Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ndricim Strana

Harjapalkin mitoitus Eurokoodi 5:n mukaisesti

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

22.5.2023

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Ndricim Strana Harjapalkin mitoitus Eurokoodi 5:n mukaisesti 55 sivua + 0 liitettä 22.5.2023
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Lehtori, Joni Pirhonen

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää symmetrisen harjapalkin laskentaohjelma, joka perustuu Eurokoodi 5:n ohjeisiin ja keskittyy liimapuisen harjapalkin mitoitukseen. Työssä hyödynnettiin liimapuukäsikirjoja, joissa on tarkempia ohjeita harjapalkin mitoittamiseen ja sisältävät tietoa liimapuun ominaisuuksista. Lisäksi työssä käytettiin RIL 205-1-2017:n mukaisia ehtoja sekä suosituksia.

Harjapalkki kuviteltiin olevan hallirakennuksen pääkannattaja, jota kuormittaa tasainen viivakuorma, joka koostuu palkin omasta painosta, kattorakenteen omasta painosta ja lumikuormasta. Oman painon laskennassa käytettiin SFS-EN 1991-1-1:n mukaisia ohjeita ja lumikuorma laskettiin SFS-EN 1991-1-3:n mukaan.

Työssä tehtiin katsaus liimapuun käyttöön rakennusmateriaalina. Otettiin huomioon eurokoodi 5:n antamia suunnittelu ohjeita sekä hyödynnettiin Puuinfon-sivuston tarjoamia lähteitä. Lisäksi opinnäytetyössä suoritettiin kuvitteellisen harjapalkin mitoitus, jossa havainnollistettiin samalla tehtyä mitoitustyökalua. Tavoitteena oli hankkia ymmärrys liimapuun käyttömahdollisuuksista rakennusteollisuudessa.

Opinnäytetyössä onnistuttiin kehittämään symmetrisen harjapalkin laskentaohjelma, joka ottaa huomioon eurokoodien vaatimukset ja tarjoaa käyttäjälle työkaluja harjapalkin mitoittamiseen.

Avainsanat	Liimapuu, harjapalkki, Eurokoodi 5

Author Title Number of Pages Date	Ndricim Strana Double Detached Beam Dimensioning by Eurocode 5 55 pages + 0 appendices 22 May 2023
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Joni Pirhonen, Senior Lecturer

The topic of this final year project was to develop a calculation program for a symmetrical ridge beam. The focus of the study was on the design of a glued laminated beam that complies with the guidelines of Eurocode 5. The work utilized handbooks on glued laminated timber, which providing detailed information on the properties of glued laminated timber and offer relevant guidelines for the design of ridge beams. In addition, the thesis made use of the conditions specified in RIL 205-1-2017.

The ridge beam was imagined to be one of the main supports in a hall building. The beam is subjected to a load, which consists of the beam's own weight, the weight of the roof structure, and the snow load. The self-weights were calculated according to SFS-EN 1991-1-1, and the snow load was calculated according to SFS-EN 1991-1-3.

In the thesis, an overview of the use of glued laminated timber as a construction material was conducted. Eurocode 5's design guidelines were taken into consideration, and information sources provided by the Puuinfo website were utilized. Additionally, a hypothetical ridge beam design was carried out to illustrate the developed sizing tool. The objective was to acquire an understanding of the potential applications of glued laminated timber in the construction industry.

In summary, this final year project focused on developing a calculation program for a symmetrical ridge beam made of glued laminated timber, following the guidelines of Eurocode 5. The work provides an overview of glued laminated timber and its properties, introduces the necessary Eurocodes for design, and presents the detailed calculations and formulas for the ridge beam design.

Keywords	glulam double pitched beam, Eurocode 5

Sisällys

1 Johdanto 3

2 Liimapuu 3

2.1 Liimapuun valmistus 4
2.2 Liimapuun lujuusominaisuudet 5
2.3 Ympäristöystävällisyys 6
2.4 Liimapuun käyttökohteita 7
2.5 Harjapalkki 7

3 Suunnittelun perusteet 8

3.1 Käytettävät eurokoodit 8

4 Eurokoodin mukainen mitoitus 9

4.1 Kuormien ominaisarvot 9
4.2 Oma paino 10
4.3 Lumikuorma 10
4.4 Murtorajatila 12
4.5 Kestävyyden mitoitusarvot 16

5 Harjapalkin mitoituksen tarkastelukohdat 21

5.1 Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa 22
5.2 Taivutuskestävyys harjalla 26
5.3 Harjapalkin leikkauskestävyys tuella 27
5.4 Syysuuntaan vastaan kohtisuoran vetokestävyys harjalla 29
5.5 Yhdistetty poikittainen veto- ja leikkauskestävyys 30
5.6 Kohtisuora puristus syysuuntaa vastaan 32
5.7 Taivutetun harjapalkin kiepahduskestävyys 33
5.8 Harjapalkin lopputaipuma keskellä 35
5.9 Kiepahdustuentavoimat 38
5.9.1 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys (1.muoto) 38

5.9.2 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys (2.muoto) 39

6 Excel-pohjaisen laskentaohjelman esittely sekä harjapalkin mitoituskohtien tarkastelut ohjelmassa 41

6.1 Harjapalkin lähtötiedot 41
6.2 Murtorajatilan kuorma palkille 42
6.3 Harjapalkin ominaislujuudet sekä suunnittelulujuuden laskeminen 44
6.4 Taivutuslujuuden tarkastelu mitoittavassa kohdassa 46
6.5 Leikkaus tuella 48
6.6 Poikittainen vetokestävyys harjalla 49
6.7 Syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus 50
6.8 Kiepahduskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa 51
6.9 Taipuma-arvio harjapalkin keskellä 52
6.10 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys 53

7 Yhteenveto 55

Lähteet 56

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää symmetrisen harjapalkin laskentaohjelma, joka auttaa suunnittelemaan liimapuisia harjapalkkeja. Harjapalkin mitoituksessa noudatetaan Eurokoodi 5:n ohjeita. Työssä hyödynnetään myös liimapuukäsikirjoja, joissa käsitellään liimapuuta tarkemmin ja jotka sisältävät hyödyllisiä ohjeita harjapalkkien mitoitukseen. Lisäksi työssä otetaan huomioon RIL 205-1-2017:n mukaiset ehdot.

Harjapalkki toimii hallirakennuksen tärkeänä kantavana rakenteena ja se altistuu tasaiselle viivakuormalle, joka muodostuu palkin omasta painosta, kattorakenteen omasta painosta sekä lumikuormasta. Oman painon laskennassa käytetään SFS-EN 1991-1-1:n ohjeita ja lumikuorma määritetään SFS-EN 1991-1-3:n perusteella.

Työssä perehdytään liimapuun mahdollisuuksista rakennusmateriaalina sekä sisäistetään eurokoodi 5:n mukainen puurakenteiden suunnittelu. Opinnäytetyössä lasketaan kuvitteellinen harjapalkki.

Opinnäytetyön tuloksena kehitetään laskentaohjelma symmetrisille harjapalkeille, joka noudattaa eurokoodien vaatimuksia ja tarjoaa työkalun harjapalkkien suunnitteluun. Työn tulokset edistävät liimapuun hyödyntämistä rakennusprojekteissa ja auttavat käyttäjiä harjapalkkien mitoituksessa.

2 Liimapuu

Liimapuu viittaa puurakenteiseen tuotteeseen, joka valmistetaan liimaamalla yhteen useita sahatavaralamelleja. Tämä puutuote koostuu vähintään kahdesta ja enintään 45 mm paksusta lamellista, joiden syysuunta on pituussuunnassa liimapuutuotteessa. Liimapuun ominaisuudet määritellään standardin SFS-EN 14080 mukaisesti. [2.]

2.1 Liimapuun valmistus

Liimapuu valmistetaan kuivaamalla ja lajittelemalla kuusisahatavaraa. Kosteissa olosuhteissa voidaan käyttää mäntyä, joka on painekyllästettyä tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää lehtikuusta. [3.]

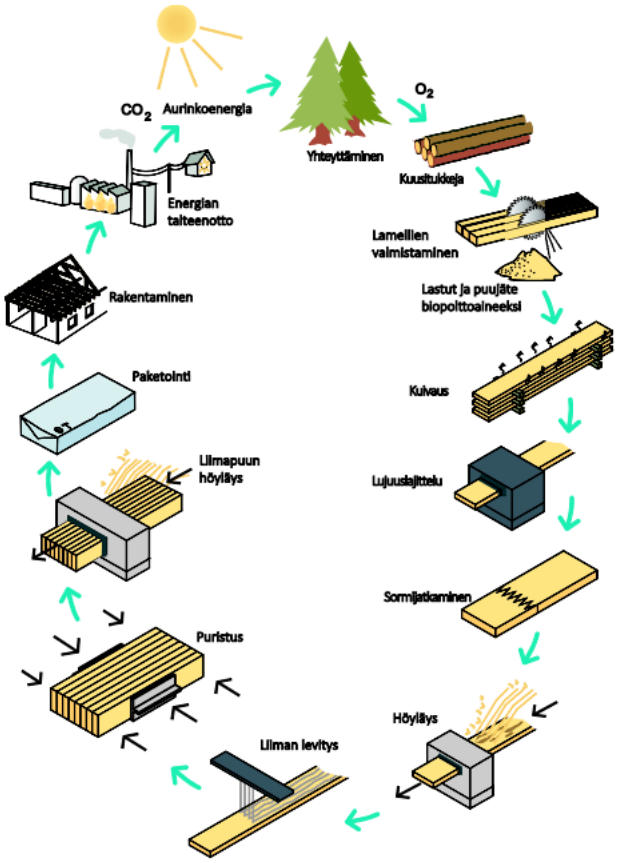
Yleensä sahatavara toimitetaan liimapuutehtaalle sahatehtaalta mahdollisimman nopeasti tai suoraan. Lamellien kosteuspitoisuus liimattaessa on oltava 6–15 painoprosentin välillä. Tämän lisäksi vierekkäisten lamellien kosteuspitoisuuden voi olla enintään 5 painoprosenttia. Tämä varmistaa parhaimman liimasauman lujuuden, sopivan lopputuotteen kosteuspitoisuuden sekä estää haitallisen halkeilun. [3.]

Liimapuun poikkileikkaus, joka on tehty saman lujuusluokan lamelleista, kutsutaan homogeeniseksi liimapuuksi. Yleisimmässä tapauksessa uloimmille lamelleille kohdistuu suurempi jännitys, joten uloimmat lamellit voidaan valita paremman lujuusluokan puusta. Tällaisen valmistustavan tuotetta kutsutaan yhdistetyksi liimapuuksi. [3.]

Pitkät lamellit saadaan, kun liimataan yksittäiset lamellit sormijatkoksilla. Tämän jälkeen katkaistaan lamellit sopivan pituisiksi sekä pinotaan päällekkäin. Yhdistetyssä liimapuussa otetaan huomioon lamellien järjestys. [3.]

Lamellien sydänpuoli käännettään aina samaan suuntaa, jotta vähennetään sisäiset jännitykset. Uloimmat lamellit käännetään kuitenkin sydänpuoli ulospäin. Sormijatkoksilla liimatut lamellit saavat kovettua muutaman tunnin. Seuraavaksi lamellien lapepinnat höylätään ja ne liimataan heti tämän jälkeen. Liimattu lamellinippu laitetaan puristimeen ja puristetaan oikealla paineella. [3.]

Tämän jälkeen liiman annetaan kovettua hallituissa kosteus- ja lämpötilasuhteissa. Liiman kovettuessa, poistetaan puristuspaine ja nostetaan höylälle liimapuiset rakennusosat. Viimeisenä rakennusosat viimeistellään halutun laadun mukaan. [3.]



Kuva 1 Liimapuun elinkaari [3.]

