kerroin:	$c_{pi} := 0.3$	Lähes neliömäisille rakennuksille, joiden aukkosuhdetta ei voida tarkkaan arvioida, käytetään vaarallisemman vaikutuksen tuottavaa arvoa vaihtoehdoista $c_{pi} = -0,3$ ja $c_{pi} = +0,2$.	
Tuulikuormat lohkoittain			
$q_{wk.sivu.A} := c_{pe.sivu.A} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.535$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.A} := c_{pe.pääty.A} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.535$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.B} := c_{pe.sivu.B} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.297$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.B} := c_{pe.pääty.B} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.297$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.C} := c_{pe.sivu.C} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.119$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.C} := c_{pe.pääty.C} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.119$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.D} := c_{pe.sivu.D} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = 0.614$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.D} := c_{pe.pääty.D} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = 0.641$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.E} := c_{pe.sivu.E} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.039$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.E} := c_{pe.pääty.E} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.093$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.F} := c_{pe.sivu.F} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.477$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.F} := c_{pe.pääty.F} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.507$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.G} := c_{pe.sivu.G} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.294$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.G} := c_{pe.pääty.G} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.788$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.H} := c_{pe.sivu.H} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = 0.014$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.H} := c_{pe.pääty.H} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.206$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.I} := c_{pe.sivu.I} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.046$	$\frac{kN}{m^2}$	$q_{wk.pääty.I} := c_{pe.pääty.I} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.146$	$\frac{kN}{m^2}$
$q_{wk.sivu.J} := c_{pe.sivu.J} \cdot q_p + c_{pi} \cdot q_p = -0.347$	$\frac{kN}{m^2}$		
Tulosten tarkastelu:			
- Laskuri laskee kaikille lohkoille arvot, vaikka lohkoja ei rakennukseen tulisikaan.			
- Cpi arvo valitaan sen perusteella, kumpi aiheuttaa suurimpia kuormituksia. Tämä valinta on laskennan laatijan vastuulla.			
- Alla vertailun vuoksi voimakertoimella laskettu tuulikuorman arvo			
$q_{wk.sivu.cf} := c_s c_d \cdot c_{f.sivu} \cdot q_p = 0.856$	$\frac{kN}{m^2}$		
$q_{wk.pääty.cf} := c_s c_d \cdot c_{f.pääty} \cdot q_p = 0.643$	$\frac{kN}{m^2}$		

Kuvio 27. Tuulikuormien yhteenveto.

5.2 Vesikattotason jäykistys

Vesikattotason jäykistys alkaa vesikattotasossa olevan viivakuorman määrittämisellä. Tuulikuorman laskentaan päätyi voimakerroinmenetelmä yksinkertaisuutensa vuoksi. Se

tuottaa myös suuremman tuulikuorman, joten se antaa myös varmuutta mitoituksiin. Tuulikuorman arvo vesikattotasolle lasketaan luvussa 4.1.1 määritetyllä kaavalla (8). Lisävaakavoima ja nurjahduksesta aiheutuva stabiloiva voima lasketaan myös luvussa 4.1.1 kaavoilla. Nurjahduksen toisen muodon, eli S-muodon kuormituksia ei tässä lasketa, koska pohjassa oletetaan peltikatteen estävän S-nurjahduksen. Lisävaakavoimien laskentaan on otettu kaavoihin (9) ja (10) poiketen räystäät vielä huomioon.

Mitoitukset alkavat kattoruoteiden määrittelystä. Pohjaan syötetään ruoteen poikkileikkausmitat sekä valitaan lujuusluokka, jolloin pohja automaattisesti poimii tarvittavat materiaaliarvot laskentaan. Pohjassa ruoteiden mitoittavat kuormat muodostuvat kattorakenteen omasta painosta ja lumesta aiheutuvasta momentista sekä yläpaarten puristavasta voimasta aiheutuvasta vaakavoimasta. Puristava voima voidaan poimia NR-suunnitelmasta ja kertoa luvulla 0,85, tai se voidaan johtaa maksimimomentin kaavasta ristikon keskimääräisellä korkeudella. Mitoitustarkastelut tehdään yhteisvaikutustarkasteluna nurjahdukselle ja suurimmalle kenttämomentille sekä vedolle ja suurimmalle momentille, oli se sitten kenttä- tai tukimomentti. Ruoteiden mitoitus toteutetaan keskipitkässä aikaluokassa, eikä tuulta huomioida laskennassa.

