

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2025

Oona Marttila

# Hallirakennuksen kantavan liimapuurungon mitoitus

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2025 | 36 sivua, 52 liitesivua

Oona Marttila

## Hallirakennuksen kantavan liimapuurungon mitoitus

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan liimapuurakenteiden mitoittamista. Tarkoituksena oli mitoittaa hallin rakenne eli mahapalkki, suora palkki, mastopilari sekä tuulipilarit. Mitoituksen pohjana toimi arkkitehtikuvat pääpiirustuksista.

Työn teoriaosuudessa tarkastellaan käytettävän materiaalien ominaisuuksia sekä hallin rakenteita. Rakenteisiin kohdistuvat kuormitukset käsitellään yleisellä tasolla ja mitoitusta varten on perehdytty ajankohtaisiin suunnitteluohjeisiin. Työssä käydään lyhyesti läpi paloteknisiä vaatimuksia sekä jäykistyksen periaatetta. Teorian pohjalla luodaan pohja käytännön mitoitusratkaisuille ja rakenneosien suunnittelulle.

Opinnäytetyön konkreettisenä tuloksena syntyi rakenteelliset laskelmat ja niitä vastaavat piirustukset. Piirustukset laadittiin AutoCAD 2024 -ohjelmalla ja mitoitus tehtiin pääosin käsinlaskentana hyödyntäen Mathcad-ohjelmistoa.

### AVAINSANAT

liimapuu, mahapalkki, mastopilari, rakennesuunnittelu

BACHELOR'S THESIS | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Civil Engineering

2025 | 36 pages, 52 appendix pages

Oona Marttila

## Design of the load-bearing glulam frame for the hall building

This thesis examines the dimensioning of glued laminated timber structures. The purpose was to dimension the hall structure, i.e. the gable beam, straight beam, mast column and wind columns. The basis for the dimensioning was architectural drawings from the main drawings.

The theoretical part of the thesis examines the properties of the materials used and the hall structures. The loads on the structures are discussed at a general level and current design guidelines were studied for the dimensioning. The work covers fire safety requirements and the principle of stiffening. The theory is used to create a basis for practical dimensioning solutions and the design of structural components.

The concrete result of the thesis was structural calculations and corresponding drawings. The drawings were prepared with the AutoCAD 2024 program, and the dimensioning was mainly completed manually using the Mathcad software.

### KEYWORDS

glulam, belly beam, mast pillar, structural design

# Sisällys

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 LIIMAPUU RAKENNUSMATERIAALINA</b>	<b>7</b>
<b>3 SUUNNITTELUPERUSTEET</b>	<b>9</b>
3.1 Lujuusominaisuudet	9
3.2 Kuormat	11
3.2.1 Pysyvät kuormat	11
3.2.2 Muuttuvat kuormat	11
3.3 Rajatilat	16
3.3.1 Murtorajatila	16
3.3.2 Käyttörajatila	16
3.3.3 Kuormitusyhdistelmät	17
<b>4 PUURAKENTEIDEN MITOITUS</b>	<b>19</b>
4.1 Pilarit	19
4.1.1 Mastopilarit ja nurkkapilari	19
4.1.2 Tuulipilari	23
4.2 Palkit	24
4.2.1 Mahapalkki	24
4.2.2 Tasakorkeapalkki	29
4.3 Jäykisteet	33
4.4 Liitokset	33
4.4.1 Pilarien liitos perustukseen	33
4.4.2 Pilari-palkkiliitos	34
4.5 Palomitoitus	34
<b>5 YHTEENVETO</b>	<b>35</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>36</b>

## LIITTEET

Liite 1. Pohjakuva.....	37
Liite 2. Linjakuvat.....	38
Liite 3. Ylä- ja alaliitokset.....	40
Liite 4. Mastopilari P1, P3.....	54
Liite 5. Nurkkapilari P4.....	62
Liite 6. Tuulipilari P5, P6.....	68
Liite 7. Mahapalkki LP1.....	73
Liite 8. Tasakorkeapalkki LP2.....	81

## KUVAT

Kuva 1. Liimapuun poikkileikkauksia.....	7
Kuva 2. Lumen ominaisarvot maan pinnalla $kN/m^2$ .....	12
Kuva 3. Harjakaton lumikuorman kuormituskaavio.....	13
Kuva 4. Maastoluokkien kuvaukset.....	14
Kuva 5. Tehollinen hoikkuus.....	15
Kuva 6. Voimakerroin $C_f$ .....	16

## TAULUKOT

Taulukko 1. Liimapuun lujuusominaisuudet lujuusluokittain.....	9
Taulukko 2. Materiaalin osavarmuusluku $\gamma_M$ .....	10
Taulukko 3. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin arvo.....	10
Taulukko 4. Hyötykuorma.....	11
Taulukko 5. Katon tuulensuojakertoimen arvot $C_e$ .....	13
Taulukko 6. Lumikuorman muotokertoimet.....	13
Taulukko 7. Puuskanopeuspaineen ominaisarvot.....	15
Taulukko 8. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet.....	17
Taulukko 9. Kuormakertoimet seuraamusluokan mukaisesti.....	17
Taulukko 10. Taipumien ja rakennuksen vaakasiirtymien enimmäisarvot.....	28
Taulukko 10. Taipumien ja rakennuksen vaakasiirtymien enimmäisarvot.....	32

# 1 JOHDANTO

Liimapuu on yksi merkittävämmistä teollisesti valmistetuista puutuotteista kantavissa rakenteissa. Puurakentaminen on kasvattanut suosiotaan kestävän kehityksen, ekologisuuden ja uusiutuvien materiaalien käytön myötä. Liimapuu tarjoaa mahdollisuudet toteuttaa monimuotoisia ja näyttäviä rakenteita, joita muilla rakennusmateriaaleilla olisi vaikeaa tai kallista tehdä.

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä liimapuurakenteiden mitoittamisen perusteisiin ja käytännön sovelluksiin. Opinnäytetyössä tarkastellaan ensin liimapuuta rakennusmateriaalina ja sen valmistamista. Seuraavana käydään läpi mitoittamiseen vaikuttavat suunnitteluperiaatteet, laskentamenetelmät ja materiaalien erityispiirteet. Lisäksi tarkastellaan kohteen avulla käytännön mitoitusprosessia ja arvioidaan suunnitteluratkaisun toimivuutta. Mitoitus on tehty Eurokoodi-standardeja noudattaen sekä Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry: julkaisuja käyttäen.

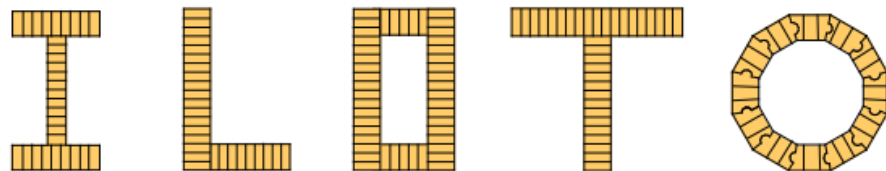
Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Late-Rakenteet Oy. Kohde on kylmä halli 47,6 m x 34,9 m ja rungon korkeus 9 metriä. Kohde sijaitsee Ruovedellä. Rungon mitoitus on tehty käsin laskien käyttäen Mathcad Prime 11.0 -laskuohjelmaa. Kuvat on piirretty AutoCAD 2024 -ohjelmalla.

## 2 LIIMAPUU RAKENNUSMATERIAALINA

Liimapuu valmistetaan pääasiassa kuivatusta ja lujuuslajitellusta kuusisahatavarasta, mutta sitä voidaan valmistaa myös muista pohjoismaisista havupuista, kuten mänty ja lehtikuusesta. Lujuuslujitettu tarkoittaa sitä, että siinä olevien oksien määrää on rajoitettu. Jos tuote on menossa kosteaan paikkaan, käytetään siinä painekyllästettyä mäntyä. Sahatavarasta valmistetaan 45-85 mm paksuisia lamelleja ja nämä liimataan yhteen, josta muodostuu liimapuuta. Ensin lamellit sormijatketaan, jotta saadaan pitkiä lamelleja. Lamellit katkotaan sopivan mittaisiksi ja kootaan päällekkäin. Lamellien tulee olla kosteussuhteiltaan optimaaliset liimausta varten, jotta vältetään halkeilua ja pienennetään vääntymisriskiä.