2.2 Liimapuun lujuusominaisuudet

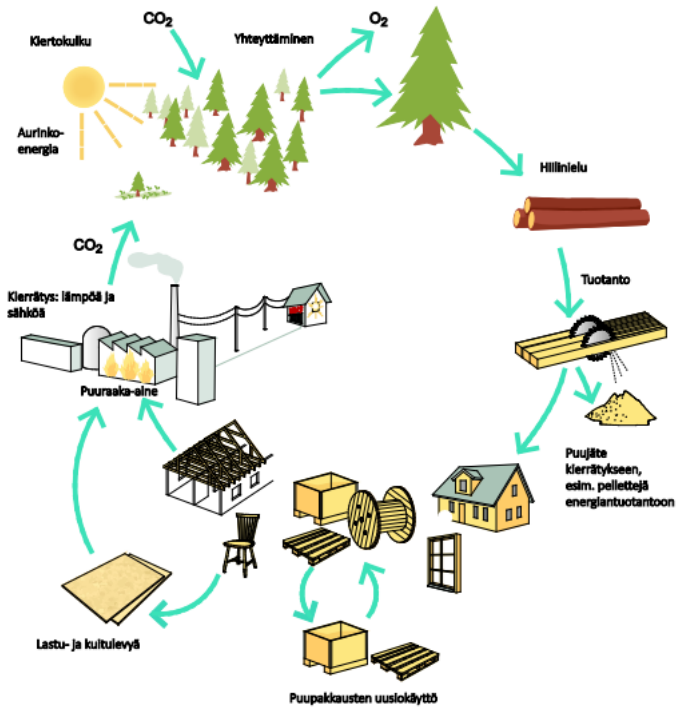
Liimapuun lujuusominaisuudet ovat yhdenmukaisia perinteisen sahatavaran kanssa. Lujuus riippuu jännityksen suunnasta suhteessa puusyihin. Lujuus vähenee kosteus-suhteen kasvaessa ja kuormitusajan pidentyessä. Liimapuiset rakenneosat omistavat kuitenkin keskimäärin suuremman lujuuden sekä pienemmän lujuuden vaihtelun kuin samanlaiset rakenneosat, jotka on tehty perinteisestä sahatavarasta.

Rakennesahatavaran heikoin poikkileikkaus sijaitsee yleensä oksan, sormijatkoksen tai muun heikentyneen kohdalla. Heikoin poikkileikkaus määrää rakennesahatavaran suurimman lujuuden. [3.]

2.3 Ympäristöystävällisyys

Kestävässä metsätaloudessa puun hakkuumäärä ei ylitä metsien kasvua. Tällöin raaka-aine uusiutuu jatkuvasti ja puu palautetaan kiertojärjestelmään aiheuttamatta ilmastoon haitallisia kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä tekee puun käytöstä edullisempaa ympäristö- ja ilmastonnäkökulmasta muihin rakentamiseen käytettyihin materiaaleihin verrattuna. [3.]

Liimapuun tuotantotavat ovat ympäristöystävällisiä. Lamellit, joista liimapuu valmistetaan säilyttävät ympäristöneutraaliuden koko elinkaarensa ajan. Tämän lisäksi liimapuuta voidaan hyvin helposti hyödyntää uudelleen, käyttää uusiokäyttöön tai kierrättää energiantuotantoon. [3.]



Kuva 2 Puisten tuotteiden kiertokulku [3.]

2.4 Liimapuun käyttökohteita

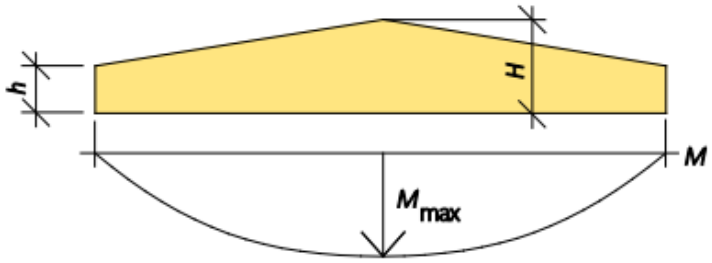
Liimapuu on ensisijaisesti suunniteltu kantaviin rakenteisiin. Sen sovellusalueet ovat laajat. Liimapuurunkoisia rakennuksia voidaan käyttää esimerkiksi liikuntarakennuksina, jäähalleina, kirjastoina, päiväkoteina, kouluina ja kauppakeskuksina. Viime vuosina on myös rakennettu useita liimapuurunkoisia kerrostaloja. Lisäksi liimapuuta hyödynnetään infrarakentamisessa kuten siltarakenteissa. [1.]

2.5 Harjapalkki

Yksinkertaisin ja yleisin liimapuurakenteen muoto koostuu palkista, joka on vapaasti tuettu kahdella pilarilla. Pilarit sijaitsevat palkin molemmissa päädyissä. Suurilla

jänneväleillä voi olla taloudellisesti kannattavaa käyttää palkkeja, joiden poikkileikkaus vaihtelee palkin voimavaikutusten mukaan. [1.]

Tällaisessa tilanteessa harjapalkki voi olla hyvä esimerkki. Harjapalkkia käytetään yleisesti kattorakenteissa, ja sen tehtävänä on toimia katon kannattajana ja tukena. Harjapalkin tärkein tehtävä on jakaa katon aiheuttama kuorma tasaisesti ja kestävästi koko rakenteelle. Näin varmistetaan rakenteen vakaus ja kestävyys.



Kuva 3 Harjapalkki ja tasaisen kuorman aiheuttama momenttikuvio [3.]

3 Suunnittelun perusteet

3.1 Käytettävät eurokoodit

Eurokoodit ovat joukko suunnittelustandardeja, jotka tarjoavat ohjeita rakenteiden suunnitteluun. Ne kattavat kaiken suunnittelun perusperiaatteista ja kuormitusten arvioinnista aina yksityiskohtaisiin suunnitteluratkaisuihin asti. Eurokoodit toimivat yhdessä

toteutus- ja tuotestandardien kanssa muodostaen yhtenäisen kokonaisuuden, joka ohjaa rakenteiden suunnittelua ja toteutusta.

Eurokoodi 5 on sovellettava silloin, kun puuta käytetään suunniteltaessa rakennuksia. Tämä standardi sisältää ohjeet, jotka liittyvät rakenteiden turvallisuuteen, toimivuuteen ja suunnitteluun. Puurakenteita suunnitteleva rakennusinsinööri, joka käyttää eurokoodi 5:n ohjeita täyttää vaatimukset, jotka on esitetty standardissa EN 1990. [5.]

EN 1991 käsittelee kuormat. Standardissa EN 1991-1-1 annetaan ohjeet ja määräykset rakennusten ja maa- sekä vesirakennuskohteiden rakennesuunnittelulle. Siinä käsitellään erilaisia suunnitteluperusteita ja kuormia, jotka liittyvät rakennusmateriaaleihin, varastoitaviin tuotteisiin, rakennusosien painoon ja rakennusten hyötykuormiin. [7.]

Standardi EN 1991-1-3 sisältää ohjeita lumi- ja lumikuormien määrittämiseksi rakennusten ja maa- sekä vesirakennuskohteiden rakennesuunnittelussa. Tämä standardi tarjoaa suunnittelijoille periaatteita ja tietoa siitä, miten lumikuormat tulee ottaa huomioon rakenteita suunnitellessa. [8.]

4 Eurokoodin mukainen mitoitus

4.1 Kuormien ominaisarvot

Rakennuskohteessa yleisesti käytetään yhtä ominaisarvoa, joka määritellään nimellismittauksien ja nimellistilavuuspainojen avulla. Nimellismitat viittaavat piirustuksissa esitettyihin mittauksiin. Nimellistilavuuspainot puolestaan perustuvat todellisuutta vastaaviin arvoihin, jotka on esitetty Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-1. [9.]

4.2 Oma paino

Liimapuiselle rakennusmateriaalille käytetään tilavuuspainoa 5 kN/m³ [9]. Harjapalkin geometristen ominaisuuksien takia tilavuuspaino kerrotaan korkeuksien keskiarvolla ja paksuudella. kuorma saadaan seuraavalla kaavalla

$$g_{k,palkki} = \frac{H_1 \times H_2}{2} \times b \times 5\ \frac{kN}{m^3} \quad (1)$$

missä,

H_1 on harjapalkin korkeus tuella

H_2 on harjapalkin korkeus harjalla eli palkin keskellä

b on palkin leveys

4.3 Lumikuorma

Kattojen ominaislumikuorma lasketaan kertomalla maanpinnan lumikuorma muotokertoimella sekä tuulensuojakertoimella. RIL 205-1-2017 esitetään seuraava kaava ominaislumikuorman määrittämiseksi [9]:

$$q_k = \mu_i \times C_e \times s_k \quad (2)$$

missä,

μ_i on muotokerroin

C_e on tuulensuojakerroin

s_k on maanpinnan lumikuorman ominaisarvo

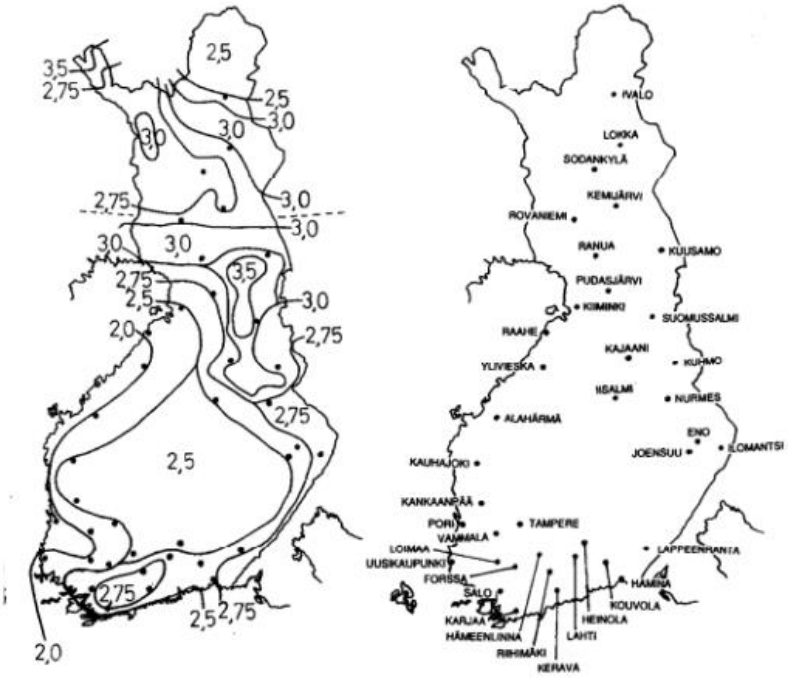
Liimapuukäsikirjassa esitetään suositeltavia kaltevuuskulmia harjapalkeille, ja nämä kulmat vaihtelevat 1,4–6° välillä [3]. Kun kyseessä on tällainen tilanne, jossa kaltevuuskulmat pysyvät suositeltavien rajojen välillä, muotokertoimeksi saadaan arvo 0,8.

Tuulensuojakertoimen arvo riippuu maastotyypistä. RIL 205-1-2017 jakaa arvot kolmeen eri ryhmään. Ryhmä 1 on tuulinen maastotyyppi, joka kuvataan seuraavasti: kyseessä on laakea maasto, jossa ei ole esteitä ja joka on avoin joka suuntaan. Tällaisessa maastossa korkeat rakennukset tai puut eivät tarjoa suojaa tai suojaavat vain vähän. Tässä maastotyypissä tuulensuojakerroin on arvoltaan 0,8. [9.]

Ryhmä 2 on normaali maastotyyppi, joka tarkoittaa aluetta, jolla tuuli ei merkittävästi poista lunta rakennuskohteesta johtuen maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden vaikutuksesta. Tällaisessa maastotyypissä käytetään suojakertoimen arvona 1,0. [9.]

Ryhmä 3 on suojainen maastoluokka. Suojainen maasto viittaa alueeseen, jossa tarkasteltava rakennuskohde sijaitsee merkittävästi alempana kuin ympäröivä maasto tai se on ympäröity korkeilla puilla tai rakennuskohteilla, jotka ovat itseään korkeampia. Tällaisessa maastoluokassa käytetään tuulensuojakertoimena arvoa 1,2. [9.]

Maanpinnan lumikuorman s_k ominaisarvot ovat nähtävänä kuvassa 5.



Kuva 4 Maanpinnan lumikuorman ominaisarvot [9.]

4.4 Murtorajatila

Rajatilamitoituksessa otetaan huomioon materiaalien ominaisuudet, niiden käyttäytyminen ajan myötä ja ilmasto-olosuhteet, jotka vaikuttavat rakenteeseen. Murtorajatila koskee tilanteita, joissa rakenteen turvallisuus tai varmuus on kyseessä, näitä tilanteita voi olla esimerkiksi rakenteen vaurioituminen, murtuminen tai tasapainon menetys. Kun tarkastellaan rakenteen kestävyyttä, mitoituskuorma lasketaan aikajaksolle käyttäen seuraavaa kuormitusyhdistelmää [9.]

$$\begin{cases} 1{,}15\ K_{FI} G_{kj} + 1{,}5\ K_{FI}\ Q_{k,1} + 1{,}5 \sum_{i>1} \psi_{0,i}\ Q_{k,i} \\ 1{,}35\ K_{FI}\ G_{kj} \end{cases} \quad (3)$$

missä,

G_{kj} on pysyvien kuormien ominaisarvo

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

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

K_{FI} on seuraamusluokasta riippuva kerroin

$\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman yhdistely kerroin

K_{FI} kertoimen voi katsoa seuraavasta taulukosta.

