



# Liimapuisen mastokehän mitoit- tus

Ella Kettunen

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2019

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Talonrakennustekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Talonrakennustekniikka

KETTUNEN, ELLA:  
Liimapuisen mastokehän mitoitus

Opinnäytetyö 79 sivua, joista liitteitä 32 sivua  
Toukokuu 2019

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli mitoittaa mastokehän mastopilari, harjapalkki ja perustusliitoksen liimaruuvi, selvittää hankolautaliitokseen syntyvät rasitukset, sekä laskea mastokehän vaakasiirtymä. Lisäksi tarkoituksena oli luoda MathCAD-pohjainen laskentaohjelma Sweco Rakennetekniikka Oy:n käyttöön alustavaa kehän mitoitusta varten.

Tutkimustyö koostui tutustumisesta liimapuuhun rakennusmateriaalina, perehtymisestä mastokehärakenteen toimintaperiaatteeseen sekä olemassa olevien laskentaohjeiden etsimisestä. Tämän lisäksi tuli sisäistää elementtimenetelmän taustalla oleva laskentaperiaate. Lopputuloksena syntyi aiempiin mitoitusohjeisiin ja elementtimenetelmään pohjautuva laskentaohjelma ja -ohje liimapuiselle mastokehälle, jonka pääkannattimena on harjapalkki. Mitoituksen havainnollistamiseksi tehtiin esimerkkilaskelmat.

Laskentaohjelma on luotu siten, että sitä on mahdollista päivittää tarpeen tullen. Mahdollisena kehitystyönä laskentaan voisi lisätä useampia vaihtoehtoisia pääkannattimia sekä laajentaa tarkastelua tasokehästä avaruuskehään. Laskentaohjelma on Sweco Rakennetekniikka Oy:n käytössä, jonka vuoksi se ei ole liitettyä tähän opinnäytetyöhön.

---

Asiasanat: mastokehä, liimapuu, harjapalkki, mastopilari, siirtymä

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Construction Engineering  
Building Construction

**ELLA KETTUNEN:**

Designing of double-hinged frame with cantilever columns

Bachelor's thesis 79 pages, appendices 32 pages  
May 2019

---

The purpose of this thesis was to create a designing guide and MathCAD-based program for preliminary designing of double-hinged frame with cantilever columns for Sweco Rakennetekniikka Oy. The program was to include whole designing of the frame. The program was kept confidential.

The data of the thesis was based on a literary research. The result was a designing guide and a program for ridge beam, cantilever column, connections and horizontal displacement. The designing was based on the Eurocodes and the latest Finnish national standards.

The program can be updated easily if needed. Possible developments could be adding more alternatives for beams and including halls longitudinal effect on designing.

---

Key words: double-hinged frame, cantilever columns, ridge beam, displacement, glued laminated timber

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	LIIMAPUU RAKENNUSMATERIAALINA .....	7
3	MASTOKEHÄRAKENTEEN TOIMINTAPERIAATTEET .....	11
	3.1 Pääkannattimet .....	12
	3.2 Mastopilarit.....	13
	3.3 Päätyrakenteet.....	14
	3.4 Sekundäärirakenteet.....	15
	3.5 Jäykistys.....	16
4	MASTOKEHÄN MITOITUS.....	18
	4.1 Harjapalkin mitoitus.....	19
	4.1.1 Taivutus.....	19
	4.1.2 Poikittainen veto harjalla.....	20
	4.1.3 Yhdistetty poikittainen vetokestävyys ja leikkauskestävyys harjalla .....	21
	4.1.4 Leikkaus .....	22
	4.1.5 Tukipaine.....	23
	4.1.6 Taipuma .....	24
	4.1.7 Kiepahdus.....	25
	4.1.8 Palomitoitus.....	27
	4.2 Mastopilarin mitoitus .....	28
	4.2.1 Nurjahdus (z-suuntaan).....	29
	4.2.2 Kiepahdus.....	30
	4.2.3 Leikkaus .....	31
	4.2.4 Palomitoitus.....	32
	4.3 Liitokset.....	32
	4.3.1 Perustusliitos .....	33
	4.3.2 Pilarin ja palkin välinen liitos .....	36
	4.4 Kehän vaakasiirtymä .....	39
5	POHDINTA .....	45
	LÄHTEET .....	47
	LIITTEET .....	48
	Liite 1. Esimerkki harjapalkin mitoituksesta.....	48
	Liite 2. Esimerkki mastopilarin mitoituksesta .....	57
	Liite 3. Esimerkki liitosten mitoituksesta .....	66
	Liite 4. Esimerkki kehän siirtymän laskennasta .....	72

## 1 JOHDANTO

Liimapuun kehitys on mahdollistanut sen, että nykyään myös puusta voidaan tehdä pitkien jänneväliden rakenteita teräksen ja teräsbetonin ohella. Tämän kehityksen myötä liimapuun käyttö varsinkin hallirakentamisessa on lisääntynyt. Myös hallirakenteiden mitoitusta kehitetään koko ajan. Pilareiden ja palkkien mitoitukseen on jo olemassa tarkkoja ohjeita ja useita laskentaohjelmia. Lisäksi liitosten mitoitus on paraikaa kehityksen alla. Tällä hetkellä liitosmitoitus on kuitenkin vielä melko alkuvaiheilla ja siihen on olemassa vain hyvin yksinkertaiset Puuinfon ohjeet. Hallien kehiä mitoittaessa myöskään siirtymämitoitukseen ei ole olemassa selkeitä ohjeita tai kunnon laskentapohjia, vaan siirtymälaskenta tehdään pääsääntöisesti FEM-ohjelmilla.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan mastokehän toimintaa ja mitoitusta, jonka tuotoksena toteutuu MathCAD -pohjainen laskentaohjelma yrityksen käyttöön mastokehän alustavaa mitoitusta varten. Raportissa käsitellään ohjelman tekoon vaadittava teoria, sekä esitetään laskuesimerkki mastokehän vaakasiirtymästä. Pilarin ja palkin mitoitus tehdään RIL 205-1-2017 mukaan ja liitosten laskenta tehdään HalliPES:n voimaliitosten mitoitusohjeiden mukaisesti. Siirtymälaskennan taustalla toimii elementtimenetelmä, johon myös FEM-pohjaiset laskentaohjelmat perustuvat. Opinnäytetyössä ei kuitenkaan perehdytä tarkemmin elementtimenetelmän toimintaperiaatteeseen, vaan esitetään, kuinka sitä voidaan hyödyntää siirtymien laskennassa. Opinnäytetyössä käsitellään vain liimapuuraakenteisia mastokehiä, joiden pääkannattajana on harjapalkki.

Opinnäytetyön päätarkoitus on tehdä MathCAD -pohjainen laskentaohjelma mastokehän mitoitukselle Sweco Rakennetekniikka Oy:n käyttöön. Raportin tarkoitus on esittää teoria laskentapohjan taustalla. Ohjelmasta tehdään mahdollisimman helppokäyttöinen ja helposti tulkittava. Idea opinnäytetyöhön tuli Sweco Rakennetekniikka Oy:n suunnittelijalta, joka työskentelee paljon liimapuuhallien parissa. Vielä ei ole olemassa yksinkertaista ohjelmaa, jolla pystyisi nopeasti mitoittamaan sekä pilarin, palkin että liitokset ja josta saisi selville lisäksi kehän

siirtymät. Opinnäytetyön ohjaajana toimii Sweco Rakennetekniikka Oy:n Puu-  
osasto 1:n osastopäällikkö Heikki Löytty, ja ohjaavana opettajana Lehtori Henri  
Salonen.

## 2 LIIMAPUU RAKENNUSMATERIAALINA

Liimapuu on puutavaraa, joka valmistetaan liimaamalla havupuisia lamelleja yhteen. Lamelleina käytetään yleensä kuusta, mutta myös muiden havupuiden, kuten männyn käyttö on mahdollista. Lamellien syyt sijoitetaan rakenteen pituus-suuntaan, jolloin taivutus tapahtuu lamellien tasossa. Suorissa rakenteissa lamellipaksuus on yleensä 45 millimetriä ja taivutetuissa rakenteissa 33 millimetriä. Liimapuun korkeutena käytetään yleensä lamellipaksuuksien monikertoja, mutta kuitenkin vähintään neljää lamellipaksuutta. Lamellien yhteen liimaamisen avulla saadaan aikaan sahatavaraa homogeenisempi tuote, sillä oksat jakautuvat tällöin tasaisesti puutavaraan. Tämä vähentää oksien aiheuttamia vaurioita, jonka vuoksi liimapuun lujuudet ovat hieman suurempia kuin vastaavalla sahatavaraalla on. Liimapuulle käytettäviä lujuuksia on esitetty taulukossa 1. (Liimapuukäsikirja Osa 1 2014, 19, 20, 22)

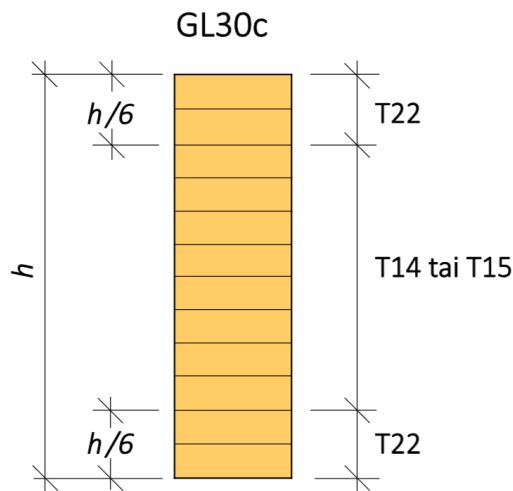
TAULUKKO 1. Liimapuun lujuusominaisuudet (Liimapuukäsikirja Osa 2, Luku 1, 12-13)

Lujuusluokka		GL28c	GL28h	GL30c	GL30h	GL32c	GL32h
Ominaislujuudet (N/mm <sup>2</sup> )							
Taivutus	$f_{m,k}$	28	28	30	30	32	32
Veto	$f_{t,0,k}$	19,5	22,3	19,5	24	19,5	25,6
	$f_{t,90,k}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Puristus	$f_{c,0,k}$	24	28	24,5	30	24,5	32
	$f_{c,90,k}$	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
	$f_{v,90,k}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Jäykkyysominaisuudet (N/mm <sup>2</sup> )							
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$	10400	12600	13000	13600	13500	14200
	$E_{0,05}$	8600	10500	10800	11300	11200	11800
	$E_{90,mean}$	300	300	300	300	300	300
Liukumoduuli	$G_{mean}$	650	650	650	650	650	650
Tiheydet (kg/m <sup>3</sup> )							
Ominaisstiheys	$\rho_k$	390	425	390	430	400	440
Tiheyden keskiarvo	$\rho_{mean}$	420	460	430	480	440	490

Liimapuutekniikan kehitys alkoi jo 1800-luvun lopulla Saksassa. 1900-luvun alussa tekniikka tuli Skandinaviaan Norjan kautta ja ensimmäinen liimapuura-kenne valmistettiin Suomessa 1940-luvun alussa. Aina 1960-luvun alkuun asti liimapuun tuotanto Suomessa oli melko vaatimatonta, mutta sen jälkeen se on ollut jatkuvassa kasvussa, ja jo 1990-luvulla liimapuuta käytettiin Suomessa 20 000–30 000 m<sup>3</sup> vuodessa. Nykyään Suomessa tuotetaan liimapuuta noin 300 000 m<sup>3</sup> vuodessa, ja tästä noin 50 000 m<sup>3</sup> käytetään kotimaassa. Myytävästä liimapuusta noin 75 % käytetään talonrakentamiseen. Loput 25 % käytetään erilaisiin tarkoituksiin, kuten siltarakenteisiin, voimajohtopylväisiin ja venemastoihin. (Liimapuukäsikirja osa 1 2014, 8-13)

Valmistustapansa vuoksi liimapuulla on monia etuja. Lamelli-rakenteen vuoksi liimapuun dimensiot ovat teoriassa rajoittamattomat. Rajoittavina tekijöinä toimivat kuitenkin tuotantolaitteiden ja -hallien koot, sekä kappaleen kuljetettavuus, jonka vuoksi korkeus rajoitetaan yleensä kahteen metriin ja pituus 30-40 metriin. Valmistustapa mahdollistaa myös moninaiset palkkien muodot. Palkeista voidaan saada kaarevia tai esikorotettuja kaarruttamalla lamellit ennen liimausta. Myös erilaisten kapenevien palkkien valmistus on mahdollista joko eri pituisten lamellien avulla tai suorasta palkista haluttuun muotoon sahaamalla. Liimapuisissa kappaleissa voidaan käyttää myös heikkolaatuisempaa puutavaraa, joka ei sovellu sahatavaraksi. Tällainen heikomman lujuusluokan puutavara sijoitetaan kappaleen sisimmiksi lamelleiksi, sillä sisäosissa rasitukset eivät ole yhtä korkeita kuin kappaleen ulko-osilla. Kuvassa 1 on esitetty, kuinka heikompaa puutavaraa voidaan sijoittaa poikkileikkauksen keskilamelleiksi. (Liimapuukäsikirja Osa 1 2014, 20-22)





Kuva 1 Yhdistetty liimapuu (Liimapuukäsikirja osa 2, luku 1, 7)

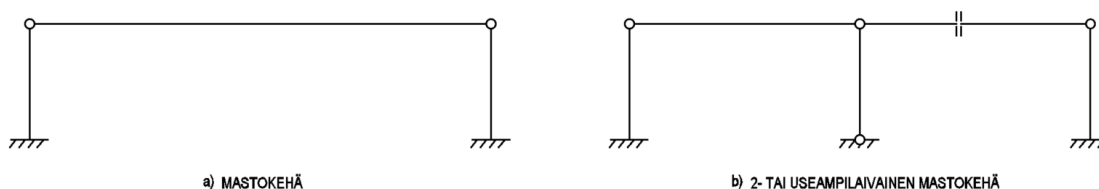
Tällaista tuotetta, jossa jännitysten jakautuminen poikkileikkauksessa on otettu huomioon, kutsutaan yhdistetyksi liimapuuksi. Yhdistettyä liimapuuta käytettäessä on puumateriaalin käyttö taloudellisempaa. Liimapuu on myös hyvin mittatarkkaa materiaalia valmistusprosessin vuoksi, ja tästä syystä toisinaan joudutaan käyttämään sahatavaran sijasta liimapuuta, vaikka sahatavaran lujuus ja jäykkyys olisivatkin riittäviä. Valmistusprosessissa mittatarkkuutta lisää se, että ennen liimaamista lamellit kuivataan noin 12 % kosteuteen, jolloin kuivumisesta aiheutuu hyvin epätodennäköisesti muodonmuutoksen aiheuttamia vaurioita rakenteeseen. (Liimapuukäsikirja osa 2, luku 1, 7; Step 1, A8, 5)

Alkuun liimapuussa liimana käytettiin kaseiiniliimaa ja rakenteet, joissa sitä on käytetty, ovat yhä edelleen toimivia. 1930-luvun alulla alettiin käyttää fenolihartsiliimoja, jotka ovat erinomaisia säälle altistuvissa rakenteissa. Huonona puolena fenolihartsiliimoissa sekä myöhemmin käytetyissä fenoli-resorsinoliimoissa olivat liiman aiheuttamat tummat saumat. Nykyään käytössä on pääsääntöisesti vaalean sauman muodostavia ja säänkestäviä melamiinipohjaisia liimoja. Nämä liimat asettavat erityisvaatimuksia kovettumiselle ja niiden ympäristövaikutukset ovat pienemmät. Pohjoismaiden ulkopuolella käytössä on myös usein polyuretaaniliimaa, jota Suomessa voidaan käyttää sormijatkamiseen. Rakenneliimoja kehitetään koko ajan, ja koska ympäristöasiat ovat nykyään tärkeitä myös rakentamisessa, kiinnitetään kehityksessä huomiota muun muassa ympäristöystävällisempien liimojen luomiseen. (Liimapuukäsikirja Osa 1 2014, 13, 19)

Liimapuukurakenteen syttyminen ja palon eteneminen tapahtuu hitaasti homogeenisen rakenteen ja usein melko suuren poikkileikkauksen vuoksi. Hiiltymisnopeus liimapuulla on tavallisesti 0,6-1,0 mm/min. Kun poikkileikkaus on suuri, hiiltynyt kerros suojaa puun sisäosia, jolloin liimapuun kantokyky säilyy parempana palon aikana. Usein liimapuun luontainen palonkestävyys onkin riittämätön vain liitosten kohdalla. Paloturvallisuutta voidaan parantaa esimerkiksi pintakäsittelyllä tai suojaverhouksella, sekä piilokiinnityksillä, kuten tappivaarnaliitoksella. (Liimapuukäsikirja osa 1 2014, 24, 70)

### 3 MASTOKEHÄRAKENTEEN TOIMINTAPERIAATTEET

Mastokehä on rakennemalli, jota käytetään yleisesti Suomessa hallirakentamisessa. Erilaiset hallirakenteet ovat myös tärkeimpiä liimapuun käyttökohteita. Rakenteeltaan mastokehä on yksinkertainen, ja tämän vuoksi myös edullinen rakennemalli. Kuten kuvassa 2a on esitetty, mastokehässä pilarit ovat jäykästi kiinni perustuksissa ja palkki on kiinnitetty pilareiden päälle nivelellisesti. Toisin sanoen pilarit toimivat siis jäykkinä mastoina, jolloin alapään jäykkä liitos välittää pysty- ja vaakasuuntaiset tukireaktiot, sekä tukimomentin perustuksille. Pilareiden ja palkin välinen nivelellinen liitos puolestaan siirtää pysty- ja vaakavoimia.

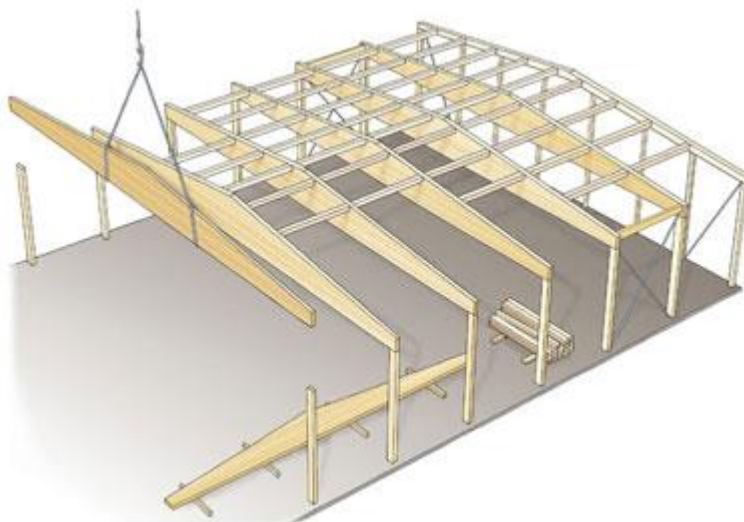


Kuva 2. Mastokehän rakennemallit

Tavallisesti mastokehässä on kaksi kantavaa mastopilaria, joiden välille kiinnitetään nivelellisesti pääkannattaja. Rakenne on kuitenkin mahdollista toteuttaa myös useampilaivaisena, kuten kuvassa 2b on esitetty, jolloin rakenteessa on useampi kuin yksi pääkannattaja. Tällöin päätypilarit ovat mastopilareita, kuten yksilaivaisessa rakennemallissa, mutta keskipilareiden alapään liitokset voidaan toteuttaa myös nivelellisenä. Palkki on myös mahdollista toteuttaa useampiaukkoisena, jolloin palkin alle, mastopilareiden väliin asennetaan nivelellisesti pilari. Tällaiset rakenteet ovat kuitenkin harvinaisempia, sillä mastokehärakenteella tavoitellaan usein suuria jännevälejä. (Puuhallin suunnittelu 2009, 28, 42, 68; Liimapuukäsikirja 2003, 28)

Mastokehiä käytetään yleensä suurta jänneväliä vaativissa rakennuksissa, kuten halleissa. Tällaisten rakennusten runko koostuu peräkkäin pystytetyistä mastokehistä, sekä niiden välille asennetuista seinä- ja kattorakenteista. Rakennuksen päädyt toteutetaan yleensä kevyempirakenteisilla kehillä, jotka muodostuvat

nurkkapilareista ja palkeista, sekä tuulipilareista, jotka kannattelevat päädyn seinärakenteita ja vastaanottavat päädyn tuulikuormia. Lisäksi tarvitaan myös pituussuunnassa lisäjäykistystä tuovia rakenteita, sillä runkorakenteet toimivat vain pääkannattajien suuntaisina jäykisteinä. Tavallinen liimapuuhallirakenne on esitetty kuvassa 3.