Tämän jälkeen valikoituu kerroin, joka huomioi, toimivatko ruoteet sekä vedettyinä että puristettuina. Kerroin jakaa vesikattotason kuormat kummankin päädyn jäykistykselle, jolloin niiden mitoituskuorma on puolet koko vesikattotason kuormituksesta. Kuviossa 28 on esitetty ruoteiden mitoituksien tuloksia.

Yhteisvaikutusten tarkastelu:

Puristus ja taivutus:
$$Ruode_{pur} := \frac{\sigma_{c.t.d}}{k_{c,y} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.1.d}}{f_{m.d}} = 61.894\%$$

Veto ja taivutus:
$$Ruode_{veto} := \frac{\sigma_{c.t.d}}{f_{t.0.d}} + \frac{\sigma_{m.2.d}}{f_{m.d}} = 83.239\%$$

Jos molemmat ehdot toteutuvat, niin ruoteet toimivat sekä vedettyinä, että puristettuina sauvoina ja kuormitukset voidaan jakaa tasan kummankin päädyn jäykisteille.

Ruoteiden mitoituksen huomioiva kerroin:
 - Jos ruoteet eivät toimi molempiin suuntiin jäykistekuormaa ei jaeta tasan kummankin päädyn jäykisteille

$$r := \max \left(\left\| \begin{array}{l} \text{if } Ruode_{pur} \leq 1 \\ \| 0.5 \\ \text{if } Ruode_{pur} > 1 \\ \| 1 \end{array} \right\|, \left\| \begin{array}{l} \text{if } Ruode_{veto} \leq 1 \\ \| 0.5 \\ \text{if } Ruode_{veto} > 1 \\ \| 1 \end{array} \right\| \right) = 0.5$$

Kuvio 28. Ruoteiden mitoitustarkastelu.

Ruoteiden kiinnitys mitoitetaan erikseen. Kiinnitysten mitoituksen alkuun on luotu laskentapohjat naulojen leikkauslujuuden määrittämiseen RIL-205-1-2017:n kaavojen mukaan. Pohjaan syötetään naulan halkaisija sekä pituus, jolloin pohja antaa naulan mitoitusleikkauskestävyyden. Puun tiheysvaikutuskerroin on jätetty pois kaavasta, koska yleisimmät ruodelaudat ovat C18- tai C24-lujuusluokkaa, jolloin tiheysvaikutuskerroin ei korota leikkauslujuutta. RIL-205-1-2017-teoksessa mainitaan, että naulan leikkauskestävyyden arvoa voidaan korottaa tiheysvaikutuskertoimella. Tästä voi tulkita, että tiheysvaikutuskerroin ei myöskään pienennä leikkauskestävyyttä, joten sen takia se on jätetty pois. RIL-205-1-2017:n mukainen naulan leikkauslujuuden laskentakaava on muotoa (RIL-205-1-2017, 2017, s. 112)

$$R_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} k_\rho \begin{cases} k_t \\ k_e \end{cases} R_k \quad (34)$$

missä

k_{mod} on kuorman aikaluokan ja kosteusvaikutuksen huomioiva muunnoskerroin

γ_M on materiaalin osavarmuusluku

k_ρ on tiheysvaikutuskerroin, joka saadaan kaavasta

$$k_{\rho} = \sqrt{\frac{\rho_k}{350}} \quad (35)$$

k_t on naulan leikkauskestävyyden korotuskerroin

k_e on naulan leikkauskestävyyden pienennyskerroin

R_k on naulan leikkauskestävyyden ominaisarvo [N]

ρ_k on liitettävien puuosien ominaistiheys [kg/m^3]

Pohja mitoittaa valituille liittimille naulausjaon tuuletusrimalle sekä ruoteen liitoksen naulamäärän. Ruoteen lopullinen naulamäärä määritetään kuitenkin tuulen imukuormitustarkastelun kohdalla. Ruoteiden jatkosten ja päätyliitosten naulamäärä mitoitetaan vielä tässä kohtaa kaavasta (17) saadulla kuormalla. Kuviossa 29 on esitetty ruoteiden jousijäykkyyden tarkistus.

