

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

Talonrakennustekniikka

2019

Hassanen AL-Anbary

LIIMAPUUHARJAPALKIN LASKENTAOHJELMA

– Eurokoodi 5

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri | Talonrakennustekniikka

Kevät 2019 | 39 + 1

Hassanen AL-Anbary

LIIMAPUUHARJAPALKIN LASKENTAOHJELMA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Late-Rakenteet Oy:lle selkeä Excel-pohjainen laskentaohjelma yksiaukkoisen liimapuusta valmistetun symmetrisen harjapalkin mitoitukseen. Mitoitus perustuu sekä Eurokoodi 5:een että Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisuihin (RIL 205-1-2017) ja (RIL 205-2-2009).

Työn alussa tutustutaan harjapalkin mitoituksen suunnitteluperusteisiin, joista saatujen lähtötietojen avulla edetään harjapalkin varsinaiseen mitoituksen kulkuun. Mitoitus etenee kolmessa vaiheessa. Se alkaa alustavalla mitoituksella ja jatkuu Eurokoodi 5:n mukaiseen lopulliseen mitoitukseen. Viimeisessä vaiheessa suoritetaan harjapalkin palomitoitus, jos suunnitellulta rakennukselta vaaditaan tietyn palokestoluokan mukaista kestävyyttä.

Työn tuloksena valmistui ulkoasultaan ja toiminnaltaan selkeä Excel-pohjainen laskentaohjelma harjapalkin mitoitukseen.

ASIASANAT:

liimapuu, harjapalkki, laskentaohjelma, mitoitus, rakennesuunnittelu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering | Structural Engineering

Spring 2019 | 39 + 1

Hassanen AL-Anbary

GLULAM DOUBLE PITCHED BEAM SPREADSHEET

This thesis was commissioned by Late-Rakentee Oy and its aim was to create a clear Excel-based spreadsheet for the design of a simply supported symmetrical double pitched beam. The design is based on both Eurocode 5 and the publications of the Finnish Association of Civil Engineers (RIL 205-1-2017) and (RIL 205-2-2009).

The thesis begins with the basis of the design and then advances to the actual design of the double pitched beam. The design progresses in three stages. It starts with the preliminary design and continues to the final design according to Eurocode 5. In the final stage the fire design is completed, if there is a fire resistance requirement for the building.

The result of this thesis was a clear Excel-based spreadsheet for the design of a double pitched beam.

KEYWORDS:

glulam, beam, spreadsheet

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	8
2 SUUNNITTELUPERUSTEET	9
2.1 Materiaaliominaisuudet	9
2.2 Mitoitusarvot	10
2.3 Kuormat	11
2.3.1 Pysyvät kuormat	13
2.3.2 Tuulikuorma	13
2.3.3 Lumikuorma	14
3 MITOITUS	17
3.1 Alustava mitoitus	17
3.1.1 Leikkauskestävyys tuella	17
3.1.2 Taivutuskestävyys palkin keskellä	18
3.2 Lopullinen mitoitus	19
3.2.1 Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa	20
3.2.2 Taivutuskestävyys harjalla	22
3.2.3 Poikittainen vetokestävyys harjalla	22
3.2.4 Yhdistetty poikittainen veto- ja leikkauskestävyys	24
3.2.5 Leikkauskestävyys maksimitaivutusjännityksen kohdalla	26
3.2.6 Leikkauskestävyys tuella	27
3.2.7 Tukipainekestävyys	28
3.2.8 Kiepahduskestävyys	29
3.2.9 Taipuma-arvio	30
3.2.10 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys	32
4 PALOMITOITUS	35
5 LOPUKSI	38
LÄHTEET	39

LIITTEET

Liite 1. Laskentaohjelman tuloste.

KAAVAT

Kaava 1. Lujuusominaisuuden mitoitusarvo.	10
Kaava 2. Murtorajatilán kuormitusyhdistely.	11
Kaava 3. Käyttörajan tilán kuormitusyhdistely.	11
Kaava 4. Lumikuorman mitoitusarvo kN/m^2 .	14
Kaava 5. Leikkausvoima tuella.	17
Kaava 6. Palkin korkeus tuella.	18
Kaava 7. Poikkileikkauksen tehollinen leveys.	18
Kaava 8. Taivutusmomentti palkin keskellä.	18
Kaava 9. Palkin korkeus keskellä.	19
Kaava 10. Mitoittavan poikkileikkauksen sijainti.	20
Kaava 11. Palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa.	20
Kaava 12. Taivutusmomentti mitoittavassa poikkileikkauksessa.	20
Kaava 13. Taivutusjännitys mitoittavassa poikkileikkauksessa.	21
Kaava 14. $k_{m,\alpha}$ -kerroin.	21
Kaava 15. Taivutusjännityksen mitoitusehto mitoittavassa poikkileikkauksessa.	21
Kaava 16. Taivutusjännitys harjalla.	22
Kaava 17. Harjan taivutusjännityksen korotuskerroin k_1 .	22
Kaava 18. Harjan taivutusjännityksen mitoitusehto.	22
Kaava 19. Harjavyöhykkeen pinta-ala.	23
Kaava 20. Harjavyöhykkeen tilavuus.	23
Kaava 21. Harjapalkin tilavuus.	23
Kaava 22. Mitoittava tilavuus.	23
Kaava 23. k_p -kerroin.	23
Kaava 24. Poikittainen vetojännitys harjalla.	23
Kaava 25. Harjavyöhykkeessä syysuuntaa vastaan kohtisuoran vetojännityksen mitoitusehto.	24
Kaava 26. Poikittaisen vetolujuuden kokovaikutuskerroin.	24
Kaava 27. Tukireaktio B.	25
Kaava 28. Tukireaktio A.	25
Kaava 29. Leikkausvoiman 0-kohta.	25
Kaava 30. Maksimi taivutusmomentti.	25
Kaava 31. Leikkausvoima harjalla.	26
Kaava 32. Taivutusmomentti harjalla.	26
Kaava 33. Leikkausjännitys harjalla.	26
Kaava 34. Poikittainen vetojännitys harjalla.	26
Kaava 35. Yhdistetyn poikittaisen veto- ja leikkausjännityksen mitoitusehto.	26
Kaava 36. Leikkauskestävyyden mitoitusehto maksimitaivutusjännityksen kohdalla.	27
Kaava 37. Pienennetty leikkausvoima V_{red} .	27
Kaava 38. Määräävä korkeus h_{A1} .	27
Kaava 39. Leikkauskestävyyden mitoitusehto.	28
Kaava 40. Syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuksen mitoitusehto.	28

Kaava 41. Tukipainekerroin $k_{c,\perp}$.	28
Kaava 42. Tehollinen tukipituus $l_{c,90,ef}$.	28
Kaava 43. Kriittinen taivutusjännitys $\sigma_{m,crit}$.	29
Kaava 44. Tehollinen kiepahduspituus.	29
Kaava 45. Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,m}$.	30
Kaava 46. Kiepahduskerroin k_{crit} .	30
Kaava 47. Kiepahduskestävyyden mitoitusehto.	30
Kaava 48. Harjapalkin hetkellinen taipuma.	31
Kaava 49. Lopputaipuma $w_{net,fin}$.	31
Kaava 50. Kokonaistaipuma w_{fin} .	31
Kaava 51. Kokonaistaipuman ehto.	32
Kaava 52. Lopputaipuman ehto.	32
Kaava 53. Jousijäykkyyden ehto.	32
Kaava 54. Harjapalkin yläreunassa vaikuttavan puristusvoiman N_d mitoitusarvo.	33
Kaava 55. Nurjahdusmuodon määräytymisen ehto.	33
Kaava 56. Kriittinen aallonpituus l_s .	33
Kaava 57. Jäyhyysmomentti z-suunnassa mitoittavassa poikkileikkauksessa.	34
Kaava 58. Stabiloivaan tukeen vaikuttava voima F_d , kun kiepahdusmuoto 1.	34
Kaava 59. Stabiloivaan tukeen vaikuttava voima F_d , kun kiepahdusmuoto 2.	34
Kaava 60. Stabiloivan voiman pienennys kerroin $k_{s,red}$.	34
Kaava 61. Palotilanteen kuormitusyhdistely.	35
Kaava 62. Lujuusominaisuuden mitoitusarvo palotilanteessa.	35
Kaava 63. Hiililymissyvyys d_{ef} .	36
Kaava 64. Nimellisen hiililymsyvyuden mitoitusarvo.	36
Kaava 65. Kerroin k_0 .	37
Kaava 66. Harjapalkin korkeus tuella palotilanteessa.	37
Kaava 67. Harjapalkin korkeus harjankohdalla palotilanteessa.	37
Kaava 68. Palkin leveys palotilanteessa.	37
Kaava 69. Tuen pituus palotilanteessa.	37

KUVAT

Kuva 1. Harjakaton lumikuorman kuormituskaaviot.	14
Kuva 2. Maanpinnan lumikuorman ominaisarvot s_k .	16
Kuva 3. Kuormitustapaukset 1 ja 2.	19
Kuva 4. Tasaisesti kuormitetun harjapalkin mitoittavan poikkileikkauksen sijainti.	20
Kuva 5. Tasaisella symmetrisellä kuormalla kuormitetun harjapalkin taivutusjännityskuvio.	21
Kuva 6. Harjapalkin harjavyöhyke.	22
Kuva 7. Tukireaktiot A ja B.	24
Kuva 8. Tasaisesti kuormitetun harjapalkin leikkausvoiman pienentäminen.	27
Kuva 9. Erillisillä tuilla oleva palkki.	29
Kuva 10. Kiepahdusmuodot.	32
Kuva 11. Esimerkkejä poikittaistuetuista puristussauvoista.	33
Kuva 12. Tehollinen poikkileikkaus.	36