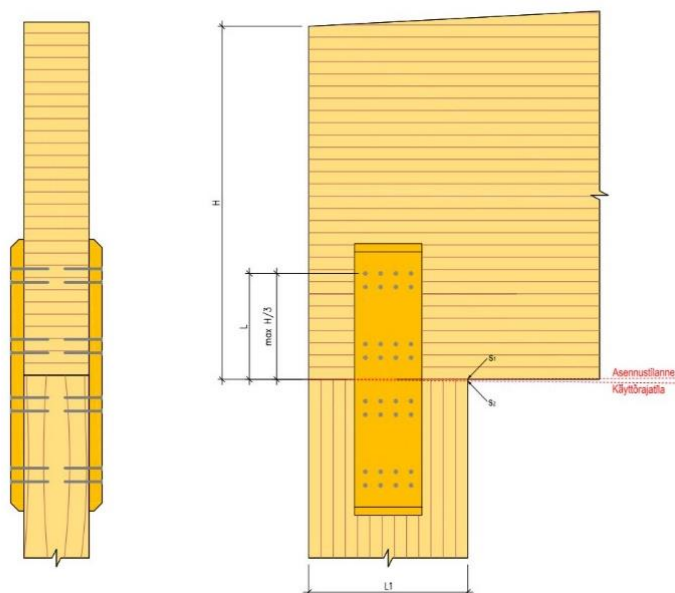
Kuva 3. Liimapuuhallin runko (Martinsonstra.com)

Tavallisesti mastokehähalleissa jännevälit ovat alle 30 metriä. Tehokas kehäväli on 6-8 metriä, jotta kantavien rakenteiden dimensiot pysyvät kohtuullisina ja katto- ja seinäelementit asettuvat hyvin pilariväleihin vakiokokoisina. Kehien lukumäärä määräytyy rakennuksen suunnitellun pituuden mukaan, mutta niitä tulisi olla kolmella jaollinen määrä. (Puuhallin rakenteet, esisuunnittelu ja valintaperusteet 2009, 18, 20)

### 3.1 Pääkannattimet

Mastokehän pääkannattimena voidaan käyttää monia erilaisia palkkivaihtoehtoja, kuten suoraa palkkia, harjapalkkia, mahapalkkia, pulpettipalkkia tai bumerangipalkkia. Näiden lisäksi on olemassa myös muita harvinaisempia kannatinvaihtoehtoja, kuten erilaisia ristikkorakenteita. Liitosten kannalta palkkivalinnalla ei ole suurta merkitystä, joten pääkannattimeksi tulee valita se, joka on kyseiseen tilanteeseen edullisin. Tavallisesti suurin käytettävä jänneväli on 30 metriä. (HalliPES 1.0, osa 2, 1-5)

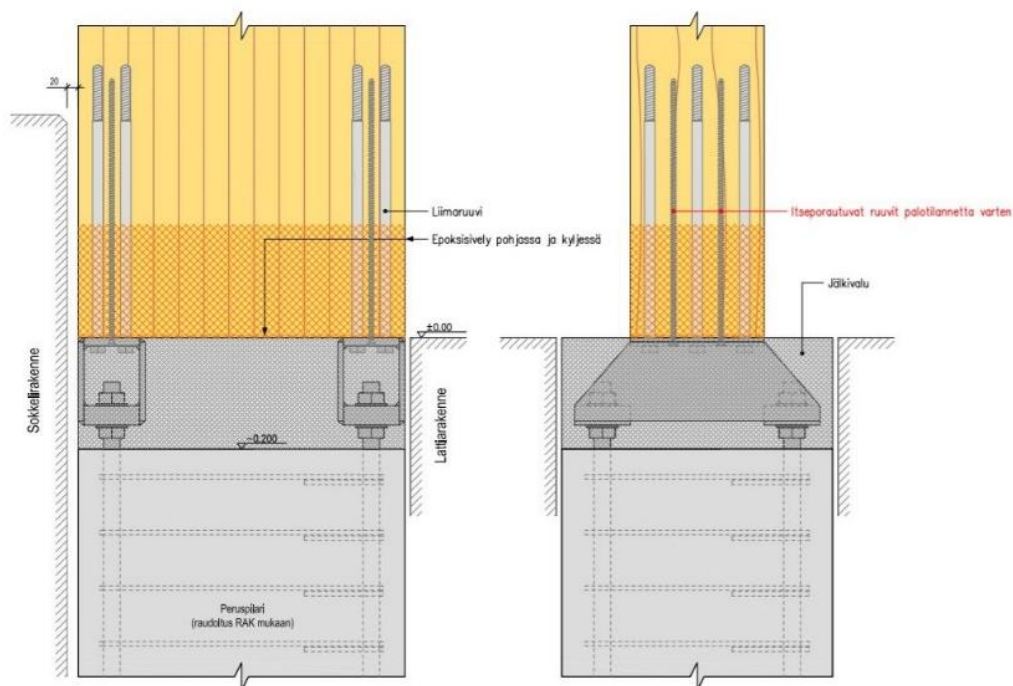
Tavallisesti pääkannattimen ja mastopilarin välinen liitos toteutetaan kuvan 4 mukaisena hankolautaliitoksena. Tällöin liitos saadaan toimimaan nivelellisesti, ja siirtämään sekä pysty- että vaakasuuntaisia voimia. (HalliPES 1.0, Osa 14)



Kuva 4. Hankolautaliitos (HalliPES 1.0, Osa 14)

### 3.2 Mastopilarit

Mastokehän pääpilareina käytetään yleensä liimapuusta valmistettuja suorakaiteen muotoisia mastopilareita. Pilarit asennetaan jäykästi kiinni perustuksiin siten, että pilarin poikkileikkauksen pidempi sivu on kehän suuntaisesti. Näin saadaan siirrettyä perustuksille rungon pidempään sivuun kohdistuvat tuulikuormat sekä muut vaakakuormat. Tällainen jäykkä liitos perustuksiin toteutetaan pääsääntöisesti kuvan 5 mukaisesti liimaruuvien avulla. (HalliPES 0.1, osa 3, 1; HalliPES 0.1, osa 7; Puuhallin rakennesuunnittelu 2009, 32, 38)

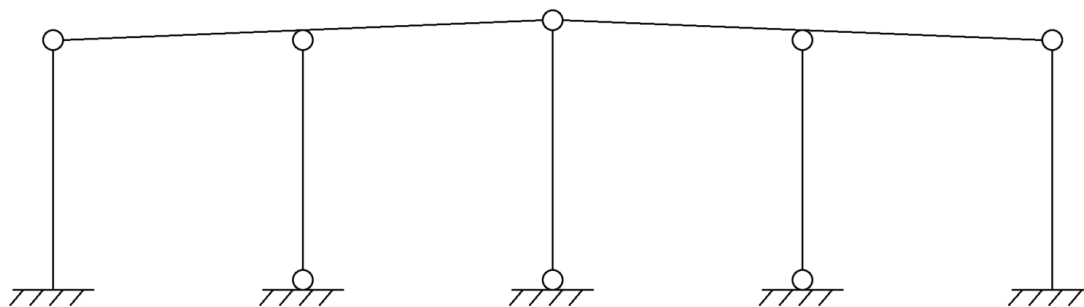


Kuva 5. Mastopilarin liitos perustuksiin (HalliPES 1.0, osa 7)

Liimapuupilareille on olemassa tietyt vakioimitat, joita pyritään noudattamaan suunnittelussa. Pienin pilarin poikkileikkauksen varastokoko on 90x225 ja suurin 165x405 (Puuinfo, liimapuun yleisimmät poikkileikkausmitat). Maksimipituutena pilarille pidetään kuutta metriä (HalliPES 1.0, osa 3, 1). Pilarin leveys pyritään suunnittelemaan yhtä suureksi kuin pääkannattajan leveys, jotta pääpilarin ja pääkannattajan välinen liitos on helpompi toteuttaa. (Liimapuukäsikirja 2003, 71)

### 3.3 Päätyrakenteet

Hallien päätyrakenteet toteutetaan yleensä kantavia kehiä kevyempinä kehärakenteina, sillä pätyihin ei kohdistu yhtä suuria voimia kuin keskelle rakennusta. Päätty on kuitenkin mahdollista toteuttaa samanlaisena kehärakenteena kuin hallin kantavat kehät. Tällöin hallia on helppo laajentaa sen pituussuunnassa lisäämällä kehiä (HalliPES 1.0, osa 3, 8). Kuvan 6 mukainen päätyrakenteena tavallisesti käytetty kehä koostuu nurkkapilareista, palkeista ja tuulipilareista. Päädyn nurkkapilarit kiinnitetään yleensä jäykästi perustuksiin.



Kuva 6. Päädyn kehä

Tuulipilareiden yläpää kiinnitetään päätypalkkiin yleensä nivelellisesti ja alapää kiinnitetään perustuksiin joko nivelellisesti tai jäykästi. Mikäli tuulipilareiden alapään liitos on jäykkä, pilari kykenee siirtämään myös momenttia perustuksille, jolloin osa tuulikuormasta siirtyy tuulipilareiden kautta suoraan perustuksille. Jäykästi alapäästään kiinnitetty pilari vaatii kuitenkin suuremman perustuksen kuin nivelellinen liitos. (Puuhallin rakenteet, esisuunnittelu ja valintaperusteet 2009, 18, 33, 40, 41)

Tuulipilareiden tehtävänä on ottaa päätyyn kohdistuva tuulikuorma vastaan, sekä toimia päätypalkin tukena. Päätypilareiden tehokas k-jako on 5-8 metriä ja välejä tulisi olla kahdella jaollinen määrä. (puuhallin rakennesuunnittelu 2009, 18) Päätyrakenteessa nurkkapilarit sijoitetaan yhdensuuntaisesti päätypilareihin nähden ja tuulipilarit kohtisuorasti.

### 3.4 Sekundäärirakenteet

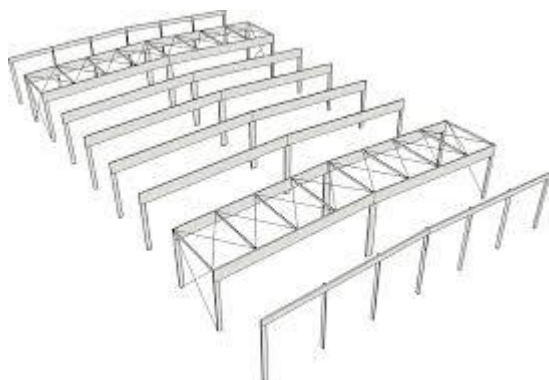
Rakenteita, joita ei lueta primäärirakenteiksi, kutsutaan sekundäärirakenteiksi. Sekundäärirakenteet ovat rakennuksen pituussuuntaisia rakenteita, kuten palkkeja. Näiden rakenteiden tarkoituksena on muun muassa estää primääripalkkien nurjahtaminen ja kiepahtaminen katon tasossa, sekä kannatella kattorakenteita. Myös erilaisia kattoelementtejä ja profiilipeltejä on mahdollista käyttää katon sekundäärirakenteina, jolloin erillisiä sekundääripalkkeja ei tarvita. (Liimapuukäsikirja 2003, 126, 131)

### 3.5 Jäykistys

Poikkisuunnassa mastokehien mastopilarit riittävät jäykistämään yleensä koko hallin. Poikkisuunnan tuulikuorma siirretään pääpilareille ulkoseinien ja katon rakenteiden avulla. Tämä jäykistysmenetelmä on hyvin yksinkertainen ja etuna on se, että jäykistys on heti pilareiden asentamisen jälkeen valmis. Haittapuolena kuitenkin on mastopilareiden suuret sivumitat. Mikäli halutaan käyttää hoikempia pilareita, voidaan suurissa halleissa jäykistys tehdä myös pystysuuntaisilla tuuliristikoilla tai vinotuilla. Tämän menetelmän haittapuoli on rungon asennusaikainen tuentatarve, sekä vaadittava katon jäykistäminen. (puuhallin rakenteet 2009, 39)

Hallin pituussuunnassa mastopilareiden avulla ei yleensä saavuteta riittävää jäykkyyttä vaakavoimia, kuten päädyn tuulikuormaa, vastaan, joten jäykkyyttä täytyy lisätä muilla rakenteilla. Yleensä pituussuunnan jäykisteinä käytetään kuvan 7 mukaisia jäykisteristikoita, jotka sijoitetaan pääpilareiden ja -palkkien väliin. Myös erilaiset vinotuet ja levyjäykisteet ovat mahdollisia. Ristikoita käytettäessä voidaan hyödyntää jo olevia rakenteita: primääripalkit toimivat ristikon paarteina ja sekundääripalkit vertikaaleina. Yleensä tuuliristikoissa käytetään kuitenkin omia vertikaaleja, sillä tällöin kaikki rakenteen osat saadaan samaan tasoon ja vältetään solmukohtien epäkeskeisyyksien aiheuttamilta hankaluuksilta. Veto otetaan vastaan kattopalkkien ja vertikaalien väleihin ristiin asennetuilla diagonaaliteräksillä. Jotta päätyyn kohdistuvat tuulikuormat saadaan siirrettyä perustuksille mahdollisimman tehokkaasti, ristikot sijoitetaan mahdollisimman lähelle päätyjä. Usein ensimmäinen ristikkoväli on kiinnitysten ja päätyrakenteen vuoksi hieman erilainen kuin muut. Jäykisteristikoita ei sijoiteta ensimmäiseen ristikkoväliin, jotta päätyrakenteen ei vaikuta solmukohtien muotoiluun (Liimapuukäsikirja 2003, 131).





Kuva 7. Jäykisteristikoiden sijoittelu (EC 5 sovelluslaskemat, hallirakennus, 84)

## 4 MASTOKEHÄN MITOITUS

Mitoitus pohjautuu Eurokoodi 5:n ohjeisiin, sekä RIL 205-1-2017, RIL 205-2-2009 ja RIL 201-1-2017 ohjeisiin. Siirtymäanalyysin taustalla oleva elementtimenetelmän teoria pohjautuu Tapio Salmen ja Kai Kuulan Rakenteiden mekaniikka -kirjaan sekä Jarmo Lampimäen opinnäytetyöhön Mastopilarikehän FEM-laskenta.

Tässä opinnäytetyössä mitoitetaan kehän pääkannattajana toimiva harjapalkki, kehän mastopilarit ja perustusliitoksen ruuvin kestävyys, sekä selvitetään pilarin ja palkin välisessä hankolautaliitoksessa vaikuttavat voimasuureet. Lisäksi tehdään palomitoitus palkille, pilareille ja liitoksille, sekä selvitetään elementtimenetelmän avulla kehän vaakasiirtymä.

Lujuusominaisuuksien mitoitusarvot  $X_d$  lasketaan kaavalla

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

jossa  $X_k$  on taulukon 1 mukainen lujuusominaisuuden ominaisarvo,  $\gamma_M$  on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku ja  $k_{mod}$  on kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioiva muunnoskerroin. Liimapuulle osavarmuusluku  $\gamma_M$  on 1,25. Muunnoskerroimen  $k_{mod}$  arvo määräytyy taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Muunnoskerroimen  $k_{mod}$  arvot

Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
	Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkellinen
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

## 4.1 Harjapalkin mitoitus

Harjapalkki on yksi tavallisimmista mastokehissä käytetyistä pääkannattimista. Harjapalkilta tulisi tarkastaa taivutuskestävyys sekä mitoittavassa poikkileikkauksessa että harjalla, poikittainen vetokestävyys harjalla, yhdistetty poikittainen vetokestävyys ja leikkauskestävyys harjalla, leikkausvoimakestävyys, tukipainekestävyys, taipuma sekä kiepahduskestävyys. Mikäli palkilta vaaditaan rakenteellista palonkestoa, tulee palkille suorittaa myös palomitoitus. Harjapalkin mitoitus on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

### 4.1.1 Taivutus

Palkkiin kohdistuva taivutusrasituksen tulee olla pienempi kuin rakenteen taivutuslujuuden, joten mitoitus ehdon

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d} \quad (2)$$

tulee olla voimassa.  $\sigma_{m,\alpha,d}$  on mitoittavassa poikkileikkauksessa vallitseva taivutusjännitys,  $f_{m,d}$  on mitoittava taivutuslujuus ja  $k_{m,\alpha}$  on lujuuden pienennyskerroin, joka huomioi palkin yläreunan kaltevuuden. Taivutusmitoitus tulee tarkastaa palkin mitoittavassa poikkileikkauksessa. Mitoittavan poikkileikkauksen etäisyys  $x$  palkin päästä voidaan selvittää kaavalla

$$x = \frac{h_0}{2h_{ap}} \cdot L, \quad (3)$$

jossa  $h_0$  on palkin korkeus tuella,  $h_{ap}$  on palkin korkeus harjalla ja  $L$  on palkin pituus. Kun mitoittava poikkileikkaus on selvillä, voidaan selvittää palkin taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa.

Mitoitusehdossa esiintyvä palkin yläreunan kaltevuudesta riippuva kestävyys pienennyskerroin  $k_{m,\alpha}$  voidaan selvittää kaavalla

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5f_{v,d}} \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \tan^2 \alpha\right)^2}} \quad (4)$$

jossa  $\alpha$  on palkin yläreunan kaltevuus,  $f_{v,d}$  on leikkauskestävyyden mitoitusarvo,  $f_{m,d}$  on mitoittava taivutuslujuus ja  $f_{c,90,d}$  on mitoittava puristuslujuus.

Mitoittavan poikkileikkauksen taivutuskestävyyden lisäksi taivutuskestävyys tulee tarkistaa palkin harjalla. Jotta myös harjan taivutuskestävyys on riittävä, tulee täytyä mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d} \quad (5)$$

jossa  $\sigma_{m,d}$  on harjalla vallitseva taivutusjännitys,  $f_{m,d}$  on mitoittava taivutuslujuus ja  $k_r$  on lamellien taivuttamisesta aiheutuvan lujuuden pienentymisen huomioiva kerroin, joka on harjapalkille 1,0.

#### 4.1.2 Poikittainen veto harjalla

Palkin harja-alueella kestävyys tulee olla riittävä poikittaista vetoa vastaan. Jotta kestävyys poikittaista vetoa vastaan harjalla on riittävä, tulee täytyä mitoitusehto

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}, \quad (6)$$

jossa  $\sigma_{t,90,d}$  on poikittainen vetojännitys harjalla,  $k_{dis}$  on jännityksen jakautumisen harjavyöhykkeessä huomioiva kerroin,  $k_{vol}$  on poikittaisen vetolujuuden kokonaiskerroin ja  $f_{t,90,d}$  on poikittaisen vetolujuuden mitoitusarvo. Harjapalkille  $k_{dis}$  -kerroin on 1,4. Toinen korjauskerroin  $k_{vol}$  saadaan vertailutilavuuden  $V_0$ , jonka arvo on 0,01 m<sup>3</sup>, ja harja-alueen tilavuuden  $V$  avulla selville kaavalla

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2}. \quad (7)$$

### 4.1.3 Yhdistetty poikittainen vetokestävyys ja leikkauskestävyys harjalla

Jos palkkiin kohdistuva kuormitus ei ole symmetristä, harjalla on mahdollista olla vaikuttamassa samaan aikaan sekä poikittaista vetoa että leikkausta. Tällaisessa tilanteessa kestävyys tulee olla riittävä mitoitusehdolle

$$\frac{\tau_d}{f_{vd}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (8)$$

jossa  $\tau_d$  on leikkausjännityksen mitoitusarvo harjalla,  $\sigma_{t,90,d}$  on syysuuntaa kohtisuoran vetojännityksen mitoitusarvo,  $f_{v,d}$  ja  $f_{t,90,d}$  ovat lujuuden mitoitusarvoja ja  $k_{dis}$  ja  $k_{vol}$  ovat jo harjan poikittaisen vedon yhteydessä esitettyjä kertoimia.