Nurjahdustukien jousijäykkyyden tarkistus	
Tuettujen kenttien lukumäärä yläpaarteessa NR-suunnitelman ruodejaolla:	$m_{kenttä} := L_{yp} \div k_{NR} = 15$
Ruoteiden jousijäykkyyden vaatimus:	$C_{vaad} := \left(2 + 2 \cdot \cos \left(\frac{180^\circ}{m_{kenttä}} \right) \right) \cdot \frac{N_d}{k_{NR}} = 481.34 \frac{N}{mm}$
Jäykisteet molemmissa päädyissä, joten vaatimus:	$C_{vaad} := C_{vaad} \div 2 = 240.669 \frac{N}{mm}$
Esiporaamattoman naulaliitoksen siirtymäkerroin:	$K_{ser} := \rho_{mean}^{1.5} \cdot \frac{(d_0 \div mm)^{0.8}}{30} \cdot \frac{N}{mm} = 562.7 \frac{N}{mm}$
Liitinmäärä todellisen ruodejaon mukaan:	$n_{liitin} := \frac{k_{NR}}{k_r} \cdot n_{ruode} = 4$
Ruodejatkoksien väli:	$Jatkoväli := k \cdot 4 = 4.8 m$
Ruoteiden jatkoksia lappeella:	$n_{jatkos} := \text{ceil} \left(\frac{L}{Jatkoväli} \right) = 4$
Siirtymäkerroin liitoksessa:	$K_{ser.liitos} := n_{liitin} \cdot K_{ser} = 2250.82 \frac{N}{mm}$
Nurjahdustukien jäykkyyden käyttöaste:	$\frac{C_{vaad}}{K_{ser.liitos} \div n_{jatkos}} = 42.8\%$

Kuvio 29. Nurjahdustukina toimivien ruoteiden jousijäykkyyden tarkistus.

Koska pohjassa oletetaan, että peltikate estää S-nurjahduksen, on peltikatteen kiinnityksille oma laskentaketju. Kiinnityksen mitoituksessa määritetään mitoitusleikkaus- sekä mitoitusulosvetokestävyudet ruodenaulalle ja peltikateruuville. Liitokset mitoitetaan yhteisvaiikutuksena vedolle ja leikkaukselle. Vetokuorma on tuulen imukuorma, joka on määritetty harjakaton osapaineiden avulla. Pohja valitsee automaattisesti suurimman tuulen imukuorman mitoitukseen. Leikkausvoimana on paarteiden nurjahdustuennasta aiheutuva stabiiloiva kuormitus, joka saadaan kaavasta (15).

Seuraavaksi päästään varsinaisiin vesikattotason jäykistysmenetelmiin. Pohjaan on luotu vaihtoehdoiksi NR-jäykisteristikot sekä yläpaarteeseen kiinnitettävä vinolaudoitus. Levyjäykistys jätettiin tässä vaiheessa vielä pois. Tätä voisi käyttää esimerkiksi huopakattoisessa rakennuksessa, jossa huovan alla on katevaneri. Katevanerilla saadaan estettyä S-nurjahdus ja jäykistettyä koko vesikattotaso tehokkaasti. Vesikattotason kuormitusyhdistelmät näkyvät kuviossa 30. Pohja valitsee määräävimmän kuormitusyhdistelmän automaattisesti.

Kuormitusyhdistelmät koko katon jäykisteille yläpaarretasoon:	
Omap+tuuli 1+lumi 0,7	$q_{d,yyp.1} := 1.15 \cdot k_{fi} \cdot (H_{Lgk} + q_{g.k.1}) + 1.5 \cdot k_{fi} \cdot q_{wk,yyp.cf} + 0.7 \cdot 1.5 \cdot k_{fi} \cdot (H_{Lqk} + q_{q.k.1}) = 2.844 \frac{kN}{m}$
Omap+lumi 1+tuuli 0,6	$q_{d,yyp.2} := 1.15 \cdot k_{fi} \cdot (H_{Lgk} + q_{g.k.1}) + 1.5 \cdot k_{fi} \cdot 0.6 \cdot q_{wk,yyp.cf} + 1.5 \cdot k_{fi} \cdot (H_{Lqk} + q_{q.k.1}) = 2.978 \frac{kN}{m}$
Omap+lumi 1	$q_{d,yyp.3} := 1.15 \cdot k_{fi} \cdot (H_{Lgk} + q_{g.k.1}) + 1.5 \cdot k_{fi} \cdot (H_{Lqk} + q_{q.k.1}) = 2.317 \frac{kN}{m}$
Määräävä kuormitusyhdistelmä	$q_d := \max(q_{d,yyp.1}, q_{d,yyp.2}, q_{d,yyp.3}) = 2.978 \frac{kN}{m}$ $k_{mod} := 1.1$

Kuvio 30. Vesikattotason kuormitusyhdistelmät pituusyksikköä kohti.