Liimoitettu lamellinippu nostetaan puristimeen ja puristetaan paineella yhteen. Esikoroitettuja tai kaarevia muotoja voidaan valmistaa taivuttamalla lamellinippu puristimeen laittaessa. Liima saa kovettua hallituissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa. Liiman kovettuttua liimapuu nostetaan höylälle, missä se viimeistellään toivotun laatuluokan mukaan. Tämän jälkeen liimapuu loppu työstetään eli tehdään halutut sahaukset, kolot, reiät ja kiinnitetään tarvittaessa teräsosat. (Liimapuuyhdistys ja puuinfo osa 2, luku 1–7)

Liimapuisten rakenneosien koot ja muodot voivat vaihdella (kuva 1). Useimmiten poikkileikkaukset ovat suorakaiteita, mutta voidaan valmistaa myös I-, T- ja L-poikkileikkauksia ja ontelopoikkileikkauksia. (Liimapuuyhdistys ja puuinfo osa 2, luku 1–16)



Kuva 1. Liimapuun poikkileikkauksia

Liimapuu on energiatehokas, ympäristöystävällinen ja uusiutuva rakennusaine. Puuraaka-ainetta on käytetty liimapuussa tavallisesti sahatavaraa tehokkaammin. Liimapuu on lujempaa ja jäykempää kuin sahatavarasta tehty vastaava rakenne. Liimapuu on lujempaa kuin mikään muu vastaava rakennusaine omaan painoonsa verrattuna. (Liimapuuyhdistys ja puuinfo osa 1, 7)

Liimapuu on tarkoitettu ensisijaisesti kantaviin rakenteisiin. Liimapuuta käytetään pääosin teollisuus ja kaupallisissa rakennuksissa, siltojen rakentamisessa, asuinrakennuksissa sekä puukehyksissä ja rungoissa. Sitä voidaan käyttää myös ei-kantaviin rakenteisiin, huonekaluihin ja sisustukseen. Liimapuuta voidaan pintakäsitellä ja huoltaa perinteisin menetelmin. Liimapuuta voidaan työstää jälkikäteen sekä tehdä lovia ja reikiä, jos rakennesuunnitelmat sallivat. (Liimapuuyhdistys ja puuinfo osa 1, 15)

Liimapuun lujuusominaisuuksissa on paljon yhteistä perinteisen sahatavaran kanssa, mutta sen valmistusprosessin ansiosta mekaaninen käyttäytyminen on ennustettavampaa ja keskimäärin vahvempaa. Liimapuu eroaa rakennesahatavarasta siinä, että sen keskimääräinen lujuus on korkeampi ja lujuuden hajonta pienempi. Tämä johtuu lamelli-vaikutuksesta. Puun lujuusominaisuudet riippuvat siitä, mihin suuntaan jännitys kohdistuu suhteessa puun syysuuntaan. Puu on lujempaa syiden suuntaisesti kuin niiden poikisuunnassa. Puun lujuus heikkenee kosteuden noustessa ja pitkäkestoisen kuormituksen aikana. Yksittäisten rakenneosien ja niiden eri kohtien välillä voi esiintyä luonnollisesti vaihtelua lujuudessa. (Liimapuuyhdistys ja puuinfo osa 2, luku 1–9)

### 3 Suunnitteluperusteet

Liimapuurakenteiden mitoituksessa kuormien mitoitusarvot muodostavat perustan rakenteen lujuuden ja turvallisuuden varmistamiselle. Mitoituksessa otetaan huomioon pysyvät ja muuttuvat kuormat. Näiden avulla lasketaan mitoitusarvot eurokoodi-standardeja ja kansallisten liitteiden mukaisesti. Kuormitustilanteet suunnitellaan niin, että rakenne kestää pahimman mahdollisen yhdistelmän ilman murtumista tai liiallisia siirtymätiloja.

#### 3.1 Lujuusominaisuudet

Tässä kohteessa on käytetty liimapuuta, jonka lujuusluokka on GL30c. Taulukosta 1 saadaan liimapuun lujuusarvot.

Taulukko 1. Liimapuun lujuusominaisuudet lujuusluokittain

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

<sup>1</sup> Vakioluokka Suomessa. Muita lujuusluokkia valmistetaan yleensä vain tilauksesta.

Liimapuulle tulee mitoittaa lujuusominaisuuden mitoitusarvo  $X_d$ . Mitoitusarvo lasketaan kaavalla 1 (RIL 205-1-2017, 46):

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

jossa

$X_k$	lujuusominaisuuden ominaisarvo
$\gamma_M$	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
$k_{mod}$	muunnoskerroin

Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku saadaan taulukosta 2.

Taulukko 2. Materiaalin osavarmuusluku  $\gamma_M$

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara	1,3
Liimapuu, CLT	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy, kuitulevyt	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyliitokset: - tartuntalujuus	1,25
- levyn lujuus (teräs)	1,1
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

Kosteuden ja kuorman keston muunnoskerroin  $k_{mod}$  määritetään materiaalin käyttöluokan ja kuorman aikaluokan perusteella taulukosta 3.

Taulukko 3. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin arvo

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

## 3.2 Kuormat

### 3.2.1 Pysyvät kuormat

Pysyvät kuormat (G) koostuvat rakenteiden ja kiinteiden laiteiden omasta painosta sekä mahdollisista esijännityksistä. Omapaino lasketaan käyttämällä rakenteen nimellismittoja ja materiaalien nimellisiä tilavuuspainoja. Pysyvä kuorma vaikuttaa rakenteeseen koko tarkastelujakson ajan ja sen suuruuden vaihtelu on vähäistä tai merkityksetöntä. Kuorman muuttuessa se tapahtuu aina samaan suuntaan ja saavuttaa tietyn raja-arvon. Tällainen kuorma on vakaa ja ennakoitavissa pitkällä aikavälillä. (RIL 201-1-2017, 31.)

### 3.2.2 Muuttuvat kuormat

Muuttuva kuorman (Q) on kuorma, jonka suuruus vaihtelee ajan myötä. Muuttuviin kuormiin kuuluvat lumi-, tuuli- sekä hyötykuormat. Hyötykuormat syntyvät rakennuksen käytön myötä, kuten ihmisten ja ajoneuvojen kuormasta. Taulukossa 4 on esitetty hyötykuormien arvoja. Tässä kohteessa ei ollut huomioon otettavia hyötykuormia. (RIL 201-1-2017, 21.)

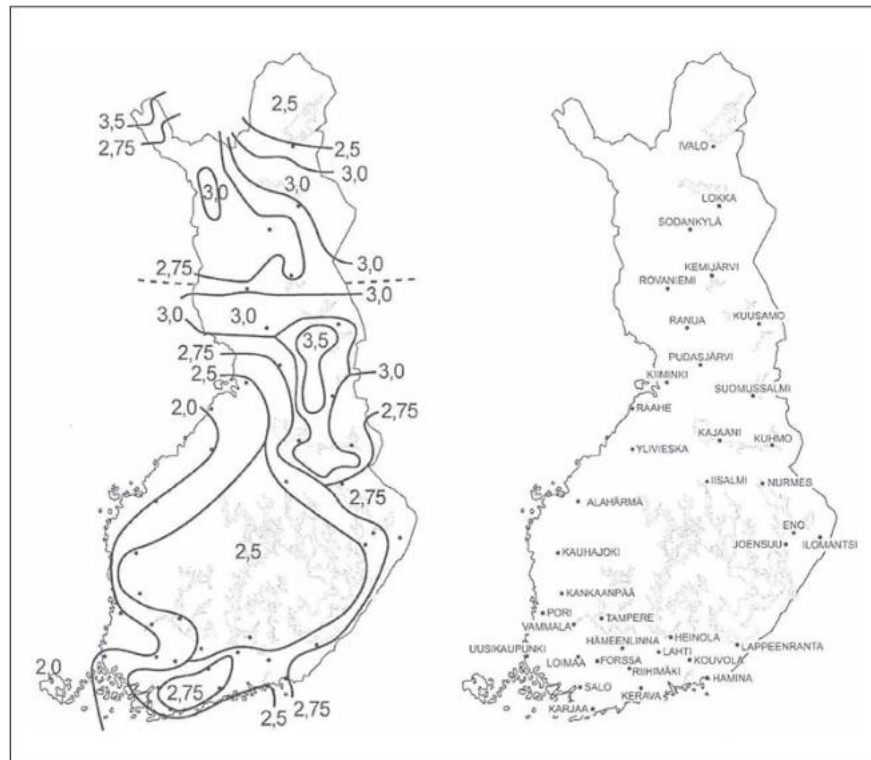
Taulukko 4. Hyötykuormat

Kuormitettujen tilojen luokat	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]			$Q_k$ [kN] (portaat suluissa)
	Väliportaat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A: Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0*)
Luokka B: Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C: Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua				
C1 Pöytäalueet	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
C2 Kiinteiden istuimien alueet	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
C3 Esteettömät alueet	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
C4 Liikuntatilat ja näyttämöt	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
C5 Tungokselle alttiit alueet	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
Luokka D: Myymälätilat				
D1 Tavalliset vähittäiskaupat	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
D2 Tavaratalot	5,0	6,0	5,0	7,0 (2,0)
Luokka E: Varastotilat				
E1 Tavarain säilytys ja vastaanottotilat	7,5	3,0		7 (2,0)
Luokka H: Vesikatot ilman hyötykäyttöä	0,4			1,0

<sup>1)</sup> Asunnon sisäiset portaat  $Q_k = 1,5$  kN

## Lumikuorma

Lumikuorma on lumen aiheuttama paino, joka vaikuttaa rakennuksen kantokykyyn. Maassa olevan lumikuorman ominaisarvo määritellään vuosittaisen ylittymisen keskimääräisellä todennäköisyydellä, joka on 0,02. Tämä tarkoittaa, että lumikuorma ylittyy keskimäärin kerran 50 vuodessa. Tässä kohteessa maassa olevan lumikuorman ominaisarvo  $s_k$  on 2,5. Arvo on saatu kuvasta 2. (RIL 201-1-2017, 98.)