Jos puun pinnat käsitellään kosteuden siirtymistä estävällä pintakäsittelyllä, voidaan taivutusmomentista aiheutuva syysuuntaa vastaan kohtisuora vetojännitys  $\sigma_{t,90,d}$  laskea kaavalla

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} - 0,6 \frac{p_d}{b} \quad (9)$$

Muussa tapauksessa käytetään kaavaa

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} \quad (10)$$

Kaavassa 9  $p_d$  on palkin yläpinnan harjavyöhykkeellä vaikuttava tasaisesti jakautunut kuorma. Kaavoissa 9 ja 10 muuttuja  $b$  on palkin leveys,  $h_{ap}$  on palkin korkeus harjalla,  $M_{ap,d}$  on palkin harjavyöhykkeellä suoralle reunalle vetojännityksiä aiheuttavan momentin mitoitusarvo ja  $k_p$  on kerroin, joka saadaan harjapalkille kaavalla

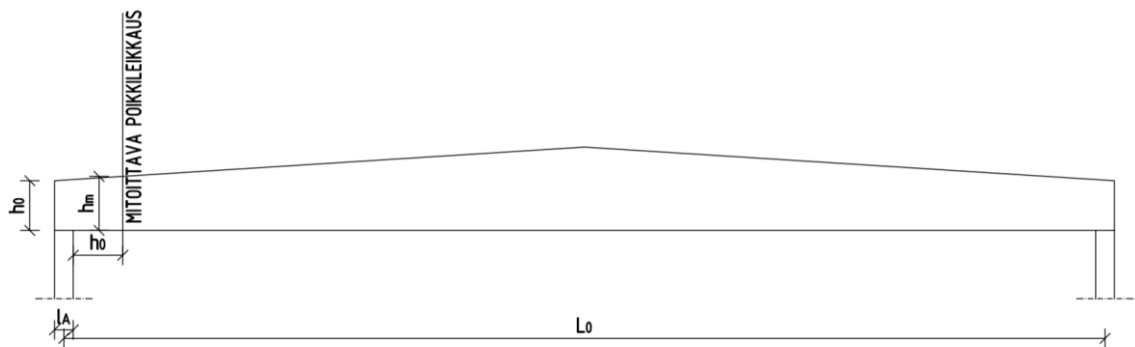
$$k_p = 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap} \quad (11)$$

#### 4.1.4 Leikkaus

Palkkiin kohdistuu puhdasta leikkausta, oli kuorma sitten symmetristä tai ei. Tämän vuoksi tulee tarkistaa, että palkin tuella vaikuttava leikkausjännitys  $\tau_d$  on mitoittavaa leikkauslujuutta  $f_{v,d}$  pienempää. Leikkausjännitys tuella saadaan selvitettyä kaavalla

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h_m}, \quad (12)$$

jossa  $b_{ef}$  on palkin tehollinen leveys,  $h_m$  on palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa ja  $V_d$  on leikkausvoima mitoittavassa poikkileikkauksessa. Palkin tehollinen leveys  $b_{ef}$  saadaan kertomalla palkin leveys  $b$  kertoimella  $k_{cr}$ , joka on lämmitetyissä sisätiloissa tai sitä vastaavissa kosteusolosuhteissa liimapuulle 0,67. Kuitenkin jos kosteuden siirtyminen rakenteessa on suojattu esimerkiksi 2-kertaisella säänkestävällä lakkauksella, voidaan  $k_{cr}$  arvona käyttää 1,0. Myös pysyvästi käyttöluokkaa 2 tai 3 vastaavissa kosteusolosuhteissa oleville rakenteille käytetään  $k_{cr}$  arvoa 1,0. Tutkittaessa leikkausvoimakestävyyttä tuella, mitoittava poikkileikkaus sijaitsee kuvan 8 mukaisesti tukikorkeuden etäisyydellä tuen reunasta.



Kuva 8. Mitoittavan poikkileikkauksen sijainti

Leikkausvoimana voidaan käyttää kuvan 8 mukaan pienennettyä arvoa

$$V_{red} = V_{pd} \cdot \left(1 - \frac{2h_0 + l_A}{L_0}\right) \quad (13)$$

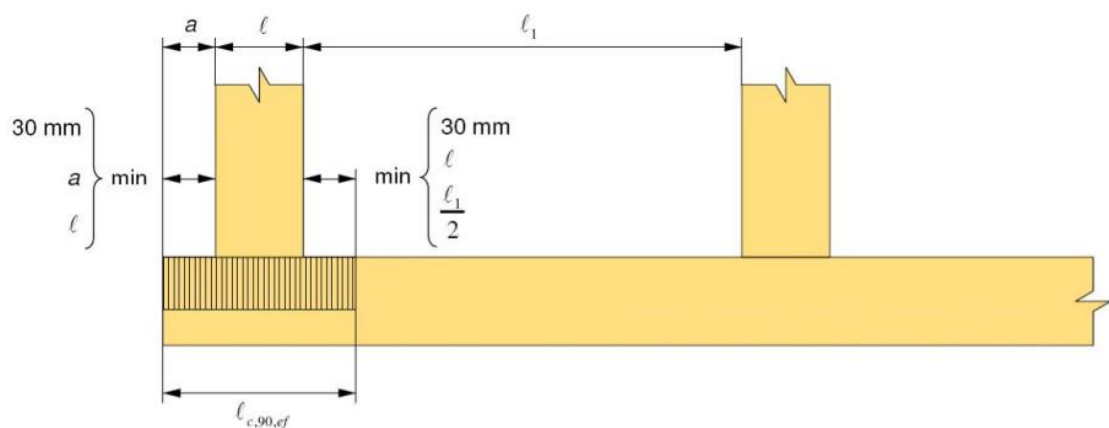
Leikkausvoima  $V_{pd}$  on tasaisen kuorman aiheuttama leikkausvoima tuella.

#### 4.1.5 Tukipaine

Palkin tukena olevat pilarit aiheuttavat palkin alareunaan tuella tukipainetta. Tukipainekestävyys on riittävä, jos palkissa vallitseva puristusjännitys  $\sigma_{c,90,d}$  on pienempi tai yhtä suuri kuin tukipainekertoimella  $k_{c,\perp}$  korotettu puristuslujuuden  $f_{c,90,d}$  arvo. Mikäli mitoitusehto täyttyy, on palkin tukipainekestävyys riittävä. Mikäli ehto ei täyty, tulee joko pilarin kokoa kasvattaa tai lisätä tukipainekestävyyttä esimerkiksi tukipaineraudan avulla. Tukipainekerroin  $k_{c,\perp}$  selvitetään kaavalla

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90}. \quad (14)$$

Korotuskertoimen  $k_{c,90}$  arvo havupuiselle liimapuulle on 1,5, edellyttäen kuitenkin, että puristuspintojen välinen etäisyys  $l_1$  on enintään kaksi kertaa pilaripoikkeileikkauksen korkeus  $h$ . Jos edellä mainittu ehto ei täyty, korotuskertoimelle  $k_{c,90}$  käytetään arvoa 1,0. Muuttuja  $l$  on kosketuspinnan pituus puun syiden suunnassa ja  $l_{c,90,ef}$  on tehollinen kosketuspinnan pituus, joka määräytyy tuen sijainnin mukaan. Tehollinen kosketuspinnan pituus  $l_{c,90,ef}$  määritetään kuvan 9 mukaisesti lisäämällä kosketuspinnan pituuteen  $l$  molemmiin puolin 30 mm, mutta kuitenkin enintään  $a$ ,  $l$  tai  $l_1/2$ .



Kuva 9. Tehollinen kosketuspinnan pituus

#### 4.1.6 Taipuma

Rakenteen taipuma mitoitetaan käyttörajatilassa. Rakenneosien taipumille on olemassa omat taipumarajansa. Kun kyseessä on pääkannatin, kokonaistaipumaraja  $w_{fin}$  on  $L_0/200$ , jossa  $L_0$  on palkin jänneväli. Lopputaipumaraja  $w_{net,fin}$  pääkannattimille on  $L_0/300$ . Jotta palkin taipuma pysyy sallituissa rajoissa, tulee taipuman olla joko pienempi tai yhtä suuri kuin taipumarajan mukainen arvo. Kokonaistaipuma muodostuu pysyvistä ja muuttuvista kuormista aiheutuvista hetkellisistä taipumista ja se voidaan selvittää kaavalla

$$w_{fin} = \max \left\{ \begin{aligned} &(1 + k_{def})w_{inst,G} + (1 + 0,2k_{def})w_{inst,lumi} + (0,7 + 0,3k_{def})w_{inst,hyöty} \\ &(1 + k_{def})w_{inst,G} + (1 + 0,3k_{def})w_{inst,hyöty} + (0,7 + 0,2k_{def})w_{inst,lumi} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

jossa  $k_{def}$  on virumaluku,  $w_{inst,G}$  on pysyvästä kuormasta aiheutuva hetkellinen taipuma,  $w_{inst,lumi}$  on lumikuormasta aiheutuva hetkellinen taipuma ja  $w_{inst,hyöty}$  on hyötykuormasta aiheutuva hetkellinen taipuma. Taipumien arvot voidaan määrittää esimerkiksi yksikkövoimamenetelmällä tai taipuman kaavoilla, joita myös tässä työssä hyödynnetään. Tasaisen kuorman aiheuttama taipuma lasketaan kaavalla

$$w = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL_0^4}{EI} \quad (16)$$

ja keskellä palkin jänneväliä sijaitsevan pistekuorman aiheuttama taipuma kaavalla

$$w = \frac{FL_0^3}{48 \cdot EI} \quad (17)$$

Kaavassa 16  $q$  on palkille kohdistuva tasainen kuorma,  $L_0$  on palkin jänneväli,  $E$  on taulukon 1 mukainen kimmomoduuli ja  $I$  on jäyhyysmomentti. Kaavassa 17 muuttuja  $F$  on palkkiin kohdistuva pistemäinen kuorma.



Lopputaipuma  $w_{net,fin}$  saadaan, kun vähennetään hetkellisen taipuman arvosta palkin esikorotus  $w_c$ , mikäli sellaista käytetään. Yleensä esikorotuksen arvona käytetään  $L_0/400$ .

#### 4.1.7 Kiepahdus

Kiepahdusta tutkittaessa palkin korkeutena käytetään mitoittavan poikkileikkauksen korkeutta  $h_m$ . Kun palkkia rasittaa pelkkä vahvemman suunnan taivutusmomentti  $M_y$ , kestävyys kiepahdusta vastaan on riittävä, mikäli se täyttää mitoitus-ehdon

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (18)$$

$\sigma_{m,\alpha,d}$  on mitoittavassa poikkileikkauksessa vallitseva taivutusmomentti,  $f_{m,d}$  on liimapuun taivutuslujuuden mitoitusarvo ja  $k_{crit}$  on rakenteen hoikkuuden huomioiva lujuuden pienennyskerroin, joka ratkaistaan kaavalla

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} \quad (19)$$

jossa  $\lambda_{rel,m}$  on kaavalla

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (20)$$

saatava rakenteen suhteellinen hoikkuus. Suhteellisen hoikkuuden kaavassa parametri  $f_{m,k}$  on suoraan taulukosta 1 löytyvä taivutuksen ominaisarvo ja  $\sigma_{m,crit}$  on palkin kriittinen taivutusjännitys, joka saadaan kaavalla

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h_m \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad (21)$$

Kriittisen taivutusjännityksen kaavassa parametri  $c$  saa arvon 0,71 käytettäessä liimapuuluokkia GL24c ja GL32c. Kun käytetään liimapuuluokkaa GL30c, on  $c$  arvo 0,7. Parametri  $b$  on palkin poikkileikkauksen leveys,  $h_m$  on mitoittavan poikkileikkauksen korkeus,  $E_{0,05}$  on taulukon 1 mukainen kimmomoduulin arvo ja  $l_{ef}$

on palkin tehollinen jänneväli. Palkin tehollinen jänneväli saadaan lisäämällä palkin kiepahdustuentaväliin  $a$  kaksi kertaa palkin mitoittavan poikkileikkauksen korkeus  $h_m$ .

Mikäli palkki tuetaan kiepahdusta vastaan sivusuunnassa, tulee selvittää palkkiin kohdistuva kiepahdustuentavoima. Myös kiepahdustuen ja pääkannattimen välinen liitos mitoitetaan tälle samalle voimalle. Kiepahdustukeen kohdistuva voima saadaan selville kaavalla

$$F_d = \frac{N_d}{80} \cdot k, \quad (22)$$

jossa  $N_d$  on puristusvoima palkin yläreunassa ja  $k$  on kerroin, joka voidaan selvittää kaavalla

$$k = \frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}}. \quad (23)$$

Taivutusmomentille, taivutuslujuudelle ja  $k_{crit}$ -kertoimelle käytetään samoja arvoja kuin kiepahduskestävyyden mitoituksessa.

Palkin yläreunassa vaikuttava puristusvoima saadaan selville kaavalla

$$N_d = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_d}{h_m} \quad (24)$$

Momentin arvona  $M_d$  käytetään taivutusmomenttia mitoittavassa poikkileikkauksessa. Kerroin  $k_{crit}$  selvitetään kaavojen 19-21 avulla. Koska kiepahdustuenta-voimaa selvittäessä palkin oletetaan olevan sivusuunnassa tukematon, käytetään palkin tehollisen jännevälin  $l_{ef}$  arvona  $0,9l$ . Koska kuorma sijaitsee puristetulla reunalla, voidaan tehollista jänneväliä suurentaa mitan  $2h_m$  verran.

#### 4.1.8 Palomitoitus

Mikäli palkilta vaaditaan rakenteellista palonkestoa, tulee suorittaa palomitoitus. Palotilanteessa palkki mitoitetaan tehollista poikkileikkausta käyttäen taivutukselle harjalla ja mitoittavassa poikkileikkauksessa sekä kiepahdukselle. Taivutus ja kiepahdusmitoitus etenee kuten normaalissakin tilanteessa, mutta poikkileikkauksen mitat ovat tehollisen hiililymissyvyyden verran pienennettyjä palolle alttiilta sivuilta. Lisäksi kuormina käytetään hieman tavallista pienempiä palokuormia.

Tehollinen hiililymissyvyys saadaan kaavasta

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0, \quad (25)$$

jossa  $d_0$  on 7 mm,  $k_0$  on palosuojauksen ja ajan mukaan tuleva kerroin ja  $d_{char,n}$  saadaan kaavalla

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (26)$$

jossa  $t$  on palorasituksen kesto ja  $\beta_n$  on nimellisen hiililymisnopeuden mitoitusarvo, joka ottaa huomioon kulmapyöristysten ja halkeamien vaikutuksen. Nimellisen hiililymisnopeuden mitoitusarvona liimapuulle käytetään 0,7 mm/min, mikäli ominaistiheys on yli 290 kg/m<sup>3</sup>.

Tässä opinnäytetyössä rakenteen oletetaan olevan palolta suojaamaton, joten kerroin  $k_0$  on alle 20 minuutin palorasitusajalla  $t/20$  ja yli 20 minuutin palorasitusajalla 1.

Palotilanteen kuormien aiheuttama rasitus  $E_{d,fi}$  palon alussa määritellään kaavasta

$$E_{d,fi} = G_k + \sum_{i \geq 1} \Psi_{fi,i} Q_{k,i} \quad (27)$$

jossa  $G_k$  on pysyvän kuorman ominaisarvo ja  $Q_{k,i}$  on muuttuvan kuorman ominaisarvo. Muuttuvien kuormien palotilanteen yhdistelykerroin  $\Psi_{fi,i}$  saa arvonsa

taulukon 3 mukaan riippuen siitä, onko luonnonkuorma vai hyötykuorma määräävä kuormitustapaus. Tavallisesti harjapalkkiin vaikuttaa muuttuvana kuormana vain lumikuorma, joten yhdistelykertoimena käytetään lumikuorman ominaisarvon suuruudesta riippuen joko 0,4 tai 0,5.

Taulukko 3. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet  $\psi_{fi,i}$

Kuorma	Luonnonkuorma määräävä	Hyötykuorma määräävä
Hyötykuormat rakennuksissa		
Luokka A: asuintilat	0,3	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,3	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,3	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,6	0,6
Luokka E: varastotilat	0,8	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, esim. autotallit	0,6	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, raskaat ajoneuvot	0,3	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0
Lumikuorma, kun		
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,5	0,2
Jääkuorma	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat	0,2	0

## 4.2 Mastopilarin mitoitus

Mastokehän pääpilarit ovat mastopilareita, eli niiden alapään liitos on jäykkä ja yläpää on nivelellisesti kiinni pääkannattimessa. Mastopilari tulee mitoittaa puristukselle, taivutukselle, nurjahdukselle, kiepahdukselle sekä leikkaukselle. Lisäksi, jos pilarilta vaaditaan palonaikaista rakenteellista kestävyyttä, tulee suorittaa palomitoitus. Mastopilarin mitoitus kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä 2.