NR-jäykisteristikoiden laskentaketjussa valitaan tulevatko jäykisteristikot koko lappeen mitaisena vai kaksi ristikkoa per lape. Jäykisteristikon kuormat esitetään ominaiskuormina pituusyksikköä kohti, jotta kuormat voidaan suoraa ottaa NR-kaavioihin. Seuraavaksi pohja laskee jäykisteristikon tukireaktiot, joista saadaan ristikon mittojen suhteella tukireaktiosta aiheutuva leikkausvoima yläpaarretta vasten. Jäykisteristikon kiinnitys tapahtuu tälle leikkaavalle voimalle. Pohjan oletus oli, että stabiilivat voimat pidetään vesikattotasossa. Tästä johtuen luotiin pieni ketju hyödyntäen ruoteiden mitoituksessa saatua tietoa, jotta

jäykisteristikoiden päihin voidaan mitoittaa tarvittavat lisäruoteet palauttamaan stabiloivat voimat tuille.

Vesikattotason vinolaudoituksen laskentaketjussa määritetään käytettävän laudan dimensiot sekä lujuusluokka. Pohja osaa poimia oikeat materiaaliarvot laskentaan. Vinolaudoitusta käyttäessä kuormien siirto yläpohjatasolle suoritetaan pystysuuntaisin vinolaudoituksin. Tässä kohtaa tulee valita pystyvinolaudoituslinjojen lukumäärä. Vesikattotason vinolaudoituksen jäykistekenttien koko riippuu näistä. Jäykistekentän reunassa vaikuttava leikkaava voima määritetään vesikattotason kuormasta valittujen pystylinjojen jaon mukaan. Lautojen nurjahduskestävyys määritetään syötetyn asennuskulman mukaan, joka tyypillisesti on 45 astetta. Tämä muutetaan leikkauskestävyydeksi kosinilauseen avulla ja verrataan kentän reunan leikkaavaan voimaan. Käytettävät naulat mitoitetaan leikkaavalle voimalle. Laudan jatkokset ja päätyliitokset mitoitetaan laudan suuntaiselle voimalle, joka saadaan myös kosinilauseella kentän reunassa vaikuttavasta leikkaavasta voimasta.

5.3 Vesikattotason kuormien johtaminen yläpohjatasolle

Laskentapohjassa on kaksi vaihtoehtoa kuormien johtamiselle. Ensimmäisenä on pystysuuntaiset NR-pukit, joita käytetään NR-jäykisteristikoiden kanssa. NR-pukkien mitoittavia ominaiskuormia ei ole tässä esitetty, koska NR-suunnittelija saa ne jäykisteristikoiden tuki-reaktioista. Pukin korkeus ja leveys kuitenkin määritetään, jotta saadaan määritettyä vaakasuuntaisesta voimasta aiheutuva pystysuuntainen voima. Pystysuuntainen voima muodostuu vaakasuuntaisesta voimasta kerrottuna pukin dimensioiden suhteella. Pukit kiinnitetään tälle pystysuuntaiselle kuormitukselle, ja muualla kuin seinälinjalla tämä pystysuuntainen kuormitus tulee huomioida kattoristikokaavioissa. Kuviossa 31 osa NR-pukkien ketjusta.

Huomioitavaa NR-pukkeja käytettäessä:

- Laskentapohja ei mitoiteta pukkien kiinnitystä, vain kiinnityksen mitoituskuorman. Liitokset tulee mitoitaa erikseen.
- Yläpaarteiden nurjahdustuennasta aiheutuvat stabiloivat voimat pidetään palautetaan jäykistysjärjestelmän tuille, joten NR-pukit mitoitetaan vain ulkoisille kuormille
- NR-pukit mitoitetaan aina jäykisteristikon päähän, eli harjalle tulee vähintään kaksi pukkia

Tässä käytetään samaa jakoa kuin jäykisteristikoissa: $L_{NR} = 4.598 \text{ m}$

NR-pukkien kokoja kattoristikon eri pisteissä:

NR-pukin korkeus harjalinjalla:

$$h_{p,harja} := 1880 \text{ mm}$$

$$h_{harja} = 1976 \text{ mm}$$

NR-pukin korkeus seinälinjalla:

$$h_{p,seinä} := 440 \text{ mm}$$

$$h_{tuki} = 520 \text{ mm}$$

NR-pukin korkeus lappeen puolella välissä:

$$h_{p,BA} := 1130 \text{ mm}$$

NR-pukin leveys:

$$b_p := k - b_{yp} - 2 \text{ mm} = 1156 \text{ mm}$$

NR-pukin pistekuorma yläpäähän murtorajatilassa: $F_p := T_{JR,d} = 3.423 \text{ kN}$