TAULUKOT

Taulukko 1. Liimapuun ominaislujuudet lujuusluokittain.	9
Taulukko 2. Liimapuun jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuuskerroin γ_M .	10
Taulukko 3. Liimapuun muunnoskerroimen k_{mod} arvot.	10
Taulukko 4. Kuormakerroin seuraamusluokittain.	12
Taulukko 5. Muuttuvan kuorman yhdistelykerroimet.	13
Taulukko 6. Lumikuorman muotokerroimet.	15
Taulukko 7. Tuulensuojaisuuskerroin.	15
Taulukko 8. Tuulensuojaisuuskertoimen korotuskerroimet.	15
Taulukko 9. Virumaluvun k_{def} arvot liimapuulle.	31
Taulukko 10. Hiiltymänopeuden mitoitusarvot.	37

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä Late-Rakenteet Oy:lle selkeä Excel-pohjainen laskentaohjelma yksiaukkoisen liimapuusta valmistetun symmetrisen harjapalkin mitoitukseen. Late-Rakenteet Oy:ltä löytyy harjapalkin mitoitusta varten valmiita Excel-pohjaisia laskentaohjelmia. Näiden ohjelmien päivittäminen, käyttö ja toiminnan ymmärtäminen on kuitenkin ollut hankalaa. Suomen Rakennusinsinöörien Liiton uudessa puurakenteiden suunnitteluohjeen julkaisussa (RIL 205-1-2017) on myös mitoituksessa huomioon otettavia päivityksiä edelliseen julkaisuun verrattuna. Työn lähdeaineistona käytetään pääasiassa eurokoodeja, Suomen Rakennusinsinöörien Liiton viimeisimpiä julkaisuja, liimapuukäsikirjoja sekä Puuinfo Oy:n julkaisemia laskuesimerkkejä.

Opinnäytetyön alussa tutustutaan harjapalkin mitoituksen suunnitteluperusteisiin, joita ovat käytettävän liimapuun materiaaliominaisuudet, harjapalkkiin vaikuttavat kuormat ja kuormien kuormitusyhdistelyt sekä murtorajatilassa että käyttörajatilassa. Näiden lähtötietojen avulla edetään harjapalkin varsinaiseen mitoituksen kulkuun. Mitoitus etenee kolmessa vaiheessa. Se alkaa alustavalla mitoituksella, jonka tarkoituksena on rajoittaa mahdollisten rakenneratkaisujen määrää ja jatkuu Eurokoodi 5:n mukaiseen lopulliseen mitoitukseen. Viimeisessä vaiheessa suoritetaan harjapalkin palomitoitus, jos suunnitellulta rakennukselta vaaditaan tietyn palonkestoluokan mukaista kestävyyttä.

Opinnäytetyön lopussa kuvaillaan valmistuneen Excel-pohjaisen laskentaohjelman ulkoasua ja toimintaperiaatetta. Tarkastellaan saatujen mitoitustulosten käyttöasteita ja selvitetään useimmiten määräävät kestävyuden tarkastelut harjapalkin mitoituksessa. On myös pohdittu myöhemmin ohjelmaan mahdollisesti tarvittavia lisäyksiä ja päivityksiä.

2 SUUNNITTELUPERUSTEET

2.1 Materiaaliominaisuudet

Suomessa valmistettava yleisin liimapuun lujuusluokka on GL30c. Muita vähemmän valmistettavia lujuusluokkia ovat GL30h, GL32c ja GL32h. Näitä lujuusluokkia käytettäessä on huomioitava, että niillä on usein pidempi toimitusaika ja korkeammat valmistuskustannukset. Näiden lujuusluokkien valmistukseen tarvitaan myös enemmän korkeamman lujuusluokan sahatavaraa, jonka saatavuus on rajallisempaa. Harjapalkin laskentaohjelmassa on kuitenkin mahdollista käyttää lujuusluokkia GL30c, GL30h, GL32c ja GL32h.

Taulukko 1. Liimapuun ominaislujuudet lujuusluokittain (SFS-EN 14080, 24).

Lujuusluokka		Liimapuu			
		GL30c	GL30h	GL32c	GL32h
Ominaislujuudet (N/mm ²)					
Taivutus	$f_{m,k}$	30	30	32	32
Veto	$f_{t,0,k}$	19,5	24	19,5	25,6
	$f_{t,90,k}$	0,5			
Puristus	$f_{c,0,k}$	24,5	30	24,5	32
	$f_{c,90,k}$	2,5			
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,5			
	$f_{r,k}$	1,2			
Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²)					
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$	13000	13600	13500	14200
	$E_{0,05}$	10800	11300	11200	11800
	$E_{90,mean}$	300			
	$E_{90,05}$	250			
Liukumoduuli	G_{mean}	650			
	$G_{0,05}$	540			
Tiheydet (kg/m ³)					
Ominaisstiheys	ρ_k	390	430	400	440
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	430	480	440	490

2.2 Mitoitusarvot

Liimapuun lujuusominaisuuden (taivutus, puristus, veto ja leikkaus) mitoitusarvo X_d lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M}$$

X_k lujuusominaisuuden ominaisarvo

γ_M osavarmuusluku

k_{mod} kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioiva muunnoskerroin

Kaava 1. Lujuusominaisuuden mitoitusarvo (RIL 205-1-2017, 46).

Liimapuun jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuuskertoimen γ_M arvo saadaan taulukosta 2. Suomen Rakennusinsinöörien Liiton aiemmassa julkaisussa RIL 205-1-2009 osavarmuusluku liimapuulle oli 1,2. Uusimmassa julkaisussa RIL 205-1-2017 kertoimen arvoa on korotettu 1,25.

Taulukko 2. Liimapuun jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuuskerroin γ_M (RIL 205-1-2017, 47).

Perusyhdistelmät: Liimapuu	1,25
Onnettomuusyhdistelmät:	1,0

Kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioivan muunnoskerroimen k_{mod} arvo määritetään rakenteen käyttöluokan ja kuorman aikaluokan mukaan taulukosta 3.

Taulukko 3. Liimapuun muunnoskerroimen k_{mod} arvot (RIL 205-1-2017, 49).

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkellinen
Liimapuu	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

2.3 Kuormat

Harjapalkkien käyttö on yleistä hallirakentamisessa. Hallin rakenteisiin vaikuttavat rasitukset muodostuvat rakenteen omasta painosta, ripustus-, hyöty-, lumi- ja tuulikuormasta. Rakenne on suunniteltava siten, että se kestää kaikki siihen kohdistuvat kuormat ja rasitukset suunnitellun käyttöikänsä ajan. (RIL 201-1-2017, 25.)

Rakenteen kestävyyttä tarkastellaan sekä murto- että käyttörajatilassa. Murto-rajatilassa käyttöasteen ylittyessä rakenne sortuu tai vaurioituu. Käyttörajatilassa käyttöasteen ylitymisen jälkeen eivät rakenteen käyttökelpoisuusvaatimukset täyty. (RIL 201-1-2017, 21.)

Murto-rajatilassa rakennetta rasittava mitoituskuorma lasketaan aikaluokittain seuraavalla kuormitusyhdistelyllä:

$$\max \begin{cases} 1,15K_{FI}G_{kj} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} & \text{Muuttuvien kuormien aikaluokat} \\ 1,35K_{FI}G_{kj} & \text{Pysyvä aikaluokka} \end{cases}$$

G_{kj} pysyvien kuormien ominaisarvo

$Q_{k,1}$ määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

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

K_{FI} taulukon 4 mukainen seuraamusluokasta riippuva kuormakerroin

$\psi_{0,i}$ taulukon 5 mukainen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

Kaava 2. Murto-rajatilan kuormitusyhdistely (RIL 205-1-2017, 27).

Käyttörajatilassa kuormitusyhdistely saa muodon:

$$G_{kj} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Kaava 3. Käyttörajatilan kuormitusyhdistely (RIL 205-1-2017, 30).

Rakenteen seuraamusluokka ja kuormakerroin K_{FI} määritetään taulukossa 4 olevien kuvausten avulla.

Taulukko 4. Kuormakerroin seuraamusluokittain (RIL 205-1-2017, 28).

Luokka	K_{FI}	Kuvaus	Rakennuksia ja rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	1,1	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai hyvin suurten</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä, kuten <ul style="list-style-type: none"> – yli 8-kerroksiset²⁾ asuin-, konttori- ja liikerrakennukset – konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot – raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esim. korkeat tornit.
CC2	1,0	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai merkittävien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristön vahinkojen takia.	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.
CC1	0,9	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai pienten tai merkityksettömien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristön vahinkojen takia.	1- ja 2-kerroksiset rakennukset ²⁾ , joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä ³⁾ , kuten esim. pienehköt varastot ja maatalouden tuotantorakennukset, joiden pinta-ala on enintään 300 m ² tai suurin jänneväli on enintään 6 m. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa, kuten <ul style="list-style-type: none"> – matalalla olevat terassit ja 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.

¹⁾ Pienehköt rakennusrungosta erilliset välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2, elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena.

²⁾ Kellarikerrokset mukaan luettuina.