Kuva 2. Lumen ominaisarvot maan pinnalla [kN/m<sup>2</sup>]

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon, että lumi voi kinostua moniin erilaisiin muotoihin katolle. Näitä erilaisia kinostumia voivat aiheuttaa katon ominaisuudet tai muut tekijät, kuten katon muoto, pinnan karheus, ympäröivä maasto sekä paikallinen ilmasto. Laskennassa tulee ottaa huomioon kinostumattoman sekä kinostuneen lumen aiheuttamat kuormakaaviot. Katon lumikuorma saadaan seuraavalla kaavalla 2 (RIL 201-1-2017, 100):

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (2)$$

jossa

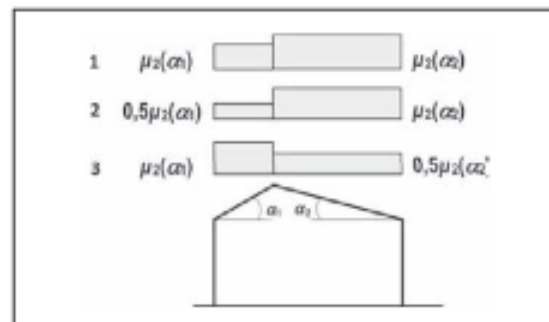
$\mu_i$	lumikuorman muotokerroin
$C_e$	tuulensuojakerroin
$C_t$	lämpökerroin, jonka kerroin yleensä 1,0
$s_k$	maassa olevan lumikuorman ominaisarvo $\text{kN/m}^2$

Tuulensuojakerroin ottaa huomioon rakennuksen ympärillä olevan maaston muodon. Kerroin saadaan taulukosta 5.

Taulukko 5. Katon tuulensuojakerroimen arvot  $C_e$

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

Katon kuormituskaaviot tulee määrittää kattotyypin mukaisesti. Tässä kohteessa katto tyyppinä on harjakatto. Harjakaton kuormituskaavio on esitetty kuvassa 3. (RIL 201-1-2017, 102.)



Kuva 3. Harjakaton lumikuorman kuormituskaavio

Lumikuorman muotokerroin saadaan taulukosta 6.

Taulukko 6. Lumikuorman muotokertoimet

Katon kaltevuuskulma $\alpha$	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1, \mu_2$	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
$\mu_3$	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	1,6

## Tuulikuorma

Tuulikuorma aiheuttaa painetta rakenteiden ulkopintoihin ja huokoisten ulkopintojen kautta myös sisäosiin. Tuuli voi vaikuttaa suoraan myös avoimien rakenteiden sisäpintaan. Paineet kohdistuvat rakenteiden pintoihin, aiheuttaen kohtisuoria voimia. Tuulikuorma esitetään yksinkertaistetusti paineina tai voimina, jotka vastaavat tuulenpuuskien suurimpia vaikutuksia. (RIL 201-1-2017, 127.)

Laskennan lähtökohta tuulikuormaa laskiessa on tuulen nopeuspaineen ominaisarvo. Puuskanopeuden suuruuteen vaikuttaa rakennuksen korkeus sekä sijainti maastossa. Sijainti huomioidaan maastoluokan valinnalla. Maastoluokka voidaan määrittää kuvan 4 avulla. Maastoluokan määrittämisen jälkeen saadaan puuskanopeuspaine, kun tiedetään rakennuksen korkeus harjalle. Puuskanopeuspaineen arvo saadaan taulukosta 7. Tässä kohteessa maastoluokka on III ja puuskanopeus 0,47 (RIL 201-1-2017, 136.)



Kuva 4. Maastoluokkien kuvaukset

Taulukko 7. Puuskanopeuspaineen ominaisarvot

z (m)	Maastoluokka				
	0	I	II	III	IV
0	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
1	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
2	0,78	0,52	0,39	0,35	0,32
5	0,96	0,65	0,53	0,35	0,32
8	1,05	0,73	0,61	0,43	0,32
10	1,09	0,76	0,65	0,47	0,32
15	1,18	0,83	0,72	0,55	0,40
20	1,24	0,88	0,77	0,60	0,45
25	1,29	0,92	0,82	0,65	0,50
30	1,33	0,95	0,85	0,68	0,54
35	1,37	0,98	0,88	0,72	0,57
40	1,40	1,01	0,91	0,74	0,60

Kun rakennuksen korkeus on pienempi kuin sen leveys, oletetaan, että tuulipaine on kaikissa korkeusasemissa sama kuin rakennuksen harjalla vallitseva paine. Tällöin rakennukseen kohdistuva kokonaistuulivoima voidaan laskea kaavalla 3 (RIL 201-1-2017, 140):

$$q_{w,k} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p \quad (3),$$

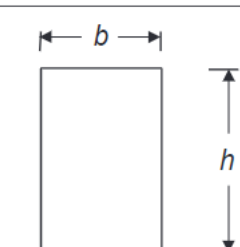
jossa

$c_s c_d$  rakennekerroin, kerroin yleensä 1

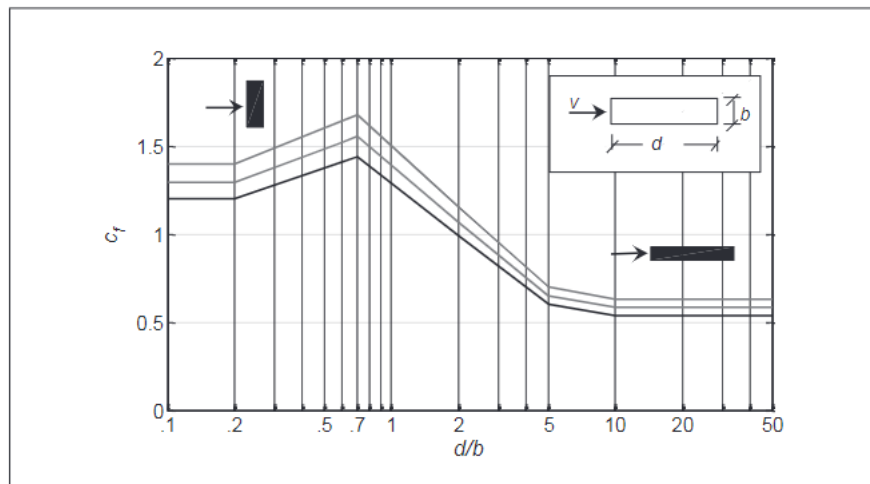
$c_f$  voimakkeroin

$q_p$  tuulennopeuspaine harjan korkeudella

Voimakkeroin saadaan määriteltyä käyttäen kuvia 5 ja 6.

Rakenteen mittasuhteet, tuuli kohtisuoraan tasoa vasten	Tehollinen hoikkuus $\lambda$
	<p>kun <math>h &lt; 15</math> m, <math>\lambda = 2 h/b</math>  kun <math>h \geq 50</math> m, <math>\lambda = 1,4 h/b</math></p> <p>Välialueella <math>15 \text{ m} &lt; h &lt; 50 \text{ m}</math> sovelletaan interpolointia.</p> <p>Huom: Tämä ohje ei koske hyvin hoikkia rakennuksia, joille <math>\lambda &gt; 10</math>.</p>

Kuva 5. Tehollinen hoikkuus



Kuva 6. Voimakerroin  $C_f$

### 3.3 Rajatilat

#### 3.3.1 Murtorajatila

Murtorajatiiloilla tarkoitetaan tilanteita, joissa rakenne ei ole enää tasapainossa, rakenne vaurioituu, murtuu tai kokee väsymisestä johtuvaa vaurioitumista. Näitä ilmiöitä ovat jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menetys, liian suuri siirtymä rakenteessa, rakenteen tai sen osan vakauden heikkeneminen sekä ajassa tapahtuvia vaurioita. (RIL 201-1-2017, 29.)

#### 3.3.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa tarkastellaan rakenteiden käyttäytymistä normaalissa käyttötilanteessa, jossa muodon muutokset eivät saa olla liian suuria. Tällaisia muodon muutoksia ovat esimerkiksi taipuma, värähtely ja siirtymä. Tavoitteena on estää vahinkojen syntyminen pintamateriaaleille ja varmistaa rakenteen toimivuus. Muodonmuutokset ja hetkeliset taipumat lasketaan käyttämällä kimmo-, liuku- ja siirtymäkertoimien keskiarvoja. (RIL 205-1-2017, 30-31.)

### 3.3.3 Kuormitusyhdistelmät

Kuormitusyhdistelmä on joukko mitoitusarvoja, joita käytetään arvioitaessa rakenteen kestävyyttä, kun eri kuormat vaikuttavat samanaikaisesti. Se varmistaa rakenteen turvallisuuden eri kuormitustilanteissa. Kuormitusyhdisteille on erilaisia yhdistelykertoimia. Kertoimet on esitetty taulukossa 8. (RIL 201-1-2017, 21.)