NR-pukin pystysuuntainen leikkausvoima vaakasuuntaisesta pistekuormasta:

- Harjalinjalla

$$F_p \cdot h_{p,harja} \div b_p = 5.566 \text{ kN}$$

- Seinälinjalla

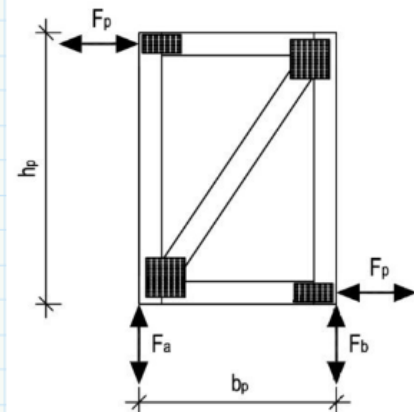
$$F_p \cdot h_{p,seinä} \div b_p = 1.303 \text{ kN}$$

- Paarteen keskellä

$$F_p \cdot h_{p,BA} \div b_p = 3.346 \text{ kN}$$

NR-pukin kiinnitykset esim. kulmalevyillä, kestävyudet valmistajien taulukoista yllä olevien murtorajatilakuormitusten mukaan**NR-pukin ja kattoristikon välinen leikkausvoima huomioitava kattoristikkokaaviossa pistekuormana**

Jos yläpaarteiden väliin tuleva jäykisteristikko on yläpaarteen mittainen, niin lappeen puolella välissä olevan NR-pukin laskuja ei tarvitse huomioida



Kuvio 31. NR-pukin määrittäminen.

Pohjan toinen vaihtoehto kuormien johtamiseen ovat pystysuuntaiset vinolautaparit. Tästäkin määritetään käytettävän laudan dimensiot ja lujuusluokka. Pystysuuntaisten tukilinjojen lukumäärä ja kuormitus on määritetty jo edellä vesikattotason vinolaudoituksessa. Vinolaudoitusta mitoitetaan samoin kuin vesikattotason tapauksessa eli nurjahduksen perusteella. Pohjaan syötetään vinolautapari- ja liitoksen nauhojen lukumäärä sekä jäykistekentän leveys. Jäykistekentän leveys muodostuu siitä, montako ristikkoa vinolaudoitusta si-
too. Kentän korkeus lasketaan automaattisesti ristikon harjakorkeudesta. Jäykistekentän koko määrittää lautojen asennuskulman, jota käytetään sini- ja kosinilauseissa. Mitoituksia on kaksi eri ketjua seinälinjalle ja harjalinjalle. Harjalinjan mitoitus antaa suurimman käyttöasteen. Tämän takia ei ole erikseen montaa laskentakettjua, vaikka päädyssä olisi esimerkiksi kuusi tuentalinjaa. Harjalinjalla olevia vinolautoja käytetään myös seinä- ja harjalinjan väleillä, koska se yksinkertaistaa laskentapohjaa ja tuo varmuutta rakenteisiin. Seinälinjan

mitoitus tehdään erikseen, koska sen kuormitus on aina puolet lappeen seuraavasta tuentalinjasta. Kuviossa 32 on osa vinolautaparien laskentaketjua.

Vinolaudan puristuskestävyys:	$N_{Rd,Tj} := k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} \cdot b \cdot h = 3.469 \text{ kN}$
Vinolaudan leikkauskestävyys:	$V_{Rd,Tj} := N_{Rd,Tj} \cdot \cos(\alpha_{Tj} \cdot 1^\circ) = 3.128 \text{ kN}$
Valittu vinolautaparien määrä peräkkäin:	$n_{VL} := 3$
Käyttöaste puristuslujuuden mukaan:	$V_d \div (V_{Rd,Tj} \cdot n_{VL}) = 48.635\%$
Liittimien kestävyys:	
Naulamäärä vinolaudan liitoksissa:	$n_{VL,naula} := 3$
yhden vinolautaparin normaalivoima	$N_{d,Tj} := V_d \div (n_{VL} \cdot \cos(\alpha_{Tj} \cdot 1^\circ)) = 1.687 \text{ kN}$
Käyttöaste vinolaudan suuntaisesti:	$N_{d,Tj} \div (R_{d,Tj} \cdot n_{VL,naula}) = 92.967\%$