#### 4.2.1 Nurjahdus (z-suuntaan)

Samanaikaisesti puristetun ja taivutetun sauvan nurjahduskestävyys tulee osoittaa ehdolla

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_h f_{m,d}} \leq 1 \quad (28)$$

jossa  $\sigma_{c,0,d}$  on mitoittava puristusjännitys,  $\sigma_{m,y,d}$  on mitoittava taivutusjännitys ja  $f_{c,0,d}$  ja  $f_{m,d}$  ovat liimapuun puristus- ja taivutuslujuus. Puristusjännitys saadaan, kun pilariin kohdistuva maksimi normaalivoima jaetaan pilarin poikkipinta-alalla. Pilariin kohdistuvan maksimimomentin aiheuttama taivutusjännitys saadaan kaavalla

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6M_d}{bh^2}. \quad (29)$$

Kertoimet  $k_{c,y}$  ja  $k_h$  lasketaan kaavoilla

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (30)$$

$$k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1} \quad (31)$$

joissa  $h$  on poikkileikkauksen korkeus ja  $k_y$  ja  $\lambda_{rel,y}$  saadaan kaavoista

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (32)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (33)$$

Kaavoissa  $\beta_c$  on alkukäyrydestä riippuva kerroin liimapuulle, jonka arvo on 0,1, ja  $f_{c,0,k}$  on taulukosta 1 löytyvä liimapuun puristuslujuuden ominaisarvo.  $\lambda_y$  ja  $\lambda_{rel,y}$  ovat pilarin hoikkeudesta riippuvia parametreja. Koska kyseessä on masto-

pilari, pilarin nurjahduspituus  $L_{c,z}$  on 2,5 kertaa pilarin pituus  $L$ . Nurjahduspituutena  $L_{c,z}$  voidaan kuitenkin käyttää arvoa  $2,2L$ , jos mastopilari on kiinnitetty liimaruuveilla ja nurjahduspituutta  $2,5L$  vastaava hoikkuus täyttää ehdon

$$\lambda_y \geq \begin{cases} 120, & \text{jos käytetään teräslajin S235JRG2 liimaruuveja} \\ 100, & \text{jos käytetään lujuusluokan 5.8 liimaruuveja} \end{cases} \quad (34)$$

Hoikkuuslukujen  $\lambda_y$  ja  $\lambda_{rel,y}$  selvittämiseksi täytyy nurjahduspituuden lisäksi selvittää poikkileikkauksen jäyhyysäde  $i_y$  kaavalla

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (35)$$

jossa  $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala ja jäyhyysmomentti  $I_y$  selvitetään kaavalla

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad (36)$$

Näiden poikkileikkausparametrien avulla voidaan selvittää hoikkuusparametrit  $\lambda_y$  ja  $\lambda_{rel,y}$ . Muunnettu hoikkuusluku  $\lambda_{rel,y}$  saadaan selville kaavalla 33 ja hoikkuusluku  $\lambda_y$  saadaan kaavalla

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad (37)$$

#### 4.2.2 Kiepahdus

Kiepahdusta tarkastellaan  $k_{crit}$  -kertoimen avulla. Jos kertoimen arvo on yli yksi, pilari ei ole kiepahdusherkkä. Jos arvo on alle yksi, tulee joko muuttaa poikkileikkausta suuremmaksi tai mitoittaa pilarille kiepahdustuenta. Kertoimen  $k_{crit}$  arvo lasketaan kaavalla

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} \quad (38)$$

jossa  $\lambda_{rel,m}$  on pilarin suhteellinen hoikkuus, joka saadaan kaavasta

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}. \quad (39)$$

Suhteellisen hoikkuuden kaavassa  $f_{m,k}$  on taulukosta 1 löytyvä liimapuun ominaisuuslujuus taivutukselle ja  $\sigma_{m,crit}$  on suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys, joka voidaan selvittää kaavalla

$$\sigma_{m,crit} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} E_{0,05} \quad (40)$$

jossa  $c$  saa arvon 0,7, kun liimapuun lujuus on GL30c. Liimapuulle GL28c ja GL32c parametrin  $c$  arvo on 0,71. Parametrit  $b$  ja  $h$  ovat pilarin poikkileikkauksen leveys ja korkeus, ja  $E_{0,05}$  on taulukosta 1 löytyvä liimapuun kimmomoduulin ominaisarvo. Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli  $l_{ef}$  tasaiselle kuormalle ja pistekuormille saadaan selville kaavalla

$$l_{ef} = \frac{M_{d,1}l_{ef,1} + M_{d,2}l_{ef,2}}{M_{d,1} + M_{d,2}} \quad (41)$$

jossa  $M_{d,1}$  on tasaisen kuorman aiheuttama momentti ja  $M_{d,2}$  on pistekuormien aiheuttama momentti. Mikäli tasainen kuorma sijaitsee pilarin vedetyllä reunalla, voidaan tehollista jänneväliä  $l_{ef,1}$ , joka on  $0,5l$ , pienentää mitan  $0,5h$  verran. Parametri  $h$  on pilaripoikkileikkauksen korkeus ja  $l$  on pilarin pituus.

Jos pistekuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla, joka toteutuu hankolautaliitoksen tapauksessa, on  $l_{ef,2}$  yhtä suuri kuin  $l_{ef}$ , eli  $0,8l$ .

### 4.2.3 Leikkaus

Jotta pilarin leikkauskestävyys on riittävä, tulee tuella vaikuttavan leikkausjännityksen  $\tau_d$  olla pienempi tai yhtä suuri kuin liimapuun mitoittava leikkauslujuus  $f_{v,d}$ . Leikkausjännitys tuella saadaan selville kaavalla

$$\tau_d = \frac{3V_d}{2b_{ef}h} \quad (42)$$

jossa  $V_d$  on pilariin kohdistuva maksimi leikkausvoima,  $h$  on pilarin poikkileikkauksen korkeus ja  $b_{ef}$  on pilarin poikkileikkauksen tehollinen leveys. Poikkileikkauksen tehollinen leveys  $b_{ef}$  saadaan, kun pilarin poikkileikkauksen leveyttä  $b$  pienennetään  $k_{cr}$  kertoimella, joka on lämmitetyissä sisätiloissa tai sitä vastaavissa kosteusolosuhteissa liimapuulle 0,67. Pysyvästi käyttöluokkaa 2 tai 3 vastaavissa kosteusolosuhteissa oleville puurakenteille voidaan käyttää  $k_{cr}$  arvoa 1,0. Myös silloin, kun puurakenne suojataan esimerkiksi 2-kertaisella säänkestävällä lakauksella, jota voidaan pitää kosteuden siirtymistä estävänä pintakäsittelynä, käytetään  $k_{cr}$  kertoimelle arvoa 1,0.

#### 4.2.4 Palomitoitus

Jos pilarilta vaaditaan rakenteellista kestävyyttä palossa, tulee suorittaa palomitoitus. Pilari mitoitetaan palotilanteessa puristukselle, nurjahdukselle ja kiepahdukselle. Palomitoitus etenee kuten normaalitilanteen mitoitukseen, mutta rasituksina käytetään palotilanteen rasituksia ja pilarin poikkileikkauksena tehollista poikkileikkausta. Tehollinen poikkileikkaus lasketaan kaavoilla 25 ja 26 samalla tavalla kuin palkillekin. Palotilanteen rasitukset lasketaan kaavan 27 avulla.

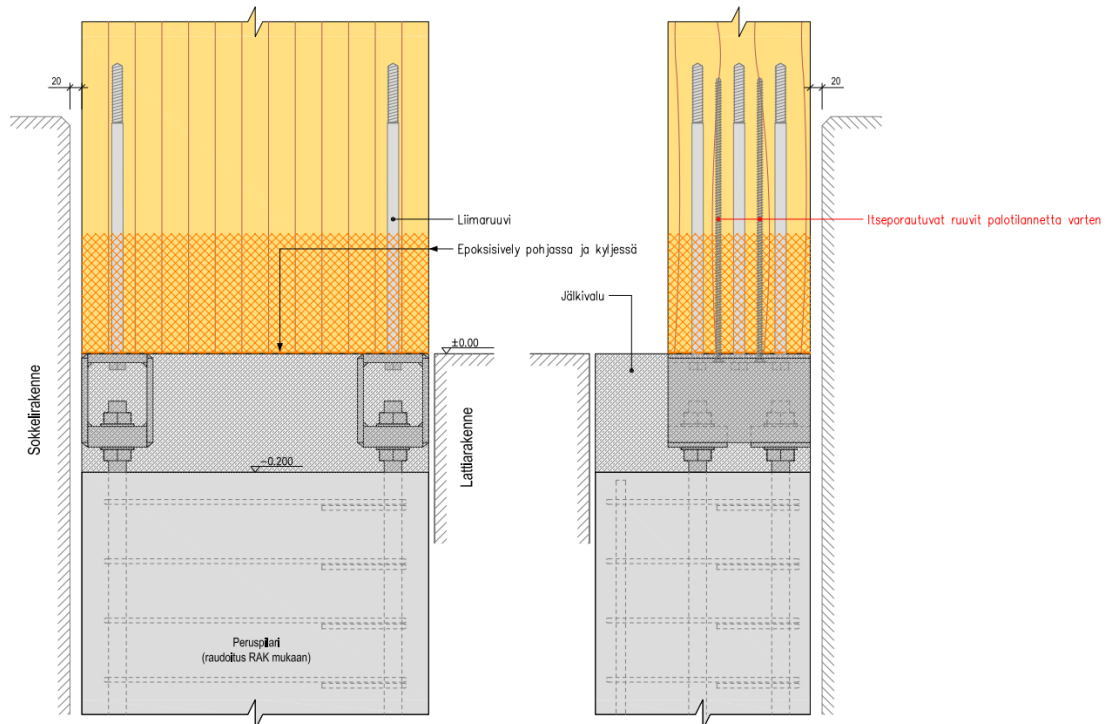
#### 4.3 Liitokset

Tässä opinnäytetyössä liitoksina käytetään pääsääntöisesti käytössä olevia liitoksia, eli perustusliitoksena on liimaruuviliitos ja pilarin ja palkin välinen liitos toteutetaan hankolautaliitoksena. Tässä opinnäytetyössä liitoksista mitoitetaan vain perustusliitoksessa olevat liimaruuvit, sekä pilarin ja palkin välisessä liitoksessa vallitsevat voimasuureet. Lisäksi opinnäytetyössä on esitelty molempien liitosten palomitoitus. Liitteessä 3 on esitettyä esimerkkilasku liitosten mitoituksesta.



### 4.3.1 Perustusliitos

Perustusliitos toteutetaan liimaruuviliitoksena. Tässä opinnäytetyössä liitoksesta mitoitetaan vain liimaruuvi, sekä liitoksessa vaikuttavat voimasuureet. Liitoksen periaate on esitetty kuvassa 10. Liitoksen mitoitus perustuu lausuntoon VTT-S-05701-14. Palomitoitus perustuu RIL 205-1-2017 itseporautuvien ruuvien mitoitushjeeseen.



Kuva 10. Liimaruuviliitos (HalliPES 1.0, osa 14, Voimaliitokset)

Liitoksessa liimaruuvien sileän osan syvyydelle saakka porataan 20 mm:n reikä, jonka jälkeen reiän pohjaan porataan vielä 16 mm:n reikä siten, että reiän kokonaisvyvyys vastaa ruuvien tartuntapituutta  $L_a$ , jonka vaihteluväli on 400–490 mm. Liimaruuvien halkaisija on yleensä 19 mm ja lujuusluokka joko S235JRG2 tai 5.8. Jotta seuraavaa laskentaa voidaan hyödyntää, tulee rakenteen käyttöluokan olla joko 1 tai 2. (HalliPES 1.0, osa 14, Voimaliitokset)

Koska pilarin kanta on liitoksestaan jäykkä, tulee liitoksen voida siirtää perustuksille pysty- ja vaakakuormia, sekä momenttia. Liitoksen toinen pilarikengä ottaa vastaan vetoa ja toinen puristusta. Pilarikengän vetovoima saadaan kaavalla

$$A_d = \frac{M_d}{e} - \frac{N_d}{2} \quad (43)$$

ja puristusvoima kaavalla

$$B_d = \frac{M_d}{e} + \frac{N_d}{2} \quad (44)$$

Kaavoissa 43 ja 44  $M_d$  on liitoksessa vaikuttavan momentin mitoitusarvo,  $N_d$  on liitoksessa vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo ja  $e$  on veto- ja puristusvoiman välinen etäisyys.

Liimaruuvien normaalivoimakestävyyden tulee olla suurempaa kuin liitoksessa vaikuttavan maksimi normaalivoiman. Liimaruuvien normaalivoimakestävyyden  $R_{ax,d}$  mitoitusarvo saadaan kaavalla

$$R_{ax,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{y,k}}{\gamma_{M,y}} \\ k_{mod} \cdot \frac{R_{a,k}}{\gamma_M} \end{array} \right. , \quad (45)$$

jossa  $R_{y,k}$  on ruuvien myötökestävyyden ominaisarvo ja  $R_{a,k}$  on ruuvien tartunta-kestävyyden ominaisarvo. Ruuvien myötökestävyyden käytettävä osavarmuusluvulle  $\gamma_{M,y}$  käytetään Suomessa arvoa 1,1 ja liimapuun osavarmuusluvulle  $\gamma_M$  käytetään arvoa 1,2. Liimapuun muunnoskerroin  $k_{mod}$  määräytyy taulukon 2 mukaisesti. Myötökestävyyden ominaisarvo  $R_{y,k}$  on 62 kN, kun ruuvien lujuusluokka on S235, ja 101 kN, kun ruuvien lujuusluokka on 5.8. Kun ruuvien lujuusluokka on S235 ja käyttöluokka on 1, tartunta-kestävyyden ominaisarvo  $R_{a,k}$  on

$$R_{a,k} = \left( \frac{L_a}{490} \right) \cdot 72 \text{ kN}. \quad (46)$$

Kun ruuvien lujuusluokka on 5.8 ja käyttöluokka on 1, tartunta-kestävyyden ominaisarvo  $R_{a,k}$  on

$$R_{a,k} = \left( \frac{L_a}{490} \right) \cdot 84 \text{ kN}. \quad (47)$$

Jos käyttöluokka on 2, kerrotaan kaavoista 46 ja 47 saadut arvot luvulla 0,8.

Lisäksi vetorasitetun liimaruuviryhmän tulee täyttää ehto

$$F_{t,d} \leq n_t^{0,9} \cdot R_{a,d}, \quad (48)$$

jossa  $F_{t,d}$  on vedetyn liimaruuviryhmän mitoituskuorma,  $n_t$  on vedettyjen liimaruuvien lukumäärä ja  $R_{a,d}$  on ruuvin tartuntakestävyyden mitoitusarvo, joka saadaan kaavalla

$$R_{a,d} = k_{mod} \cdot \frac{R_{a,k}}{\gamma_M}. \quad (49)$$

Pilarin puristetun reunan liimaruuvit ottavat vastaan liitoksessa olevan leikkausvoiman  $V_d$ . Kun ruuvin etäisyys liimapuupoikkileikkauksen leikkauskuormite-  
tusta reunasta on  $\geq 0,5h$ , voidaan hyödyntää puristettujen liimaruuvien leikkauskestävyyttä. Yhden liimaruuvin leikkauskestävyydelle käytetään taulukon mukaista arvoa, kun käyttöluokkana on 1 tai 2, ruuvin etäisyys reunasta on  $\geq 0,5h$  ja ruuvien keskiöetäisyys  $a_h$  on pienempi tai yhtä suuri kuin  $a_{h,s}$ . Kun ruuvin lujuusluokka on S235 ja mitoittava aikaluokka on hetkellinen, käytetään parametreille  $a_{h,s}$  arvoa 65 mm. Muussa tapauksessa  $a_{h,s}$  on 75 mm.

Taulukko 4. Yhden ruuvin leikkauskestävyys  $R_{v,d}$  (kN).

Ruuvi	Aikaluokka		
	Pysyvä	Keskipitkä	Hetkellinen
S235JRG2	5,2	6,0	7,0
5.8	6,1	7,1	8,3

Kun liimapuun vetokestävyys täyttää ehdon

$$N_{t,d} = f_{t,d} \cdot \sum_{i=1}^{n_t} A_{ef,i} \geq F_{t,d}, \quad (50)$$

voidaan liimaruuvien keskiöetäisyydet  $a_{b,s}$  ja  $a_{h,s}$  pienentää mittaan 40 mm.

Kaavassa 50  $f_{t,d}$  on liimapuun vetolujuuden mitoitusarvo ja  $A_{ef,i}$  on liimapuun tehollinen vetovyöhykkeen pinta-ala ruuvia  $i$  kohden.

Perustusliitos mitoitetaan paloa vastaan syysuuntaan asennettujen itseporautuvien ruuvien varaan. Jos palonkesto-aika on vähintään 15 minuuttia, tulee ruuvien halkaisijan olla vähintään 3,5 mm. Lisäksi perustusliitoksessa olevat teräsosat tulee suojata palonsuojamaalauksella teräsrakentamisen ohjeiden mukaan. Liitokseen tulee mitoittaa niin monta itseporautuvaa ruuvia, että ruuvien leikkauskestävyyden arvo saadaan palotilanteen leikkausvoimaa suuremmaksi. Yhden ruuvien leikkauskestävyyden ominaisarvo saadaan kaavalla

$$R_k = 1,15 \cdot 120 \cdot d_{ef}^{1,7}, \quad (51)$$

jossa  $d_{ef}$  on ruuvien tehollinen halkaisija, joka on 1,1 kertaa ruuvien kierteisen osan sisähalkaisija  $d_i$ . Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo saadaan kaavalla

$$R_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_s \cdot R_k \quad (52)$$

#### 4.3.2 Pilarin ja palkin välinen liitos

Pilarin ja palkin välinen liitos toteutetaan hankolautaliitoksena. Hankolautaliitosta itsessään ei tässä opinnäytetyössä mitoiteta, mutta mitoitusvaadittavat liitoksessa vaikuttavat voimasuureet selvitetään. Mitoitus perustuu HalliPES ohjeeseen hankolautaliitoksen mitoituksesta.

Hankolautaliitoksen avulla pilarin ja pääkannattimen välisestä liitoksesta tehdään momenttijatkos, jolloin voima  $N_d$  saadaan kulkeutumaan liitoksen läpi perustuksille. Jos näin ei tehtäisi, tulisi pilarin yläpäähän suunnitella vaakasuuntainen jäykistesauva, jonka avulla liitos saataisiin tuettua pilarin heikommassa suunnassa.

Hankolautaliitokseen syntyvien voimien suuruus riippuu eniten siitä, kuinka kaltevaan asentoon pääkannatin voi teoriassa siirtyä. Hankolautaliitokseen aiheutuu momenttia ja leikkausvoimaa pääkannattimen yläreunan siirtymästä suhteessa alapintaan, eli toisin sanoen epäkeskisyydestä  $e$ . Epäkeskisyyttä syntyy pääkan-

nattimen asennustarkkuudesta sekä tuulikuorman, pääkannattimen jäykkyyskuorman ja lisävaakavoiman aiheuttamasta yläreunan siirtymästä. (HalliPES 1.0, osa 14, Voimaliitokset)

Liitoksessa vaikuttava pystyvoima  $A_d$  on yhtä suuri kuin pääkannattimen tukireaktio  $N_d$ . Liitoksessa vaikuttava momentti  $M_d$  saadaan, kun kerrotaan pystyvoima  $A_d$  epäkeskisyydellä  $e$ . Leikkausvoima  $V_d$  saadaan, kun pystyvoima  $A_d$  kerrotaan pääkannattimen kaltevuuskulman  $\alpha$  sinifunktiolla. Näiden lisäksi liitoksessa vaikuttaa tuulen imukuorman aiheuttama tukireaktio  $H_d$  pilarin yläpäässä. Tämä mitoitusmenetelmä ei ota huomioon pääkannattimen pystytukireaktion aiheuttamaa stabiloivaa vaikutusta liitosvoimiin.

Jotta seuraavat kaavat pätevät, tulee tehdä oletus, että liitoksessa on kaksi ruuviryhmää hankolaudan yhtä puoliskoa kohden. Myös hankolautoja on kaksi kappaletta liitosta kohden. Näin ollen  $n_R$  ja  $n_H$  saavat siis arvon 2.