Taulukko 1 Rakennusten ja rakenteiden seuraamusluokkien luokittelu [9]

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko [1] jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten • yli 8-kerroksiset [2] asuin-, konttori- ja liikerakennukset • konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot • raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisten maalajien alueilla siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten esim. varastot Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten − matalalla olevat alapohjat ilman kellaritiloja − ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne − sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana − standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokkien (structural class) II ja III muotolevyrakenteet. − standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokan (structural class) I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille [3].

[1] ylä- ja välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena. Rakennuksen koostuessa erilaisista toisistaan riippumattomista rakennusosista määritetään kunkin osan seuraamusluokka erikseen.
[2] kellarikerrokset mukaan luettuina.
[3] ei koske kuormituksia, jotka syntyvät, kun muotolevyrakenteita käytetään siirtämään levytason suuntaisia leikkausvoimia (levyvaikutuksen hyväksikäyttö) tai normaalivoimia.

Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimen voidaan katsoa seuraavasta taulukosta.

Taulukko 2 Yhdistely kertoimet muuttuville kuormille [9.]

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, 30kN < ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3)*) kun			
$s_k < 2,75$ kN/m^2	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m^2	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma **)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

*) Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä.
Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ-arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.
**) Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.

Puurakenteita suunniteltaessa niihin kohdistuvat kuormat jaetaan eri aikaluokkiin. Näiden aikaluokkien määrittämiseen käytetään tietyn ajanjakson aikana vaikuttavan vakiokuorman kestoa. [9.]

Eurokoodissa kuormat jaotellaan taulukon 2 mukaisesti sekä taulukosta 3 nähdään esimerkkejä kuormista sekä niiden sijoittelu eri aikaluokkiin. [9.]

Taulukko 3 Kuormien aikaluokat [9.]

Kuorman aikaluokka	**Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka**
Pysyvä	yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kuukautta – 10 vuotta
Keskipitkä	1 viikko – 6 kuukautta
Lyhytaikainen	alle yksi viikko
Hetkellinen	

Taulukko 4 kuormien jaottelu eri aikaluokkiin [9.]

Kuorman aikaluokka	**Esimerkkejä kuormista**
Pysyvä	oma paino
Pitkäaikainen	varastoitu tavara
Keskipitkä	välipohjan hyötykuorma, lumi
Lyhytaikainen	lumi, tuuli
Hetkellinen	tuuli, onnettomuuskuorma

4.5 Kestävyyden mitoitusarvot

Lujuusominaisuuden mitoitusarvo X_d lasketaan seuraavasti [9.]

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_m} \tag{4}$$

missä,

X_k on lujuusominaisuuden ominaisarvo

γ_m on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku

k_{mod} on kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

Taulukosta 4 saadaan Suomessa valmistetun Standardin EN 14080 mukaisen liimapuun ja halkaistun liimapuun ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet ja tiheydet yleisimmissä lujuusluokissa.

Taulukko 5 Strandardin EN 14080 mukaisen liimapuun ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet ja tiheydet yleisimmissä lujuusluokissa [9.]

Lujuusluokka		Liimapuu				Halkaistu liimapuu	
		GL24c	GL24h	GL30c[1]	GL30h	GL30cs[1]	GL30hs
Ominaislujuudet (N/mm^2)							
Taivutus	$f_{m,k}$	24	24	30	30	28	28
Veto	$f_{t,0,k}$ $f_{t,90,k}$	17 0,5	19,2 0,5	19,5 0,5	24 0,5	18,7 0,5	22,4 0,5
Puristus	$f_{c,0,k}$ $f_{c,90,k}$	21,5 2,5	24 2,5	24,5 2,5	30 2,5	23,3 3,0	28 3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$ $f_{r,k}$	3,5 1,2	3,5 1,2	3,5 1,2	3,5 1,2	3,5 1,2	3,5 1,2
Jäykkyysominaisuudet (N/mm^2)							
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$ $E_{0,05}$ $E_{90,mean}$	11 000 9 100 300	11 500 9 600 300	13 000 10 800 300	13 600 11 300 300	12 500 10 300 300	13 100 10 800 300
Liukumoduuli	G_{mean} $G_{0,05}$	650 540	650 540	650 540	650 540	650 540	650 540
Tiheydet (kg/m^3)							
Ominaistiheys	ρ_k	365	385	390	430	390	430
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	400	420	430	480	430	480

Taulukosta yleisimpiä liimapuun lujuusluokkia ovat GL24c, GL30c, GL24c ja GL24h. Lujuusluokka ilmaisee palkin ominaisen taivutuslujuuden megapascaleina (MPa). Kirjain "c" tarkoittaa, että liimapuun poikkileikkaus koostuu eri lujuusluokan lamelleista, jotka on yhdistetty toisiinsa. Kirjain "h" puolestaan tarkoittaa, että kaikki lamellit ovat samaa lujuusluokkaa. [11.]

Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluvun suositusarvoja on listattu eri puutavaralle Eurokoodi 5:ssa. Liimapuulle suositeltava arvo on 1,25. [9.]

Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin on nähtävänä taulukosta 5

Taulukko 6 Muunnoskertoimen arvot [9.]

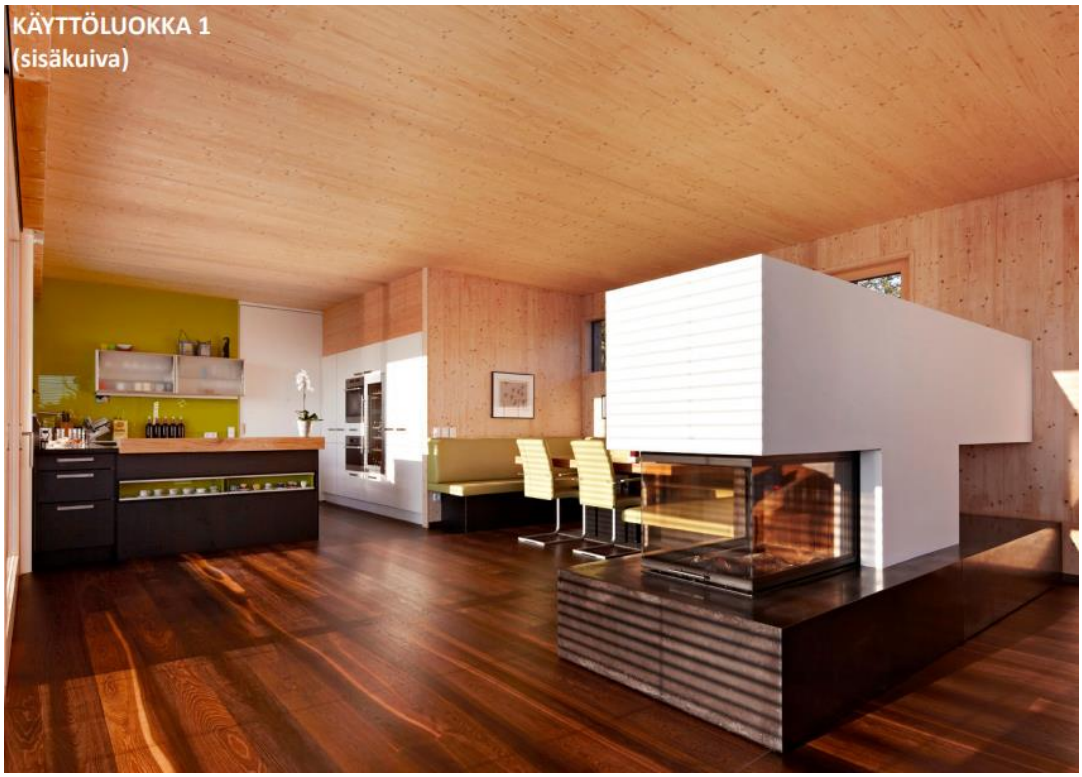
Materiaali	Käyttö-luokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkä-aikainen	Keski-pitkä	Lyhyt-aikainen	Hetkel-linen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri, CLT	1 2 3	0,60 0,60 0,50	0,70 0,70 0,55	0,80 0,80 0,65	0,90 0,90 0,70	1,10 1,10 0,90
Lastulevy P4[1)] ja P5, OSB/2[1)], Kova kuitulevy	1 2	0,30 0,20	0,45 0,30	0,65 0,45	0,85 0,60	1,10 0,80
Lastulevy P6[1)] ja P7, OSB/3 ja OSB/4	1 2	0,40 0,30	0,50 0,40	0,70 0,55	0,90 0,70	1,10 0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA[1)], MBH.HLS, MDF.LA[1)] ja MDF.HLS	1 2	0,20 -	0,40 -	0,60 -	0,80 0,45	1,10 0,80

Kuorman kesto ja puun kosteus vaikuttavat puun lujuuteen ja kestävyyteen. Kerroin ottaa huomioon nämä tekijät ja mahdollistaa oikean lujuusarvon laskemisen erilaisissa olosuhteissa. [9.]

Eurokoodissa on kuvattu käyttöluokkien piirteitä, joiden perusteella rakenteet jaetaan näihin luokkiin. [9.]

Käyttöluokka 1: Tässä käyttöluokassa on tyypillistä, että materiaalien kosteus on lämpötilaa 20 °C. Ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ylittää 65 % vuoden aikana vaan muutamana viikkona. [9.]

Kuvassa 6 on yritetty auttaa havainnoimaan minkälaisessa olosuhteessa käyttöluokan 1 puurakenne voi sijaita.



Kuva 5 Sisätilassa olevat puurakenteet [11.]

Käyttöluokka 2: Tässä käyttöluokassa materiaalien kosteus on lämpötilaa 20 °C. Ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ylittää 85 % vuoden aikana vain muutamana viikkona. [9.]

Kuvassa 7 on yritetty auttaa havainnoimaan minkälaisessa olosuhteessa käyttöluokka 2 puurakenne voi sijaita.

Kuva 6 Käyttöluokka 2 olosuhteissa oleva puurakenne [11.]

Käyttöluokka 3: Tässä käyttöluokassa ilmasto-olosuhteet johtavat korkeampiin kosteusarvoihin verratessa käyttöluokka 2. [9.]

Kuvassa 8 on yritetty auttaa havainnoimaan minkälaisessa olosuhteessa käyttöluokka 2 puurakenne voi sijaita.

Kuva 7 Käyttöluokassa 3 oleva puurakenne [11.]

Harjapalkit kuuluvat yleensä käyttöluokkaan 1, koska ne sijoittuvat tyypillisesti hallin sisätiloihin. Hallin sisätilat tarjoavat suojatun ja kontrolloidun ympäristön, jossa kosteusolosuhteet pysyvät melko tasaisina. Tällaisessa ympäristössä harjapalkit eivät altistu merkittäville kosteusvaihteluille tai korkeille kosteusarvoille, jotka voisivat heikentää puun lujuutta ja kestävyyttä.

5 Harjapalkin mitoituksen tarkastelukohdat

Mitoituksen kannalta eurokoodi 5, RIL 205-1-2017 ja liimapuukäsikirjat ovat antaneet ohjeita ja säännöksiä. Niistä on saatu arvokasta tietoa liimapuisen harjapalkin mitoittamiseen, ja näitä ohjeita on käytetty tässä työssä.

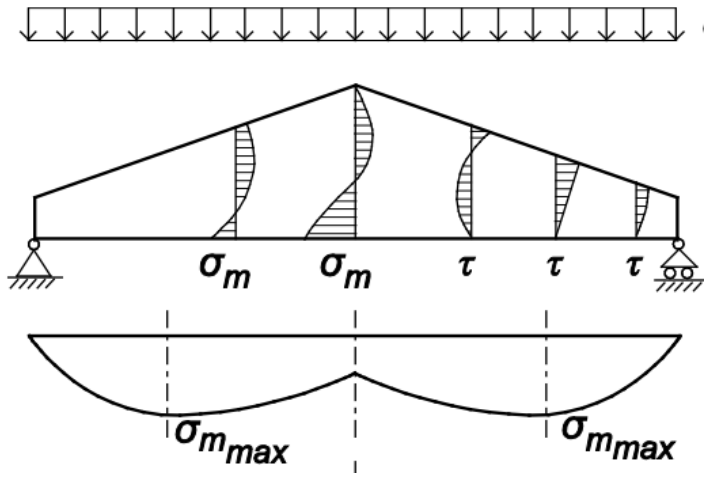
Seuraavaksi keskitytään harjapalkin mitoituskohdissa seuraaviin seikkoihin:

- Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa
- Taivutuskestävyys harjalla
- Poikittainen vetokestävyys harjalla
- Yhdistetty poikittainen veto- ja leikkauskestävyys
- Leikkauskestävyys tuella
- Tukipainekestävyys
- Kiepahduskestävyys
- Taipuma-arvio
- Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys.