Taulukko 8. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6 <sup>**</sup>
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3 <sup>**</sup>
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3 <sup>*)</sup> , kun			
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma <sup>***</sup>	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset	1,0	1,0	1,0
Tukien painumat	1,0	1,0	1,0

<sup>\*)</sup> Ulkotasoilla ja parvekkeilla  $\psi_0 = 0$  luokkien A, B, F ja G yhteydessä.

Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään  $\psi$ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.

<sup>\*\*</sup>) Ajokäytävillä  $\psi_2 = 0$ .

<sup>\*\*\*</sup>) Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia.

Kuormitusyhdistelmissä käytetään  $K_{FI}$ -kerrointa, joka määräytyy rakennuksen seuraamusluokan mukaan. Kerrointa  $K_{FI}$  käytetään normaalisti vallitsevien ja tilapäisten mitoitus-tilanteiden kuormayhdistelmissä, jotta saavutetaan tarvittava luotettavuustaso. Kertoimet on esitetty taulukossa 9. (RIL 201-1-2017, 39.)

Taulukko 9. Kuormakerroimet seuraamusluokan mukaisesti

Kuormakerroin $K_{FI}$	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1,0	CC2
0,9	CC1

Rakennusten staattinen tasapaino varmistetaan laskemalla kuormien mitoitusarvo käyttämällä kaavaa 4. Kaavassa pysyvät kuormat kerrotaan kertoimella 1,15 ja muuttuvat kuormat kerrotaan kertoimella 1,5. (RIL 201-1-2017, 40):

$$\max \left\{ \begin{array}{l} 1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_{k,j} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \\ 1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_{k,j} \end{array} \right. \quad (4)$$

jossa

- $G_{k,j}$  ominaisarvo pysyvälle kuormalle  
 $Q_{k,1}$  ominaisarvo määrävälle muuttuvalle kuormalle  
 $Q_{k,j}$  ominaisarvo muulle muuttuvalle kuormalle

Onnettomuus tilanteissa kuormituksen mitoitusarville käytetään seuraavia kaavoja riippuen siitä, mikä on aiheuttajana onnettomuustilanteelle. Kaavaa 5 käytetään kun pääasiallinen kuorma on tuuli-, lumi- tai jääkuorma:

$$G_{k,j} + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5)$$

Kaavaa 6 käytetään kun pääasiallisen kuorman on jokin muu kuin luonnon aiheuttama kuorma. (RIL 201-1-2017, 41):

$$G_{k,j} + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{i,j} \quad (6)$$

## 4 Puurakenteiden mitoitus

Liimapuurunko tässä halissa toteutetaan pilari-palkkijärjestelmällä. Pääkannattajana toimii mahapalkit. Mahapalkkeja on 8 kappaletta ja suoria palkkeja 4 kappaletta. Rakennukseen tulee myös keskipilareita kannattelemaan mahapalkkeja. Rakennuksen kehän suuntainen jäykistys toteutetaan mastopilareilla. Pituussuunnassa rakennuksen jäykistys toteutetaan seinän vinositeillä sekä orsilla. Kattorakenne toimii palkkien kiepahdus- tukena ja siirtää kattotason kuormat jäykistäville rakenteille. Kattorakenne tässä koh- teessa on puuelementti. Runko suojataan lakkaamalla puuosat.

### 4.1 Pilarit

#### 4.1.1 Mastopilarit ja nurkkapilari

Mastopilarien ja nurkkapilarien laskelmat on esitetty liitteissä 4 ja 5.

#### Nurjahduskestävyys

Nurjahduskestävyydessä otetaan huomioon samaan aikaan vaikuttava puristus ja taivu- tus sauvassa. Mastopilareita ei ole tuettu kummastakaan suunnasta, joten nurjahdus- kestävyys on tarkasteltava molemmista suunnista. Jos muunnettu hoikkuus on korkein- taan 0,3 käytetään nurjahduskertoimelle  $k_c$  arvoa 1. Tällöin taivutuskestävyyttä tarkastel- laan mitoitusehdolla 7 (RIL 205-1-2017, 78):

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (7)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (8)$$

Muissa tapauksissa tarkastellaan yhdistettyä puristus- ja taivutuskestävyyttä y- ja z-ak- selin suunnassa seuraavalla ehdolla:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (10)$$

$\sigma_{c,0,d}$	syysuunnassa vaikuttava puristusjännityksen
$\sigma_{m,y,d}$	taivutusjännityksen tarkasteltavan akselin suhteen
$f_{c,0,d}$	syysuuntaisen puristuslujuuden suunniteluarvo
$f_{m,d}$	syysuuntaisen taivutuslujuuden mitoitusarvo
$k_m$	materiaalin huomioiva kerroin (suorakaidepoikkileikkausliimapuulle 0,7)
$k_c$	nurjahduskerroin

Nurjahduskerroin saadaan määriteltä y-akselin suhteen, mutta z-akselin suhteen nurjahduskerroin määritellään samalla tavoin kaavojen 11 ja 12 avulla. (RIL 205-1-2017, 82):

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \leq 1 \quad (11)$$

jossa

$\lambda_{rel,y}$  hoikkuusluku

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2 \quad (12)$$

jossa

$\beta_c$  alkukäyrästä riippuva kerroin, liimapuulle 0,1

Sauvan nurjahduskertoimien määrittämisessä tarvitaan sauvan muunnetut hoikkuudet. Nämä saadaan kaavalla 13 (RIL 205-1-2017, 80):

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (13)$$

$\lambda_y$  ja  $\lambda_{rel,y}$  pilarin hoikkuudesta riippuvia parametrejä

Sauvan hoikkuusluku saadaan kaavalla 14 (RIL 205-1-2017, 79):

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad (14)$$

jossa

$L_c$  nurjahduspituus z-akselin suuntaisessa nurjahduksessa

$i_y$  poikkileikkauksen jäyhyys säde y-akselin suhteen

Mastopilarille  $L_c$  on  $2,5L$ , koska pilari on jäykästi kiinnitetty toisesta päästä ja on vapaa toisesta päästä.

### Kiepahduskestävyys

Kiepahduskestävyys varmistaa, ettei sauva kierry ja kaadu taivutuksen tai puristuksen vaikutuksesta. Kiepahdus tulee tarkastaa pelkän momentin suhteen sekä yhdistetyn momentin ja puristuksen suhteen. Kiepahduskestävyyden tulee täyttää ehto 15 (RIL 205-1-2017, 83):

$$\left( \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (15)$$

jossa

$\sigma_{m,d}$  taivutusjännityksen mitoitusarvo

$f_{m,d}$  taivutuslujuuden mitoitusarvo

$k_{crit}$  kerroin, jonka avulla otetaan huomioon pienentynyt taivutusjännitys

$\sigma_{c,0,d}$  puristusjännityksen mitoitusarvo

$f_{c,0,d}$  puristuslujuuden mitoitusarvo

$k_{c,z}$  poikittaissuunnan nurjahduskerroin

Kiepahduskertoimen laskemisessa tarvitaan palkin suhteellinen hoikkuus, joka saadaan kaavalla 16.

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (16)$$

Hoikkuuteen tarvittava kriittinen taivutusjännitys lasketaan kaavalla 17.

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad (17)$$

jossa

c kerroin 0,70 (liimapuulle)

$l_{ef}$  tehollinen pituus

$E_{0,05}$  liukukerroin

Kun hoikkuusluku saadaan selville, voidaan valita  $k_{crit}$  arvo kaavasta 18 (RIL 205-1-2017, 85):

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (18)$$

### Leikkausvoimakestävyys

Leikkauksen mitoitus ehdolla varmistetaan, ettei liimapuu murru leikkaantumalla. Jos leikkaus vaikuttaa syysuuntaan tai kohtisuoraan sitä vastaan, on tarkistettava, että jännitys pysyy sallitun rajan alla. Leikkausvoiman tulee täyttää ehto:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (19)$$

jossa

$\tau_d$  leikkausjännityksen mitoitusarvo

$f_{v,d}$  vallitsevaa tilannetta vastaava leikkauslujuuden mitoitusarvo

### Mastopilarikehän siirtymä

Mastopilarin siirtymällä tarkoitetaan taipumasta johtuvaa yläpään siirtymistä. Taipuma voidaan laskea pilarin päässä vaikuttaville lisävaakavoimille kaavalla 20.

$$w = \frac{FL^3}{3EI} \quad (20)$$

jossa

F	pistekuorman ominaisarvo
L	pilarin jänneväli
E	liimapuun kimmokerroin
I	poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

Maastopilarin taipuma tasaiselle tuulikuormalle saadaan kaavasta 21.

$$w = \frac{qL^4}{8EI} \quad (21)$$

Rakennuksen maksimiarvo vaakasiirtymälle on  $H/150$ , missä  $H$  on rakennuksen korkeus (RIL 205-1-2017, 98).

#### 4.1.2 Tuulipilari

Tuulipilarin nurjahduskestävyys, kiepahduskestävyys sekä leikkausvoima lasketaan samalla tavalla kuin mastopilarissa. Tuulipilarin laskelmat ovat esitetty liitteessä 6.