Kuvio 32. Vinolautaparien mitoitustarkastelu

5.4 Yläpohjataso jäykistys

Yläpohjataso kuormitukselle on oma laskentaketju, joka huomioi, mitä menetelmiä vesikattotasolla on käytetty. Yläpohjataso tuulikuorma lasketaan myös voimakerroinmenetelmällä luvun 4.1.3 kaavasta (19). Lisävaakavoimat lasketaan samoin kuin vesikattotasolla. Pohja laskee yläpohjataso kuormituksen sekä päädyn että sivun suunnassa ja määrittää molemmille määräävän kuormitusyhdistelmän. Yläpohjan jäykistysmenetelminä pohjassa on vinolautajäykistys sekä levyjäykistys. Vinolautajäykistysketju on samanlainen kuin vesikattotason vinolaudoituksessa. Poikkeuksena on jatkosten mitoitus, joka on lisätty perään. Pohja laskee suurimman yksittäisen laudassa vaikuttavan normaalivoiman riippumatta kuormituksen suunnasta ja mitoittaa naulamäärän kyseiselle voimalle. Osa jatkosten mitoituksesta on esitetty kuviossa 33.

Vinolautojen jatkosten mitoitus:

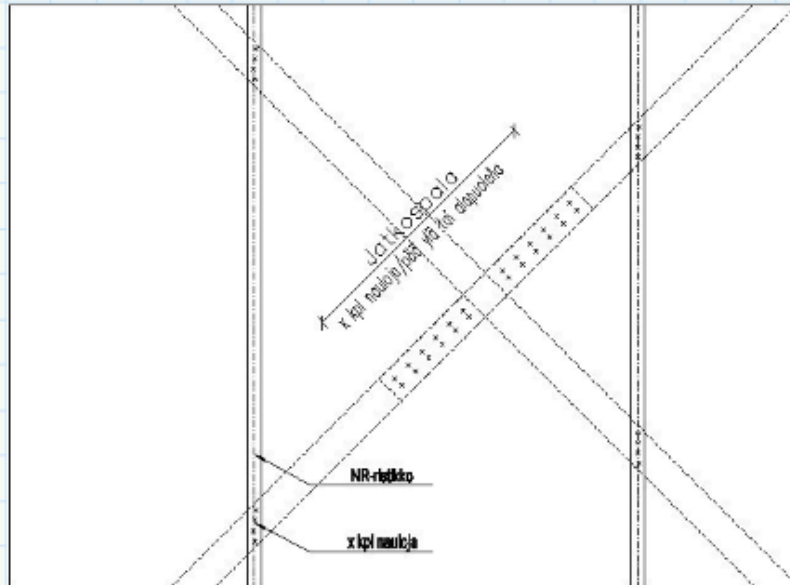
Jatkoksen kuormitus:

$$N_d := \max \left(\frac{N_{d.ap.pääty}}{n_{ap.pääty}}, \frac{N_{d.ap.sivu}}{n_{ap.sivu}} \right) = 3.178 \text{ kN}$$

Naulamäärä jatkoksessa per puoli:

$$\text{ceil} (N_d \div R_{d.ap}) = 5$$

Esimerkki jatkoksesta:



Kuvio 33. Vinolautojen jatkosten mitoitus.

Yläpohjan levyjäykistys lasketaan lineaarisen kimmoteorian menetelmällä. Tämä menetelmä on yksinkertainen, ja sillä voidaan mitoittaa sekä vanereita että kipsilevyjä. Pohjaan on koottu Gyprocin ja Knaufin kipsilevyjen materiaaliominaisuuksia sekä tyyppihyväksytyjen levyjen ja liittimien yhdistelmien leikkauskestävyyksiä sekä siirtymäkertoimia. Pohjaan määritetään levyn koko, valitaan alavetovalikosta tyyppi ja liitin sekä kiinnitystapakertoimet kyseisen menetelmän mukaan. Laskentaketjun viereen on liitetty taulukko, josta löytyy kiinnitystapakertoimia yleisimmille levykoille ja liitinväleille. Pohja laskee tämän perusteella yhden liittimen kuormituksen ja vertaa sitä mitoituskestävyyteen sekä laskee yläpohjaketän vaakasuuntaisen siirtymän päädyn ja sivun suunnassa.

Riippumatta kumpaa jäykistysmenetelmää käytetään yläpohjatasossa, mitoittaa pohja yläpohjan jäykistekentän vetopaarten. Pohjan syötetään vetopaarten dimensioid ja lujuusluokka, jonka perusteella lasketaan vetokestävyys. Vetopaarten normaalivoima määritetään yläpohjaketässä vaikuttavan maksimimomentin kautta. Kuviossa 34 on esitetty vetopaarten normaalivoiman määrittäminen laskentapohjassa.