Seuraavaksi tässä työssä käydään läpi yksityiskohtaisesti oheisten mitoituskohtien kaavat ja ehdot.

5.1 Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa

Tasaisesti kuormitetun harjapalkin maksimi taivutusmomentti sijaitsee palkin jännevälin keskellä. Harjapalkin muuttuvan poikkileikkauksen takia tämä ei tarkoita, että kriittinen taivutusjännitys sijaitsee keskellä. Kuvassa 9 huomataan, kuinka taivutusjännitys kasvaa ja pienenee palkin jännevälissä.



Kuva 8 Taivutusjännitykset [3.]

Eurokoodi 5 mukaan on osoitettava, että kestävyydet toteuttavat seuraavan ehdon poikkileikkauksen viistetyn reunan korkeudella [9.]

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} f_{m,d} \quad (5)$$

missä,

$\sigma_{m,\alpha,d}$ on taivutusjännityksen mitoitusarvo

$k_{m,\alpha}$ kertoimeen vaikuttaa onko viistetty reuna vedetty tai puristettu

kun viistetty reuna on vedetty [9].

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0{,}75\ f_{v,d}} \tan\alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d}} tan^2\ \alpha\right)^2}} \quad (6)$$

ja kun viistetty reuna on puristettu

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1{,}5\ f_{v,d}} \tan\alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} tan^2\ \alpha\right)^2}} \quad (7)$$

missä,

$f_{v,d}$ on leikkauslujuuden mitoitusarvo

$f_{t,90,d}$ on poikittaisen vetolujuuden mitoitusarvo

$f_{c,90,d}$ on poikittaisen puristuslujuuden mitoitusarvo

α on viistetyn reunan ja syysuunnan välinen kulma

Taivutusjännitys lasketaan, kun palkkiin kohdistuva taivutusmomentti jaetaan palkin taivutusvastuksella. Harjapalkilla kriittisin taivutusjännitys ei sijaitse jännevälin keskellä,

jossa on suurin taivutusmomentin arvo. Tämän takia on selvitettävä harjapalkille mitoittava taivutusmomentti sekä mitoittava taivutusvastus. [2.]

Mitoittava taivutusjännitys lasketaan seuraavalla kaavalla [9.]

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} \quad (8)$$

missä,

M_d on taivutusmomentti mitoittavassa kohdassa, joka lasketaan seuraavalla kaavalla [11]:

Kaava 1

$$M_d = \frac{pd \times x_m}{2} \times (L - x_m) \quad (9)$$

p_d on harjapalkkiin kohdistuva viivakuorma

x_m on rasitetuimman paikan etäisyys tuelta ja se ratkaistaan seuraavalla kaavalla [3]:

$$x_m = \frac{L \times H_1}{2 \times H_2} \quad (10)$$

H_1 on palkin korkeus tuella

H_2 on palkin korkeus harjalla

L on palkin jänneväli

Kaavassa 8 palkin leveys on b ja h on harjapalkin korkeus paikassa x_0. Tämän korkeuden selvittämiseksi käytetään kaavaa [3]:

$$h_x = h = H_1 \times \left(2 - \frac{H_1}{H_2}\right) \quad (11)$$

5.2 Taivutuskestävyys harjalla

Eurokoodi 5 mukaan on osoitettava, että harjavyöhykkeessä kestävyydet toteuttavat seuraavan ehdon [9]:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \, f_{m,d} \quad (12)$$

missä,

k_r on alapinnaltaan suorilla harjapalkeilla 1,0 [9]

$\sigma_{m,d}$ lasketaan tässä tapauksessa seuraavalla kaavalla [9]:

$$\sigma_{m,d} = k_l \times \frac{6 \times M_d}{b \times H_1} \quad (13)$$

missä,

M_d on taivutusmomentti harjakorkeuden kohdalla. Taivutusmomentti tässä tapauksessa lasketaan seuraavalla kaavalla

Kaava 2

$$M_d = \frac{pd \times L^2}{8} \quad (14)$$

k_l kerroin lasketaan harjapalkille seuraavalla kaavalla [9]:

p_d on harjapalkkia kuormittava viivakuorman suunnittelu arvo

L on palkin jänneväli

[9].

$$k_l = 1 + 1{,}4 \tan \alpha + 5{,}4 \tan \alpha^2 \quad (15)$$

5.3 Harjapalkin leikkauskestävyys tuella

Harjapalkille muodostuu tasaisesta kuormituksesta leikkausvoimaa tukien kohdalla. Tasaisesti kuormitetun harjapalkin leikkausvoiman suuruus saadaan seuraavalla kaavalla

$$V_d = \frac{p_d \times L}{2} \quad (16)$$

missä,

p_d on harjapalkkia kuormittava viivakuorman suunnittelu arvo

L on palkin jänneväli

Eurokoodi 5 on antanut tarkastelu kohdalle seuraavan ehdon

$$\tau_d \leq f_{v,d} \tag{17}$$

missä,

$f_{v,d}$ on leikkauslujuuden mitoitusarvo [9.]

τ_d on leikkausjännityksen mitoitusarvo, joka lasketaan seuraavalla kaavalla [9.]

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{b_{eff} \times H_1} \tag{18}$$

b_{eff} on harjapalkin tehollinen leveys, jolla halkeamien vaikutus otetaan huomioon. [9.] Liimapuupalkille tehollinen leveys lasketaan, kun palkin leveys kerrotaan arvolla 0,67. Tehollista leveyttä käytetään vain niissä tapauksissa, jossa palkki sijaitsee lämmitetyssä sisätilassa tai vastaavassa kosteusolosuhteessa. Muussa tapauksessa palkin leveyttä ei kerrotta millään arvolla. [9.]

Tasaisella kuormalla kuormitetun harjapalkin leikkausvoimaa voidaan pienentää tuella. Tällöin leikkausvoima lasketaan seuraavalla kaavalla [9.]

$$V_{red} = V \cdot \left(1 - \frac{2h \cdot l_A}{l}\right) \quad (19)$$

5.4 Syysuuntaan vastaan kohtisuoran vetokestävyys harjalla

Eurokoodi 5 mukaan on osoitettava, että syysuntaan vastaan kohtisuoran kestävyys täyttää seuraavan ehdon [9]:

$$\sigma_{t,90,d} = k_{dis}\, k_{vol}\ f_{t,90,d} \quad (20)$$

missä,

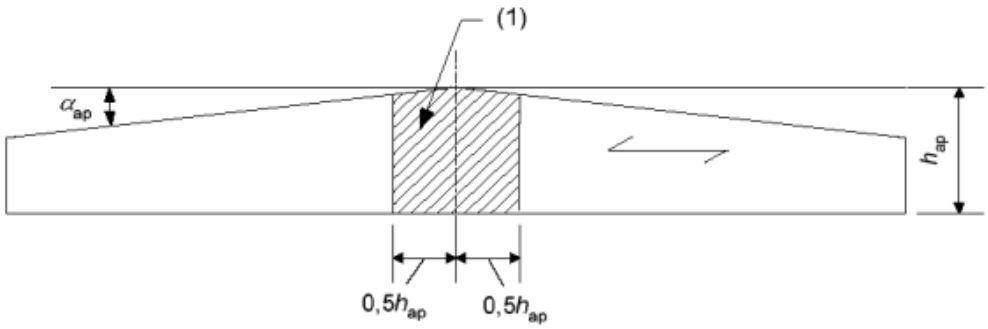
k_{dis} on alapinnaltaan suorille harjapalkille 1,4 [9]

k_{vol} liimapuulle lasketaan seuraavalla kaavalla [9]:

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} \quad (21)$$

V_0 on vertailutilavuus, jolle käytetään arvoa 0,01 m^3 [9]

V on kuvan 10 mukainen harjavyöhykkeen tilavuus



Kuva 9 harjavyöhykkeen tilavuus [5.]

Taivutusmomentin aiheuttama syysuuntaa vastaan kohtisuora vetojännitys lasketaan seuraavalla kaavalla [9.]

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \times \frac{6 \times M_d}{b \times {H_2}^2} \tag{22}$$

missä,

k_p lasketaan harjapalkille seuraavalla kaavalla [9.]

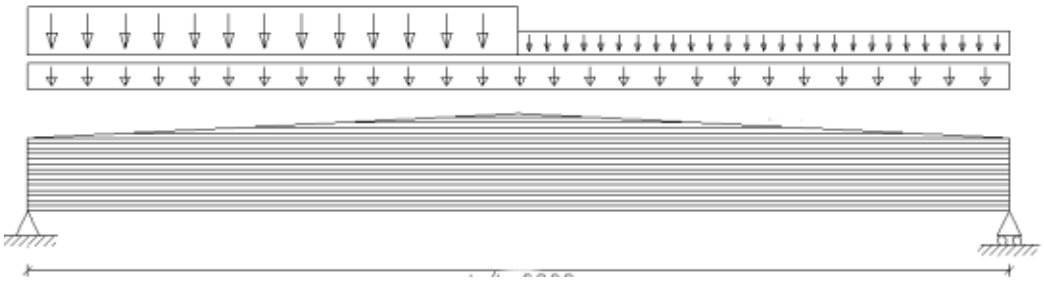
Kaava 3 [9]:

$$k_p = 0{,}2 \times \tan \alpha \tag{23}$$

5.5 Yhdistetty poikittainen veto- ja leikkauskestävyys

Puuinfon sivuilla löytyvien koulutusmateriaalissa on annettu selkeät ohjeet, kuinka tarkastellaan seuraavanlainen tapaus harjapalkille. Tämän tapauksen tarkastelussa on ajateltu harjapalkin mitoituskuorman muodostuvan siten, että omat painot kuormittavat

palkkia koko jännevälin matkalla 100 % mutta lumikuorma kuormittaa palkkia jännevälin keskeltä katsottuna vasemmalla puolella 100 % ja oikealla puolella 50 %. Tällä tavoin saadaan palkin harja-alueeseen leikkausta ja poikittaista vetoa. [11.]



Kuva 10 Kuormitustapaus 2 [11.]

Kuormitustapauksen taivutusvoiman suurus sekä leikkausvoiman suuruus on laskettava ja kestävyydet tulee täyttää seuraava ehto [11]:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \times k_{vol} \times f_{t,90,d}} \leq 1{,}0 \tag{24}$$

missä,

τ_d on leikkausjännityksen suunnittelu arvo ja se lasketaan harjapalkille seuraavalla kaavalla [11]:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{b \times H_2} \tag{25}$$

Kaavassa 20 on huomioitava harjapalkin tehollinen leveys. [9.] Kohtisuoran vetojännityksen syysunta lasketaan samalla tavalla kuin kaavassa 16, mutta ainoana erona on taivutusmomentin suuruus.

5.6 Kohtisuora puristus syysuuntaa vastaan

Tarkastelussa seuraavan ehdon tulee olla voimassa [9]:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} f_{c,90,d} \tag{26}$$

missä,

$\sigma_{c,90,d}$ on puristusjännityksen arvo, joka vaikuttaa kosketuspinnalla

$f_{c,90,d}$ on puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuorassa syysuuntaa

$k_{c,\perp}$ on tukipainekerroin, joka lasketaan seuraavalla kaavalla [9.]

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \times k_{c,90} \tag{27}$$

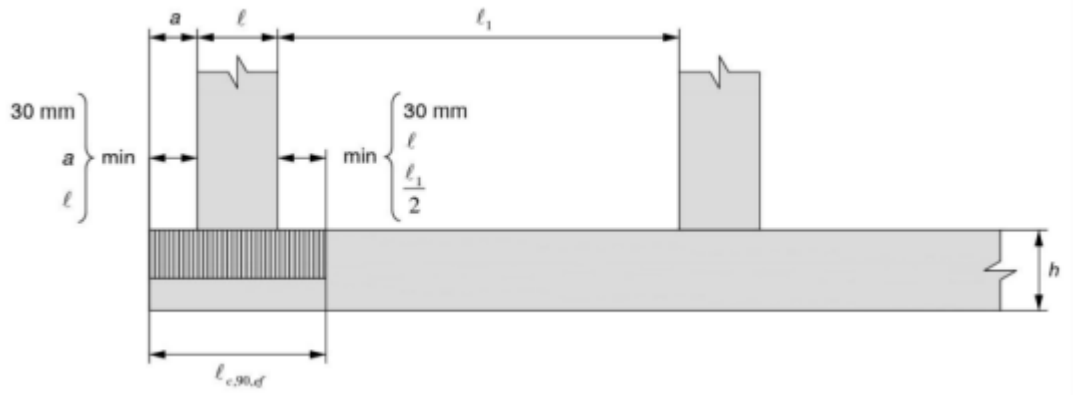
missä,

l on kosketuspinnan pituus puun syiden suunnassa

$l_{c,90,ef}$ on kosketuspinnan tehollinen pituus

$k_{c,90}$ on liimapuisella harjapalkilla 1,5 tai 1,75, jos harjapalkin tukipituus on suurempi kuin 400 mm. [9.]