Liitoksen ruuviryhmä mitoitetaan voimien  $V_{x,d}$  ja  $V_{z,d}$  resultantin  $R_d$  sekä ruuvien suuntaisen voiman  $N_{y,d}$  yhteisvaikutukselle. Voima  $V_{x,d}$  saadaan kaavalla

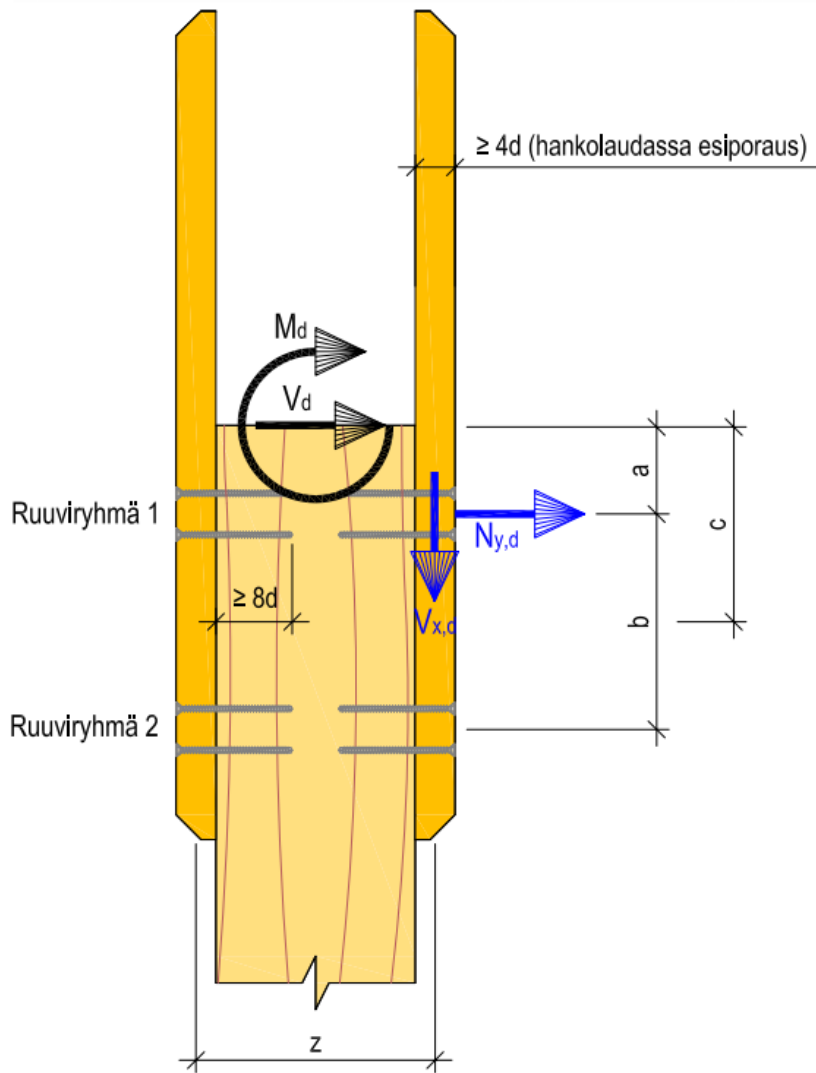
$$V_{x,d} = \frac{M_d}{z \cdot n_R}, \quad (53)$$

jossa  $z$  on kuvan 11 mukainen hankolautojen keskiöetäisyys. Voima  $V_{z,d}$  saadaan kaavalla

$$V_{z,d} = \frac{H_d}{n_H \cdot n_R} + \frac{H_d \cdot c}{n_H \cdot b}, \quad (54)$$

jossa  $b$  on ruuviryhmien 1 ja 2 välinen keskiöetäisyys ja  $c$  on etäisyys pilarin yläreunasta mitan  $b$  keskelle. Mitat  $b$  ja  $c$  on esitetty kuvassa 11. Voima  $N_{y,d}$  saadaan kaavalla

$$N_{y,d} = \frac{\frac{V_d \cdot c}{b} + \frac{V_d}{n_R}}{n_H}. \quad (55)$$



Kuva 11. Hankolautaliitoksen mittoja (HalliPES 1.0, osa 14, Voimaliitokset)

Hankolaudan leikkauskestävyys tarkastetaan leikkausvoimille  $Q_{z,d,hankolauta}$ , joka saadaan jakamalla leikkausvoima  $V_d$  hankolautojen määrällä  $n_H$ , ja  $Q_{y,d,hankolauta}$ , joka saadaan jakamalla lisävaakavoima  $H_d$  hankolautojen määrällä  $n_H$ . Hankolaudan taivutuskestävyys tarkastetaan momenteille  $M_{z,d,hankolauta}$  ja  $M_{y,d,hankolauta}$ . Momentti z-akselin ympäri saadaan kaavalla

$$M_{z,d,hankolauta} = \frac{V_d \cdot c}{n_H} - \frac{V_d \cdot b}{n_H \cdot n_R} \quad (56)$$

ja momentti y-akselin ympäri saadaan kaavalla

$$M_{y,d,hankolauta} = \frac{H_d \cdot c}{n_H} - \frac{H_d \cdot b}{n_H \cdot n_R} \quad (57)$$

Hankolaudan veto- ja puristuskestävyys tarkastetaan voimalle, joka saadaan kertomalla  $V_{x,d}$  kahdella. Näiden lisäksi hankolaudan kestävyys tarkastetaan myös vedon ja puristuksen, sekä puristuksen ja taivutuksen yhdistetyille jännityksille.

Jos liitokselta vaaditaan palokestävyyttä, tulee liitos mitottaa siten, että R 30 -liitoksessa hankolaudan dimensioita suurennetaan mitalla  $a_{fi}$  ja R 60 -liitoksessa dimensioita suurennetaan hiililymän  $d_{ef}$  verran. Lisäksi R 60 -liitoksessa liittimet tulee suojata esimerkiksi palonsuojalevyllä. (HalliPES 1.0, osa 14, Voimaliitokset)

Mitta  $a_{fi}$  lasketaan RIL 205-2-2009 ohjeiden mukaan kaavalla

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - t_{d,fi}) \quad (58)$$

Hiililymän  $d_{ef}$  arvo lasketaan kaavoilla 25 ja 26. Palorasituksen keston  $t$  arvoksi annetaan tässä tapauksessa 60 minuuttia.

#### 4.4 Kehän vaakasiirtymä

Kehän siirtymää on mahdollista tutkia useilla eri tavoilla. Mastokehän siirtymälle ei kuitenkaan ole olemassa tarkkaa kaavaa, vaan se selvitetään yleensä joko valmiilla kehäkaavoilla tai yksikkövoimamenetelmällä. Tämän opinnäytetyön yksi haaste ja tarkoitus olikin selvittää mahdollisimman tarkka laskentatapa siirtymän selvittämiseksi.

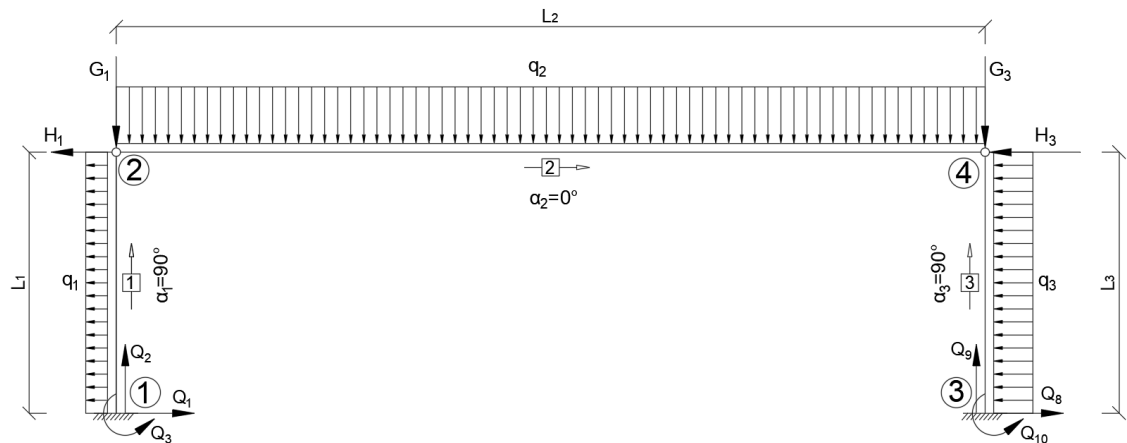
Siirtymämitoituksessa käytettävät kuormat ovat käyttörajatilan kuormia. Siirtymän suuruus voidaan selvittää yksinkertaistetulla menetelmällä taipuman kaavojen avulla. Tässä menetelmässä mastopilarin yläpäähän siirtymä lasketaan pistekuormasta ja tasaisesta kuormasta aiheutuvien siirtymien summana kaavalla

$$u_{kok} = \frac{(F_{w,d} + H_{d,t}) \cdot L^3}{3EI} + \frac{q_{w,d} \cdot L^4}{8EI} \quad (59)$$

jossa  $F_{w,d}$  on katon tuulen aiheuttama pistekuorma pilarin yläpäässä,  $H_{d,t}$  on lisävaakavoiman aiheuttama pistekuorma pilarin yläpäässä,  $L$  on palkin pituus,  $E$  on

kimmomoduuli,  $I$  on jäyhyysmomentti ja  $q_{w,d}$  on tuulesta aiheutuva tasainen kuorma. Tämän kaavan avulla voidaan selvittää karkea arvio siirtymän suuruudesta. Kaava ei kuitenkaan huomioi rakenneosien jäykkyyksien yhteisvaikutusta, eikä pilarin alapään liitoksen todellista jäykkyyttä.

Tässä opinnäytetyössä tasokehän siirtymät selvitettiin lineaarisella elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmässä rakenne yksinkertaistetaan laskentamalliksi, jossa elementit ovat toisissaan kiinni solmuilla. Laskentamalli huomioi rakenteen elementtien jäykkyydet, solmupisteisiin ja niiden välille kohdistuvat ulkoiset kuormat, sekä solmupisteiden siirtymät ja kiertymät. Liitteessä 4 on laskettu esimerkikehän vaakasiirtymä alla olevan teorian mukaisesti. Kuvassa 12 on esitettyä siirtymäanalyyysissä käytettäviä muuttujia. Koska pilareiden alapäiden liitokset ovat jäykkiä, kehän reunaehdoiksi asetetaan, että solmuissa 1 ja 3 tapahtuvat siirtymät ja kiertymät saavat arvon nolla. Tällöin siirtymän laskennassa jätetään huomioimatta vapausasteiden 1, 2, 3, 8, 9 ja 10 komponentit.



Kuva 12. Kehän siirtymälaskennan lähtöarvot

Lineaarisen elementtimenetelmän matemaattinen malli voidaan kirjoittaa kaava-muotoon

$$[K][r] = [\hat{P}] - [\hat{R}^{ek}] \quad (60)$$

jossa  $[K]$  on koko rakenteen jäykkymatriisi,  $[r]$  on globaali siirtymävektori,  $[\hat{P}]$  on matriisi, johon on koottu rakenteen solmupistevoimat ja  $[\hat{R}^{ek}]$  on matriisi, joka



sisältää solmupisteiden välille kohdistuvista ulkoisista kuormista aiheutuvat luki-  
tusvoimat. Globaali siirtymävektori  $[r]$  on matriisi, joka sisältää rakenteen solmu-  
pisteiden siirtymät ja kiertymät. Siirtymien selvittämiseksi matemaattinen malli tu-  
lee muuttaa matriisialgebran sääntöjä noudattaen muotoon

$$[r] = [K]^{-1}([\hat{P}] - [\hat{R}^{ek}]). \quad (61)$$

Rakenteen jäykkyyismatriisi  $[K]$  muodostetaan rakenteen elementtien jäykkyyss-  
matriiseista  $[k^e]$  sijoittelusummauksella. Mastokehän matemaattisessa mallissa  
yksittäiset elementit oletetaan siirtymiä vastaan tukemattomiksi, eli ne ovat kuu-  
den vapausasteen elementtejä. Tällaisen yksittäisen elementin jäykkyyttä ku-  
vaava matriisi voidaan kirjoittaa muotoon

$$[k^e] = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -EA/L & 0 & 0 & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \quad (62)$$

Koska elementtien suunta eroaa kuvan 12 mukaan globaalista vaakasuunnasta,  
tulee elementit siirtää kyseiseen järjestelmään kiertomatriisin avulla. Elementin  
siirtymät paikallisessa koordinaatistossa saadaan yhtälöstä

$$\{\hat{u}^e\} = [C]\{u^e\} \quad (63)$$

joka voidaan esittää matriisimuodossa

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_1^e \\ \hat{u}_2^e \\ \hat{u}_3^e \\ \hat{u}_4^e \\ \hat{u}_5^e \\ \hat{u}_6^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^e \\ u_2^e \\ u_3^e \\ u_4^e \\ u_5^e \\ u_6^e \end{bmatrix} \quad (64)$$

Paikallisen koordinaatiston mukaisen elementin jäykkyyismatriisi  $[k^e]$  saadaan  
muunnettua globaaliin koordinaatistoon yhtälöllä

$$[k^e] = [C]^T [k^e] [C]. \quad (65)$$

Kun edellä mainitun yhtälön tulo lasketaan auki vaiheittain, saadaan taulukon 5 mukaisia symboleja apuna käyttäen yksittäisen elementin globaali jäykkyysmatriisi muotoon

$$[k^e] = \begin{bmatrix} c^2 k_A + s^2 k_B & cs(k_A - k_B) & -sk_C & -c^2 k_A - s^2 k_B & cs(k_B - k_A) & -sk_C \\ cs(k_A - k_B) & s^2 k_A + c^2 k_B & ck_C & cs(k_B - k_A) & -s^2 k_A - c^2 k_B & ck_C \\ -sk_C & ck_C & k_D & sk_C & -ck_C & k_E \\ -c^2 k_A - s^2 k_B & cs(k_B - k_A) & sk_C & c^2 k_A + s^2 k_B & cs(k_A - k_B) & sk_C \\ cs(k_B - k_A) & -s^2 k_A - c^2 k_B & -ck_C & cs(k_A - k_B) & s^2 k_A + c^2 k_B & -ck_C \\ -sk_C & ck_C & k_E & sk_C & -ck_C & k_D \end{bmatrix} \quad (66)$$

Taulukko 5. Yksittäisen elementin jäykkyysmatriisissa käytetyt symbolit

	Trigonometriset funktiot		Jäykkyysmatriisin alkio				
Symboli	c	s	$k_A$	$k_B$	$k_C$	$k_D$	$k_E$
Symbolia vastaava kaava	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$	$\frac{EA}{L}$	$\frac{12EI}{L^3}$	$\frac{6EI}{L^2}$	$\frac{4EI}{L}$	$\frac{2EI}{L}$

Kun kullekin elementille on saatu muodostettua globaalit jäykkyysmatriisit, tulee ne laajentaa koko rakenteen vapausasteiden mukaisiksi, jonka jälkeen voidaan muodostaa koko rakenteen jäykkyyttä kuvaava matriisi  $[K]$  sijoittelusummalla siten, että yksittäisten elementtien jäykkyysmatriisien  $[k^1]$ ,  $[k^2]$  ja  $[k^3]$  alkio sijoitellaan niiden vapausasteiden mukaisille paikoille matriisiin  $[K]$ . Alkioiden sijainti laajennetussa matriisissa määräytyy globaaleiden vapausasteiden alaindeksien mukaan. Jäykkyysmatriisi  $[K]$  saadaan siis summasta

$$[K] = [k_1] + [k_2] + [k_3]. \quad (67)$$

Jäykkyysmatriisiin lisäksi siirtymien ratkaisuun tarvitaan ulkoisten kuormien vaikutuksen huomioivat matriisit  $[\hat{P}]$  ja  $[\hat{R}^{ek}]$ . Myös nämä voimavektorit muodostetaan yksittäisten elementtien voimavektoreista samalla tavoin sijoittelusummalla kuin jäykkyysmatriisikin. Solmupistevoimavektori saadaan siis sijoittelusummalla

$$[\hat{P}] = [\hat{P}^1] + [\hat{P}^2] + [\hat{P}^3] \quad (68)$$

ja lukitusvoimavektori sijoittelusummalla

$$[\hat{R}^{ek}] = [\hat{r}^1] + [\hat{r}^2] + [\hat{r}^3] \quad (69)$$

Solmupistevoimavektori muodostuu suoraan globaalisolmuihin kohdistuvista ulkoisista kuormista, sekä tukireaktiokomponenteista, jotka voidaan ratkaista, kun tunnetaan rakenteen siirtymät. Näin mastokehän solmupistevoimavektoriksi saadaan

$$[\hat{P}] = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ -H_1 \\ -G_1 \\ 0 \\ 0 \\ Q_8 \\ Q_9 \\ Q_{10} \\ -H_3 \\ -G_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (70)$$

Lukitusvoimavektori puolestaan koostuu elementtien kenttäkuormituksista, jotka muutetaan ekvivalenteiksi solmukuormitusvektoreiksi valmiiden taulukkokaavojen avulla. Muunnosten ja sijoittelusummauksen jälkeen lukitusvoimavektoriksi saadaan

$$[\hat{R}^{ek}] = \begin{bmatrix} \frac{q_1 L_1}{2} \\ 0 \\ -\frac{q_1 L_1^2}{12} \\ \frac{q_1 L_1}{2} \\ \frac{q_2 L_2}{2} \\ \frac{q_1 L_1^2}{12} \\ \frac{q_2 L_2^2}{12} \\ \frac{q_3 L_3}{2} \\ 0 \\ -\frac{q_3 L_3^2}{12} \\ \frac{q_3 L_3}{2} \\ \frac{q_2 L_2}{2} \\ \frac{q_3 L_3^2}{12} \\ -\frac{q_2 L_2^2}{12} \end{bmatrix} \quad (71)$$

Lukitusvoimavektorilla kuvataan ulkoisten voimien suuruudet paikallisessa koordinaatistossa voiman suunta ja suuntakulma huomioiden.

Koko rakenteen matemaattinen malli muodostuu kaavan (60) mukaisesti sijoitussummausta ja superpositioperiaatetta hyödyntäen. Kun rakenteen matemaattinen malli muutetaan kaavan (61) mukaiseen muotoon käyttäen matriiseista vain vapausasteiden 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13 ja 14 mukaisia arvoja, saadaan selville rakenteen siirtymät pilareiden ja palkkien välisten solmujen kohdalla. Näistä arvoista 4. vapausasteen mukainen arvo kertoo rakenteen vaakasiirtymän, jota verrataan rakenteelle sallittuun vaakasiirtymän arvoon  $H/300$ , jossa  $H$  on kehärakenteen korkeus.

## 5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda laskentaohje, jonka pohjalta koko mastokehä voidaan mitoittaa tasokehänä. Haasteena työssä oli löytää ja sisäistää menetelmä, jolla kehän vaakasiirtymä saadaan ratkaistua mahdollisimman tarkasti. Pilarin, palkin, hankolautaliitoksen ja liimaruuviliitoksen mitoitukseen on olemassa ohjeita, mutta laskentapohjaa, jossa nämä kaikki olisi yhdistetty, ei ole. Lisäksi mastokehän siirtymän tarkkaan laskentaan ei ole selkeitä ohjeita. Tämän vuoksi FEM-ohjelmien taustalla olevaan elementtimenetelmään tuli perehtyä hyvin, jotta sitä voitiin hyödyntää siirtymän mitoituksessa.

Haastavinta työssä oli sisäistää elementtimenetelmän toimintaperiaate ja luoda selkeä laskentaohje siirtymän mitoitukseen sen pohjalta. Siirtymän laskentaan liittyvät matriisit olivat hyvin laajoja, minkä vuoksi oli tärkeää ymmärtää teoria, johon matriisit pohjautuivat. Tämän lisäksi tuli osata matriisilaskennan laskusäännöt.

Tässä opinnäytetyössä siirtymän laskennassa tehtiin oletus, että pilareiden alapäiden solmuissa ei tapahdu vaaka- tai pystysuuntaista siirtymää eikä kiertymää. Todellisuudessa puurakeilla on lähes mahdotonta saada aikaiseksi täysin jäykkää liitosta jo pelkästään puun kuivumisen vaikutusten vuoksi. Myös tämä osittainen perustusliitoksen jäykkyys olisi mahdollista ottaa siirtymälaskennassa huomioon. Osittaisen jäykkyyden huomioiminen vaatisi kuitenkin iterointia, sillä liitoksen jäykkyys on riippuvainen liittyvästä rakenteesta ja liittyvän rakenteen jäykkyys puolestaan on riippuvainen liitoksen jäykkyydestä. Lisäksi rakenteen alkuvinoudella on pieni vaikutus siirtymän suuruuteen, sillä kun rakenne on jo alkuun hieman epäkeskeisesti asennettu, aiheutuu pilarin alapäähän muun muassa momenttia. Tällöin rakenteella on jo alussa hieman siirtymää, joka sitten kasvaa, kun rakenteeseen kohdistuu ulkoisia kuormia.

Osana opinnäytetyötä tehdyn laskentapohjan oikeellisuutta tutkittiin tekemällä palkin ja pilarin mitoituksen vertailulaskelmat RX-Timber -ohjelmalla, jonka tulokset olivat hyvin lähellä opinnäytetyön yhteydessä luodun laskentapohjan tuloksia. Tulokset erosivat pääsääntöisesti vain muutamilla prosenteilla ja erojen

syynä olivat suurimmaksi osaksi mitoituksessa käytetyt lujuusarvot sekä käytetyt kuormat. Tulosten paikkansa pitävyyden varmistamiseksi tarkastuslaskelmat tehtiin parilla eri lähtötiedoilla. RX-Timber -ohjelmalla tarkastettiin pilarin ja palkin mitoitus, sekä kehän vaakasiirtymä. Liitosten mitoitukseen ei ole olemassa vielä laskentaohjelmia, joten liitosten mitoitusta ei saanut vertailla muihin tuloksiin. Vertailujen perusteella laskentapohjaa voidaan pitää luotettavana käyttötarkoitukseensa.