#### Taipuma

Pilarin taipuma saadaan seuraavalla kaavalla:

$$w_{inst} = \frac{q_{w,k} \cdot L^4}{185 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} \quad (22)$$

jossa

$q_{w,k}$	seinän tuulikuorma käyttörajatilassa
L	pilarin pituus
$E_{0,mean}$	kimmomoduuli
$I_y$	jäyhyysmomentti

Taipuman tulee täyttää ehdon 23.

$$w_{net,fin} \leq \frac{L}{300} \quad (23)$$

## 4.2 Palkit

### 4.2.1 Mahapalkki

Mahapalkki on liimapuukuranteinen pääkannattaja, joka asennetaan pilarien päälle ja toimii alemman rakenteen kantavana osana. Mahapalkki vastaanottaa yläpuoliset kuormat pilarien kautta perustukselle. Mahapalkki mitoitetaan kantamaan sekä pystysuuntaisia että mahdollisia vaakakuormia. Mahapalkin laskut on esitetty liitteessä 3 ja mahapalkin kooksi saatiin 215x1370x2016. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 7.

#### Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa

Taivutusjännitys saadaan taivutusmomentin aiheuttamasta jännityksestä kaavalla 24 (RIL 205-1-2017, 86):

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad (24)$$

jossa

$M_d$  taivutusmomentti

$b$  palkin leveys

$h$  palkin korkeus

Taivutusmomentin aiheuttama jännitys vaihtuvakorkuisilla palkeilla täyttää seuraavan ehdon:

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}, \text{ jossa} \quad (25)$$

jossa

$k_{m,\alpha}$  viistetyn reunan huomioiva kerroin

$f_{m,d}$  taivutuslujuuden mitoitusarvo

Kerroin  $k_{m,\alpha}$  saadaan kaavalla viistetyn reunan ollessa puristettu:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1.5 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan \alpha^2\right)^2}}, \text{ jossa} \quad (26)$$

jossa

$f_{v,d}$	leikkauslujuuden mitoitusarvo
$f_{c,90,d}$	poikittaisen puristuslujuuden mitoitusarvo
$\alpha$	viistetyn reunan ja syysunnan välinen kulma

### Taivutuskestävyys palkin keskellä

Taivutusjännitys palkin keskellä saadaan laskettua kaavalla 27.

Taivutusjännityksen mitoitusehto palkin keskellä tulee toteuttaa seuraavan ehdon:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d} \quad (27)$$

missä kerroin  $k_r$  ottaa huomioon kaarevan liimapuun valmistuksessa tapahtuvan lamellien taipumisesta aiheutuva lujuuden pientyminen.  $k_r$  määräytyy ehdolla 28 (RIL 205-1-2017, 88):

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{kun } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \cdot \frac{r_{in}}{t} & \text{kun } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (28)$$

jossa

$r_{in}$	sisäpuolinen kaarevuussäde
$t$	lamellin paksuus

### Kiepahduskestävyys

Taivutettujen sauvojen kiepahduskestävyys, kun pelkkä taivutusmomentti rasittaa palkkia tulee jännityksien täyttää ehto 29 (RIL 205-1-2017, 83):

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (29)$$

jossa

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

$f_{m,d}$	taivutuslujuuden mitoitusarvo
$k_{crit}$	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kiepahdusriskin takia pienentynyt taivutuskestävyys

Kiepahduskertoimen laskennallisessa määrittämisessä tarvittava suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (30)$$

Kun kriittinen taivutusjännitys lasketaan kaavalla 31:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad (31)$$

jossa

$c$	0,70 liimapuun lujuusluokalle GL30c
$b$	palkin leveys
$h$	palkin korkeus
$l_{ef}$	palkin tehollinen pituus
$E_{0,05}$	syysuuntaista kuormitusta vastaava kimmokerroin

Kun palkin suoruuksia täyttää esitetty vaatimukset, voidaan kerroin  $k_{crit}$  määrittää kaavalla 32 (RIL 205-1-2017, 85):

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (32)$$

## Leikkauskestävyys tuella

Kun leikkausjännityksellä on komponentti tai komponentit, jotka vaikuttavat syysuunnan mukaisesti, niin tällöin on varmistettava, että alla oleva ehto täyttyy (RIL 205-1-2017, 74):

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (33)$$

jossa

$\tau_d$  leikkausjännityksen mitoitusarvo

$f_{v,d}$  vallitsevaa tilannetta vastaava leikkauslujuuden mitoitusarvo

Tasaisella kuormalla kuormitetun palkin leikkausvoimaa pienennetään kaavalla 34 (RIL 205-1-2017, 76):

$$V_{red} = V \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h + l_A}{l}\right) \quad (34)$$

## Taipuma

Tarkka taipuma tulisi laskea tietokoneohjelmalla, mutta taipumaa voidaan arvioida käsin laskennalla. Palkin tulee olla tällöin symmetrinen, vapaasti tuettu sekä tasaisesti kuormitettu. Laskennassa voidaan käyttää kaavaa 35 hetkelliselle taipumalle muuttuvassa sekä pysyvässä kuormassa (Liimapuukäsikirja 2015a, luku 6.2):

$$w = \frac{5qL^4}{384EI_y} + 0,35 \frac{qL^2}{Gb(h_s + h_{max})} \quad (35)$$

jossa

q palkin tasaisen kuorman ominaisarvo

L palkin jänneväli

E liimapuun kimmokerroin

$I_y$  jäyhyysmomentti

G liimapuun liukukerroin

b palkin leveys

$h_s$  palkin korkeus tuella

$h_2$  palkin korkeus keskellä

Jäyhyysmomentti määräävälle poikkileikkauksen mukaan saadaan kaavalla 37 (Puuinfo Oy 2020a, 8):

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (37)$$

Lopputaipuma saadaan kaavalla 38. Lopputaipumassa otetaan huomioon esikorotus, jonka avulla pystytään pitämään palkki suorana ja parantamaan rakenteen ulkonäköä ja kestävyttä (RIL 205-1-2017, 97).

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c \quad (38)$$

jossa

$w_c$  esikorotus (L/400)

$w_{fin}$  kokonaistaipuma

Sallittu taipuma pääkannattimelle kokonaistaipumassa on L/200 ja lopputaipumalle L/300, joka selviää taulukosta 10 (RIL 205-1-2017, 98).

Taulukko 10. Taipumien ja rakennuksen vaakasiirtymien enimmäisarvot

Rakenne	$w_{inst}^{1)}$	$w_{net,fin}^{2)}$	$w_{fin}^{3)}$
Pääkannattimet	L/400	L/300	L/200
Orret ja muut toisiokannattimet	-	L/200 <sup>5)</sup>	L/150
Rakennuksen vaakasiirtymä <sup>4)</sup>	-	H/300	-

### Tukipainekestävyys

Mahapalkin tukipaineen aiheuttaa syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus. Puristuksen tulee täyttää seuraava ehto 39 (RIL 205-1-2017, 72):

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} f_{c,90,d} \quad (39)$$

jossa

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

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

$k_{c,\perp}$  tukipainekerroin

Tukipainekerroin lasketaan kaavalla:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad (40)$$

jossa

$l$  kosteuspinnan pituuspuun syiden suunnassa

$l_{c,90,ef}$  tehollinen kosteuspinnan pituus

$k_{c,90}$  kerroin, halkeamismahdollisuus ja puristuman suuruudelle

Tehollinen kosteuspinnan pituus määritetään lisäämällä kosteuspinnan pituuteen molemmin puolin 30 mm.  $k_{c,90}$  kerroin on määritelty havupuiselle liimapuulle arvoksi 1,5. (RIL 205-1-2017, 72)

#### 4.2.2 Tasakorkeapalkki

Tasakorkeapalkin laskelmat on esitetty liitteessä 8. Palkin kooksi saatiin 190x1305.

#### Taivutuskestävyys

Taivutusjännitys saadaan taivutusmomentin aiheuttamasta jännityksestä kaavalla 41 (RIL 205-1-2017, 86):

$$\sigma_{m,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad (41)$$

jossa

$M_d$  taivutusmomentti

$b$  palkin leveys

$h$  palkin korkeus

Taivutusjännityksen tulee toteuttaa ehdon:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (42)$$

jossa

$f_{m,d}$  taivutuslujuuden mitoitusarvo

### Leikkausvoimakestävyys

Taivutuksesta aiheutuma leikkausvoima tulee täyttää ehdon:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (43)$$

jossa

$\tau_d$  leikkausjännityksen mitoitusarvo

$f_{v,d}$  vallitsevaa tilannetta vastaava leikkauslujuuden mitoitusarvo

Leikkausvoima tukialueella saadaan kaavalla 44 (Liimapuukäsikirja 2015b, 28):

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{I \cdot b} \quad (44)$$

jossa

$V_d$  leikkausvoiman suunnitteluarvo

$S$  poikkileikkauksen suurin staattinen momentti

$I$  poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

Tasaisella kuormalla kuormitetun palkin leikkausvoimaa palkin tukialueella pienennetään kaavalla 45 (RIL 205-1-2017, 76):

$$V_{red} = V_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h + l_A}{l}\right) \quad (45)$$

jossa

$V_d$  leikkausvoiman suunnitteluarvo

$h$  poikkileikkauksen korkeus

$l_A$  tuen pituus

$l$  palkin pituus

### Tukipainekestävyys

Tukipainekestävyys kohtisuoraan syitä vastaan tulee täyttää ehdon 46 (Puuinfo Liimapuukäsikirja Osa 3, 31):