$l_{c,90,ef}$ on kosketuspinnan tehollinen pituus ja se saadaan, kun lisätään kosketuspituuteen 30 mm molemmille puolille kuitenkin lisäys minimi arvo kuvasta 12 löydetyistä arvoista. [9.]



Kuva 11 Tehollinen kosketuspinnan pituus [9.]

5.7 Taivutetun harjapalkin kiepahduskestävyys

Harjapalkin kiepahduskestävyyttä tarkastellaan sen mitoittavassa kohdassa. Yleensä harjapalkille, joka toimii katon kantajana, on suunniteltu kiepahdustuet esimerkiksi kattoelementit tai katto-orret. [3.]

Kun momentti vaikuttaa vain vahvemman akselin y suhteen, on osoitettava, että kestävyydet täyttävät seuraavan ehdon [5]:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d} \tag{28}$$

missä,

$\sigma_{m,d}$ on taivutusjännityksen mitoitusarvo

$f_{m,d}$ on taivutuslujuuden mitoitusarvo

k_{crit} on kerroin, joka määrittyy seuraavasti [9].

Jos palkin suhteellinen hoikkuus, jota merkitään $\lambda_{rel,m}$ on pienempi tai yhtä suuri kuin 0,75 kerroin saa arvoksi 1. [9.]

Jos suhteellinen hoikkuus on suurempi kuin 0,75, mutta pienempi kuin 1,4 suhteellinen hoikkuus saadaan arvo laskemalla $1{,}56 - 0{,}75 \times \lambda_{crit}$ [9].

Jos suhteellinen hoikkuus on suurempi kuin 1,4 saadaan arvo laskemalla $\frac{1}{\lambda_{rel,m}{}^2}$ [9].

Palkit, jotka omaksuvat suorakaide muotoisen poikkileikkauksen suhteellinen hoikkuus saadaan laskettua seuraavalla kaavalla [9]:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \tag{29}$$

missä,

$f_{m,k}$ on taivutuslujuuden ominaisarvo

$\sigma_{m,crit}$ on kriittinen taivutusjännitys ja se lasketaan seuraavalla kaavalla [9.]

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0{,}78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0{,}05} \quad (30)$$

missä,

b on palkin leveys

h on palkin korkeus

l_{ef} on tehollisen pituuden suhde jänneväliin ja se on taulukon 6 mukainen arvo [9]:

Taulukko 7 tehollisen pituuden suhde jänneväliin [9]

Palkin tuenta	**Kuormituksen tyyppi**	ℓ_{ef}/ℓ^a
Vapaasti tuettu	Vakiomomentti	1,0
	Tasaisesti jakautunut kuorma	0,9
	Pistekuorma jänteen keskellä	0,8
Uloke	Tasaisesti jakautunut kuorma	0,5
	Pistekuorma vapaassa päässä	0,8

[a] Tehollisen jännevälin ℓ_{ef} ja todellisen jännevälin ℓ suhde on voimassa palkilla, joka ei tuillaan pääse kiertymään pituusakselin ympäri ja johon kuormitus vaikuttaa painopisteen korkeudella. Jos kuormitus vaikuttaa palkin puristetun reunan korkeudella, tehollisen pituuden ℓ_{ef} arvoa suurennetaan mitan $2h$ verran, ja sitä voidaan pienentää mitan $0{,}5h$ verran, jos kuormitus vaikuttaa vedetyn reunan korkeudella.

5.8 Harjapalkin lopputaipuma keskellä

Tässä työssä on laskettu taipuma-arvio Liimapuukäsikirjan mukaan, jossa palkin taipuma on laskettu käyttörajatilan kuormitusyhdistelmällä. Taivutetun rakenteen taipumat aiheutuvat taivutusmomentin lisäksi leikkausvoimista [2.]. Työssä on laskettu erikseen hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta. Pysyvät kuormat ovat harjapalkin oma paino

sekä ripustuskuorman paino. Tämän lisäksi palkille aiheutuu hetkellistä taipumaa hyöty-kuormasta, joka on lumikuorma.

Lopputaipuma saadaan laskettua seuraavalla kaavalla [3.]

$$w_{net,fin} = \left(1 + k_{def}\right) \times w_{inst,G} + \left(1 + 0{,}2 \times k_{def}\right) \times w_{inst,Q} \quad (31)$$

missä,

k_{def} on virumaluku ja sen saa seuraavasta taulukosta [9.]

Taulukko 8 Virumaluvun arvot [9.]

Materiaali	Standardi	Käyttöluokka		
		1	2	3
Liimapuu	EN 14080	0,6	0,8	2,0

$w_{inst,G}$ on hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta, joka lasketaan seuraavalla kaavalla

$$w_{inst,G} = \frac{5}{384} \times \frac{p_{g,k} \times L^4}{E_{0,mean} \times I_y} + 0{,}35 \times \frac{p_{g,k} \times L^2}{G_{0,mean} \times b \times (H_1 + H_2)} \quad (32)$$

jossa,

$p_{g,k}$ on hetkellinen taipuma aiheuttava pysyvä kuorma, joka on laskettu käyttörajatilan kuormitusyhdistelmällä

L on palkin jänneväli

I_y on mitoittavan kohdan jäyhyysmomentti, joka lasketaan seuraavasti $\frac{b \times {h_e}^3}{12}$[3.], jossa h_e on $H_1 + 0{,}33 \times L \times \tan\alpha$ [3].

$w_{inst,Q}$ on hetkellinen taipuma hyötykuormasta, joka lasketaan seuraavalla kaavalla [3]:

$$w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \times \frac{p_{g,s,k} \times L^4}{E_{0,mean} \times I_y} + 0{,}35 \times \frac{p_{g,s,k} \times L^2}{G_{0,mean} \times b \times (H_1 + H_2)} \quad (33)$$

missä,

$p_{g,s,k}$ on hetkellinen taipuma aiheuttava hyötykuorma, joka on laskettu käyttörajatilan kuormitusyhdistelmällä

L on palkin jänneväli

I_y on mitoittavan kohdan jäyhyysmomentti, joka lasketaan seuraavasti $\frac{b \times {h_e}^3}{12}$[3], jossa h_e on $H_1 + 0{,}33 \times L \times \tan\alpha$ [3].

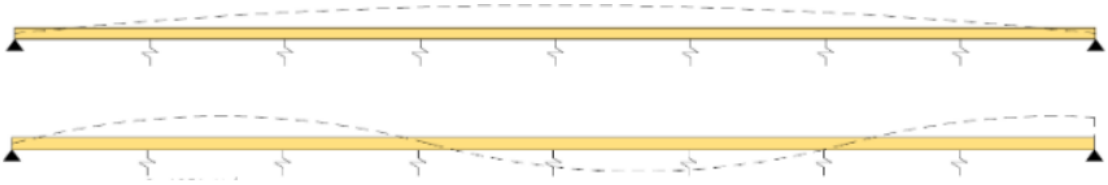
Lopputaipuma täytyy täyttää seuraavan ehdon [9]:

$$w_{net,fin} \leq \frac{L}{300} \quad (34)$$

jossa L on palkin jänneväli

5.9 Kiepahdustuentavoimat

Harjapalkin on mahdollista kiepahtaa kahdessa eri muodossa. 1-muodossa palkki kiepahtaa niin sanotusti yhteen suuntaan. 2-muodossa palkki kiepahtaa s-muodossa eli tapahtuu moniaaltoista kiepahdusta. Kuvassa 13 näkyy kiepahdusmuodot. [11.]



Kuva 12 Kiepahdusmuodot [11]

5.9.1 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys (1.muoto)

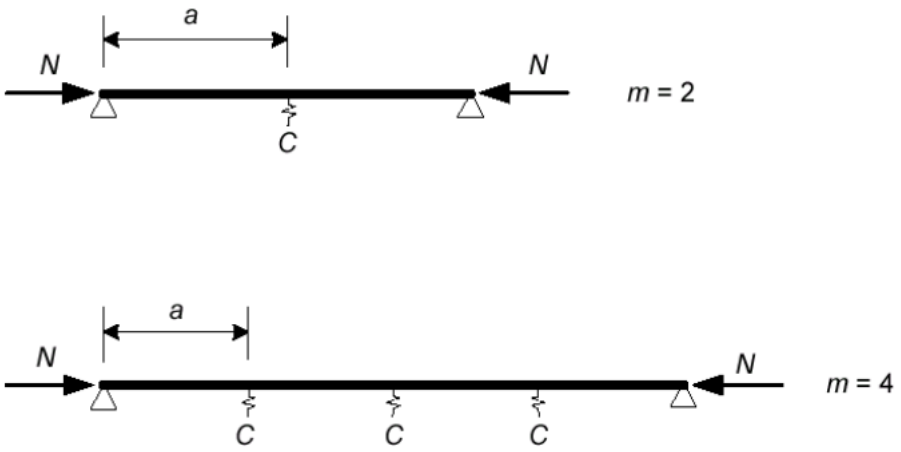
Mikäli kriittinen aallonpituus on suurempi kuin puolet kokonaisjännevälistä voidaan olettaa, että s-muodon kiepahdusta ei tapahdu. Tällaisissa tapauksissa stabiloivat tuen voimat lasketaan 1.muodon mukaan. Jokaisen jousijäykkyyden tulee toteuttaa seuraava ehto [9.]

$$C \geq \left(2 + 2\cos\left(\frac{180}{m}\right)\right) \times \frac{N_d}{a} \tag{35}$$

missä,

m on välein a poikittaistuettujen kenttien lukumäärä ja niitä on oltava vähintään 2 [9]

a on tukiväli. Kuvassa 14 on havainnollistettu tuenta välit sekä poikittaistukien lukumäärä



N_d on rakenneosassa keskimäärin vaikuttavan puristusvoiman mitoitusarvo, joka lasketaan seuraavalla kaavalla [9]:

$$N_d = (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d}{h} \tag{36}$$

missä,

k_{crit} on tukemattoman palkin kiepahduskerroin

M_d on taivutusmomentti mitoittavassa kohdassa

h on palkin korkeus

Kiepahdustukeen syntyvä voima lasketaan seuraavasti $F_d = \frac{N_d}{50 \times L} \times a$ [9], kun kiepahdusmuoto on yhteen suuntaan.

5.9.2 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys (2.muoto)

Kun on todettu, että kiepahdusmuodoltaan aaltoileva lasketaan jousijäykkyys samalailla kuin 1 muodossa ja se on noudattava samaa ehtoa. Palkki, joka on tasavälein tuettu

vähintään neljästä pisteestä, voidaan stabiloivaa voimaa pienentää kertoimella $k_{S,red}$. [9].

$k_{S,red}$ kerroin lasketaan seuraavan kaavan mukaan [9]:

$$k_{S,red} = \frac{a}{l_s - a} \tag{37}$$

missä,

a on tuentaväli

l_s on moniaaltoisen kiepahdusmuodon kriittinen aallonpituus, joka lasketaan seuraavalla

$$l_s = \max \begin{cases} \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C}{a \times E_{0,05} \times I_z}}} \\ 2 \times a \end{cases} \tag{38}$$

missä,

C on kaavan 34 mukaisesti laskettu jousijäykkyys

$E_{0,05}$ on harjapalkin kimmomoduulin ominaisarvo

I_z on palkin heikomman suunnan jäyhyysmomentti

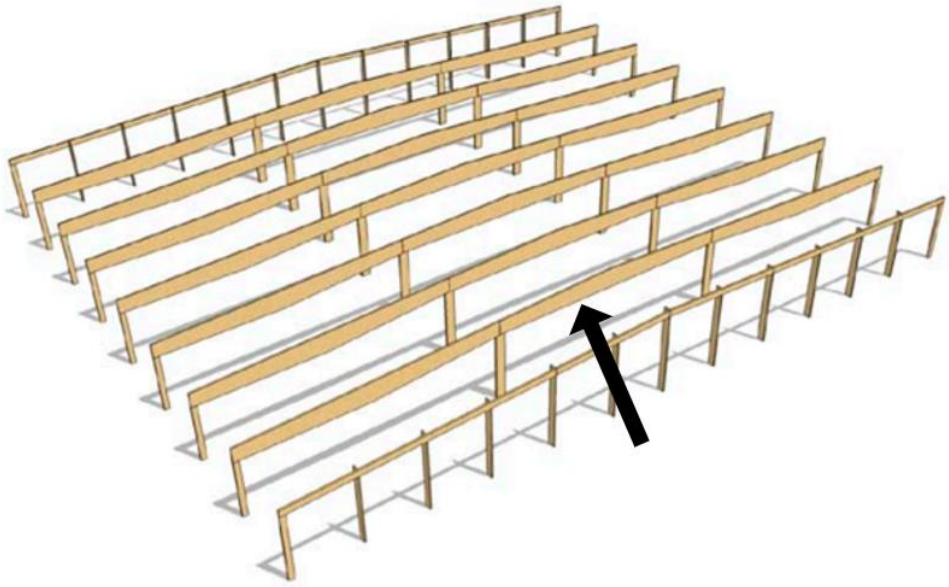
Poikittaistuen kohdalla vaikuttavalle stabiloivalle voima lasketaan tässä tapauksessa $F_d \times k_{S,red}$ [11].