³⁾ Tilapäisenä oleskeluna pidetään päivittäistä käymistä rakennuksessa, mutta ei siellä pidempään viipymistä.

Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet saadaan taulukosta 5.

Taulukko 5. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet (RIL 205-1-2017, 29).

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa (ks. taulukko 2.5)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, esim. autotallit	0,7	0,7	0,6 **)
Luokka G: liikennöitävät tilat, raskaat ajoneuvot	0,7	0,5	0,3 **)
Luokka H: vesikatot (kunnossapito)	0	0	0
Jääkuorma (huurtumisesta, jäätävästä sateesta tai räntäsateesta)	0,7	0,3	0
Lumikuorma ¹⁾ , kun			
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset, tukien painumat	1,0	1,0	1,0

¹⁾ 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.

**) Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$.

2.3.1 Pysyvät kuormat

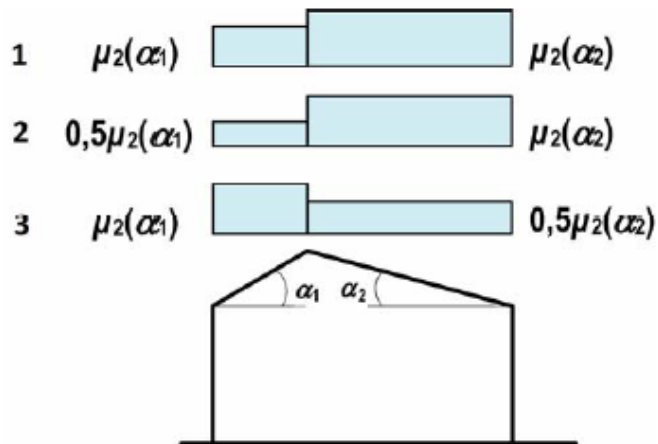
Harjapalkkiin vaikuttavat pysyvät rasitukset muodostuvat pääasiassa palkin omasta painosta, ripustuskuormasta ja kattorakenteesta.

2.3.2 Tuulikuorma

Tuulikuorman vaikutus harjapalkin mitoitukseen on hyvin pieni, joten sen laskentaa ei tarkastella tässä opinnäytetyössä.

2.3.3 Lumikuorma

Harjakatolle muodostuvan lumikuorman kuormituskaaviot on esitetty kuvassa 1. Tapauksessa 1 katolla olevan lumikuorman oletetaan jakaantuvan tasaisesti. Tapauksissa 2 ja 3 on otettu huomioon lumikuorman mahdollinen epätasainen poistaminen tai jakaantuminen katolla. (RIL 201-1-2017, 101)



Kuva 1. Harjakaton lumikuorman kuormituskaaviot (RIL 201-1-2017, 102).

Lumikuorman mitoitussarvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k$$

μ_i lumikuorman muotokerroin

C_e tuulensuojaisuuskerroin

C_t lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti 1,0

s_k maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [kN/m^2]

Kaava 4. Lumikuorman mitoitussarvo [kN/m^2] (RIL 201-1-2017, 100).

Lumikuorman muotokertoimen arvo katsotaan taulukosta 6, kun lumen liukuminen ei ole estetty. Muotokertoimen arvo määräytyy katon kaltevuuden mukaan. Harjapalkin kaltevuuskulman suositussarvo on (2° – 10°) välillä, jolloin lumikuorman muotokertoimen arvoksi saadaan 0,8. (Hallipes 1.0 Osa 2: Pääkännattimet).

Taulukko 6. Lumikuorman muotokertoimet (RIL 201-1-2017, 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

Huom. Jos lumen liukuminen estetty $\mu_2 \geq 0,8$.

Rakennuskohteen sijainnin maastotyyppi vaikuttaa lumikuorman muodostumiseen katon kaltevuuskulmalla. Tuulisessa maastossa lumen muodostuminen on vähäisempää kuin suojaisessa maastossa. Tämä huomioidaan lumikuorman laskennassa tuulensuojaisuuskertoimella C_e , jonka arvo saadaan taulukosta 7.

Taulukko 7. Tuulensuojaisuuskerroin (RIL 201-1-2017, 100).

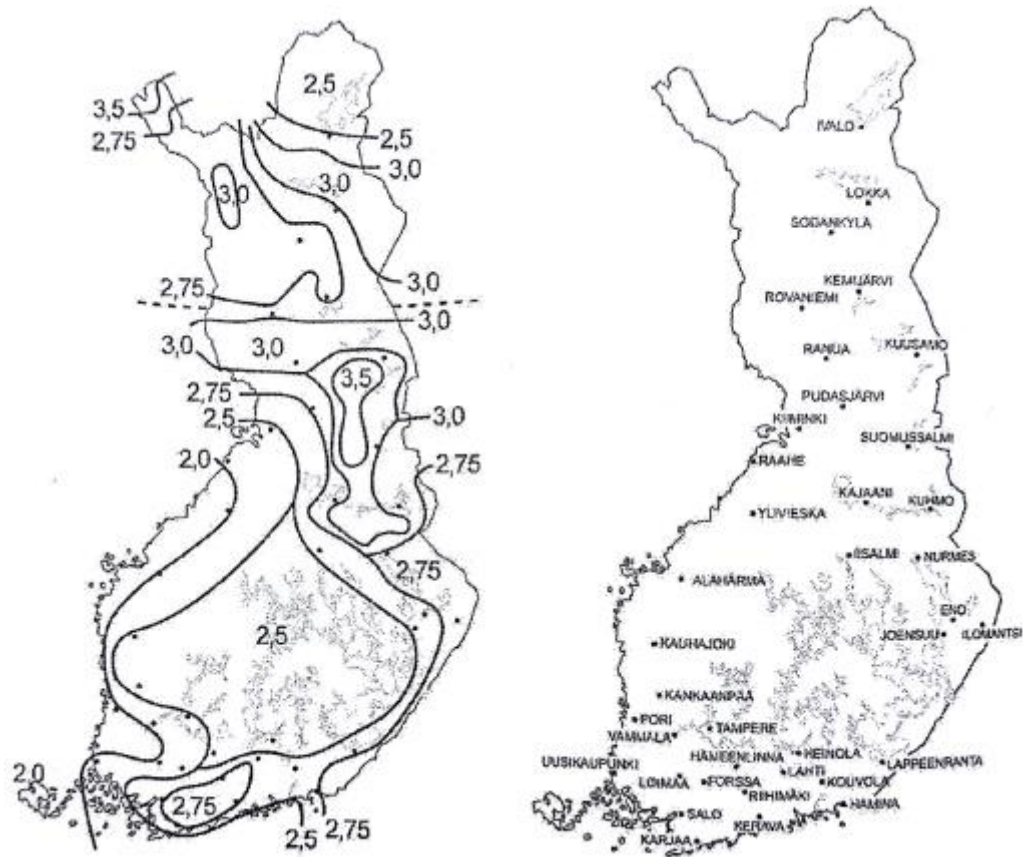
Maastotyyppi	C_e
Tuulinen	0,8 ($\geq 1,0$, mikäli lyhyempi sivumitta > 50 m)
Normaali	1,0
Suojainen	1,2

Taulukossa 7 esitetyn tuulensuojaisuuskertoimen arvo kerrotaan taulukon 8 mukaisilla korotuskertoimilla, jos katon lyhyempi sivumitta on vähintään 50 m. (RIL 201-1-2017, 100).

Taulukko 8. Tuulensuojaisuuskertoimen korotuskertoimet (RIL 201-1-2017, 101).

Lyhyt sivu (m)	Pitkän sivun suhde lyhyeen sivuun	
	1	2
50	1,0	1,1
75	1,1	1,2
100	1,2	1,25

Maassa olevan lumikuorman ominaisarvo s_k [kN/m^2] määräytyy rakennuskohteen sijainnin mukaan. Suomen paikkakuntaakohtaiset lumikuorman ominaisarvot voidaan katsoa kuvasta 2 tai taulukkomuodossa (RIL 205-1-2017, Liite F).



Kuva 2. Maanpinnan lumikuorman ominaisarvot s_k (RIL 201-1-2017, 98).

3 MITOITUS

3.1 Alustava mitoitus

Kun rakennuskohteen lähtötiedot, kuormat ja käytettävä materiaali on tiedossa, voidaan edetä alustavaan mitoitukseen. Alustavan mitoituksen tarkoituksena on rajoittaa mahdollisten rakenneratkaisujen määrää. Mitoituksessa selvitetään harjapalkin kestävyden vaatimat korkeus ja paksuus mitat kuormitustapauksessa 1 (pysyvät kuormat 100 % + lumikuorma 100 %) tarkastelemalla leikkauskestävyyttä tuella ja taivutuskestävyyttä harjapalkin keskellä. Saadut mitat tarkentuvat lopullisessa mitoituksessa. (Liimapuukäsikirja. Osa 2, 2015, 32–33).

3.1.1 Leikkauskestävyys tuella

Lasketaan tasaisesti kuormitetun harjapalkin leikkausvoima tuella:

$$V_d = \frac{p_d \cdot L}{2}$$

p_d kuorman mitoitusarvo

L palkin pituus

Kaava 5. Leikkausvoima tuella.

Seuraavaksi ratkaistaan leikkauskestävyyden mitoitusehdosta palkin korkeus h_1 tuen reunassa.