Opinnäytetyötä tehdessä tuli havaittua, että laskentapohjaa on mahdollista hyödyntää myös vinoihin kehiin, sillä siirtymämitoitus huomioi elementtien suunnan globaalin kiertokulman avulla. Tähän liittyen ei ole kuitenkaan tehty vertailulaskelmaa, joten täyttä varmuutta toimivuudesta ei ole. Lisäksi siirtymämitoitusta on helppo hyödyntää myös esimerkiksi teräsrakenteisen kehän mitoitukseen muuttamalla poikkileikkaus- ja jäykkyysarvoja. Laskentaohjelmassa laskennan eteneminen ja käytetyt arvot on selkeästi esitetty, joten ohjelmaa on mahdollista päivittää, mikäli normit muuttuvat. Laskentapohjaan on myös tarvittaessa helppo lisätä liimapuun lujuusluokkia. Laskentaohjelmaa voisi myös kehittää lisäämällä laskentaan erilaisia palkkivaihtoehtoja. Mahdollisena jatkotutkimuksena voisi olla kehän pituussuuntaisten siirtymien määrittäminen, sekä koko liimapuuhallin mitoitus päätyrakenteineen ja jäykistyksineen. Koko hallin mitoitus pituussuuntaisine siirtymineen vaatisi tarkempaa tutustumista hallien pituussuuntaisiin rakenteisiin, sekä elementtimenetelmän soveltamista hallin pituussuuntaiseen toimintaan.

## LÄHTEET

Lampimäki, J. 2014. Mastopilarikehän FEM-laskenta. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Savonia-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Puuinfo Oy. 2009. Puuhallin rakenteet. Esisuunnittelu ja valintaperusteet. Tulostettu 28.2.2019. <https://staging.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/puuhallin-rakenteet-esisuunnittelu-ja-valintaperusteet>

Puuinfo Oy. 2009. Puuhallin suunnittelu. Esisuunnittelu ja arkkitehtoniset valinnat. Tulostettu 28.2.2019. <https://staging.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/puuhallin-suunnittelu-esisuunnittelu-ja-arkkitehtoniset-valinnat>

Puuinfo Oy. 2014. HalliPES 1.0. Tulostettu 22.2.2019. <https://www.puuinfo.fi/hallipes>

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

RIL 205-1-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje. 2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

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

Salmi, T. & Kuula, K. 2012. Rakenteiden mekaniikka. Tampere: Pressus Oy.

Suomen Liimapuuyhdistys ry. 2003. Liimapuukäsikirja. Tulostettu 8.2.2019. <https://staging.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja/liimapuukasikirja.pdf>

Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. 2014. Liimapuukäsikirja Osa 1. Tulostettu 26.2.2019. [https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuu\\_low.pdf](https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuu_low.pdf)

Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. 2014. Liimapuukäsikirja Osa 2. Tulostettu 20.2.2019. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%200.pdf>

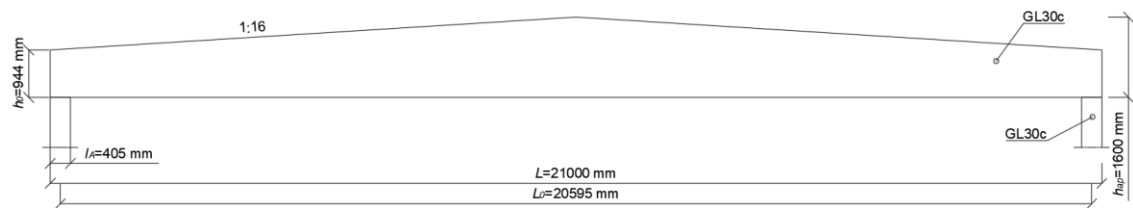
Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennustieto. 1996. STEP 1 Puurakenteet. Tampere: Rakennustieto Oy.

## LIITTEET

1(9)

## Liite 1. Esimerkki harjapalkin mitoituksesta

Harjapalkin mitoitus tehdään alla olevan kuvan mukaisilla keksityillä lähtöarvoilla.



Harjapalkin leveys  $b=240$  mm  
Kehäväli  $s=5$  m

Kuomat:  
Kattorakenteen paino  $g_{k1}=0,5$  kN/m<sup>2</sup>  
Ripustuskuorma  $g_{k2}=0,2$  kN/m<sup>2</sup>  
Lumikuorma (maassa)  $s_k=2,5$  kN/m<sup>2</sup>

Palonkesto aika  $t=30$  min



**Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa****Mitoitusehto:**  $\sigma_{mod} \leq k_{m\alpha} \cdot f_{md}$ 

Mitoittavan poikkileikkauksen sijainti jännevälin päästä

$$x := \frac{h_0}{2 \cdot h_{ap}} \cdot L_{pal} = (6.193 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Palkin korkeus mitoittavassa poikkileikkauksessa

$$h_x := h_0 + x \cdot \tan(\alpha) = (1.331 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Tukireaktiot

$$F_A := \frac{P_d \cdot L_{pal}}{2} = 238.168 \text{ kN}$$

$$F_B := F_A = 238.168 \text{ kN}$$

Momentti mitoittavassa poikkileikkauksessa

$$M_x := F_A \cdot x - P_d \cdot x \cdot \frac{x}{2} = (1.04 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusjännitys mitoittavassa poikkileikkauksessa

$$\sigma_{mod} := \frac{6 \cdot M_x}{b_{pal} \cdot h_x^2} = 14.68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutuslujuus

$$f_{md} := k_{mod1} \cdot \frac{f_{mk}}{\gamma_M} = 19.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Palkin yläreunan kaltevuus

$$\alpha_{ap} := \alpha = 3.576 \text{ deg}$$

Leikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{vd} := k_{mod1} \cdot \frac{f_{vk}}{\gamma_M} = 2.24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Poikittaisen puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_{c90d} := k_{mod1} \cdot \frac{f_{c90k}}{\gamma_M} = 1.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

 $k_{m\alpha}$  -kerroin

$$k_{m\alpha} := \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{md}}{1.5 \cdot f_{vd}} \cdot \tan(\alpha) \right)^2 + \left( \frac{f_{md}}{f_{c90d}} \cdot (\tan(\alpha))^2 \right)^2}} = 0.941$$

Käyttöaste = 0.813

Käyttöaste = "KESTÄÄ"

**Taivutuskestävyys harjalla****Mitoitusehto:**  $\sigma_{md} \leq f_{md}$  $k_l$  -kerroin

$$k_l := 1 + 1.4 \cdot \tan(\alpha_{ap}) + 5.4 \cdot (\tan(\alpha_{ap}))^2 = 1.109$$

Taivutusjännitys harjalla

$$M_{apd} := \frac{P_d \cdot L_0^2}{8} = (1.203 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{md} := k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{apd}}{b_{pal} \cdot h_{ap}^2} = 13.02 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutuslujuus

$$f_{md} = 19.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

 $k_r$  -kerroin

$$k_r := 1 \quad (\text{Harjapalkilla})$$

 $K\ddot{a}y\ddot{t}\ddot{o}a\ddot{s}t\ddot{e} = 0.678$  $K\ddot{a}y\ddot{t}\ddot{o}a\ddot{s}t\ddot{e} = \text{“KESTÄÄ”}$ **Poikittainen vetokestävyys harjalla****Mitoitusehto:**  $\sigma_{t90d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90d}$ 

Poikittainen vetojännitys harjalla

$$M_{apd} = (1.203 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tasainen kuorma palkin yläpinnalla

$$P_d = 22.683 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

 $k_p$  -kerroin

$$k_p := 0.2 \cdot \tan(\alpha_{ap}) = 0.013$$

Poikittainen vetojännitys taivutusmomentista

$$\sigma_{t90d} := k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{apd}}{b_{pal} \cdot h_{ap}^2} = 0.147 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Poikittainen vetolujuus

$$f_{t90d} := k_{mod1} \cdot \frac{f_{t90k}}{\gamma_M} = 0.32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

 $k_{vol}$  -kerroin

$$V_0 := 0.01 \text{ m}^3 \quad V = 0.488 \text{ m}^3$$

$$k_{vol} := \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.2} = 0.459$$

 $k_{dis}$  -kerroin

$$k_{dis} := 1.4 \quad (\text{Harjapalkille})$$

 $K\ddot{a}y\ddot{t}\ddot{o}a\ddot{s}t\ddot{e} = 0.713$  $K\ddot{a}y\ddot{t}\ddot{o}a\ddot{s}t\ddot{e} = \text{“KESTÄÄ”}$

### Yhdistetty leikkauskestävyys ja poikittainen vetokestävyys harjalla

**Mitoitusehto:**  $\frac{\tau_d}{f_{vd}} + \frac{\sigma_{t90d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90d}} \leq 1$

Leikkausvoima harjalla  $V_d := \frac{-F_A + P_d \cdot \left(\frac{L_0}{2}\right)}{2} = -2.297 \text{ kN}$

Taivutusmomentti harjalla  $M_{apd} = 874.818 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Leikkausjännitys harjalla  $\tau_d := \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b_{pal} \cdot h_{ap}} = -0.009 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Leikkauslujuus  $f_{vd} = 2.24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$k_p$  -kerroin  $k_p = 0.013$

Poikittainen vetojännitys harjalla  $P_{apd} := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot P_{kG} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \frac{P_{kQ}}{2} = 14.433 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$\sigma_{t90d} := k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{apd}}{b_{pal} \cdot h_{ap}^2} - 0.6 \cdot \frac{P_{apd}}{b_{pal}} = 0.071 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Poikittainen vetolujuus  $f_{t90d} = 0.32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$Käyttöaste = 0.34$

$Käyttöaste = \text{“KESTÄÄ”}$

### Leikkausvoimakestävyys tuella

**Mitoitusehto:**  $\tau_d \leq f_{vd}$

Tasaisen kuorman aiheuttama leikkausvoima tuella  $V_{pd} := \frac{P_d \cdot L_0}{2} = 233.575 \text{ kN}$

Leikkausvoiman redusoitu arvo  $V_{red} := V_{pd} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_0 + l_A}{L_0}\right) = 207.575 \text{ kN}$

Mitoittava leikkausvoima  $V_d := V_{red} = 207.575 \text{ kN}$

Mitoittava poikkileikkaus  $k_{cr} := 1$  (liimapuulle)

$b_{ef} := k_{cr} \cdot b_{pal} = 0.24 \text{ m}$

$h_m := h_0 + \tan(\alpha) \cdot (h_0 + l_A) = 1.028 \text{ m}$

Leikkausjännitys  $\tau_d := \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b_{ef} \cdot h_m} = 1.262 \frac{N}{mm^2}$

Leikkauslujuus  $f_{vd} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$

$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = 0.563$

$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = \text{“KESTÄÄ”}$

### Tukipainekestävyys

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{c90d} \leq k_c \cdot f_{c90d}$

Tukireaktio  $N_d := \frac{P_d \cdot L_{pal}}{2} = 238.168 \text{ kN}$

---

Tehollinen kosketuspinnan pituus  $l_{c90ef} = 435 \text{ mm}$

Puristusjännitys palkissa  $\sigma_{c90d} := \frac{N_d}{b_{pal} \cdot l_A} = 2.45 \frac{N}{mm^2}$

Palkin puristuslujuus syysuuntaa vastaan  $f_{c90d} = 1.6 \frac{N}{mm^2}$

$k_{c90}$  -kerroin  $k_{c90} = 1$

Tukipainekerroin  $k_c := \frac{l_{c90ef}}{l} \cdot k_{c90} = 1.074$

$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = 1.426$

$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = \text{“EI KESTÄ, Kasvata poikkileikkausta tai mitoita teräslevyvahvistus tuelle”}$

### Taipuma palkin keskellä

**Mitoitusehto:**  $w_{fin} \leq \frac{L_0}{200}$

Jähyysmomentti mitoittavassa poikkileikkauksessa  $I_e := \frac{b_{pal} \cdot h_x^3}{12} = (4.714 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$

Momentin aiheuttama taipuma pysyvistä kuormista  $w_{instMG} := \frac{5 \cdot P_{kG} \cdot L_0^4}{384 \cdot E_{0mean} \cdot I_e} = 20.55 \text{ mm}$

Momentin aiheuttama taipuma  
muuttuvista kuormista

$$w_{instMQ} := \frac{5 \cdot P_{kQ} \cdot L_0^4}{384 \cdot E_{0mean} \cdot I_e} = 42.047 \text{ mm}$$

Leikkausvoiman aiheuttama  
taipuma pysyvistä kuormista

$$w_{instVG} := 0.35 \cdot \frac{P_{kG} \cdot L_0^2}{G_{mean} \cdot b_{pal} \cdot (h_0 + h_{ap})} = 2.011 \text{ mm}$$

Leikkausvoiman aiheuttama  
taipuma muuttuvista kuormista

$$w_{instVQ} := 0.35 \cdot \frac{P_{kQ} \cdot L_0^2}{G_{mean} \cdot b_{pal} \cdot (h_0 + h_{ap})} = 4.115 \text{ mm}$$

Kokonaistaipuma

$$k_{def} := 0.6$$

$$w_{fin} := (w_{instMG} + w_{instVG}) \cdot (1 + k_{def}) + (w_{instMQ} + w_{instVQ}) \cdot (1 + \Psi_2 \cdot k_{def}) = 87.8 \text{ mm}$$

*Käyttöaste* = 0.853

**Mitoitusehto:**  $w_{net,fin} \leq \frac{L_0}{300}$

Esikorotus

$$w_c := \frac{L_0}{400} \quad (\text{suositeltu esikorotus})$$

Lopputaipuma

$$w_{net,fin} := w_{fin} - w_c = 36.312 \text{ mm}$$

*Käyttöaste* = 0.529

### Kiepahdus

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{md} \leq k_{crit} \cdot f_{md}$

Mitoittavan poikkileikkauksen korkeus

$$h_x = 1.331 \text{ m}$$

Taivutusjännitys mitoitavassa  
poikkileikkauksessa

$$M_x = (1.04 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{md} := \frac{6 \cdot M_x}{b_{pal} \cdot h_x^2} = 14.68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sivusuunnassa tuetun palkin  
tehollinen jänneväli

$$l_{ef} := a_s + 2 \cdot h_x = (5.162 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys

$$c = 0.7$$

$$\sigma_{crit} := \frac{c \cdot b_{pal}^2}{h_x \cdot l_{ef}} \cdot E_{005} = 63.391 \frac{N}{mm^2}$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{relm} := \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{crit}}} = 0.688$$

$k_{crit}$  -kerroin

$$k_{crit} = 1$$

$$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = 0.765$$

K $\ddot{a}$ ytt $\ddot{o}$ aste = "KEST $\ddot{A}$ Ä"

### Palomitoitus

Palonkesto aika

$$t := 30 \text{ min}$$

Tehollinen hiiltymisnopeus

$$\beta_n := 0.7 \frac{mm}{min}$$

Tehollinen hiiltymissyvyys

$$d_{charn} := \beta_n \cdot t = 21 \text{ mm} \quad d_0 := 7 \text{ mm}$$

$$k_0 := \begin{cases} \text{if } t < 20 \text{ min} \\ \left| \frac{t}{20 \text{ min}} \right| \\ \text{if } t \geq 20 \text{ min} \\ \left| 1 \right| \end{cases} = 1$$

$$d_{ef} := d_{charn} + k_0 \cdot d_0 = 28 \text{ mm}$$

Harjapalkki hiiltyy 3 sivulta, joten jäännöspoikkileikkauksen mitat ovat:

$$b_{fi} := b_{pal} - 2 \cdot d_{ef} = 184 \text{ mm}$$

$$h_{xfi} := h_x - d_{ef} = (1.303 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$h_{apfi} := h_{ap} - d_{ef} = (1.572 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$h_{0fi} := h_0 - d_{ef} = 915.75 \text{ mm}$$

Palokuorma	$E_{dfi} := P_{kG} + \Psi_{fi} \cdot P_{kQ} = 9.776 \frac{kN}{m}$
Mitoittava momentti mitoittavassa poikkileikkauksessa	$M_{xfi} := \frac{E_{dfi} \cdot L_{pal}}{2} \cdot x - E_{dfi} \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 448.255 \text{ kN} \cdot m$
Mitoittava momentti harjalla	$M_{apdfi} := \frac{E_{dfi} \cdot L_0^2}{8} = 518.329 \text{ kN} \cdot m$
Mitoittava leikkausvoima harjalla	$V_{dfi} := \frac{-\frac{E_{dfi} \cdot L_{pal}}{2} + E_{dfi} \cdot \left(\frac{L_0}{2}\right)}{2} = -0.99 \text{ kN}$
Taivutuslujuus	$f_{mdfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{mk}}{\gamma_{Mfi}} = 34.5 \frac{N}{mm^2}$
Leikkauslujuus	$f_{vdfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{vk}}{\gamma_{Mfi}} = 4.025 \frac{N}{mm^2}$
Puristuslujuus syysuuntaa vastaan	$f_{c90dfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{c90k}}{\gamma_{Mfi}} = 2.875 \frac{N}{mm^2}$
Poikittainen vetolujuus	$f_{t90dfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{t90k}}{\gamma_{Mfi}} = 0.575 \frac{N}{mm^2}$

Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{modfi} \leq k_{m\alpha} \cdot f_{mdfi}$

Taivutusjännitys mitoittavassa poikkileikkauksessa  $\sigma_{modfi} := \frac{6 \cdot M_{xfi}}{b_{fi} \cdot h_{xfi}^2} = 8.612 \frac{N}{mm^2}$

$k_{m\alpha}$  -kerroin

$$k_{m\alpha} := \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{mdfi}}{1.5 \cdot f_{vdfi}} \cdot \tan(\alpha)\right)^2 + \left(\frac{f_{mdfi}}{f_{c90dfi}} \cdot (\tan(\alpha))^2\right)^2}} = 0.941$$

$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = 0.265$

$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = \text{“KESTÄÄ”}$

Taivutuskestävyys harjalla**Mitoitusehto:**  $\sigma_{mdfi} \leq f_{mdfi}$  $k_l$  -kerroin

$$k_l := 1 + 1.4 \cdot \tan(\alpha_{ap}) + 5.4 \cdot (\tan(\alpha_{ap}))^2 = 1.109$$

Taivutusjännitys harjalla

$$\sigma_{mdfi} := k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{apdfi}}{b_{fi} \cdot h_{apfi}^2} = 7.582 \frac{N}{mm^2}$$

 $k_r$  -kerroin

$$k_r := 1 \quad (\text{Harjapalkille})$$

 $Käyttöaste = 0.22$  $Käyttöaste = \text{“KESTÄÄ”}$ Kiepahdus**Mitoitusehto:**  $\sigma_{mdfi} \leq k_{crit} \cdot f_{mk}$ Sivusuunnassa tuetun palkin  
tehollinen jänneväli

$$l_{effi} := a + 2 \cdot h_{xfi} = (2.606 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Suorakaidepalkin kriittinen  
taivutusjännitys

$$\sigma_{mcrif_i} := \frac{c \cdot b_{fi}^2}{h_{xfi} \cdot l_{effi}} \cdot E_{005} = 75.396 \frac{N}{mm^2}$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{relm} := \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{mcrif_i}}} = 0.631$$

 $k_{crit}$  -kerroin

$$k_{crit} = 1$$

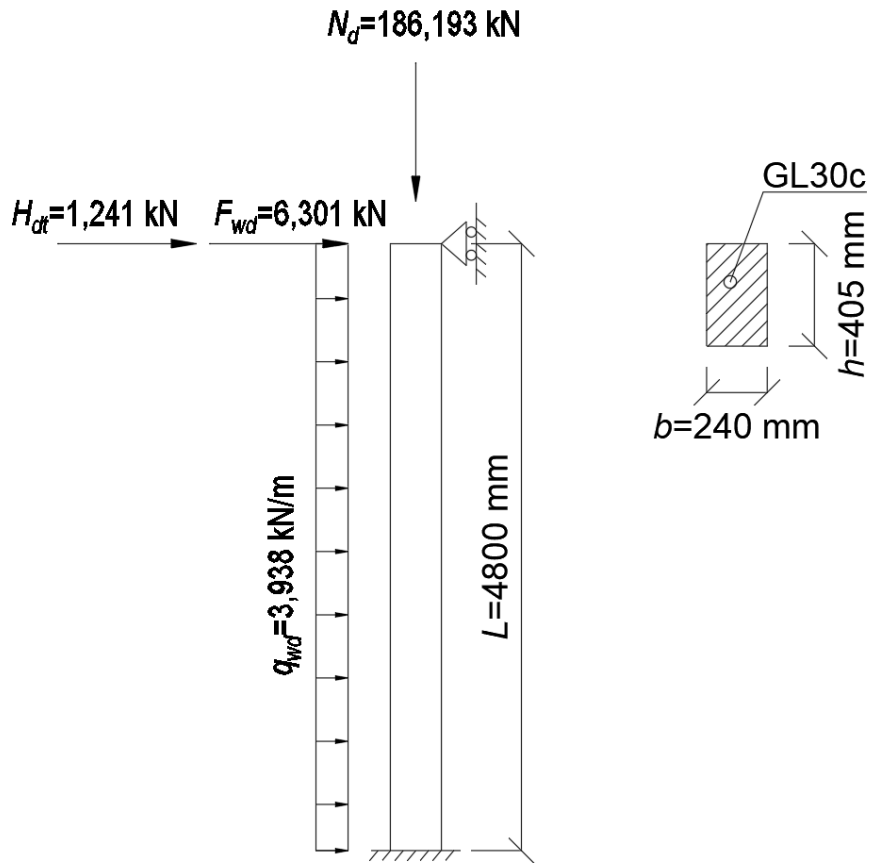
 $Käyttöaste = 0.22$  $Käyttöaste = \text{“KESTÄÄ”}$



## Liite 2. Esimerkki mastopilarin mitoituksesta

1(9)

Mastopilarin mitoitus tehdään liitteen 1 ja alla olevan kuvan mukaisilla lähtöarvoilla.