6 Excel-pohjaisen laskentaohjelman esittely sekä harjapalkin mitoituskohtien tarkastelut ohjelmassa

Tämän työn pohjalta laadittiin Excel-pohjainen laskenta ohjelma liimapuisille harjapalkeille. Ohjelmalla on mahdollista tarkastella yksiaukkoista symmetristä harjapalkkia. Ohjelmassa noudatetaan Eurokoodi 5:en, RIL 205-1-2017 ohjeita sekä tiettyjä suosituksia liimapuukäsikirjojen osista 1-3 on otettu huomioon. Laskentaohjelman tarkoitus on olla selkeä sekä helppo käyttöinen. Seuraavassa kappaleessa lasketaan kuvitteellisen harjapalkin mitoituskohdat ja näytetään laskentaohjelman toiminnot sekä verrataan laskenta tuloksia ohjelman antamiin tuloksiin.

6.1 Harjapalkin lähtötiedot

Kuvitteellinen harjapalkki sijaitsee Helsingissä ja on osa teollisuushallia. Teollisuushallin tyyppi on ajateltu olevan 3-laivainen halli, jossa harjapalkki on keskellä kahden pilareiden pystyssä. Kuvasta 14 nähdään kyseisen hallityypin runko.



Kuva 13 3-laivainen hallityypin kantava harjapalkki

Harjapalkin seuraamusluokka on 2 sekä käyttöluokka on 1. Harjapalkin materiaaliksi on valittu liimapuu GL30c. Kuorman aikaluokka on keskipitkä. Harjapalkin geometriset mitat on valittu seuraavanlaisesti → korkeus tuella = 1 300 mm, korkeus harjalla = 1 850 mm, leveys = 240 mm ja jänneväli = 20 000 mm.

Harjapalkkiin kohdistuvat kuormat ovat kattorakenteen oma paino, ripustuskuorman paino, harjapalkin oma paino sekä lumikuorma. Kuormien ominaisarvot ovat seuraavat → katon oma paino = 0,6 kN/m^2, ripustuskuorma = 0,2 kN/m^2, lumikuorma = 2,2 kN/m^2. Harjapalkit ovat jaettu 6 000 mm välein sekä katto on rakenteeltaan 3-aukkoinen.

6.2 Murtorajatilan kuorma palkille

Lasketaan ensimmäisenä lumikuorma kyseiselle harjapalkille. Merkitään lumikuorman osuutta tässä esimerkissä $q_{s,k}$. Koska palkkijako on 6 000 mm ja kattorakenne 3-aukkoinen lumikuorma lasketaan seuraavanlaisesti

→ $q_{s,k} = 2{,}2\frac{kN}{m^2} \cdot 6\,m \cdot 1{,}1 = 14{,}52\frac{kN}{m}$.

Lasketaan seuraavaksi katon painosta aiheutuva kuorma palkille, ripustuskuorma sekä palkin omasta painosta aiheutuva kuorma. Merkitään katosta aiheutuva kuorma tässä esimerkissä $g_{k,1}$. Koska palkkijako on 6 000 mm ja kattorakenne on 3-aukkoinen, lumikuorma lasketaan seuraavanlaisesti → $g_{k,1} = 6\,m \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}6\frac{kN}{m^2} = 3{,}96\frac{kN}{m}$. Merkitään ripustuskuorma $g_{k,2}$. Ripustuskuorman osuus → $g_{k,2} = 6\,m \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}2\frac{kN}{m^2} = 1{,}32\frac{kN}{m}$. Summattaan katon sekä ripustuskuorman painot yhteen saadaan yhteensä → $3{,}96\frac{kN}{m} + 1{,}32\frac{kN}{m} = 5{,}28\frac{kN}{m}$. Merkitään palkin omasta painosta aiheutuvaa kuormaa $g_{k,palkki}$. Palkin osuus → $g_{k,palkki} = \frac{5kN}{m^3} \cdot \frac{(1{,}85\,m + 1{,}30\,m)}{2} \cdot 0{,}240\,m = 1{,}89\frac{kN}{m}$. Summattaan kaikki palkkia kuormittavat omat painot ja saadaan → $3{,}96\frac{kN}{m} + 1{,}32\frac{kN}{m} + 1{,}89\frac{kN}{m} = 7{,}17\frac{kN}{m}$. Merkitään murtorajatilan kuorma palkille p_d. Se lasketaan → $p_d = 1{,}15 \cdot 7{,}17\frac{kN}{m} + 1{,}5 \cdot 14{,}42\frac{kN}{m} = 30\frac{kN}{m}$.

Ohjelmassa syötetään harjapalkin lähtötiedot sekä kuormien ominaisarvot. Tämän jälkeen ohjelma laskee murtorajatila kuorman palkille. Ohjelmassa on mahdollista tarkastella harjapalkkia kahdessa eri kuorman aikaluokassa. Aikaluokat ovat keskipitkä- sekä pysyväaikaluokka. Keskipitkä on yleensä määräävä kuorma, sillä pysyvissä kuormissa otetaan huomioon omista painoista aiheutuvat kuormat palkille. Seuraavasta kuvasta nähdään samojen lähtötietojen syöttäessä mitoitusohjelmaan saamat tulokset ovat samat kuin käsin laskiessa.

HARJAPALKIN MITOITUS EUROKOODI 5 MUKAISESTI			
LÄHTÖTIEDOT			
L =	20 000	mm	*jänneväli*
b =	240	mm	*leveys*
H_1 =	1 300	mm	*tuella korkeus*
H_2 =	1 850	mm	*harjalla korkeus*
α =	3,15	°	*kaltevuus kulma*
KUORMAT			
K_{FI}	1		*kuormakerroin*
k =	1,1		*sekundääri jatkuvuus*
s =	6 000		*palkkijako*
$g_{k,1}$ =	0,6	kN/m²	*katon oma paino*
$g_{k,2}$ =	0,2	kN/m²	*ripustuskuorman oma paino*
$g_{k,palkki}$ =	1,89	kN/m	*palkin oma paino*
$q_{s,k}$ =	2,2	kN/m²	*lumikuorman ominaisarvo*
MITOITUSKUORMA MURTORAJATILASSA			
Kuorman aikaluokka	***keskipitkä***		
p_d	30,0	kN/m	*mitoituskuorma murtorajatilassa*

Kuva 14 Ohjelman 1 osa

6.3 Harjapalkin ominaislujuudet sekä suunnittelulujuuden laskeminen

Tässä esimerkin harjapalkin materiaaliksi on valittuna liimapuu GL30c. Merkitään kuorman keston ja kosteuden muunnoskerrointa k_{mod}. Muunnoskertoimen arvo keskipitkässä aikaluokassa on 0,8. Liimapuun osavarmuusluku $\gamma_m = 1{,}25$. Tarkasteluissa tarvittavia ominaislujuuksia ovat taivutuslujuus ($f_{m,k}$), leikkauslujuus ($f_{v,k}$), puristuslujuus ($f_{c,90,k}$ sekä $f_{c,0,k}$), vetolujuus ($f_{t,90,k}$). Suunnittelu lujuus lasketaan, kun ominaislujuus kerrottaan kuorman keston ja kosteuden muunnoskertoimella ja jaetaan osavarmuusluvun kanssa. Näiden lisäksi taivutuslujuutta on mahdollista korottaa korotuskertoimella, jos harjapalkin korkeus on alle 600 mm. Tässä esimerkissä tämä ehto ei täyty, jolloin taivutuslujuus lasketaan ilman korotuskerrointa. Laskenta ohjelmassa on kuitenkin otettu huomioon tämä ehto.

Seuraavaksi lasketaan tarvittavat suunnittelulujuudet →

1. $f_{m,d} = \frac{0{,}8 \cdot 30\ N/mm^2}{1{,}25} = 19{,}2\ N/mm^2$

2. $f_{v,d} = \frac{0{,}8 \cdot 3{,}5\ N/mm^2}{1{,}25} = 2{,}24\ N/mm^2$

3. $f_{c,90,d} = \frac{0{,}8 \cdot 2{,}5\ N/mm^2}{1{,}25} = 1{,}60\ N/mm^2$

4. $f_{c,0,d} = \frac{0{,}8 \cdot 24{,}5\ N/mm^2}{1{,}25} = 15{,}7\ N/mm^2$

5. $f_{t,90,d} = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}5\ N/mm^2}{1{,}25} = 0{,}32\ N/mm^2$

Ohjelmassa voi valita GL30h, GL30c, GL24h ja GL24c väliltä. Ohjelmassa näytetään kyseisen materiaalin ominaislujuudet sekä ohjelma laskee automaattisesti suunnittelulujuuden. Seuraavasta kuvasta nähdään ohjelman osio, jossa ominaislujuudet sekä suunnittelulujuudet ovat laskettuna.

MATERIAALI OMINAISUUDET						
Liimapuu	GL30c					
k_{mod} =	0,8		*kuorman keston ja kosteuden muunnoskertoimen arvo*			
γ_m =	1,25		*osavarmuusluku*			
k_h =	1,00		*Taivutuslujuuden korotuskerroin*			
$f_{m,k}$	30	N/mm^2	*taivutus*	MITOITUSLUJUUDET :		
$f_{t,0,k}$	19,5	N/mm^2	*veto*	$f_{m,d}$ =	19,20	N/mm^2
$f_{t,90,k}$	0,5	N/mm^2	*veto*	$f_{t,0,d}$	12,48	N/mm^2
$f_{c,0,k}$	24,5	N/mm^2	*puristus*	$f_{t,90,d}$	0,32	N/mm^2
$f_{c,90,k}$	2,5	N/mm^2	*puristus*	$f_{c,0,d}$	15,68	N/mm^2
$f_{v,k}$	3,5	N/mm^2	*leikkaus*	$f_{c,90,d}$	1,60	N/mm^2
$f_{r,k}$	1,2	N/mm^2	*leikkaus*	$f_{v,d}$	2,24	N/mm^2
$E_{0,mean}$	13000	N/mm^2	*kimmomoduuli*	$f_{r,d}$	0,77	N/mm^2
$E_{0,05}$	10800	N/mm^2	*kimmomoduuli*			
$E_{90,mean}$	300	N/mm^2	*kimmomoduuli*			
G_{mean}	650	N/mm^2	*Liukumoduuli*			
$G_{0,05}$	540	N/mm^2	*Liukumoduuli*			

Kuva 15 Ohjelman 2 osio

6.4 Taivutuslujuuden tarkastelu mitoittavassa kohdassa

Tasaisesti kuormittavan harjapalkin mitoittava kohta merkitään tässä työssä X_m. Esimerkin harjapalkin mitoittava kohta on seuraava $X_m = \frac{1\,300\ mm}{1\,850\ mm} \cdot \frac{20\,000\ mm}{2} = 7\,027\ mm$. Selvitetään harjapalkin korkeus mitoittavassa kohdassa. Merkitään tätä korkeutta h_m. Tällöin esimerkki kohteen harjapalkin mitoittava korkeus on seuraava $h_m = 1\,300\ mm + 7\,027\ mm \cdot \tan 3.15° = 1\,686\ mm$. Seuraavaksi on ratkaistava harjapalkkiin kohdistuvan taivutuskuorman suuruus kohdassa X_m. Merkitään tätä taivutuskuormaa $M_{d,mitt}$. $M_{d,mitt} = \frac{30\,\frac{kN}{m} \cdot 20\ m \cdot 7{,}027\ m}{2} \cdot \left(1 - \frac{7{,}027\ m}{20\ m}\right) = 1\,369\ kNm$. Lasketaan taivutusjännityksen suuruus mitoittavassa kohdassa käyttäen saatujen arvojen kanssa. Merkitään tätä $\sigma_{m,d}$. Esimerkissä taivutusjännityksen arvo on $\sigma_{m,d} = \frac{1369\ kNm \cdot 10^6 \cdot 6}{240\ mm \cdot (1\,686\ mm)^2} = 12\ N/mm^2$. RIL 205-1-2017 ehtojen mukaisesti harjapalkin taivutus kestävyyttä heikennettään $k_{m,\alpha}$ kerrtoimella. Esimerkki harjapalkin tapauksessa viistetty reuna on puristettu, joten kerroin lasketaan seuraavasti $k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{19{,}2\frac{N}{mm^2}}{1{,}5 \cdot 2{,}24\frac{N}{mm^2}} \cdot \tan 3{,}15°\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{19{,}2\frac{N}{mm^2}}{1{,}60\frac{N}{mm^2}} \cdot (\tan 3{,}15°)^2\right)^2}} = 0{,}953.$

Eurokoodi 5 mukainen ehto esimerkin harjapalkissa on seuraava $\frac{12\frac{N}{mm^2}}{0{,}953 \cdot 19{,}2\frac{N}{mm^2}} \leq 1 \rightarrow 0{,}66 \leq 1$. Tässä tarkastelussa esimerkki harjapalkki täyttää Eurokoodi 5 ehdon.