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{eff} \cdot h_1} \leq f_{v,d},$$

josta johdetaan palkin korkeus h_1 :

$$h_1 \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{eff} \cdot f_{v,d}}$$

b_{eff} poikkileikkauksen tehollinen leveys

$f_{v,d}$ leikkauslujuuden mitoitusarvo

Kaava 6. Palkin korkeus tuella.

Taivutettujen sauvojen leikkauskestävyyssmitoituksessa halkeamien vaikutus huomioidaan käyttämällä poikkileikkaukselle tehollista leveyttä:

$$b_{eff} = k_{cr} \cdot b$$

b palkin leveys

k_{cr} Kerroin (liimapuulle 1,0)

Kaava 7. Poikkileikkauksen tehollinen leveys (RIL 205-1-2017, 75).

Edellisessä julkaisussa (RIL 205-1-2009) k_{cr} kerroin liimapuulle käyttöluokassa 1 oli 0,67. Muissa käyttöluokissa kerroin oli 1,0. Uusimmassa julkaisussa (RIL 205-1-2017) k_{cr} kerroin on kaikissa käyttöluokissa 1,0. Eurokoodissa (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC) k_{cr} kertoimen suositusarvo liimapuulle on aina 0,67 käyttöluokasta riippumatta. Laskentaohjelmaan on lisätty tehollisen leveyden kaava, jolloin suunnittelijalla on mahdollisuus käyttää haluamaansa kerrointa.

3.1.2 Taivutuskestävyys palkin keskellä

Lasketaan tasaisesti kuormitetun harjapalkin taivutusmomentti palkin keskellä:

$$M_{d,max} = \frac{p_d \cdot L^2}{8}$$

Kaava 8. Taivutusmomentti palkin keskellä.

Ratkaistaan palkin korkeus keskellä h_2 taivutuskestävyyden mitoitusehdosta:

$$\sigma_{m,d} = \frac{6 \cdot M_{d,max}}{b \cdot h_2^2} \leq f_{m,d},$$

jossa

$$h_2 \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{d,max}}{b \cdot f_{m,d}}}$$

$M_{d,max}$ mitoittava taivutusmomentti

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

b palkin leveys

Kaava 9. Palkin korkeus keskellä (RIL 205-1-2017, 87).

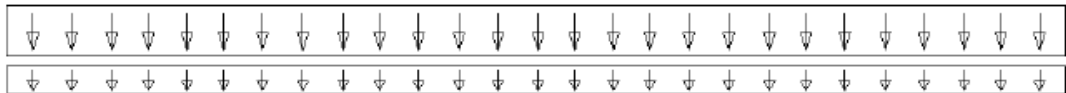
3.2 Lopullinen mitoitus

Lopullisessa mitoituksessa tarkastellaan alustavasta mitoituksesta saadun harjapalkin kestävyys Eurokoodi 5:n mukaan. Käyttöasteiden ylittyessä harjapalkin profiilia optimoidaan, kunnes käyttöasteet ovat sallituissa raja-arvoissa. Harjapalkin kestävyttä tarkastellaan seuraavissa kuormitustapauksissa:

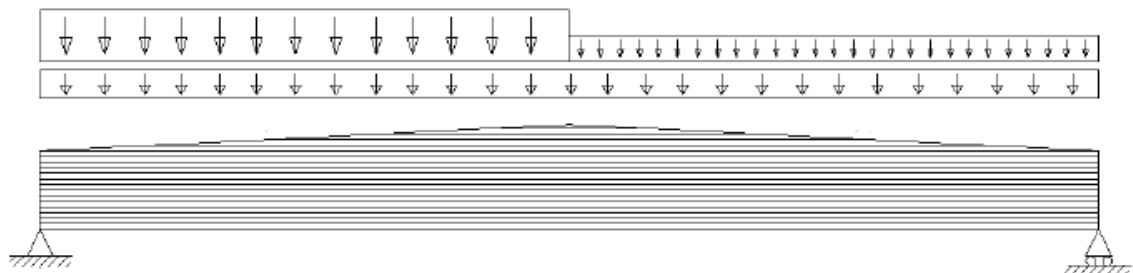
Kuormitustapaus 1: Pysyvät kuormat 100 % + lumikuorma 100 %

Kuormitustapaus 2: Pysyvät kuormat 100 % + lumikuorma 50 %

KUORMITUSTAPAUSET 1:



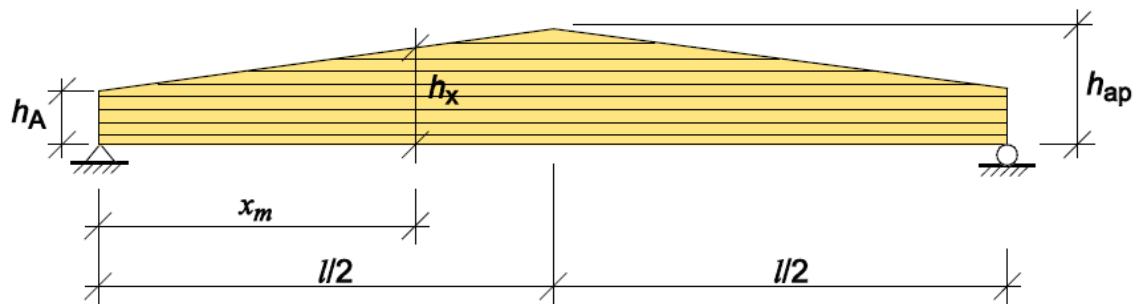
KUORMITUSTAPAUSET 2:



Kuva 3. Kuormitustapaukset 1 ja 2 (Puuinfo 2015).

3.2.1 Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa

Tasaisesti kuormitetun symmetrisen harjapalkin taivutuskestävyyttä tarkastellaan mitoittavassa poikkileikkauksessa, missä esiintyvät suurimmat taivutusjännitykset. Mitoittavan poikkileikkauksen sijainti ei yleensä ole maksimimomentin kohdalla (palkin keskellä), koska harjapalkin poikkileikkauksen korkeus ja momentti vaihtelevat palkin pituussuunnassa. (Liimapuukäsikirja 2003, 83).



Kuva 4. Tasaisesti kuormitetun harjapalkin mitoittavan poikkileikkauksen sijainti (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 53).

Ratkaistaan alustavasta mitoituksesta saadusta harjapalkista sen poikkileikkauksen sijainti, jossa taivutusjännitykset ovat suurimmat:

$$x_{mitt} = \frac{l \cdot h_A}{2 \cdot h_{ap}}$$

Kaava 10. Mitoittavan poikkileikkauksen sijainti (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 53).

Lasketaan palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa:

$$h_{mitt} = h_A \cdot \left(2 - \frac{h_A}{h_{ap}}\right)$$

Kaava 11. Palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 53).

Lasketaan taivutusmomentti mitoittavassa poikkileikkauksessa:

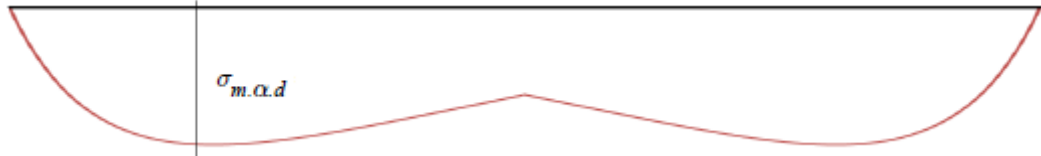
$$M_{d,mitt} = \frac{p_d \cdot x_{mitt}}{2} \cdot (L - x_{mitt})$$

Kaava 12. Taivutusmomentti mitoittavassa poikkileikkauksessa (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113).

Lasketaan taivutusjännitys mitoittavassa poikkileikkauksessa:

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 \cdot M_{d,mit} }{b \cdot h_{mit}^2}$$

Kaava 13. Taivutusjännitys mitoittavassa poikkileikkauksessa (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113).



Kuva 5. Tasaisella symmetrisellä kuormalla kuormitetun harjapalkin taivutusjännityskuvio (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113).

Ratkaistaan taivutuslujuuden suunnitteluarvon pienennyskerroin $k_{m,\alpha}$, jolla huomioidaan taivutus-, leikkaus-, ja puristusjännityksen yhteisvaikutus. (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113). Harjapalkin viistetty reuna on puristettu, jolloin $k_{m,\alpha}$ -kertoimen arvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

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

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

$f_{v,d}$ leikkauslujuuden mitoitusarvo

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

α harjapalkin yläpinnan kaltevuuskulma

Kaava 14. $k_{m,\alpha}$ -kerroin (RIL 205-1-2017, 87).

Lopuksi tarkistetaan taivutusjännityksen mitoitus ehdon toteutuminen:

$$\frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

Kaava 15. Taivutusjännityksen mitoitus ehto mitoittavassa poikkileikkauksessa (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113).

3.2.2 Taivutuskestävyys harjalla

Lasketaan taivutusjännitys harjalla:

$$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{d,max}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

k_l taivutusjännityksen korotuskerroin

Kaava 16. Taivutusjännitys harjalla (RIL 205-1-2017, 87).

Lasketaan taivutusjännitystä korottava k_l -kerroin. Kertoimella huomioidaan, että neutraaliakseli ei ole palkin keskellä. (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113).