**Puristuskestävyys****Mitoitusehto:**  $\sigma_{c0d} \leq f_{c0d}$ 

Puristusjännitys

$$\sigma_{c0d} := \frac{N_d}{b_{pil} \cdot h_{pil}} = 1.916 \frac{N}{mm^2}$$

Puristuslujuus

$$f_{c0d} := k_{mod2} \cdot \frac{f_{c0k}}{\gamma_M} = 21.56 \frac{N}{mm^2}$$

 $Käyttöaste = 0.089$  $Käyttöaste = \text{"KESTÄÄ"}$ **Taivutuskestävyys poikkileikkauksen y-suuntaan****Mitoitusehto:**  $\sigma_{mzd} \leq k_h \cdot f_{myd}$ 

Taivutusjännitys

$$\sigma_{mzd} := \frac{6 \cdot M_{zd}}{b_{pil} \cdot h_{pil}^2} = 6.626 \frac{N}{mm^2}$$

Taivutuslujuus

$$f_{md} := k_{mod2} \cdot \frac{f_{mk}}{\gamma_M} = 26.4 \frac{N}{mm^2}$$

 $k_h$  -kerroin

$$k_h := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{h_{pil}} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.04$$

 $Käyttöaste = 0.241$  $Käyttöaste = \text{"KESTÄÄ"}$ **Taivutuskestävyys poikkileikkauksen z-suuntaan****Mitoitusehto:**  $\sigma_{myd} \leq k_h \cdot f_{md}$ 

Taivutusjännitys

$$\sigma_{mzd} := \frac{6 \cdot M_{yd}}{h_{pil} \cdot b_{pil}^2} = 0.46 \frac{N}{mm^2}$$

 $Käyttöaste = 0.017$  $Käyttöaste = \text{"KESTÄÄ"}$

**Nurjahduskestävyys (z-suuntaan)**

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{\sigma_{c0d}}{k_{cy} \cdot f_{cod}} + \frac{\sigma_{myd}}{k_h \cdot f_{md}} \leq 1$$

Maksimi normaalivoima

$$N_d = 186.193 \text{ kN}$$

Hoikkuusluku

$$L_{cz} := 2.5 \cdot L_{pil} = (1.2 \cdot 10^4) \text{ mm}$$

$$I_y := \frac{b_{pil} \cdot h_{pil}^3}{12} = (1.329 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{b_{pil} \cdot h_{pil}}} = 116.913 \text{ mm}$$

$$\lambda_y := \frac{L_{cz}}{i_y} = 102.64$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{005}}} = 1.556$$

 $k_y$  -kerroin

$$\beta_c := 0.1 \quad (\text{alkukäyrydestä riippuva kerroin liimapuulle})$$

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) = 1.774$$

Nurjahduskerroin  $k_{cy}$ 

$$k_{cy} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0.381$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c0d} := \frac{N_d}{b_{pil} \cdot h_{pil}} = 1.916 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristuslujuus

$$f_{cod} = 21.56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Maksimi taivutusmomentti

$$M_{zd} = 43.475 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{myd} := \frac{6 \cdot M_{zd}}{b_{pil} \cdot h_{pil}^2} = 6.626 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutuslujuus

$$f_{md} = 26.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = 0.474$$

K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = "KEST\ddot{A}\ddot{A}"

## Kiepahdus

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{md} \leq k_{crit} \cdot f_{md}$

Taivutusjännitys 
$$\sigma_{md} := \frac{6 \cdot M_{zd}}{b_{pil} \cdot h_{pil}^2} = (6.626 \cdot 10^3) \frac{kN}{m^2}$$

Kiepahdustuentaväli 
$$a := L_{pil} = (4.8 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle 
$$l_{ef} := 0.5 \cdot a = (2.4 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Kuorma sijaitsee vedetyllä reunalla, joten tehollista jänneväliä voidaan pienentää 0,5h verran

$$l_{ef1} := l_{ef} - 0.5 \cdot h_{pil} = (2.198 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli pistekuormille 
$$l_{ef} := 0.8 \cdot a = (3.84 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Pilarin yläpään liitos harjapalkkiin toteutetaan hankolautaliitoksena, joten pistekuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla

$$l_{ef2} := l_{ef} = (3.84 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Tasaisen kuorman aiheuttama momentti 
$$M_{d1} := \frac{5 \cdot q_{wd} \cdot L_{pil}^2}{16} = 28.353 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pistekuormien aiheuttama momentti 
$$M_{d2} := \frac{F_{wd} \cdot L_{pil}}{2} = 15.122 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle ja pistekuormille

$$l_{ef} := \frac{M_{d1} \cdot l_{ef1} + M_{d2} \cdot l_{ef2}}{M_{d1} + M_{d2}} = 2.769 \text{ m}$$

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

$$c = 0.7$$

$$\sigma_{mcrit} := \frac{c \cdot b_{pil}^2}{h_{pil} \cdot l_{ef}} \cdot E_{005} = 388.326 \frac{N}{mm^2}$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{relm} := \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{mcrit}}} = 0.278$$

$k_{crit}$  -kerroin

$$k_{crit} = 1$$

*Käyttöaste* = 0.251

*Käyttöaste* = "KESTÄÄ"

**Leikkaus****Mitoitusehto:**  $\tau_d \leq f_{vd}$ 

Maksimi leikkausvoima

$$V_d = 18.272 \text{ kN}$$

 $k_{cr}$  -kerroin ja tehollinen poikkileikkauksen korkeus

$$k_{cr} := 0.67 \quad (\text{Liimapuulle})$$

$$b_{ef} := k_{cr} \cdot b_{pil} = 160.8 \text{ mm}$$

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_d := \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b_{ef} \cdot h_{pil}} = 420.863 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Leikkauslujuus

$$f_{vd} := k_{mod2} \cdot \frac{f_{vk}}{\gamma_M} = 3.08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = 0.137$$

$$K\ddot{a}ytt\ddot{o}aste = \text{“KESTÄÄ”}$$

**Palomitoitus**

Palonkesto aika

$$t = 30 \text{ min}$$

Tehollinen hiiltymisnopeus

$$\beta_n := 0.7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Tehollinen hiiltymissyvyys

$$d_{charn} := \beta_n \cdot t = 21 \text{ mm} \quad d_0 := 7 \text{ mm}$$

$$k_0 := \left\| \begin{array}{l} \text{if } t < 20 \text{ min} \\ \left\| \frac{t}{20 \text{ min}} \right\| \\ \text{if } t \geq 20 \text{ min} \\ \left\| 1 \right\| \end{array} \right\| = 1$$

$$d_{ef} := d_{charn} + k_0 \cdot d_0 = 28 \text{ mm}$$

Harjapalkki hiiltyy 3 sivulta, joten jäännöspoikkileikkauksen mitat ovat:

$$b_{pilfi} := b_{pil} - 2 \cdot d_{ef} = 184 \text{ mm}$$

$$h_{pilfi} := h_{pil} - d_{ef} = 377 \text{ mm}$$

Seinän tuulikuorma MRT

$$q_{wdfi} := \Psi_{fituuli} \cdot q_{wk} \cdot s = 0.525 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta MRT

$$F_{wdfi} := q_{wdfi} \cdot (H - L_{pil}) = 0.84 \text{ kN}$$

Pilarin pystykuorma

$$N_{dfi} := (g_{k1} + g_{k2}) \cdot k \cdot s \cdot \frac{B}{2} + g_{kop} \cdot \frac{B}{2} + q_k \cdot \Psi_{filumi} \cdot k \cdot s \cdot \frac{B}{2} = 102.651 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima rakennuksen pituussuunnassa

$$H_{dfi} := \max\left(\frac{B}{d} \cdot \frac{N_{dfi}}{150}, \frac{N_{dfi}}{250}\right) = 0.411 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima rakennuksen leveysuunnassa

$$H_{dfi} := \frac{N_{dfi}}{150} = 0.684 \text{ kN}$$

Pilarin taivutusmomentti z-suuntaan MRT

$$M_{ydfi} := \frac{5 \cdot q_{wdfi} \cdot L_{pil}^2}{16} + \frac{F_{wdfi} \cdot L_{pil}}{2} = 5.797 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pilarin taivutusmomentti y-suuntaan MRT

$$M_{zdfi} := \frac{H_{dfi} \cdot L_{pil}}{2} = 0.985 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pilarin leikkausvoima MRT

$$V_{dfi} := \frac{4 \cdot q_{wdfi} \cdot L_{pil}}{5} + \frac{F_{wdfi}}{2} = 2.436 \text{ kN}$$

Taivutuslujuus

$$f_{mdfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{mk}}{\gamma_{Mfi}} = 34.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkauslujuus

$$f_{vdfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{vk}}{\gamma_{Mfi}} = 4.025 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$$f_{c0dfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{c0k}}{\gamma_{Mfi}} = 28.175 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Poikittainen vetolujuus

$$f_{t90dfi} := k_{modfi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{t90k}}{\gamma_{Mfi}} = 0.575 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristuskestävyys

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{c0dfi} \leq f_{c0dfi}$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c0dfi} := \frac{N_{dfi}}{b_{püfi} \cdot h_{püfi}} = 1.48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste = 0.053

Käyttöaste = "KESTÄÄ"

Nurjahduskestävyys z-suuntaan

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{\sigma_{c0dfi}}{k_{cyfi} \cdot f_{c0dfi}} + \frac{\sigma_{mydfi}}{k_n \cdot f_{mdfi}} \leq 1$$

Maksimi normaalivoima

$$N_{dfi} = 102.651 \text{ kN}$$

Hoikkuusluku

$$L_{czfi} := 2.5 \cdot L_{pil} = (1.2 \cdot 10^4) \text{ mm}$$

$$I_{yfi} := \frac{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}^3}{12} = (8.216 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$i_{yfi} := \sqrt{\frac{I_{yfi}}{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}}} = 108.831 \text{ mm}$$

$$\lambda_{yfi} := \frac{L_{czfi}}{i_{yfi}} = 110.263$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{relyfi} := \frac{\lambda_{yfi}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{005}}} = 1.672$$

 $k_y$  -kerroin

$$\beta_c := 0.1 \quad (\text{alkukäyrästä riippuva kerroin liimapuulle})$$

$$k_{yfi} := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{relyfi} - 0.3) + \lambda_{relyfi}^2) = 1.966$$

Nurjahduskerroin  $k_{cy}$ 

$$k_{cyfi} := \frac{1}{k_{yfi} + \sqrt{k_{yfi}^2 - \lambda_{relyfi}^2}} = 0.333$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c0dfi} := \frac{N_{dfi}}{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}} = 1.48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Maksimi taivutusmomentti

$$M_{ydfi} = 5.797 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{mydfi} := \frac{6 \cdot M_{ydfi}}{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}^2} = 1.33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Käyttöaste} = 0.195$$

$$\text{Käyttöaste} = \text{“KESTÄÄ”}$$

Nurjahduskestävyys y-suuntaan

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{\sigma_{c0dfi}}{k_{cy} \cdot f_{c0dfi}} + \frac{\sigma_{mydfi}}{k_h \cdot f_{mdfi}} \leq 1$$

Maksimi normaalivoima  $N_{dfi} = 102.651 \text{ kN}$

Hoikkuusluku  $L_{cyfi} := 2.5 \cdot L_{pil} = (1.2 \cdot 10^4) \text{ mm}$

$$I_{zfi} := \frac{h_{pilfi} \cdot b_{pilfi}^3}{12} = (1.957 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$i_{zfi} := \sqrt{\frac{I_{zfi}}{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}}} = 53.116 \text{ mm}$$

$$\lambda_{zfi} := \frac{L_{cyfi}}{i_{zfi}} = 225.92$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{relzfi} := \frac{\lambda_{zfi}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{005}}} = 3.425$$

$k_y$  -kerroin

$$\beta_c := 0.1 \quad (\text{alkukäyrydestä riippuva kerroin liimapuulle})$$

$$k_{zfi} := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{relzfi} - 0.3) + \lambda_{relzfi}^2) = 6.522$$

Nurjahduskerroin  $k_{cy}$

$$k_{czfi} := \frac{1}{k_{zfi} + \sqrt{k_{zfi}^2 - \lambda_{relzfi}^2}} = 0.083$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c0dfi} := \frac{N_{dfi}}{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}} = 1.48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Maksimi taivutusmomentti

$$M_{zdfi} = 0.985 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{mydfi} := \frac{6 \cdot M_{zdfi}}{b_{pilfi} \cdot h_{pilfi}^2} = 0.226 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste = 0.64

Käyttöaste = "KESTÄÄ"



Kiepahdukestävyys**Mitoitusehto:**  $\sigma_{mdfi} \leq k_{critfi} \cdot f_{mdfi}$ 

Taivutusjännitys

$$\sigma_{mdfi} := \frac{6 \cdot M_{ydfi}}{b_{püfi} \cdot h_{püfi}^2} = (1.33 \cdot 10^3) \frac{kN}{m^2}$$

Kiepahdustuentaväli

$$a := L_{pil} = (4.8 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle

$$l_{effi} := 0.5 \cdot a = (2.4 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Kuorma sijaitsee vedetyllä reunalla, joten tehollista jänneväliä voidaan pienentää 0,5h verran

$$l_{ef1fi} := l_{effi} - 0.5 \cdot h_{püfi} = (2.212 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli pistekuormille

$$l_{effi} := 0.8 \cdot a = (3.84 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Pilarin yläpään liitos harjapalkkiin toteutetaan hankolautaliitoksena, joten pistekuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla

$$l_{ef2fi} := l_{effi} = (3.84 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Tasaisen kuorman aiheuttama momentti

$$M_{d1fi} := \frac{5 \cdot q_{wdfi} \cdot L_{pil}^2}{16} = 3.78 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pistekuormien aiheuttama momentti

$$M_{d2fi} := \frac{F_{wdfi} \cdot L_{pil}}{2} = 2.016 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle ja pistekuormille

$$l_{effi} := \frac{M_{d1fi} \cdot l_{ef1fi} + M_{d2fi} \cdot l_{ef2fi}}{M_{d1fi} + M_{d2fi}} = 2.778 \text{ m}$$

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

$$c = 0.7$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\sigma_{meritfi} := \frac{c \cdot b_{püfi}^2}{h_{püfi} \cdot l_{effi}} \cdot E_{005} = 244.396 \frac{N}{mm^2}$$

 $k_{crit}$  -kerroin

$$\lambda_{relmfi} := \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{meritfi}}} = 0.35$$

$$k_{critfi} = 1$$

Käyttöaste = 0.636

Käyttöaste = "KESTÄÄ"

## Liite 3. Esimerkki liitosten mitoituksesta

1(6)

Liitosten mitoituksessa käytetään samoja lähtöarvoja kuin liitteen 1 harjapalkin mitoituksessa sekä liitteen 2 mastopilarin mitoituksessa. Liimaruuvit ovat lujuusluokan 5.8 ruuveja.

**LIITOKSET****Perustusliitos**

Perustusliitoksena käytetään liimaruuviliitosta!

Liimaruuvien lujuusluokka	$Lujuusluokka = "5.8"$
Liimaruuvien keskiöetäisyydet	$a_{hs} := 75 \text{ mm}$ $a_{bs} := 60 \text{ mm}$
Uloimman liimaruuvien etäisyys pilarin reunasta	$a_{re} := 35 \text{ mm}$ ( $a_{re} \geq 35 \text{ mm}$ )
Sisimmän liimaruuvien etäisyys tehollisen vyöhykkeen reunasta	$a_{ke} := 50 \text{ mm}$
Liimaruuvien halkaisija	$d_{ruuvi} := 19 \text{ mm}$
Liimaruuviryhmän painopisteen etäisyys pilarin reunasta	$a := a_{hs} + a_{re} = 110 \text{ mm}$
Puristus- ja vetoterästen painopisteiden etäisyys	$e := h_{pil} - 2 \cdot a = 185 \text{ mm}$
Mitoittava normaalivoima	$N_d = 187.978 \text{ kN}$
Mitoittava momentti	$M_d := \frac{F_{wd}}{2} \cdot L_{pil} + \frac{H_{dt}}{2} \cdot L_{pil} + q_{wd} \cdot L_{pil} \cdot \frac{L_{pil}}{2} = 63.466 \text{ kN} \cdot \text{m}$
Mitoittava leikkausvoima	$V_d = 22.053 \text{ kN}$
Pilarikengän vetovoima	$A_d := \frac{M_d}{e} - \frac{N_d}{2} = 249.073 \text{ kN}$
Pilarikengän puristusvoima	$B_d := \frac{M_d}{e} + \frac{N_d}{2} = 437.05 \text{ kN}$
<b><u>Liimaruuvien normaalivoimakestävyys</u></b>	
Ruuvien myötökestävyyden ominaisarvo	$R_{yk} = 101 \text{ kN}$
Ruuvien myötämisen osavarmuusluku	$\gamma_{My} := 1.1$

3(6)

Ruuvien uppoumasyvyys liimapuuhun  $L_a := 490 \text{ mm}$

Ruuvien tartuntakestävyyden ominaisarvo  $Käyttöluokka := 1$

$$R_{ak} := \left( \frac{L_a}{490 \text{ mm}} \right) \cdot 84 \text{ kN} = 84 \text{ kN}$$

Liimaruuvien normaalivoimakkestävyys  $R_{axd} := \min \left( \frac{R_{yk}}{\gamma_{My}}, k_{mod2} \cdot \frac{R_{ak}}{\gamma_M} \right) = 73.92 \text{ kN}$

Liimaruuvien tarvittava lukumäärä  $n_v := n_t = 3$

#### Liimaruuviryhmän lisämitoitusehto

**Mitoitusehto:**  $F_{td} \leq n_t^{0.9} \cdot R_{axd}$

Vedetyn liimaruuviryhmän mitoituskuorma  $F_{td} := A_d = 249.073 \text{ kN}$

Vedettyjen liimaruuvien lukumäärä  $n_t := 4$

Ruuvien tartuntakestävyyden mitoitusarvo  $R_{ad} := k_{mod2} \cdot \frac{R_{ak}}{\gamma_M} = 73.92 \text{ kN}$

$$Käyttöaste = 0.968$$

#### Liimapuun vetokestävyys

Mitoitusehto:  $N_{td} \geq F_{td}$

Liimapuun vetolujuuden mitoitusarvo  $f_{td} := k_{mod2} \cdot \frac{f_{t0k}}{\gamma_M} = 17.16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Liimapuun vetokestävyys  $N_{td} := f_{td} \cdot A_{ef} = (6.374 \cdot 10^5) \text{ N}$

$$Käyttöaste = 0.391$$

Liimaruuvien leikkauskestävyysMitoitusehto:  $V_d \leq R_{vd} \cdot n_v$  $n_v := 4$  ruuvia

Ruuvien keskiöetäisyys

 $a_h := 70 \text{ mm}$ Liimaruuvien leikkauskestävyyden  
mitoitusarvo $R_{vd} := \frac{a_h}{a_{hs}} \cdot 8.3 \text{ kN} = 7.747 \text{ kN}$ Puristetun reunan liimaruuvit ottavat vastaan liitoksessa olevan leikkausvoiman  $V_d$ . $Käyttöaste = 71.2\%$ Palomitoitus

Perustusliitos mitoitetaan paloa vastaan syysuuntaan asennettujen itseporautuvien ruuvien varaan. Mikäli palonkesto-aika on minimissään 15 min, tulee ruuvien halkaisijan olla  $d \geq 3.5 \text{ mm}$ . Liitoksen teräsosat tulee suojata palosuojamaalauksella teräsrakentamisen ohjeiden mukaan.