Paarteen tiedot:	$b := 148 \text{ mm}$	$h := 48 \text{ mm}$	$\begin{bmatrix} f_{c,0,k} \\ \rho_k \\ \rho_{mean} \end{bmatrix} := \text{Lujuusluokka: C24} \checkmark$
Paarteen vetovoima:	$F_d := \max\left(\frac{q_{d,pääty} \cdot B^2}{8 \cdot L}, \frac{q_{d,sivu} \cdot L^2}{8 \cdot B}\right) = 17.817 \text{ kN}$		

Kuvio 34. Vetopaarteen normaalivoiman määrittäminen.

5.5 Seinien jäykistys

Seinien jäykistykseen on luotu kolme eri laskentakettua eri jäykistysmenetelmille. Ensimmäinen ketju on seinien jäykistys NR-ristikoilla. Tämä on samankaltainen kuin edellä esitetty NR-pukkien käyttö. Tässä pystysuuntaiset NR-pukkiristikot asennetaan seinän runk välisiin. Tähän syötetään pukin korkeus, leveys ja lukumäärä, jotta pohja voi laskea pukin tai pukkiryhmän ankkuroitavan nostovoiman korkeuden ja leveyden suhteella. NR-pukin kuormitus on sama kuin yläpohjakentän reunassa oleva leikkaava voima. Pukin kuormitus on esitetty ominaisarvoina, jotta se saadaan suoraan NR-kaavioon. Suositeltu toimintatapa on laittaa pukkien lukumääräksi yksi, jolloin NR-suunnittelija määrittää pukkien lukumäärän ja nostovoiman saadaan sen jälkeen, kun NR-suunnitelmat ovat saapuneet.

Toisena seinien jäykistysvaihtoehtona on levyjäykistys. Tässäkin päädyttiin lineaarisen kimmoteorian menetelmään sen yksinkertaisuuden vuoksi. Pohja huomioi halutessa ulko- ja sisäpuolisen levytyksen sekä jakaa seinälle tulevan kuormituksen ulko- ja sisäpuolisille levytyksille liittimien siirtymäkertoimien suhteen. Laskentakettuun syötetään levyjen mitat ja täysien levyjen lukumäärän seinässä. Seinä ajatellaan yhtenä jäykisteyksikkönä, jossa aukolliset lohkot siirtävät kuormat seuraavalle täydelle lohkolle. Levyt valitaan alavetovalikosta, kuten myös levyyn sopiva liitin, jolloin pohja poimii tarvittavat lähtötiedot laskentaan. Laskentapohja on luotu suorakaiteen muotoisille rakennuksille, joten levyjäykistysketjuja on neljä kappaletta jokaiselle seinälle. Rakennuksen seinien aukotus saattaa olla hyvinkin erilainen verrattuna toisiinsa, joten on hyvä olla mahdollisuus tarkistaa ne kaikki. Pohja siis laskee levyjen leikkausvoimakestävyyden ja seinän yläreunan siirtymän.

Kolmas seinien jäykistysmenetelmä on vinolaudoitus. Laskentakettu on hyvin samanlainen kuin edellisissä vinolaudoituslaskennoissa. Määritetään kuormitus, lasketaan laudan

nurjahduskestävyys, lasketaan leikkauskestävyys nurjahduskestävyyden perusteella kosi-
nilauseen avulla ja mitoitetaan naulauksen kapasiteetti laudan suuntaiselle kuormitukselle.

5.6 Seinien ankkurointi perustuksiin

Seinien ankkuroinnissa pohja mitoittaa halutut liittimet seinän alareunan tasolla vaikutta-
valle leikkausvoimalle. Vaihtoehtoina alasidepuun ankkurointiin on annettu laskentaketju,
jolla voi laskea harjaterästartunnan tai kierretankotartunnan leikkauskestävyyden. Laskija
voi myös syöttää suoraan halutun liittimen kestävyuden esimerkiksi kiila-ankkurin valmista-
jan määrittämän leikkauskestävyyden. Tässä kohtaa on myös laskentaketjut naulan ja ruu-
vin leikkauslujuuksille elementtirakenteisia halleja ajatellen, millä voidaan mitoittaa ele-
mentin alapään kiinnitys. Jokainen seinä käydään yksitellen läpi ja määritetään halutun
ankkuroinnin ja kiinnityksen liitinväli. Seinän tietoihin syötetään halutut liittimet ja alajuok-
sun mitta seinällä, eli esimerkiksi nosto-oven kohta ei tässä tapauksessa lisää alajuoksun
mittaa.