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

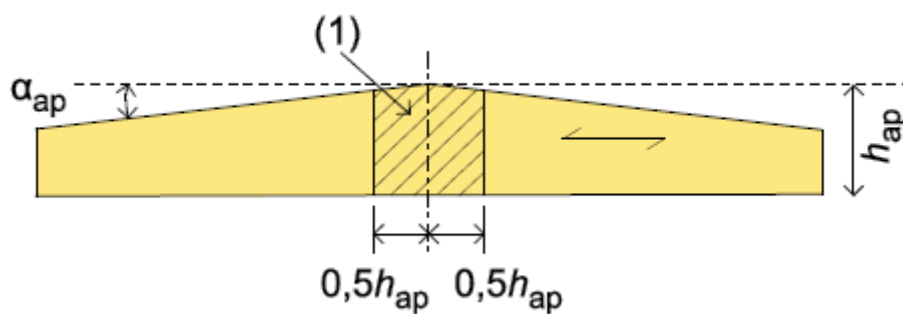
Kaava 17. Harjan taivutusjännityksen korotuskerroin k_l (RIL 205-1-2017, 87).

Lopuksi tarkistetaan taivutusjännityksen mitoitus ehdon toteutuminen harjalla:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Kaava 18. Harjan taivutusjännityksen mitoitus ehto (RIL-205-1-2017, 88).

3.2.3 Poikittainen vetokestävyys harjalla



Kuva 6. Harjapalkin harjavyöhyke (Liimapuukäsikirja. Osa 3, 2015, 113).

Lasketaan harjavyöhykkeen pinta-ala A . Pinta-ala koostuu tasasivuisesta kolmiosta ja suorakulmiosta, jolloin pinta-alan kaava:

$$A = A_k + A_N = \frac{h_{ap} \cdot \tan \alpha \cdot 0,5h_{ap}}{2} + h_{ap} \cdot (h_{ap} - \tan \alpha \cdot 0,5h_{ap})$$

Kaava 19. Harjavyöhykkeen pinta-ala.

Lasketaan harjavyöhykkeen tilavuus V_h :

$$V_h = b \cdot A$$

Kaava 20. Harjavyöhykkeen tilavuus.

Lasketaan harjapalkin tilavuus V_b

$$V_b = b \cdot \left(L \cdot h_1 + \frac{L \cdot \tan \alpha \cdot 0,5L}{2} \right)$$

Kaava 21. Harjapalkin tilavuus.

Ratkaistaan mitoittava tilavuus:

$$V = \min \left\{ \begin{array}{l} V_h \\ \frac{2}{3} \cdot V_b \end{array} \right.$$

Kaava 22. Mitoittava tilavuus (RIL 205-1-2017, 90).

Lasketaan k_p -kerroin:

$$k_p = 0,2 \cdot \tan \alpha \quad \text{Harjapalkille}$$

Kaava 23. k_p -kerroin (RIL 205-1-2017, 91).

Lasketaan harjalla vaikuttava poikittainen vetojännitys:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6 \cdot M_{d,max}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

Kaava 24. Poikittainen vetojännitys harjalla (RIL 205-1-2017, 90).

Tarkistetaan mitoitus ehdon toteutuminen:

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1,$$

jossa

k_{dis} jännitys jakauma kerroin

k_{vol} poikittaisen vetolujuuden kokovaikutuskerroin

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

Kaava 25. Harjavyöhykkeessä syysuuntaa vastaan kohtisuoran vetojännityksen mitoitus ehto (RIL 205-1-2017, 89).

Jännitys jakauma kerroin (RIL 205-1-2017, 90):

$$k_{dis} = 1,4 \quad \text{Harjapalkilla}$$

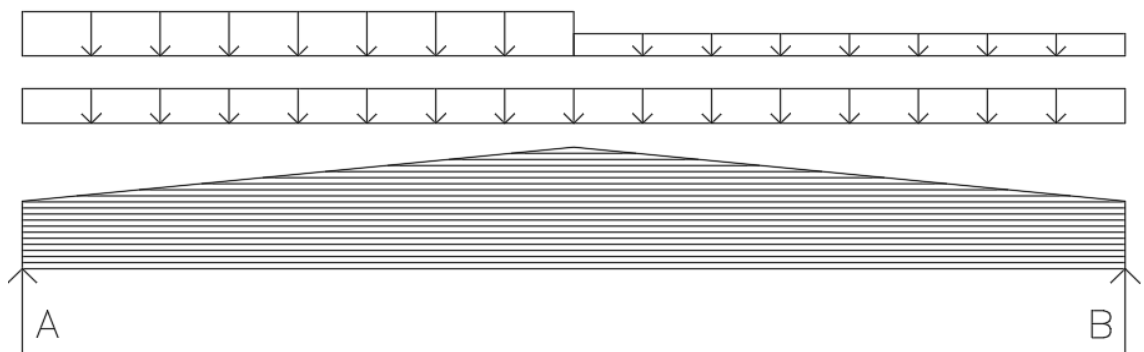
Lasketaan poikittaisen vetolujuuden kokovaikutuskerroin liimapuulle:

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2}; V_0 = 0,01m^3 \text{ vertailutilavuus}$$

Kaava 26. Poikittaisen vetolujuuden kokovaikutuskerroin (RIL 205-1-2017, 89).

3.2.4 Yhdistetty poikittainen veto- ja leikkauskestävyys

Tarkastelua ei tarvitse tehdä kuormitustapauksessa 1 (pysyvät kuormat 100 % + lumi 100 %), koska maksimi momentti sijaitsee harjan kohdalla. Kuormitustapauksessa 2 (pysyvät kuormat 100 % + lumi 50 %) maksimi momentti ei ole harjan kohdalla, jolloin harjalla esiintyy leikkausta.



Kuva 7. Tukireaktiot A ja B.

Ratkaistaan aluksi tukireaktiot A ja B, jonka jälkeen voidaan laskea harjan kohdalla vaikuttava leikkausvoima ja taivutusmomentti.

$$p_{d,1} = p_{g,d} + p_{q,d} \qquad p_{d,2} = p_{g,d} + \frac{p_{q,d}}{2}$$

Ratkaistaan ensin tukireaktio B.

$$\cup M_A = p_{d,1} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{L}{4} + p_{d,2} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{3L}{4} - B \cdot L = 0$$

$$\rightarrow \frac{p_{d,1} \cdot L^2}{8} + \frac{p_{d,2} \cdot 3L^2}{8} = B \cdot L$$

$$\rightarrow B = \frac{p_{d,1} \cdot L}{8} + \frac{p_{d,2} \cdot 3L}{8}$$

Kaava 27. Tukireaktio B.

Ratkaistaan tukireaktio A.

$$\sum F_y = A - p_{d,1} \cdot \frac{L}{2} - p_{d,2} \cdot \frac{L}{2} + B = 0$$

$$\rightarrow A = p_{d,1} \cdot \frac{L}{2} + p_{d,2} \cdot \frac{L}{2} - B$$

Kaava 28. Tukireaktio A.

Lasketaan leikkausvoiman 0-kohta, missä esiintyy suurin taivutusmomentti:

$$A - p_{d,1} \cdot x_{m,0} = 0$$

$$\rightarrow x_{m,0} = \frac{A}{p_{d,1}}$$

Kaava 29. Leikkausvoiman 0-kohta.

Lasketaan maksimi taivutusmomentti, joka esiintyy leikkausvoiman 0-kohdassa:

$$\cup M_d(x_{m,0}) = A \cdot x_{m,0} - p_{d,1} \cdot x_{m,0} \cdot \frac{x_{m,0}}{2}$$

Kaava 30. Maksimi taivutusmomentti.

Lasketaan leikkausvoima harjalla:

$$V_{d,harja} = \left| A - p_{d,1} \cdot \frac{L}{2} \right|$$

Kaava 31. Leikkausvoima harjalla.

Lasketaan taivutusmomentti harjalla:

$$\cup M_{d,harja} = A \cdot \frac{L}{2} - p_{d,1} \cdot \frac{L^2}{8}$$

Kaava 32. Taivutusmomentti harjalla.

Lasketaan leikkausjännitys harjan kohdalla:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d,harja}}{b \cdot h_2}$$

Kaava 33. Leikkausjännitys harjalla.

Lasketaan poikittainen vetojännitys harjalla:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{d,harja}}{b \cdot h_2^2}$$

Kaava 34. Poikittainen vetojännitys harjalla (RIL 205-1-2017, 90).

Lopuksi tarkistetaan mitoitus ehdon toteutuminen:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1$$

Kaava 35. Yhdistetyn poikittaisen veto- ja leikkausjännityksen mitoitusehto (RIL 205-1-2017, 90).

3.2.5 Leikkauskestävyys maksimitaivutusjännityksen kohdalla

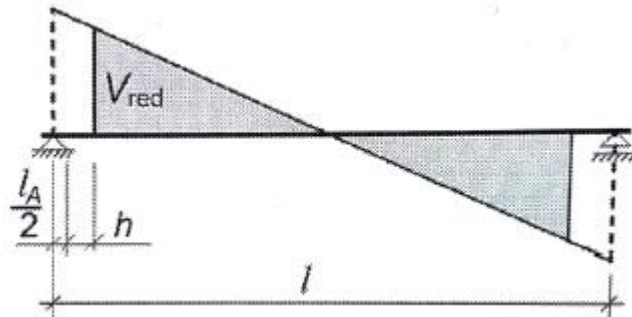
Tätä tarkastelua ei löydy Eurokoodi 5:sta, vaan sen löytää Leo Kähkösen (1997) oppikirjasta Kantavat puurakenteet -insinööriopetus. Leikkausjännityksen maksimiarvo esiintyy suurimman taivutusjännityksen kohdalla. (Puuinfo 2015; Leo Kähkönen, Kantavat puurakenteet -insinööriopetus, 73).