Mitoitusohjelma laskee yllä lasketut arvot automaattisesti lähtötietojen sekä materiaalin valinnan perusteella. Tämän lisäksi ohjelma tarkastaa ehdon sekä ilmoittaa täyttääkö kyseinen harjapalkki Eurokoodi 5 ehdon. Seuraavaksi kuva X havainnollistaa mitoitusohjelman kohta, jossa se tarkastaa kyseisen tarkastelukohdan harjapalkille sekä nähdään samat arvot kuin käsin laskennassa saadut.

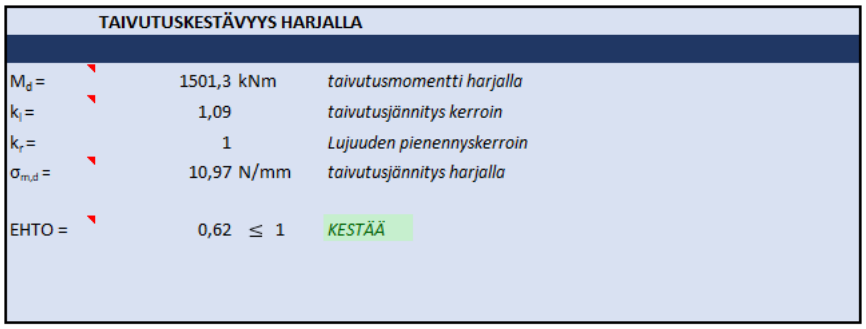
TAIVUTUSKESTÄVYYS MITOITTAVASSA POIKKILEIKKAUKSESSA

X_m =	7027	mm	*mitoittava kohta*
h_m =	1686	mm	*mitoittavan poikkileikkauksen korkeus*
$M_{d,mitt}$ =	1369	kNm	*taivutusmomentti mitoittavassa kohdassa*
$\sigma_{m,d}$ =	12,03	N/mm^2	*taivutusjännitys mitoittavassa kohdassa*
$k_{m,\alpha}$ =	0,953		*kun viistetty reuna puristettu*
EHTO =	0,66 ≤ 1		KESTÄÄ

Kuva 16 Ohjelman osio taivutuskestävyyden tarkastelusta mitoittavassa kohdassa

Taivutuskestävyys harjalla

Seuraavaksi tarkastellaan esimerkki kohteen harjapalkin taivutuskestävyyttä harjan kohdalla. Merkitään taivutusmomenttia M_d. Esimerkissä saadaan $M_d = \frac{30\frac{kN}{m^2} \cdot (20\,m)^2}{8} = 1\,500\ kNm$ suuruiseksi. Seuraavaksi ratkaistaan taivutusjännityskerroin k_l sekä lujuudenpienennyskerroin k_r. $k_l = 1 + 1{,}4 \cdot \tan 3{,}15° + 5{,}4 \cdot \tan 3{,}15°^2 = 1{,}09$. $k_r = 1$ harjapalkeilla. Taivutusjännitys harjan kohdassa $\sigma_{md} = \frac{1\,500\ kNm \cdot 10^6 \cdot 6}{240\ mm \cdot (1\,850\ mm)^2} = 10{,}97\frac{N}{mm^2}$. Harjapalkin käyttöaste $\frac{1{,}09 \cdot 10{,}97\ N/mm^2}{1 \cdot 19{,}2\ N/mm^2} = 0{,}62 < 1$. Harjapalkki toteuttaa tässä tarkastelussa myös Eurokoodi 5 ehdot. Ohjelma on laskenut saman tarkastelun ja saanut samat arvot kuin käsi laskennassa.



TAIVUTUSKESTÄVYYS HARJALLA			
M_d =	1501,3 kNm		*taivutusmomentti harjalla*
k_l =	1,09		*taivutusjännitys kerroin*
k_r =	1		*Lujuuden pienennyskerroin*
$\sigma_{m,d}$ =	10,97 N/mm		*taivutusjännitys harjalla*
EHTO =	0,62	≤ 1	*KESTÄÄ*

Kuva 17 Harjapalkin taivutuskestävyys harjalla

6.5 Leikkaus tuella

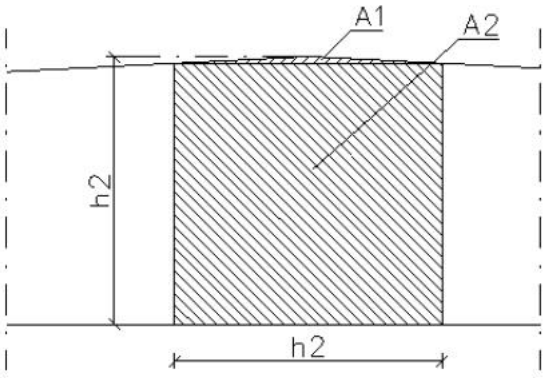
Esimerkissä harjapalkki on tuettu molemmista päästä pilareilla, joiden leveys on 495 mm. Leikkauskestävyyden tarkastelussa harjapalkin mitoittava korkeus sijaitsee 495 mm päästä päädystä. Merkitään tätä korkeutta tässä esimerkissä h_{mitt}. Mitoittava korkeus esimerkissä on $h_{mit} = 1\,300\ mm + \tan 3{,}15° \cdot 495\ mm = 1\,327\ mm$. Leikkausvoima tuella $V_d = \frac{30\frac{kN}{m^2} \cdot 20\ m}{2} = 300\ kN$. Leikkaushalkeilukerroin tässä esimerkissä on 1. Näin voidaan seuraavaksi laskea leikkausjännitys mitoittavassa kohdassa $\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{300\ kN \cdot 10^3}{240\ mm \cdot 1\,327\ mm} = 0{,}94\ N/mm^2$. Harjapalkin leikkauskestävyyden käyttöaste on $\frac{0{,}94\ N/mm^2}{2{,}24\ N/mm^2} = 0{,}42\ < 1$. Esimerkin harjapalkki täyttää Eurokoodi 5 vaatimukset leikkauskestävyyttä tarkastelussa. Seuraava kuva havainnollistaa leikkauskestävyyden tarkastelua ohjelmassa.

LEIKKAUS TUELLA			
$V_{d=}$	300,3	kN	*leikkausvoima tuella*
l =	495	mm	*tuen mitta*
h_{mitt} =	1327	mm	*korkeus tuella*
k_{cr} =	1		*leikkauskestävyyden halkeilukerroin*
τ_d =	0,94	N/mm²	*leikkausjännityksen mitoitusarvo tuen kohdalla*
EHTO =	0,42 ≤	1	KESTÄÄ

Kuva 18 Leikkauskestävyyden laskenta ohjelmassa

6.6 Poikittainen vetokestävyys harjalla

Poikittaista vetojännitystä aiheutuu harjapalkin taivutusmomentista. Taivutusmomentin suuruus on sama kuin aikaisemman tarkastelu kohdassa eli taivutusmomentin suuruus on $M_d = 1\,500\ kNm$. Poikittaista vetojännitystä kerrottaan k_p kertoimella. Kerroin on esimerkki harjapalkissa $k_p = 0{,}2 \cdot \tan 3{,}15° = 0{,}011$. Tämän jälkeen saadaan kyseiselle harjapalkille vetojännityksen suuruudeksi $\sigma_{t,90,d} = 0{,}011 \cdot \frac{1\,500\ kNm \cdot 10^6 \cdot 6}{240\ mm \cdot (1\,850\ mm)^2} = 0{,}12\ N/mm^2$. Esimerkissä k_{dis} kerroin on 1,4. Seuraavaksi lasketaan k_{vol} kerroin. Selvitetään aluksi harjapalkille kuvan 20 mukaisen alueen tilavuus.



Kuva 19 Selvitettävät pinta-alat [11]

Ratkaistaan ensimmäiseksi kuvan A1 mukainen pinta-ala. $A1 = \tan 3{,}15° \cdot (1\,850mm \cdot 0{,}5)^2 = 0{,}047\ m^2$. Kuvan A2 mukainen alue esimerkin harjapalkille on seuraava $A2 = (1{,}850\ m - \tan 3{,}15° \cdot 1{,}850m \cdot 0{,}5) \cdot 1{,}850\ m = 3{,}33\ m^2$. Koko alueen tilavuudeksi saadaan $(0{,}047\ m^2 + 3{,}33\ m^2) \cdot 0{,}24\ m = 0{,}81\ m^3$. $k_{vol} = \left(\frac{0{,}01\ m^3}{0{,}81\ m^3}\right)^{0{,}2} = 0{,}42$. Lasketaan täyttääkö esimerkin harjapalkki Eurokoodi 5 antamat ehdot. $\frac{0{,}12\ N/m^2}{1{,}4 \cdot 0{,}42 \cdot 0{,}32\ N/mm^2} = 0{,}65 < 1$. Esimerkin harjapalkki täyttää ehdot. Ohjelma laskee automaattisesti kertoimet sekä ilmoittaa täyttääkö harjapalkki tarkastelu kohdassa vaaditut ehdot.

POIKITTAINEN VETOKESTÄVYYS HARJALLA

k_{dis} =	1,4		*kerroin, joka ottaa huomioon jännittys jakautuminen harjan lähellä*
k_{vol} =	0,42		*tilavuuskerroin*
k_p =	0,011		*poikittaisen vetojännityksen pienennyskerroin*
$\sigma_{t,90,d}$ =	0,12	N/mm^2	*poikittainen vetojännitys*
EHTO =	0,65 ≤	1	*KESTÄÄ*

Kuva 20 Vetokestävyyden osio ohjelmassa

6.7 Syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus

Harjapalkin tuennan pituus oli 495 mm. Merkitään palkin tukireaktiota A_y. Esimerkki harjapalkin tukireaktion suuruus on $A_y = \frac{30\frac{kN}{m} \cdot 20\ m}{2} = 300\ kN$. Harjapalkin tehollinen tuen pituus on $l_{c,90,ef} = 0\ mm + 495\ mm + 30\ mm = 525\ mm$. Tuen pituuden ollessaan yli 400 mm, saadaan tässä esimerkissä kertoimen $k_{c,90}$ arvoksi 1,5. Tukipainekertoimen arvo $k_{c,} = \frac{525\ mm}{495\ mm} \cdot 1{,}5 = 1{,}59$. Puristusjännityksen arvo $\sigma_{c90,d} = \frac{300\ kN \cdot 10^3}{240\ mm \cdot 495\ mm} = 2{,}53\ \frac{N}{mm^2}$. Tarkistetaan täyttääkö esimerkki harjapalkki Eurokoodi 5 antamat ehdot. $\frac{2{,}53\ N/mm^2}{1{,}60\frac{N}{mm^2} \cdot 1{,}59} = 0{,}99 \leq 1$. Ehdot täyttyvät. Ohjelmassa on laskettu kertoimet ja tarkastettu täyttääkö kyseinen harjapalkki ehdot. Kuvasta x nähdään tämä tarkastelu kohta ohjelmassa.