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (46)$$

jossa

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

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

$k_{c,90}$  tukipainekerroin, 1,75

Puristusjännityksen mitoitus arvo saadaan kaavalla 48 (Puuinfo Liimapuukäsikirja Osa3, 31):

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{l_{ef} \cdot b} \quad (47)$$

jossa

$F_{c,90,d}$  puristusvoima kohtisuoraan syitä vastaan

$l_{ef}$  tehollinen tukipinnan pituus

### Kiepahduskestävyys

Taivutetun sauvan kiepahduskestävyys tulee täyttää ehdon 48 (Puuinfo Liimapuukäsikirja Osa 3, 41):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_n} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (48)$$

jossa

$\sigma_{m,d}$  taivutusjännityksen mitoitusarvo

$f_{m,d}$  taivutuslujuuden mitoitusarvo

$k_{crit}$	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kiepahdusriskin takia pienentynyt taivutuskestävyys
$M_d$	taivutusmomentin suunnittelu-arvo
$W_n$	taivutusvastus

## Taipuma

Tarkka taipuma tulisi laskea tietokoneohjelmalla, mutta taipumaa voidaan arvioida käsin laskennalla. Palkin tulee olla tällöin symmetrinen, vapaasti tuettu sekä tasaisesti kuormitettu. Laskennassa voidaan käyttää kaavaa 49 hetkelliselle taipumalle muuttuvassa sekä pysyvässä kuormassa (Liimapuukäsikirja 2015a, luku 6.2)

$$w = \frac{5qL^4}{384EI_y} \quad (49)$$

jossa

$q$	palkin yläpinnan tasainen kuormitus
$L$	palkin jänneväli
$E$	liimapuun kimmokerroin
$I_y$	jäyhyysmomentti

Sallittu taipuma pääkannattimelle kokonaistaipumassa on  $L/200$ , joka selviää alla olevasta taulukosta 11 (RIL 205-1-2017, 98).

Taulukko 11. Taipumien ja rakennuksen vaakasiirtymien enimmäisarvot

Rakenne	$w_{inst}^{1)}$	$w_{net,fin}^{2)}$	$w_{fin}^{3)}$
Pääkannattimet	$L/400$	$L/300$	$L/200$
Orret ja muut toisiokannattimet	-	$L/200^{5)}$	$L/150$
Rakennuksen vaakasiirtymä <sup>4)</sup>	-	$H/300$	-

### 4.3 Jäykisteet

Rakenteiden jäykistäminen vaakasuuntaisia ja kaatavia voimia vastaan on yksi rakennesuunnittelun keskeisimmistä tehtävistä. Rakennukseen vaikuttaa perustason suuntaisia vaakavoimia eri suunnista. Näitä voimia aiheuttaa usein tuuli, rakenteiden omapaino yhdistettynä alkuepäkeskisyyksiin rakenteissa ja nosturit aiheuttavat vaakasuuntaisia kuormia.

Rakenteiden jäykistämiseen on kolme päämenetelmää, joita voidaan käyttää erikseen tai yhdistettynä. Yksi yleisin tapa on käyttää diagonaaleja eli vinotuentoja. Nämä asennetaan kalteviin kulmiin esimerkiksi pilarien ja palkkien väliin. Tällöin tuet estävät rakenteiden muuttumisen suunnikkaaksi ottamalla vastaan veto- ja puristusvoimia sekä rajoittavat sivuttaisliikettä. Toinen tapa on levyjäykistys, jossa käytetään vaneri-, kipsi tai muita rakennuslevyjä rakenteen jäykkänä osina. Levy toimii laajana jäykkänä tasoelementtinä, joka estää muodonmuutokset jakamalla kuormia laajemmalle alueelle. Kolmantena tapana on momenttijäykät liitokset, jotka estävät rakenteen nivelmäistä käyttäytymistä. Nämä rajoittavat liitososien välisiä kulmanmuutoksia, jolloin rakenne voi siirtää vaakakuormia jäykän liitoksen kautta. (Liimapuukäsikirja 2015a, 13–2)

Tässä työssä katon sekundäärirakenteiden oletetaan välittävän kattotasolle kohdistuvat kuormat rakennuksen jäykistäville rakenteille. Rakenteen leveyssuuntainen jäykistys toteutetaan mastopilarikehien avulla. Pituussuuntainen jäykistys hoidetaan tuulipilareilla sekä tuuliristikolla, joka on sijoitettu kattoon sekä sivuseinille. Tuuliristikkona käytetään 8.8 kuumasinkittyä M16-kierretankoa. Kattoelementti toimii palkkien kiepahdustukena ja siirtää kiepahdusvoimat jäykille pysty rakenteille. Kiepahdustukina käytetään myös välitukiorsia.

### 4.4 Liitokset

#### 4.4.1 Pilarien liitos perustukseen

Puupilarin liittäminen perustukseen on sekä rakenteellinen että arkkitehtuurinen ratkaisu. Rakenteellisen liitoksen tulee kestää kuormitukset sekä estää kosteuden nousemisen puuhun. Liitos voi olla lujuusopillisesti joko jäykkä tai nivel. Mastopilarit kiinnitetään perustukseen jäykästi, joka jäykistää rakennuksen sivusuuntaisesti. Liitoksissa käytetään

usein palkkikenkiä kiinnityksen helpottamiseksi ja lujuuden varmistamiseksi. (Puuinfo, Puuhallin suunnittelu, 134)

Pilarit liitetään perustuksiin Late-Rakenteet Oy:n pyramidikengillä. Kiinnitys pilareihin tehdään 19 x 500 mm liimaruuveilla, joiden lujuusluokka on 5.8. Perustukseen tuleva liitos on mitoitettu Late-Rakenteiden omalla mitoitusmenetelmällä.

#### 4.4.2 Pilari-palkkiliitos

Mastopilarit liitetään palkkeihin hankolaudoilla. Hankolautojen mitoitus on tehty yrityksen omalla mitoitusohjelmalla. Kaikki muut liitokset toteutetaan SFS Intecin WT-T-ruuveilla, jotka on mitoitettu VTT Expert Servicen vinoruuviliitosten suunnitteluohjeen mukaan. Kohteessa on käytetty SFS WT-T 8,2xL ja 6,3x ruuveja.

#### 4.5 Palomitoitus

Rakenteen kustannuksiin vaikuttaa usein palomitoituksessa käytettävän periaatteen valinta. Esimerkiksi palosuojaus massiivisille liimapuupalkeille ei ole järkevää, koska massiivisuutensa ansiosta rakenteissa on usein hiiltymämitoituksen perusteella riittävä kantokyky. Tällaisissa tilanteissa palosuojaus olisi vain ylimääräinen kustannus.

Palosuojaamaton puurakenne hiiltyy palon alusta saakka. Palkki hiiltyy palolle altilta sivulta, jolloin dimensiot muuttuvat hiiltymisen seurauksena. Palonkestoajan loputtua hiiltyneessä rakenteessa on jäljellä tehollinen poikkileikkaus, joka on mitoitettu palotilanteen rasituksille. Tarvittaessa puurakenteen kokoa voidaan suurentaa, jolloin tehollinen poikkileikkaus jää suuremmaksi ja rakenteen kantokyky kasvaa. Hiiltymisen nopeuteen vaikuttaa otetaanko palo huomioon vain yhdeltä sivulta vai useammalta sivulta.

Jos puurakenne halutaan suunnitella paloteknisesti siten, että se palosuojataan vaaditulle palonkestoajalle niin tällöin rakenne palosuojataan. Palosuojauksena voidaan käyttää esimerkiksi kipsilevyjä, puulevyjä, lämmöneristelevyjä tai näiden yhdistelmiä. Nämä tuotteet suojaavat rakennetta hiiltymiseltä koko palonkestoajan. Puurakenne voidaan mitoittaa niin, että se kestää koko palonkestoajan tai osan palonkestoajasta. (Puuinfo, Puurakenteiden palomitoitus, 1–2)

Tässä kohteessa paloluokitus on P3 eli ei tarvitse mitoittaa palolle.

## 5 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin liimapuurakenteiden mitoittamisen periaatteita ja käytännön toetutusta. Tarkastelun kohteena olivat erityisesti materiaalin ominaisuudet, eurokoodin mukainen mitoitusprosessi sekä liimapuun edut kantavissa rakenteissa. Tavoitteena oli mitoittaa ja suunnitella hallin liimapuurunko.

Liimapuuhun perehtyminen rakennusmateriaalina oli antoisaa, vaikka pientä näkemystä siitä olikin jo tullut. Puu on materiaalina monikäyttöinen, visuaalisesti vaikuttava ja ekologinen. Nämä ominaisuudet tekevät liimapuusta houkuttelevan vaihtoehdon nykyaikaiseen rakentamiseen. Vaikka puulla on omat haasteensa esimerkiksi kosteuden ja palon osalta, sen käyttö on perusteltua ja tehokasta sen ominaisuuksien myötä kuten mahdollisuus pitkiin jänneväleihin.