Lasketaan leikkausjännitys viistetyllä yläpinnalla ja tarkistetaan mitoitus ehdon toteutuminen:

$$\tau_d = \sigma_{m,max} \cdot \tan \alpha \leq k_{cr} \cdot f_{v,d}$$

Kaava 36. Leikkauskestävyyden mitoitus ehto maksimitaivutusjännityksen kohdalla (Puuinfo 2015).

3.2.6 Leikkauskestävyys tuella



Kuva 8. Tasaisesti kuormitetun harjapalkin leikkausvoiman pienentäminen (RIL 205-1-2017, 76).

Tasaisesti kuormitetun harjapalkin leikkausvoimaa tuella voidaan pienentää seuraavalla kaavalla:

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

h palkin korkeus tuen reunassa

l_A tuen pituus

Kaava 37. Pienennetty leikkausvoima V_{red} (RIL 205-1-2017,76).

Lasketaan määrävä korkeus h_{A1} etäisyydellä l_A tuen reunasta:

$$h_{A1} = h_A + \tan \alpha \cdot l_A$$

Kaava 38. Määrävä korkeus h_{A1} .

Lopuksi tarkistetaan leikkauskestävyyden mitoitus ehdon toteutuminen:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b \cdot h_{A1}} \leq f_{v,d}$$

Kaava 39. Leikkauskestävyyden mitoitusehto.

3.2.7 Tukipainekestävyys

Syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuksen tulee täyttää seuraava ehto:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_d}{b \cdot l_{c,90,ef}} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}$$

$\sigma_{c,90,d}$ puristusjännityksen mitoitusarvo

R_d tukireaktio

$l_{c,90,ef}$ tehollinen tukipituus

$k_{c,\perp}$ tukipainekerroin

$f_{c,90,d}$ syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo

Kaava 40. Syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuksen mitoitusehto (RIL 205-1-2017, 72).

Tukipainekertoimen $k_{c,\perp}$ arvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l_A} \cdot k_{c,90}$$

$k_{c,90}$ kerroin, jolla huomioidaan kuorman sijainti, puun halkeamismahdollisuus ja puristuman suuruus

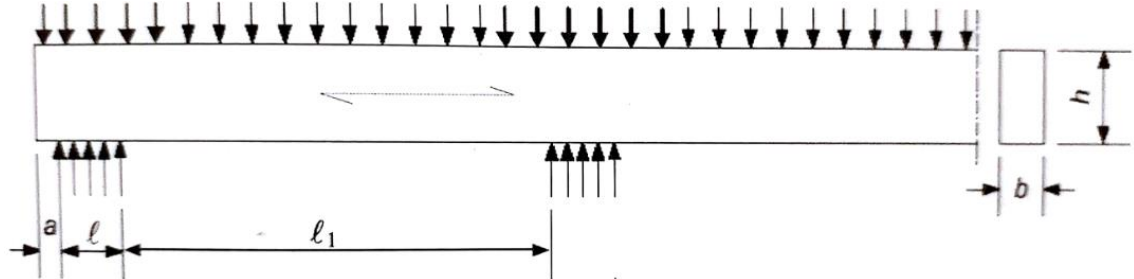
Kaava 41. Tukipainekerroin $k_{c,\perp}$ (RIL 205-1-2017, 72).

Tehollinen tukipituus $l_{c,90,ef}$ määritetään lisäämällä tukipituuteen 30 mm.

$$l_{c,90,ef} = l_A + 30 \text{ mm}$$

Kaava 42. Tehollinen tukipituus $l_{c,90,ef}$ (RIL 205-1-2017, 72).

Kertoimen $k_{c,90}$ arvo erillisillä tuilla olevalle palkille on 1,5, kun puristuspujojen (tukien) välinen etäisyys $l_1 \geq 2h$, ks. kuva 9. Harjapalkilla h - mitta on poikkileikkauksen korkeus kosketuspinnan keskikohtalla. (RIL 205-1-2017, 72).



Kuva 9. Erillisillä tuilla oleva palkki (RIL 205-1-2017, 73).

3.2.8 Kiepahduskestävyys

Harjapalkin kiepahduskestävyyttä tarkastellaan kuormitustapauksessa 1 mitoittavan poikkileikkauksen mukaan, ks. luku 3.2.1. Kiepahdus tapahtuu puristuslujuutta pienemmällä puristusjännityksen arvolla, jos palkkia ei ole kiepahdustuettu. Harjapalkin yläreunan kiepahdustukena käytetään yleensä (orsia tai kattoelementtejä) + jäykisteristikkoa. (Liimapuukäsikirja. Osa 2, 2015, luvut 4 – 5; Hallipes 1.0 Osa 2: Pääkannattimet).

Lasketaan kriittinen taivutusjännitys mitoittavassa poikkileikkauksessa:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h_{mitt} \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05}$$

c kerroin 0,70 lujuusluokille GL30c ja GL30hs

b palkin leveys

h_{mitt} palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa

l_{ef} tehollinen kiepahduspituus

Kaava 43. Kriittinen taivutusjännitys $\sigma_{m,crit}$ (RIL 205-1-2017, 84).

Poikittaissuunnassa puristetulta reunalta välein a tuetun palkin tehollinen kiepahduspituus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$l_{ef} = a + 2h_{mitt}$$

Kaava 44. Tehollinen kiepahduspituus (RIL 205-1-2017, 85).

Lasketaan kiepahduskertoimen määrittämisessä tarvittava palkin suhteellinen hoikkuus:

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

Kaava 45. Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,m}$ (RIL 205-1-2017, 83).

Lasketaan kiepahduskerroin:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

Kaava 46. Kiepahduskerroin k_{crit} (RIL 205-1-2017, 85).

Lopuksi tarkistetaan mitoitus ehdon toteutuminen:

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

Kaava 47. Kiepahduskestävyyden mitoitus ehto (RIL 205-1-2017, 83).

3.2.9 Taipuma-arvio

Tasaisella kuormalla kuormitetun symmetrisen harjapalkin (kuormitustapaus 1) taipuma jännevälillä keskellä voidaan arvioida liimapuukäsikirjassa 2015 esitetyillä kaavoilla. Lopputaipuma muodostuu momentin aiheuttamasta taipumasta ja leikkausvoiman aiheuttamasta taipumasta. Lopputaipumaa pienennetään usein esikoroituksella, jonka arvo on L/300 tai L/400.

Lasketaan hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta (momentti + leikkaus):

$$w_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_{g,k} \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_y} + 0,35 \cdot \frac{P_{g,k} \cdot L^2}{G_{mean} \cdot b \cdot (h_1 + h_2)}$$

Lasketaan hetkellinen taipuma lumikuormasta (momentti + leikkaus):

$$w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_{q,s,k} \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_y} + 0,35 \cdot \frac{P_{q,s,k} \cdot L^2}{G_{mean} \cdot b \cdot (h_1 + h_2)}$$

I_y jäyhyysmomentti $b \cdot h_e^3 / 12$

h_e harjapalkille, $h_1 + 0,33 \cdot L \cdot \tan \alpha_{ap}$

Kaava 48. Harjapalkin hetkellinen taipuma (Liimapuukäsikirja. Osa 2, 2015, luvut 6 – 11).

Lasketaan lopputaipuma $w_{net,fin}$ seuraavasta kaavasta:

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c$$

w_{fin} kokonaistaipuma

w_c esikorotus

Kaava 49. Lopputaipuma $w_{net,fin}$ (RIL 205-1-2017, 97).

Lasketaan kokonaistaipuma w_{fin} seuraavasta kaavasta:

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst,Q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def})$$

k_{def} virumaluku (taulukko 10)

ψ_2 yhdistelykerroin (taulukko 3)

Kaava 50. Kokonaistaipuma w_{fin} (RIL 205-1-2017, 30).

Virumaluvun k_{def} arvo saadaan seuraavasta taulukosta:

Taulukko 9. Virumaluvun k_{def} arvot liimapuulle (RIL 205-1-2017, 50).

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

Lopuksi tarkistetaan kokonaistaipuman ja lopputaipuman pysyvän sallituissa enimmäisarvoissa. Esikorotetulle harjapalkille kokonaistaipuma saa olla enintään L/200 ja lopputaipuma L/300. (RIL 205-1-2017, 98).

$$w_{fin} \leq \frac{L}{200}$$

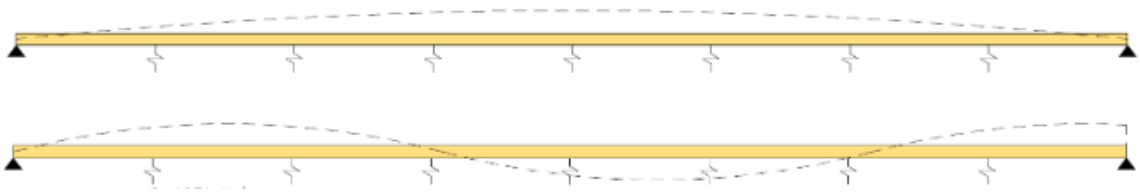
Kaava 51. Kokonaistaipuman ehto (RIL 205-1-2017, 98).

$$w_{net,fin} \leq \frac{L}{300}$$

Kaava 52. Lopputaipuman ehto (RIL 205-1-2017, 98).