SYYSUNTAA VASTAAN KOHTISUORA PURISTUS			
A_y =	300,3 kN		*Palkin tukireaktio*
l =	495 mm		*tuen pituus*
$l_{c,90,ef}$ =	525 mm		*tehollinen kosketuspinnan pituus*
$k_{c,90}$ =	1,5		*huomioidaan kuorman sijainti, halkeamismahdollisuus ja puristuman suuruus*
$k_{c,t}$ =	1,59		*tukipainekerroin*
$\sigma_{c,90,d}$ =	2,53 N/mm^2		
EHTO =	0,99	≤ 1	KESTÄÄ

Kuva 21 Ohjelman näkymä tarkastelu kohdasta

6.8 Kiepahduskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa

Esimerkissä on ajateltu harjapalkkiin tulevan 4 poikittaista tukea. Katto-orret ovat tyypilliset poikittaistuet, jotka voisi tämän tyyppisellä harjapalkilla olla. Tällöin saadaan harjapalkille kiepahdusväliksi 5 000 mm. Harjapalkin mitoittava korkeus on 1 686 mm. Tehollinen kiepahdusväli $l_{ef} = 5\,000\ mm + 2 \cdot 1\,686\ mm = 8\,373\ mm$. Kriittinen taivutusjännitys $\sigma_{m,crit} = \frac{0{,}78 \cdot (240\ mm)^2}{1\,686\ mm \cdot 8\,373\ mm} \cdot 10\,800\ \frac{N}{mm^2} = 34{,}36\ N/mm^2$. Suhteellinen hoikkuusluku $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30\frac{N}{mm^2}}{34{,}36\frac{N}{mm^2}}} = 0{,}93$. Suhteellinen hoikkuus on suurempi kuin 0,75 mutta pienempi 1,4. Tällöin $k_{crit} = 1{,}56 - 0{,}93 \cdot 0{,}75 = 0{,}86$. Taivutusjännitys mitoittavassa kohdassa on 12,03 N/mm^2. Ehtona harjapalkille on $\frac{12{,}03\frac{N}{mm^2}}{0{,}86 \cdot 19{,}2\frac{N}{mm^2}} = 0{,}65 \leq 1$. Esimerkin harjapalkki täyttää Eurokoodi 5 ehdot. Ohjelmassa on nähtävissä kaikki kertoimet sekä ohjelma tarkastaa täyttääkö harjapalkki mitoituskohdassa ehdot.

KIEPAHDUSKESTÄVYYS MITOITTAVASSA POIKKILEIKKAUKSESSA			
a =	5 000 mm		*kiepahdusväli*
l_{ef} =	8373 mm		*tehollinen pituus*
$\sigma_{m,crit}$ =	34,36 N/mm^2		*kriittinen taivutusjännitys*
$\lambda_{rel,m}$ =	0,93		*suhteellinen hoikkuusluku*
k_{crit} =	0,86		
$\sigma_{m,d}$ =	12,03 N/mm^2		*taivutusjännitys mitoittavassa kohdassa*
EHTO =	0,73 ≤ 1		KESTÄÄ

Kuva 22 Kiepahduskestävyyden tarkastelu ohjelmassa

6.9 Taipuma-arvio harjapalkin keskellä

Harjapalkin mitoituskuorma lasketaan käyttörajatilan kertoimilla. Hetkellinen taipumaa aiheuttaa pysyväkuorma. Merkitään sitä p_{d1}. Esimerkki palkin $p_{d1} = 6\ m \cdot 1{,}1 \cdot \left(0{,}6\frac{kN}{m^2} + 0{,}2\frac{kN}{m^2}\right) + 1{,}89\frac{kN}{m} = 7{,}17\ kN/m$. Merkitään hyötykuorman aiheuttamaa hetkellistä taipumaa p_{d2}. Esimerkki palkin $p_{d2} = 6\ m \cdot 1{,}1 \cdot 2{,}2\frac{kN}{m^2} = 14{,}52\frac{kN}{m}$. Lasketaan määrää korkeus $h_e = 1\,300\ mm + 0{,}33 \cdot 20\,000\ mm \cdot \tan 3{,}15° = 1\,663\ mm$. Mitoittavan korkeuden mukaan laskettu harjapalkin jäyhyysmomentti $I_{y,mitt} = \frac{240\ mm \cdot (1\,663\ mm)^3}{12} = 9{,}198\ \cdot 10^{10}\ mm^4$.

Hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta $w_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{7{,}17\frac{kN}{m} \cdot (20\ m)^4}{13\,000\frac{N}{mm^2} \cdot 9{,}198 \cdot 10^{10}\ mm^4} + 0{,}35 \cdot \frac{7{,}17\frac{kN}{m} \cdot (20\ m)^2}{650\frac{N}{mm^2} \cdot 240\ mm \cdot (1\,300 mm + 1\,850\ mm)} = 14{,}53\ mm$. Hetkellinen taipuma hyötykuormasta $w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{14{,}52\frac{kN}{m} \cdot (20\ m)^4}{13\,000\frac{N}{mm^2} \cdot 9{,}198 \cdot 10^{10}\ mm^4} + 0{,}35 \cdot \frac{14{,}52\frac{kN}{m} \cdot (20\ m)^2}{650\frac{N}{mm^2} \cdot 240\ mm \cdot (1\,300 mm + 1\,850\ mm)} = 29{,}43\ mm$. Palkin virumaluku on 0,6. Lopputaipuma $w_{fin} = (1 + 0{,}6) \cdot 14{,}53\ mm + (1 + 0{,}2 \cdot 0{,}6) \cdot 29{,}43\ mm = 56{,}22\ mm$. Lopputaipuman ehtona on, että $w_{fin} =$

$56{,}22\ mm < \frac{L}{200} = 100\ mm \rightarrow$ Ehto täyttyy. Mitoitusohjelma ratkaisee lopputaipuman ja ilmoittaa täyttääkö harjapalkki ehdon.

TAIPUMA-ARVIO PALKIN KESKELLÄ			
p_{d1} =	7,17 kN/m		*pysyvän kuorman suurus*
p_{d2} =	14,52 kN/m		*hyötykuorman suurus*
h_e =	1663 mm		*määrävä korkeus taipuman laskemiseen*
$I_{e,mitt}$ =	9,198E+10 mm^4		*mitoittavan poikkileikkauksen jäyhyysmomentti*
$w_{inst,G}$ =	14,53 mm		*hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta*
$w_{inst,Q}$ =	29,43 mm		*hetkellinen taipuma hyötykuormasta*
k_{def} =	0,6		*virumaluku*
w_{fin} =	56,22 mm		*Lopputaipuma*
EHTO =	56,22 ≤	100	OK

Kuva 23 Harjapalkin taipuma-arvio keskellä

6.10 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys

Harjapalkin jänneväli on 20 000 mm. Ratkaistaan tehollinen jänneväli. $l_{ef} = 0{,}9 \cdot 20\,000\ mm + 2 \cdot 1\,686\ mm = 21\,373\ mm$. Harjapalkin kriittinen taivutusjännitys on $\sigma_{m,crit} = \frac{0{,}7 \cdot (240\ mm)^2}{1\,686\ mm \cdot 21\,373\ mm} = 13{,}46 \frac{N}{mm^2}$. Lasketaan seuraavaksi suhteellinen hoikkuus. Merkitään sitä $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30{,}0 \frac{N}{mm^2}}{13{,}46 \frac{N}{mm^2}}} = 1{,}49$. Lasketaan k_{crit}. $k_{crit} = \frac{1}{(1{,}49)^2} = 0{,}44$. Taivutusmomentti kriittisessä kohdassa on 1 369 kNm. $N_d = (1 - 0{,}44) \cdot \frac{1\,369\ kNm}{1\,686\ mm} = 454\ kN$. Poikittaistukien määrä on 4 kpl ja tuentaväli on 5 000 mm. Jousijäykkyyden vaatimus $C = \left(2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180°}{5}\right)\right) \cdot \frac{454\ kN}{5\,000\ mm} = 310\ N/mm$. Lasketaan heikomman suunnan jäyhyysmomentti $I_z = \frac{1\,686\ mm \cdot (240\ mm)^3}{12} = 1{,}94 \cdot 10^9\ mm^4$. Kriittisen kiepahdusmuodon aallonpituus on $l_s = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{310 N/mm^2}{5\,000\ mm \cdot 10\,800 \frac{N}{mm^2} \cdot 1{,}94 \cdot 10^9\ mm^4}}} = 13\,467\ mm$. Kriittisen kiepahdusmuodon

aallonpituus on suurempi kuin puolet jännevälistä eli 10 000 mm, tarkoittaa että esimerkin harjapalkki voi kiepahtaa vain yhteen suuntaan eli 1.kiepahdusmuodon mukaisesti. Lasketaan vielä lopuksi kiepahdustukeen kohdistuva voima. $F_d = \frac{454\ kN}{50 \cdot 20\ m} \cdot 5m = 2{,}27\ kN$.

Ohjelma laske lähtöarvojen mukaan harjapalkin kiepahdustukeen kohdistuvan voiman suuruuden sekä ilmoittaa kiepahdusmuodon.

Y-SUUNNAN STABILOIVAN TEUN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS			
L =	20 000	mm	Jänneväli
l_{ef} =	21373	mm	tehollinen jänneväli
$\sigma_{m,crit}$ =	13,46	N/mm^2	kriittinen taivutusjännitys
$\lambda_{rel,m}$ =	1,49		suhteellinen hoikkuus
k_{crit} =	0,44		
N_d =	454	kN	
m =	4	kpl	poikittaistukien lukumäärä
a =	5 000	mm	tuenta väli
C =	310	N/mm	jousujäykkyyden vaatimus
$I_{z,mitt}$ =	1,94E+09	mm^4	heikomman suunnan jäyhyysmomentti
l_s =	13467	mm	kriittinen kiepahdusmuodon aallonpituus
F_d =	2,27	kN	Kiepahtaa (1.muodon mukaan)

Kuva 24 kiepahdusmuodon ratkaisun osuus ohjelmassa

7 Yhteenveto

Tämä opinnäytetyö keskittyi symmetrisen harjapalkin laskentaohjelman kehittämiseen. Ohjelma mahdollistaa liimapuisten harjapalkkien mitoituksen Eurokoodi 5:n ohjeiden mukaisesti. Työssä hyödynnettiin liimapuukäsikirjoja sekä puuinfon sivuilta saatuja tietoa liimapuun ominaisuuksista ja lisäohjeita harjapalkkien mitoitukseen. Näiden lisäksi työssä otettiin huomioon RIL-205-1-207 suosituksia ja ehtoja.

Opinnäytetyössä esiteltiin liimapuun ominaisuuksia, valmistusprosessi, lujuusominaisuudet sekä yleisimpiä käyttökohteita. Lisäksi selvitettiin puurakenteiden perusteita ja tutustuttiin eurokoodeihin, jotka ovat tärkeitä harjapalkin mitoituksen kannalta. Harjapalkin mitoitus toteutettiin Eurokoodi 5:n perusteella, jossa otettiin huomioon kuormien ominaisarvot ja niiden laskentamenetelmät. Rakenteen kestävyyttä tarkasteltiin murtorajatilassa käyttäen murtorajatilan kuormitusyhdistelmiä.

Työssä käytiin läpi harjapalkin mitoituskohdat ja selvitettiin niihin liittyvät kaavat ja tarvittavat arvot. Lopuksi esiteltiin kehitetty harjapalkin mitoitusohjelma ja sen käyttöä havainnollistettiin ratkaisemalla esimerkki harjapalkin tarkastelu kohdat.

Opinnäytetyön tuloksena kehitettiin laskentaohjelma symmetriselle harjapalkille, joka noudattaa Eurokoodi 5 vaatimuksia. Laskentaohjelma helpottaa sekä nopeuttaa harjapalkin mitoitusta.

Lähteet

1 Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy. 2014. Liimapuukäsikirja, osa 1.

2 Liimapuu. 2020. Puuinfo oy. https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/liimapuu-glt/

3 Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy.2015. Liimapuukäsikirja, osa 2. https://www.liimapuu.fi/files/liimapuu.kotisivukone.com/tiedostot/liimapuukasikirja_osa_2.pdf

4 Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy. 2015. Liimapuukäsikirja, osa 3. https://www.liimapuu.fi/files/liimapuu.kotisivukone.com/tiedostot/liimapuukasikirja_osa_3.pdf

5 SFS-EN 1995-1-1. 2014. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardoimisliitto

6 SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardoimisliitto

7 SFS-EN 1991-1-1. 2002. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuorma. Suomen Standardoimisliitto.

8 SFS-EN 1991-1-3.2015. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Suomen Standardoimisliitto.

9 RIL 205-1-2017Puurakenteiden suunnitteluohje. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry

10 SFS-EN 14080. 2013. Puurakenteet. Liimapuu ja liimattu sahatavara. Vaatimukset. Suomen standardisoimisliitto

11 Vaativien Puurakenteiden Suunnittelu -Täydennyskoulutus (Vaapuu) Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-luentoaineistot/