Seinien nostevoiman ankkuroinnille on seinäkohtaiset laskentaketjut, joissa pohja huomioi
rakenteen yläpuoliset omat painot ennen lopullista ankkuroitavaa voimaa. Pohja ei mitoita
varsinaista ankkurointia, mutta se laskee ankkuroitavan voiman. Ankkuroinnin mitoitus voi-
daan tehdä erikseen kiinnikkeen valmistaja ohjeen mukaan. Tässä nostevoima lasketaan
kertomalla vaakaleikkausvoima seinän korkeuden ja leveyden suhteella, jossa seinän le-
veys on alajuoksun pituus. Seinä ankkuroidaan päistään sekä aukkojen reunoista näille
määritetyille voimille.

6 YHTEENVETO

Laskentapohjalla pystytään toistaiseksi mitoittamaan symmetrisillä harjaristikoilla toteutetun puurankarunkoisen hallin kokonaisjäykistys. Tulevaisuudessa tavoitteena on lisätä pohjaan mahdollisuus epäsymmetrisille harjaristikoille sekä pulpettiristikoille. Mahdollisena lisäyksenä on myös vesikattotason jäykistys rakennuslevyillä. Tätä menetelmää voitaisiin hyödyntää huopakattoisissa rakennuksissa. Jatkokehitysideana myös kaikkien rakennesien levyjäykistykseen voitaisiin lisätä vanerit sekä OSB-levyt, joiden materiaaliarvot saataisiin suoraan teoksen RIL-205-1-2017 taulukoista. Liittimien kestävyudet ja siirtymäkerroimet laskettaisiin em. teoksen ohjeilla.

Muita lisäyksiä pohjaan voisi olla S-nurjahduksen estäminen tuuletuslankulla kuten luvussa 4.1.4 on esitetty. Seinien levyjäykistykseen voisi lisätä mahdollisuuden erilaisten jäykisteyksiköiden huomioimiseen sekä väliseinien käyttämiseen jäykistyksessä.

Opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen, mutta haastava. Aiheeseen sisältyi monta eri osaluuetta, jotka olivat haastavaa koota yhteen. Lähteet olivat hajanaisia, ja niitä piti koota harkitusti yhteen. Rakennuksen kokonaisjäykistys on oleellinen osa rakennesuunnittelua. Perusteellisesti suoritettuna jäykistyslaskenta vie paljon aikaa. Valmiilla laskentapohjalla pystytään suorittamaan nämä laskennat huomattavasti pienemmässä ajassa, ja siitä saadaan siistit tulosteet rakennusvalvontaa varten. Näen, että laskentapohjasta saadaan toimeksiantajalle jatkossa merkittävää hyötyä työajan säästymisen kautta. Opinnäytetyön tavoite luoda suunnittelutoimintaa tukeva, suhteellisen helppokäyttöinen, mutta riittävän monipuolinen laskentapohja hallirakennusten kokonaisjäykistykseen saavutettiin.

LÄHTEET

- Lahtela, T. (2020). *Vaativien puurakenteiden suunnittelu: NR-ristikkoyläpohjan jäykistys*. [Powerpoint-esitys] https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/20_NR-ristikkoyl%C3%A4pohjan-j%C3%A4ykistys.pdf
- Leskelä, J. (2005). *Linear elastic design method for timber framed ceiling, floor and wall diaphragms* [Licentiate's Thesis]. Helsinki University of Technology.
- Puuinfo. (2020). *EC 5 sovelluslaskelmat Hallirakennus*. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennustoinen-painos.pdf>
- Puuinfo. (2010). *Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje 5.painos*. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-5.-PAINOS-2020-P%C3%84IVITYS-22.7.-web.pdf>
- RIL 248-2013. *NR-kattorakenteen jäykistyksen suunnittelu*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry
- RIL 201-1-2017: *Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- Rakennustieto. (1993). *Puuristikot ja -kehät* (RT-85-10495).
- VTT (2006). *Puurakenteiden jäykistyssuunnittelun ohje*. VTT Technical Research Centre of Finland. http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/jaykistys_2006.pdf
- Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista 477/2014. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140477>
- Ympäristöministeriö (YM). (2016). *Rakenteiden lujuus ja vakaus: Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet* (Suomen Rakentamismääräyskokoelma (RakMk)) https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-suunnitteluperusteet-2016-C352472F_E7C4_4653_BF44_1AB47FB50CB0-137127.pdf/00fb719c-365d-d570-618e-cad1004fbc5b/lopullinen-suunnitteluperusteet-2016-C352472F_E7C4_4653_BF44_1AB47FB50CB0-137127.pdf?t=1603260660111