Opinnäytetyön tekeminen oli mielenkiintoista ja opettavaista ja sai kokemusta kokonaisen rungon mitoituksesta. Työn alussa tuli perehtyä hyvin suunnittelutyön perustaan ja mitä kaikkia arvoja tarvitaan mitoittamiseen. Esimerkkejä ja kaavoja tuli etsiä eri lähteistä ja hakea mikä kaava ja mitoitus tapa olisi sopiva tähän kohteeseen. Haastavaa kohteessa oli se, että palkkeja oli erikokoisia eri kohdissa, jolloin tuli mitoittaa monta erikokoista palkkia. Aikaa kuluikin odotettua enemmän tietojen etsimiseen. Kuvien piirtäminen sujui sulavasti yrityksen hyvien piirustustiedostojen ja mallikohteiden avulla.

Lopputuloksena saatiin mitoituksien laskut sekä rakennekuvat rungosta. Mahapalkin kooksi saatiin 215x1370x2016. Nurkkapilarien ja tuulipilarien kooksi saatiin 165x540 sekä päätypilarien kooksi saatiin 215x540. Tuulipilareiden pilarijaoksi saatiin 8,2 m ja 7,2 m sekä mastopilareiden pilarijaoksi saatiin 7,1 m ja 6,6 m. Osa mitoituksista tehtiin yrityksen laskentaohjelmilla, mutta pääkannattajat laskettiin käsin. Kuvien perusteella saadaan piirrettyä liimapuiden valmistusta varten valmistuskuvat tehtaalle.

## Lähteet

Puuinfo Oy 2022. Esimerkki Liimapuumahapalkki. [https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2022/03/Esimerkkilaskelma\\_Liimapuumahapalkki\\_2.3.2022-1.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2022/03/Esimerkkilaskelma_Liimapuumahapalkki_2.3.2022-1.pdf)

Puuinfo Oy 2020. Muuttuvan poikkileikkauksen palkit. [https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/10\\_Muuttuvan-poikkileikkauksen-palkit.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/10_Muuttuvan-poikkileikkauksen-palkit.pdf)

Puuinfo Oy 2020. Puurakenteiden palomitoitus. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/10-Puurakenteiden-palomitoitus.pdf>

Puuinfo Oy 2020. Sovelluslaskelmat hallirakennus. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennustoinen-painos.pdf>

Liimapuukäsikirja. 2014. Osa 1. Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-1.pdf>

Liimapuukäsikirja. 2015a. Osa 2. Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-2.pdf>

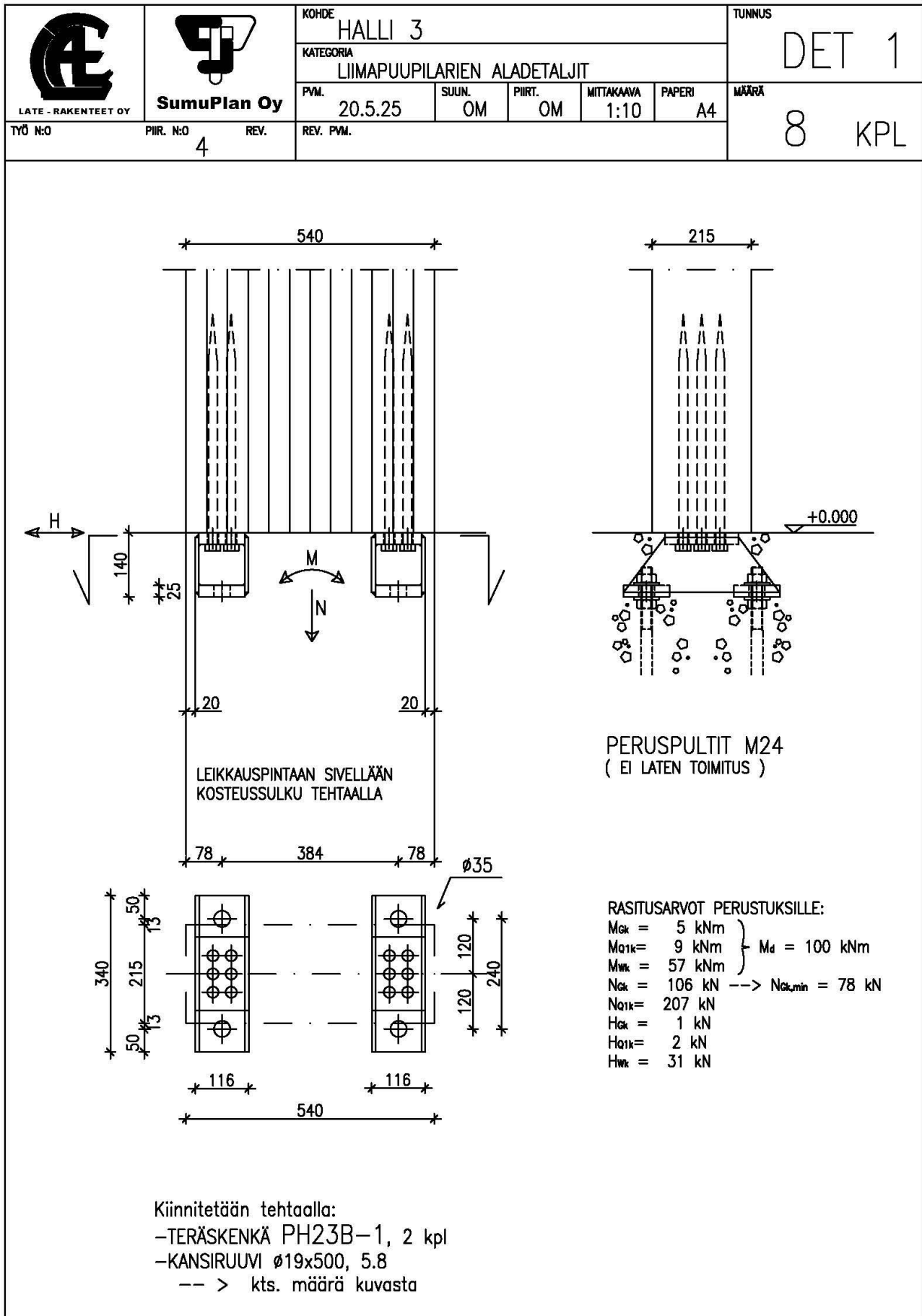
Liimapuukäsikirja. 2015b. Osa 3. Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2023/04/Liimapuukasikirja-Osa-3.pdf>

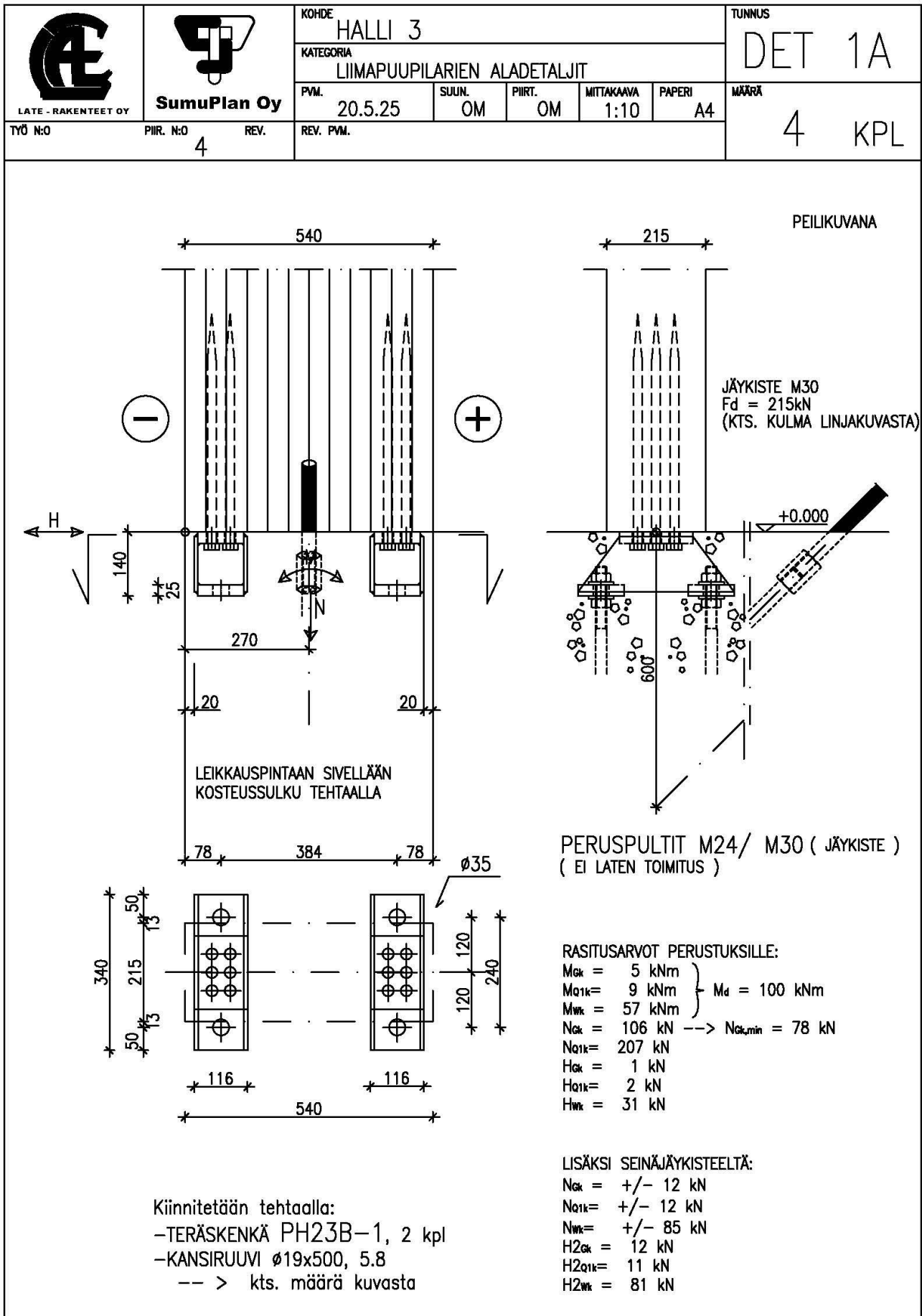
RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