3.2.10 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys

Harjapalkki voi kiepahtaa 1. muodon (yhteen suuntaan) tai 2. muodon (s-muoto) mukaan. Kiepahdus muotoon vaikuttaa harjapalkin poikkileikkauksen koko ja stabiloivien tukien tuentajako. Harjapalkin kiepahdusmuotoa kannattaa pyrkiä rajoittamaan 1. muotoon, jolloin stabiloiviin tukiin vaikuttaa huomattavasti pienempi voima. Y-suunnassa stabiloivaan tukeen vaikuttava voima ja tuen jousijäykkyyttä tarvitaan stabiloivan tuen mitoituksessa. (Puuinfo 2018).



Kuva 10. Kiepahdusmuodot (Puuinfo 2018).

Lasketaan poikittaistukien jousijäykkyyden C suurin sallittu arvo seuraavasta ehdosta:

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

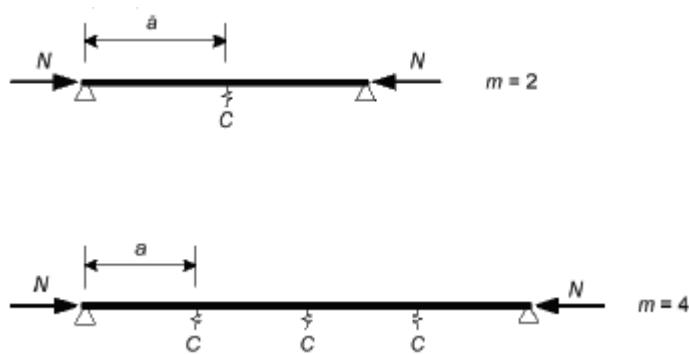
m välein a poikittaistuettujen kenttien lukumäärä ≥ 2

N_d harjapalkin yläreunassa vaikuttavan puristusvoiman mitoitusarvo

a tukiväli

Kaava 53. Jousijäykkyyden ehto (RIL 205-1-2017, 170).

Jousijäykkyyden ehdossa esiintyvät tunnuksat kuvassa esitettyinä.



Kuva 11. Esimerkkejä poikittaistuetuista puristusauvoista (RIL 205-1-2017, 170).

Lasketaan harjapalkin yläreunassa vaikuttavan puristusvoiman N_d mitoitusarvo:

$$N_d = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_{d,mitt}}{h_{mitt}}$$

k_{crit} kiepahduskerroin (ks. Kaava 46)

$M_{d,mitt}$ taivutusmomentti mitoittavassa poikkileikkauksessa (ks. kaava 12)

h_{mitt} palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa (ks. kaava 11)

Kaava 54. Harjapalkin yläreunassa vaikuttavan puristusvoiman N_d mitoitusarvo (RIL 205-1-2017, 172).

Selvitetään palkin kiepahdusmuoto. Kun kriittinen aallonpituus l_s on suurempi kuin puolet harjapalkin jännevälistä L ei 2. muodon kiepahdusta tapahdu.

$$l_s > \frac{L}{2}$$

Kaava 55. Nurjahdusmuodon määräytymisen ehto (RIL 205-1-2017, 172).

Lasketaan kriittinen aallonpituus:

$$l_s = \max \left\{ \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_{z,mitt}}}} \right. \\ \left. \frac{C}{2a} \right\}$$

$I_{z,mitt}$ jäyhyysmomentti mitoittavassa poikkileikkauksessa

Kaava 56. Kriittinen aallonpituus l_s (RIL 205-1-2017, 171).

Lasketaan jäyhyysmomentti z-suunnassa mitoittavassa poikkileikkauksessa:

$$I_{z,mitt} = \frac{h_{mitt} \cdot b^3}{12}$$

Kaava 57. Jäyhyysmomentti z-suunnassa mitoittavassa poikkileikkauksessa.

Kun palkin kiepahdusmuoto tiedetään, voidaan yksittäisen stabiloivan tuen kiepahdustuentaan tarvittava voima F_d ratkaista. Harjapalkin kiepahtaessa 1. muodon mukaan voima F_d määritetään yhtä nurjahdusaaltoa vastaavasta tuentavoimasta, jolloin kaava saa muodon:

$$F_d = \frac{N_d \cdot a}{50 \cdot L}$$

Kaava 58. Stabiloivaan tukeen vaikuttava voima F_d , kun kiepahdusmuoto 1 (Puuinfo 2018; RIL 205-1-2017, 172).

Harjapalkin kiepahtaessa 2. muodon mukaan stabiloivaan tukeen vaikuttava voima F_d lasketaan kaavalla:

$$F_d = \frac{N_d}{80}$$

Kaava 59. Stabiloivaan tukeen vaikuttava voima F_d , kun kiepahdusmuoto 2 (RIL 205-1-2017, 171).

Kiepahdusmuodossa 2 tukeen vaikuttavaa voimaa voidaan pienentää kertoimella $k_{s,red}$, kun palkki on tuettu tasavälein vähintään neljästä pisteestä. (RIL 205-1-2017, 171).

$$k_{s,red} = \frac{a}{l_s - a}$$

Kaava 60. Stabiloivan voiman pienennys kerroin $k_{s,red}$ (RIL 205-1-2017, 171).

4 PALOMITOITUS

Onnettomuustilanteessa (tulipalo) murtorajatilan mitoituskuorman kuormitusyhdistely lasketaan kaavalla:

$$P_{d,fi} = G_{kj} + \psi_{1,1}Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i}Q_{k,i}$$

Kun määräävä muuttuva kuorma on lumi, jää tai tuuli.

$$P_{d,fi} = G_{kj} + \psi_{2,1}Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i}Q_{k,i}$$

Kun määräävä muuttuva kuorma on hyötykuorma.

Kaava 61. Palotilanteen kuormitusyhdistely (RIL 205-1-2017, 29).

Palotilanteessa liimapuun lujuusominaisuuden (taivutus, puristus, veto ja leikkaus) mitoitusarvo $X_{d,fi}$ lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$X_{d,fi} = k_{fi} \cdot X_k$$

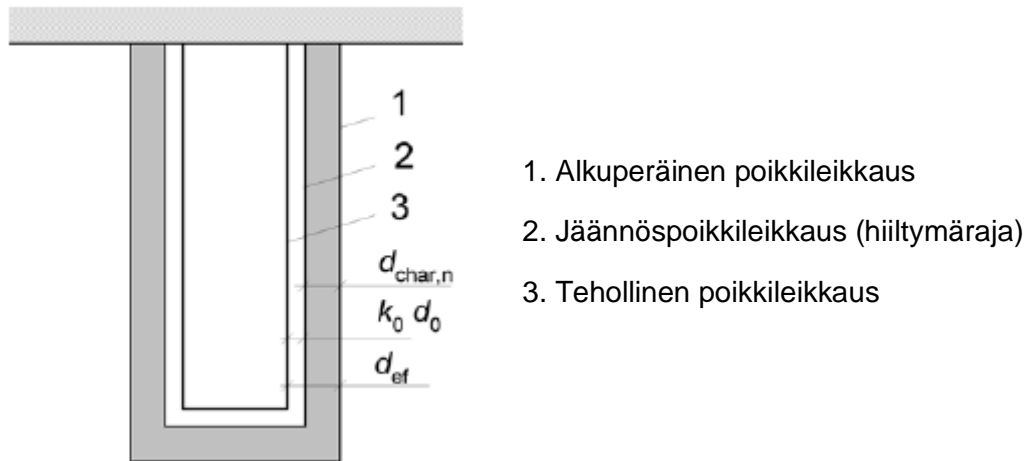
X_k lujuusominaisuuden ominaisarvo

k_{fi} kerroin (liimapuulle 1,15)

Kaava 62. Lujuusominaisuuden mitoitusarvo palotilanteessa (Eurokoodi 5 lyhennetty suunnitteluohje 2018, 44).

Suunnitteluvaiheessa on tiedettävä, mihin paloluokkaan rakennus kuuluu. Paloluokasta selviää rakennuksen kantavien rakenteiden palonkestoluokka. Palonkestoluokka määrittää, kuinka monta minuuttia kantavan rakenteen on kestävä tulipalossa sortumatta. Hallirakennuksilla paloluokka on yleensä P2, jolloin kantavien rakenteiden palonkestoluokka on R30. (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2011, E1).

Harjapalkin palokestävyys lasketaan tehollisen poikkileikkauksen menetelmällä. Menetelmässä harjapalkin poikkileikkausta pienennetään kaikilta palolle alttiina olevilta sivuilta hiiltemissävyvyyden d_{ef} verran ja mitoitus suoritetaan jäljelle jäävälle teholliselle poikkileikkaukselle. (SFS-EN 1995-1-2+AC, 56).



Kuva 12. Tehollinen poikkileikkaus (SFS-EN 1995-1-2+AC, 56).

Lasketaan hiiltymissyvyys:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

$d_{char,n}$ nimellisen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo

d_0 7 mm

k_0 kerroin

Kaava 63. Hiiltymissyvyys d_{ef} (SFS-EN 1995-1-2+AC, 56).

Lasketaan nimellisen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t$$

β_n nimellisen hiiltymisnopeuden mitoitusarvo

t paloaika minuutteina

Kaava 64. Nimellisen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo (SFS-EN 1995-1-2+AC, 40).

Harjapalkki valmistetaan kuusisahatavarasta, jolloin taulukosta 10 saadaan β_n arvoksi 0,7 mm/min.

Taulukko 10. Hiiltymänopeuden mitoitusarvot (SFS-EN 1995-1-2+AC, 44).