Ruuvien kierteisen osan sisähalkaisija

 $d_i := 4.8 \text{ mm}$ 

Ruuvien tehollinen halkaisija

 $d_{ef} := 1.1 \cdot d_i = 5.28 \text{ mm}$ 

Ruuvien pituus

 $l_{ruuvi} := 500 \text{ mm}$ 

Levyn paksuus

 $t_t := 3 \text{ mm}$ 

Ruuvien tunkeumasyyvyys

 $t_2 := l_{ruuvi} - t_t = 497 \text{ mm}$  (HUOM!  $t_2 \geq 8 \cdot d_{ef}$ )  
 $8 \cdot d_{ef} = 42.24 \text{ mm}$ 

Palotilanteen leikkausvoima

 $V_{dfi} = 2.436 \text{ kN}$ 

Leikkauskestävyyden ominaisarvo

 $R_k := 1.15 \cdot 120 \cdot \left( \frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{1.7} \cdot N = 2.335 \text{ kN}$ 

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo

 $k_s = 1.056$  $R_d := \frac{k_{mod1}}{\gamma_M} \cdot k_s \cdot R_k = 1.578 \text{ kN}$ 

Tarvittava ruuvien määrä liitoksessa

 $n_{lr} := \text{round} \left( \frac{V_{dfi}}{R_d} \right) = 2$

### Pilarin ja palkin välinen liitos

Pilarin ja palkin välinen liitos toteutetaan hankolautaliitoksena. Tästä liitoksesta on laskettu vain voimasuureet liitoksen määrittystä varten!

#### Ulkoiset voimat

Pääkannattimen vinous	$e := 15 \text{ mm}$
Pääkannattimen kaltevuus	$\alpha := \text{atan}\left(\frac{e}{h_0}\right) = 0.911 \text{ deg}$
Pääkannattimen tukireaktio	$A_d := \frac{P_d \cdot L_{pal}}{2} = 238.168 \text{ kN}$
Normaalivoima liitoksessa	$N_d := A_d = 238.168 \text{ kN}$
Momentti liitoksessa	$M_d := A_d \cdot e = 3.573 \text{ kN} \cdot \text{m}$
Leikkausvoima liitoksessa	$V_d := A_d \cdot \sin(\alpha) = (3.785 \cdot 10^3) \text{ N}$
Tuulen imukuorman aiheuttama tukireaktio pilarin yläpäässä	$H_d := q_{wkimu} \cdot h_{ap} \cdot s + \frac{q_{wkimu} \cdot h_{pit} \cdot s}{2} = -2.184 \text{ kN}$

#### Liitosvoimat

---

Ylemmän ruuviryhmän painopisteen etäisyys palkin yläreunasta	$a := 130 \text{ mm}$
Hankolaudan ruuviryhmien 1 ja 2 keskiöetäisyys	$b := 400 \text{ mm}$
Ruuviryhmien 1 ja 2 keskiöetäisyyden painopisteen etäisyys pilarin yläpäästä	$c := a + \frac{b}{2} = 330 \text{ mm}$
Hankolaudan paksuus	$h_{hankolauta} := 45 \text{ mm}$
Hankolautojen keskiöetäisyys	$z := b_{pal} + h_{hankolauta} = ? \text{ mm}$
Ruuviryhmien määrä/hankolaudan puolisko	$n_R := 2$
Hankolautojen määrä/liitos	$n_H := 2$

Hankolautaliitos mitoitetaan seuraaville voimille, kun liitoksessa on kaksi ruuviryhmää/hankolaudan puolisko.

Ruuviryhmä mitoitetaan voimien  $V_{xd}$  ja  $V_{zd}$  resultantin  $R_d$  sekä ruuvin suuntaisen voiman  $N_{yd}$  yhteisvaikutukselle

$$V_{xd} := \frac{M_d}{z \cdot n_R} = 6.268 \text{ kN}$$

$$V_{zd} := \frac{H_d}{n_H \cdot n_R} + \frac{H_d \cdot c}{n_H \cdot b} = -1.447 \text{ kN}$$

$$R_d := \sqrt{V_{xd}^2 + V_{zd}^2} = 6.432 \text{ kN}$$

$$N_{yd} := \frac{\frac{V_d \cdot c}{b} + \frac{V_d}{n_R}}{n_H} = 2.508 \text{ kN}$$

Hankolaudan leikkauskestävyys tarkastetaan leikkausvoimille

$$Q_{zd\text{hankolauta}} := \frac{V_d}{n_H} = 1.892 \text{ kN}$$

$$Q_{yd\text{hankolauta}} := \frac{H_d}{n_H} = -1.092 \text{ kN}$$

Hankolaudan taivutuskestävyys tarkastetaan momenteille

$$M_{zd\text{hankolauta}} := \frac{V_d \cdot c}{n_H} - \frac{V_d \cdot b}{n_H \cdot n_R} = 0.246 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{yd\text{hankolauta}} := \frac{H_d \cdot c}{n_H} - \frac{H_d \cdot b}{n_H \cdot n_R} = -0.142 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### Palomitoitus

#### **R30 liitos:**

Hankolaudan dimensioita kasvatetaan mitan  $a_{fi}$  verran.

$$\beta_n := 0.7 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \text{ (liimapuulle)}$$

$$k_{flux} := 1.5$$

$$t_{req} := 30 \text{ min}$$

$$t_{dfi} := 15 \text{ min}$$

$$a_{fi} := \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - t_{dfi}) = 15.75 \text{ mm}$$

**Lähtötiedot**

Lasketaan mastokehän vaakasiirtymä esimerkkikehälle keksityillä lähtötiedoilla. Lähtötiedot siirtymälaskentaan saadaan taulukosta (6).

Rakennuksen pituus  $d$  on 50 000 mm, leveys  $B$  on 21 000 mm ja korkeus  $H$  maanpinnasta on 6 400 mm. Kehäväli  $s$  on 5 000 mm. Katon kaltevuus on 1:16. Sekä pilareiden että palkin materiaalina on liimapuu GL30c, joten lujuuksina käytetään sen mukaisia arvoja taulukosta (1).

Rakenteiden omapainot sisältävät kattorakenteen painon, joka on  $0,5 \text{ kN/m}^2$ , riipustuskuorman, joka on  $0,2 \text{ kN/m}^2$  sekä palkin ja pilarin omat painot. Elementin 2 tasainen kuorma  $q$  sisältää lumikuorman, jonka ominaisarvo maassa on  $2,5 \text{ kN/m}^2$  sekä palkin omapainon ja yläpuolisten rakenteiden aiheuttaman tasaisen kuorman. Pilareiden tasainen kuorma muodostuu rakenteen pitkälle sivulle puhaltavan tuulen aiheuttamasta tuulenpaineesta ja -imusta. Rakennuksen maastoluokka on 2. Tuulen imukuorman ominaisarvo tässä tapauksessa on  $0,242 \text{ kN/m}^2$  ja painekuorman ominaisarvo on  $0,364 \text{ kN/m}^2$ . Tuulikuormien laskenta on tehty RIL 201-1-2017 ohjeen mukaisella pintapainemenetelmällä. Kaikki taulukon (6) kuorman arvot ovat käyttörajatilan kuormia.



Taulukko 6. Esimerkkilaskun lähtötiedot

Selite	Symboli	Yksikkö	Elementti 1	Elementti 2	Elementti 3
Globaali kiertokulma	$\alpha_i$	°, aste	90	0	90
Pituus	$L_i$	m	4,8	20,595	4,8
Profiilin leveys	$b_i$	m	0,24	0,24	0,24
Profiilin korkeus	$h_i$	m	0,405	1,272	0,405
Poikkipinta-ala	$A_i$	m <sup>2</sup>	0,097	0,305	0,097
Jäyhyysmomentti	$I_i$	m <sup>4</sup>	0,001	0,041	0,001
Kimmokerroin	$E_i$	N/m <sup>2</sup>	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$
Omapaino	$G_i$	N	$1,784 \cdot 10^3$	$3,143 \cdot 10^4$	$1,784 \cdot 10^3$
Tasainen kuorma	$q_i$	N/m	$1,212 \cdot 10^3$	$1,638 \cdot 10^4$	$1,818 \cdot 10^3$
Lisävaakavoima	$H_i$	N	$3,085 \cdot 10^3$	0	$4,054 \cdot 10^3$

Näiden lähtöarvojen lisäksi tulee vielä määrittää taulukon (5) mukaiset matriisien aputekijät. Tässä esimerkissä käytettävät aputekijät löytyvät taulukosta (7).

Taulukko 7. Laskennassa käytettävät matriisien aputekijät

Symboli	Elementti 1	Elementti 2	Elementti 3
$c_i$	0	1	0
$s_i$	1	0	1
$k_{Ai}$	$2,633 \cdot 10^8$	$1,927 \cdot 10^8$	$2,633 \cdot 10^8$
$k_{Bi}$	$1,874 \cdot 10^6$	$7,349 \cdot 10^5$	$1,874 \cdot 10^6$
$k_{Ci}$	$4,498 \cdot 10^6$	$7,567 \cdot 10^6$	$4,498 \cdot 10^6$
$k_{Di}$	$1,439 \cdot 10^7$	$1,039 \cdot 10^8$	$1,439 \cdot 10^7$
$k_{Ei}$	$7,197 \cdot 10^6$	$5,195 \cdot 10^7$	$7,197 \cdot 10^6$

## Jäykkyysmatriisin määrittäminen

Koko rakenteen jäykkyysmatriisi [K] muodostetaan kaavan (66) mukaisesti yksittäisten elementtien jäykkyysmatriiseista [k<sub>i</sub>]. Yksittäisten elementtien jäykkyysmatriisit muodostetaan kaavan (65) mukaisesti. Tämän jälkeen elementtien jäykkyysmatriisit tulee laajentaa vastaamaan koko rakenteen vapausasteita. Näin saadaan yksittäisille elementeille jäykkyysmatriiseiksi kuvien 13-15 mukaiset matriisit.

$$k_1 = \begin{bmatrix} 1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & -1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.874 \cdot 10^6 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 1.874 \cdot 10^6 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Kuva 13. Elementin 1 jäykkyysmatriisi

$$k_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.349 \cdot 10^5 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.349 \cdot 10^5 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 1.039 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 5.195 \cdot 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -7.349 \cdot 10^5 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.349 \cdot 10^5 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 5.195 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 1.039 \cdot 10^8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Kuva 14. Elementin 2 jäykkyysmatriisi

4(8)

$$k_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & -1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.874 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 1.874 \cdot 10^6 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 2.633 \cdot 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Kuva 15. Elementin 3 jäykkyysmatriisi

Nyt kun yksittäisten elementtien jäykkyysmatriisit on määritelty, voidaan ne yhdistää koko rakenteen jäykkyysmatriisiksi  $[K]$  sijoittelusummauksella. Näin koko rakenteen jäykkyysmatriisiksi saadaan kuvan 16 mukainen matriisi.

$$K = \begin{bmatrix} 1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & -1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.874 \cdot 10^6 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 1.946 \cdot 10^8 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 2.64 \cdot 10^8 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.349 \cdot 10^6 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 \\ -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 1.039 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 5.195 \cdot 10^7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & -1.874 \cdot 10^6 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & -1.874 \cdot 10^6 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 1.946 \cdot 10^8 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -7.349 \cdot 10^6 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & -2.633 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 2.64 \cdot 10^8 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.498 \cdot 10^6 & 0 & 7.197 \cdot 10^6 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 5.195 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 1.039 \cdot 10^8 \end{bmatrix}$$

Kuva 16. Koko rakenteen jäykkyysmatriisi

Kehän siirtymälaskennassa käytetään vain vapausasteiden 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13 ja 14 mukaisia arvoja kokonaisjäykkyysmatriisista. Kuvassa 17 on esitettyä siirtymälaskentaa varten muodostettava jäykkyysmatriisi  $[K_u]$ , joka sisältää vain siirtymälaskentaan tarvittavan osan kokonaisjäykkyysmatriisista.

5(8)

$$K_u = \begin{bmatrix} 1.946 \cdot 10^8 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & -1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.64 \cdot 10^8 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & -7.349 \cdot 10^5 & 0 & 7.567 \cdot 10^6 \\ 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 1.039 \cdot 10^8 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 5.195 \cdot 10^7 \\ -1.927 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 & 1.946 \cdot 10^8 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & -7.349 \cdot 10^5 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 2.64 \cdot 10^8 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.498 \cdot 10^6 & 0 & 1.439 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 7.567 \cdot 10^6 & 0 & 5.195 \cdot 10^7 & 0 & -7.567 \cdot 10^6 & 0 & 1.039 \cdot 10^8 \end{bmatrix}$$

Kuva 17. Siirtymälaskennassa käytettävä osa kokonaisjäykkyysmatriisista

### Lukitus- ja solmupistevoimavektoreiden summavektorin määrittäminen

Siirtymän laskentaan tarvitaan jäykkyysmatriisin lisäksi rakenteen lukitusvoimavektori ja solmupistevoimavektori. Lukitusvoimavektori määritellään kaavan (71) mukaisesti. Näin saadaan esimerkkilaskun lukitusvoimavektoriksi kuvan 18 mukainen vektori.

$$R_{ek} = \begin{bmatrix} 2.908 \cdot 10^3 \\ 0 \\ -2.326 \cdot 10^3 \\ 2.908 \cdot 10^3 \\ 1.686 \cdot 10^5 \\ 2.326 \cdot 10^3 \\ 5.788 \cdot 10^5 \\ 4.362 \cdot 10^3 \\ 0 \\ -3.49 \cdot 10^3 \\ 4.362 \cdot 10^3 \\ 1.686 \cdot 10^5 \\ 3.49 \cdot 10^3 \\ -5.788 \cdot 10^5 \end{bmatrix}$$

Kuva 18. Esimerkkilaskun lukitusvoimavektori

Solmupistevoimavektori määritellään kaavalla (70), jolloin esimerkkilaskun vektoriksi saadaan kuvan 19 mukainen vektori.

6(8)

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -3.085 \cdot 10^3 \\ -1.784 \cdot 10^3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -4.054 \cdot 10^3 \\ -1.784 \cdot 10^3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Kuva 19. Esimerkkilaskun solmupistevoimavektori

Kun sekä lukitusvoimavektori että solmupistevoimavektori on määritelty, voidaan ne laskea yhteen siirtymän laskentaa varten sijoittelusummauksella. Sijoittelusummauksen jälkeen summavoimavektoriksi saadaan kuvan 20 mukainen vektori.

$$R = \begin{bmatrix} -2.908 \cdot 10^3 \\ 0 \\ 2.326 \cdot 10^3 \\ -5.993 \cdot 10^3 \\ -1.704 \cdot 10^5 \\ -2.326 \cdot 10^3 \\ -5.788 \cdot 10^5 \\ -4.362 \cdot 10^3 \\ 0 \\ 3.49 \cdot 10^3 \\ -8.416 \cdot 10^3 \\ -1.704 \cdot 10^5 \\ -3.49 \cdot 10^3 \\ 5.788 \cdot 10^5 \end{bmatrix}$$

Kuva 20. Esimerkkilaskun summavoimavektori

7(8)

Kuten jäykkyydsmatriisissakin, myös summavoimavektorista siirtymän laskennassa käytetään vain vapausasteiden 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13 ja 14 mukaisia arvoja. Summavoimavektorista poimitaan siis kyseisten asteiden mukaiset arvot ja luodaan summavektori  $R_u$ , joka on esitetty kuvassa 21.

$$R_u = \begin{bmatrix} -5.993 \cdot 10^3 \\ -1.704 \cdot 10^5 \\ -2.326 \cdot 10^3 \\ -5.788 \cdot 10^5 \\ -8.416 \cdot 10^3 \\ -1.704 \cdot 10^5 \\ -3.49 \cdot 10^3 \\ 5.788 \cdot 10^5 \end{bmatrix}$$

Kuva 21. Siirtymälaskennassa käytettävä osa summavoimavektorista

### Siirtymän laskenta

Kun siirtymän laskentaan tarvittavat matriisit on ratkaistu, voidaan siirtymät laskea kaavan (61) mukaisesti. Siirtymämatriisi on esitetty kuvassa 22. Kaavassa (61) siirtymää on kuvattu muuttujalla  $r$ , joka vastaa kuvan 22 muuttujaa  $u$ .

$$u := K_u^{-1} \cdot R_u = \begin{bmatrix} -0.0134 \\ -0.0006 \\ 0.004 \\ -0.0111 \\ -0.0134 \\ -0.0006 \\ 0.004 \\ 0.0111 \end{bmatrix}$$

Kuva 22. Esimerkkilaskun siirtymiä kuvaava matriisi

Siirtymävektorin 4. vapausasteen arvo kertoo rakenteen vaakasiirtymän millimetreinä. Siirtymäksi saadaan siis **13,4 mm**. Kun siirtymän raja-arvona käytetään  $H/300$ , saadaan siirtymän raja-arvoksi 21,3 mm ja käyttöasteeksi 63 %.

8(8)

Siirtymä pysyy siis sallituissa rajoissa. RX-Timber -ohjelmalla laskettuna siirtymän suuruudeksi saatiin **13,6 mm**, jolloin käyttöaste on 63,8 %, joka on vain 0,8 % suurempi kuin MathCAD laskentapohjan avulla lasketun esimerkin käyttöaste.

Vertailun vuoksi voidaan laskea siirtymä myös kaavan (59) mukaisesti, joka ei huomioi kehävaikutusta, vaan siirtymä lasketaan vain pilarin yläosan siirtymänä ulokkeen taipuman kaavoja hyödyntäen. Näin siirtymäksi saadaan

$$u_{kok} = \frac{(2,908+1,146) \cdot 10^3 \text{ N} \cdot (4800 \text{ mm})^3}{3 \cdot 13\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1,329 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} + \frac{1,818 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (4800 \text{ mm})^4}{8 \cdot 13\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1,329 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} = \mathbf{15,6 \text{ mm}}.$$

Käyttöaste on tällöin 73,2 %, joka on 10,2 % enemmän kuin MathCAD -laskentapohjan avulla laskettu siirtymän käyttöaste ja 9,4 % enemmän kuin RX-Timber -ohjelmalla saatu siirtymän käyttöaste.