	β_0	β_n
	mm/min	mm/min
a) Havupuu ja pyökki	0,65	0,7
Liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$		
Sahatavara, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Lehtipuu		
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys on 290 kg/m^3	0,65	0,7
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL, jonka ominaistiheys on $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Levyt ja lautaverhoukset		
Lautaverhoukset	0,9 ^a	–
Vaneri	1,0 ^a	–
Muut puulevyt kuin vaneri	0,9 ^a	–
^a Arvot pätevät, kun ominaistiheys on 450 kg/m^3 ja levyn paksuus on 20 mm; ks. kohtaa 3.4.2(9) tiheyden tai paksuuden poiketessa näistä arvoista.		

Lasketaan kerroin k_0 seuraavasta ehdosta:

$$k_0 = \min \left\{ \frac{t}{20}; 1 \right\}$$

Kaava 65. Kerroin k_0 (Eurokoodi 5 lyhennetty suunnitteluohje 2018, 46).

Lasketaan harjapalkin korkeus tuella palotilanteessa:

$$h_{A,fi} = h_A - d_{ef}$$

Kaava 66. Harjapalkin korkeus tuella palotilanteessa.

Lasketaan korkeus harjankohdalla palotilanteessa:

$$h_{ap,fi} = h_{ap} - d_{ef}$$

Kaava 67. Harjapalkin korkeus harjankohdalla palotilanteessa.

Lasketaan palkin leveys palotilanteessa:

$$b_{fi} = b - 2 \cdot d_{ef}$$

Kaava 68. Palkin leveys palotilanteessa.

Lasketaan tuen pituus palotilanteessa:

$$l_{A,fi} = l_A - d_{ef}$$

Kaava 69. Tuen pituus palotilanteessa.

5 LOPUKSI

Opinnäytetyön tuloksena syntyi Excel-pohjainen laskentaohjelma yksiaukkoisen, symmetrisen liimapuuharjapalkin mitoitukseen, joka perustuu sekä Eurokoodi 5:een että Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisuihin RIL 205-1-2017 ja RIL 205-2-2009. Palomitoitusta käsittelevästä ohjeesta (RIL 205-2-2009) on ilmestymässä uusi painos vuoden 2019 aikana, joten laskentaohjelmaa päivitetään vielä uusimman ohjeen mukaiseksi.

Laskentaohjelman ulkoasu ja toiminta on pyritty pitämään mahdollisimman selkeänä. Taulukot ja mitoitusosio on jaettu erillisille välilehdille. Lähtötietoja syöttämällä mitoitusvälilehden ohjelma hakee tarvittavat kertoimet ja materiaalilujuudet automaattisesti taulukot-välilehdeltä. Kertoimien ja materiaalilujuus arvojen päivittyminen tapahtuu Excelissä PHAKU- ja VHAKU-toiminnoilla sekä edellisiä toimintoja yhdistämällä toisiinsa. Kun lähtötiedot, kuormat, rakenne- ja tuentatiedot ovat selvillä, ohjelma laskee kestävyystarkastelujen käyttöasteet. Saadut käyttöasteet esitetään tulosteen (ks. Liite 1) alareunassa sekä normaalitilanteessa että palotilanteessa. Ohjelma ilmoittaa tekstillä (OK) käyttöasteen ollessa sallituissa rajoissa ja tekstillä (VIRHE) käyttöasteen ylittyessä.

Saatuja mitoitustuloksia tutkimalla voidaan päätellä palomitoituksen olevan harvoin mitoittava tekijä, sillä vaikka harjapalkki mitoitetaan palotilanteessa pienemmillä dimensioilla, ovat palotilanteen kuormat merkittävästi pienemmät kuin normaalitilanteessa. Tuloksista huomataan myös, että määräävät kestävyys tarkastelut harjapalkin mitoituksessa ovat yleensä taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa, kiepahduskestävyys ja tukipainekestävyys.

Tukien vähimmäispituusvaatimukset kasvavat hyvin suuriksi harjapalkin pituuden läheisyydessä 20 metriä. Harjapalkin tukipainekestävyyttä voidaan parantaa tukien kohdalle asennettavalla ns. atrainhelalla. Suuremmissa jänneväleissä atrainhelan käyttö on lähes välttämätöntä, mikäli halutaan välttää suurempien pilarikokojen käytöltä. Atrainhelan mitoitusosio tullaan lisäämään laskentaohjelmaan samalla kun palomitoitusta päivitetään uusimman ohjeen mukaiseksi.

LÄHTEET

Kähkönen, L. 1997. Kantavat puurakenteet -insinööriopetus. Jyväskylä: Rakennustieto Oy.

Liimapuukäsikirja. 2003. Helsinki: Wood Focus Oy/Suomen liimapuuyhdistys ry.

Liimapuukäsikirja. Osa 1. 2014. Helsinki: Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>.

Liimapuukäsikirja. Osa 2. 2015. Helsinki: Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>.

Liimapuukäsikirja. Osa 3. 2015. Helsinki: Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>.

Puuinfo Oy 2014. HalliPES 1.0 Osa 2: Pääkannattimet. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.puuinfo.fi/hallipes>.

Puuinfo Oy 2015. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutus 2015. Esimerkkilaskelma: Harjapalkki.

Puuinfo Oy 2018. Esimerkkilaskelma: Liimapuuharjapalkki. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Esimerkkilaskelma_Liimapuuharjapalkki_0_0.pdf.

Puuinfo Oy 2018. Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje. Neljäs painos. Helsinki: Puuinfo Oy. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.puuinfo.fi/eurokoodi-5-lyhennetty-suunnitteluohje>.

RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

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

RIL 205-2-2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suomen rakentamismääräyskokoelma 2011, E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö.

SFS-EN 14080. Puurakenteet. Liimapuu ja liimattu sahatavara. Vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 18.11.2013.

SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 16.06.2014.

SFS-EN 1995-1-2 + AC. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 21.12.2004.

Liite 1. Laskentaohjelman tuloste.

		HARJAPALKKI		RIL 205-1-2017	Työ. nro:	Versio 1.0	LP1
		EC5	FIN SFS EN	RIL 205-2-2009	Pvm:	Laskija: HAL	
LÄHTÖTIEDOT:				RAKENNE- JA TUENTATIEDOT:			
Lujuusluokka	GL30c			Palkkijako k/k	8	m	
Käyttöluokka	1			Paksuus (b)	190	mm	
Seuraamusluokka	CC2			Korkeus tuella (h_A)	1,300	m	
Kuorman aikaluokka	Keskipitkä			Korkeus Harjalla (h_{ap})	1,850	m	
Palonkesto aika	R15			Yläreunan kaltevuus (α)	3,14810	°	
Esikorotus (L/400)	50	mm		Tukijako Y- suunnassa (a)	2	m	
Sijainti	Turku			Tuen pituus (l_A)	0,495	m	
LIIMAPUUN MATERIAALILUJUUDET:				STAATTINEN MALLI:			
Taivutus (N/mm^2)	$f_{m,k}$	30					
Veto (N/mm^2)	$f_{t,0,k}$	19,5					
	$f_{t,90,k}$	0,5					
Puristus (N/mm^2)	$f_{c,0,k}$	24,5					
	$f_{c,90,k}$	2,5					
Leikkaus (N/mm^2)	$f_{v,k}$	3,5					
	$f_{r,k}$	1,2					
KERTOIMET:							
Kimmomoduuli (N/mm^2)	$E_{0,mean}$	13000	γ_M	1,25	μ_2	0,8	
	$E_{0,05}$	10800	K_{FI}	1	C_e	1	
Liikumoduuli (N/mm^2)	G_{mean}	650	k_{mod}	0,8	C_t	1	
	$G_{0,05}$	540	k_{def}	0,6	$\gamma_{1,1}$	0,4	
Tiheys (kg/m^3)	ρ_{mean}	430	k_{cr}	1	k_{mod}/γ_m	0,64	
KUORMAT:				MRT:			
Pysyvä kuorma ($G_{k,1}$)	1	kN/m^2	$P_d =$	max{	34,91	kN/m	
Palkin omapaino ($G_{k,2}$)	1,48	kN/m			12,80	kN/m	
Lumikuorma maassa (s_k)	2,5	kN/m^2	$P_{d,fi} =$	15,8827	kN/m		
Lumikuorma katolla ($Q_{k,1}$)	2	kN/m^2	KRT:				
Kuorman jatkuvuus (k)	1		$P_k =$	25,48	kN/m		
MITOITUSTULOKSET:				Norm.		Palo	
Taivutuskestävyys $M_{d,mitt}$		96,5 %	OK	29,8 %	OK		
Taivutuskestävyys $M_{d,max}$		87,2 %	OK	26,9 %	OK		
Poikittainen vetokestävyys $M_{d,max}$		86,4 %	OK	25,7 %	OK		
Poikittainen vetokestävyys $M_{d,max} + V_{d,harja}$		79,7 %	OK	24,8 %	OK		
Leikkauskestävyys $M_{d,mitt}$		43,4 %	OK	13,4 %	OK		
Leikkauskestävyys tuella		78,0 %	OK	24,0 %	OK		
Tukipainekestävyys		137,5 %	VIRHE	42,9 %	OK		
Kiepahduskestävyys		113,4 %	VIRHE	47,0 %	OK		
Taipuma		W_{fin}	80,3 %	OK			
		$W_{net,fin}$	43,5 %	OK			
Y-suunnan stabiloiva tuki (Tuen voiman määrää muoto 2)		F_d (kN)	2,22	C (N/mm)	347,0		