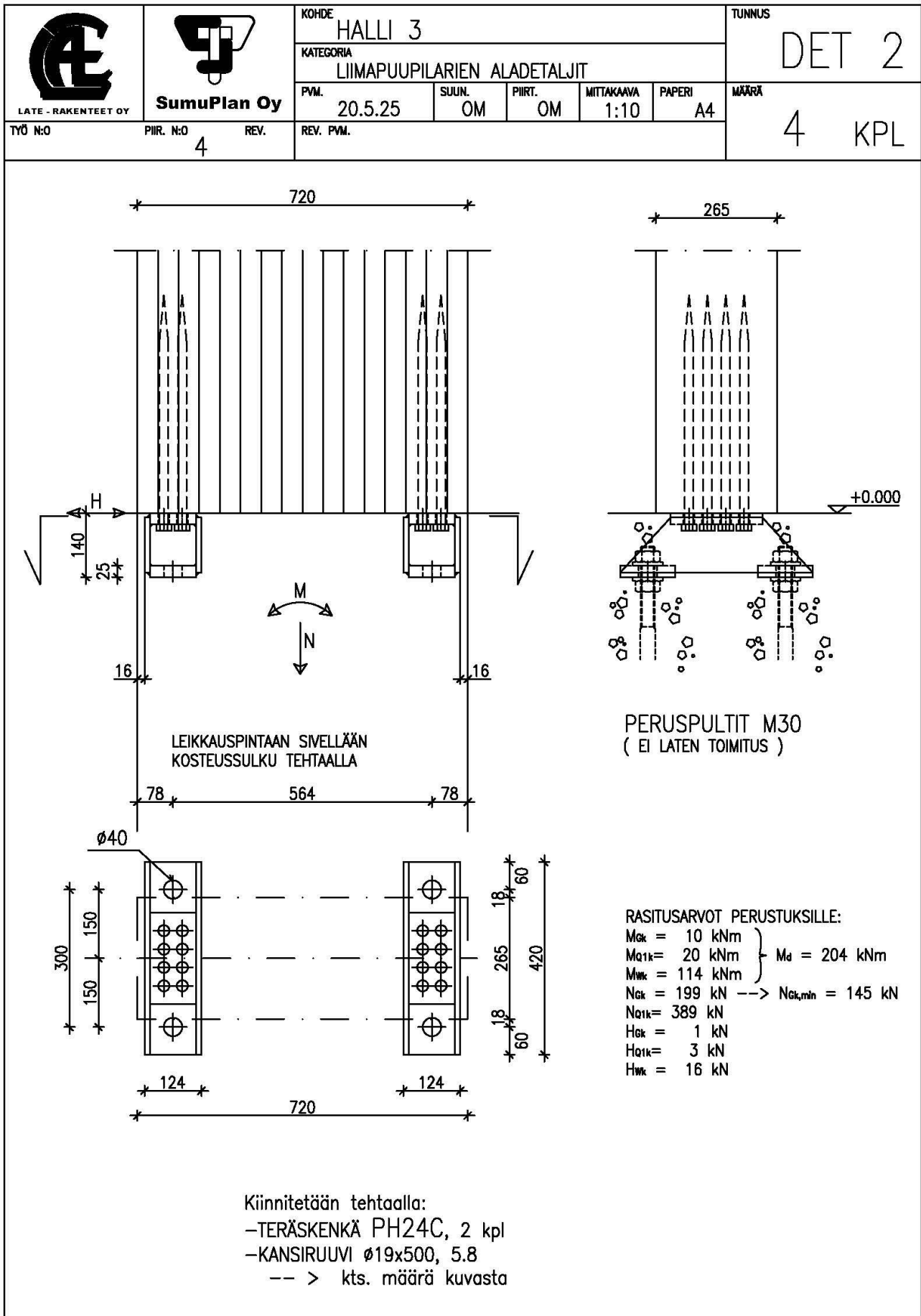
RIL 205-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.





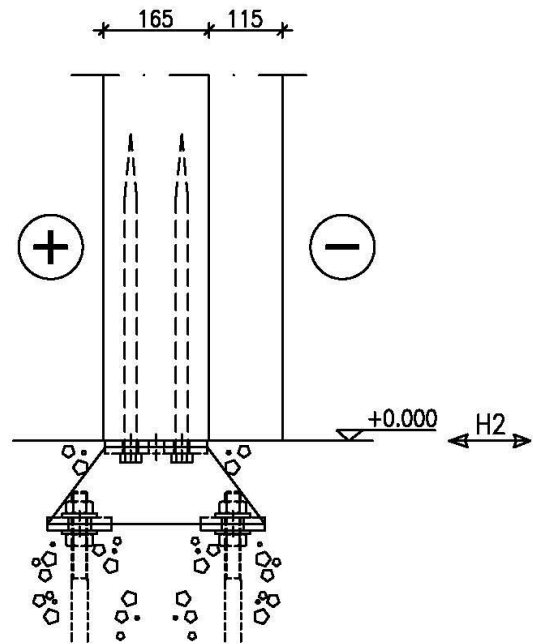
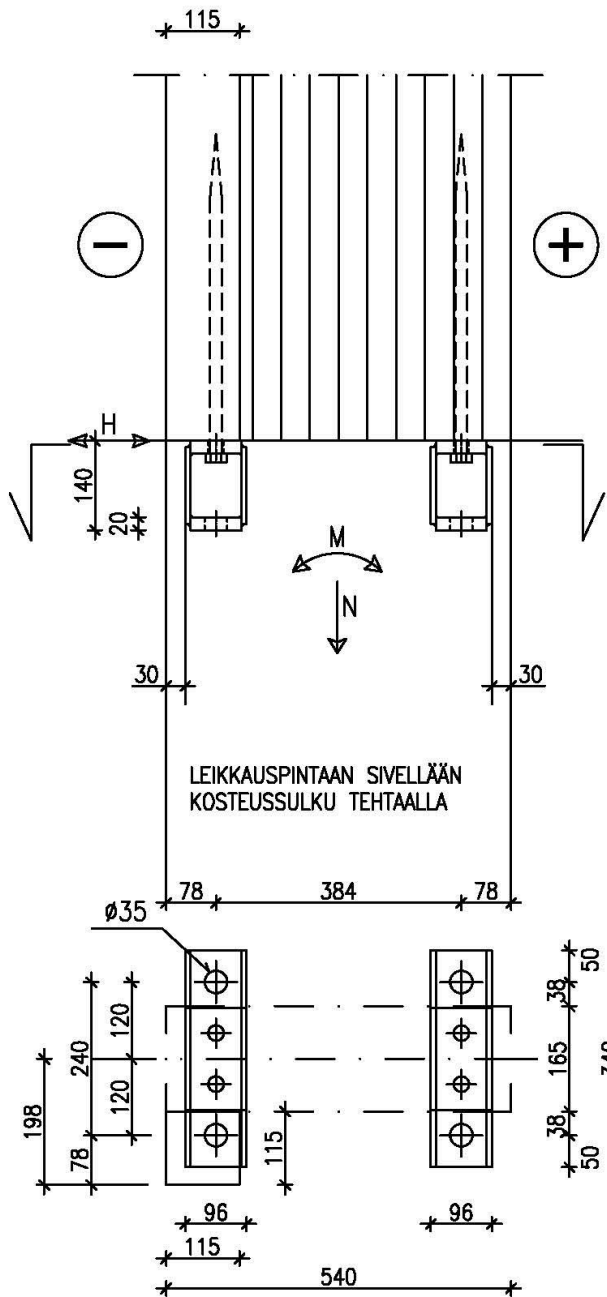








 LATE - RAKENTEET OY	 SumuPlan Oy	KOHDE HALLI 3					TUNNUS DET 3	
		KATEGORIA LIIMAPUUPILARIEN ALADETALJIT						
		TYÖ N:O	PIIR. N:O 4	REV.	PVM. 20.5.25	SUUN. OM	PIIRT. OM	MITTAKAAVA 1:10

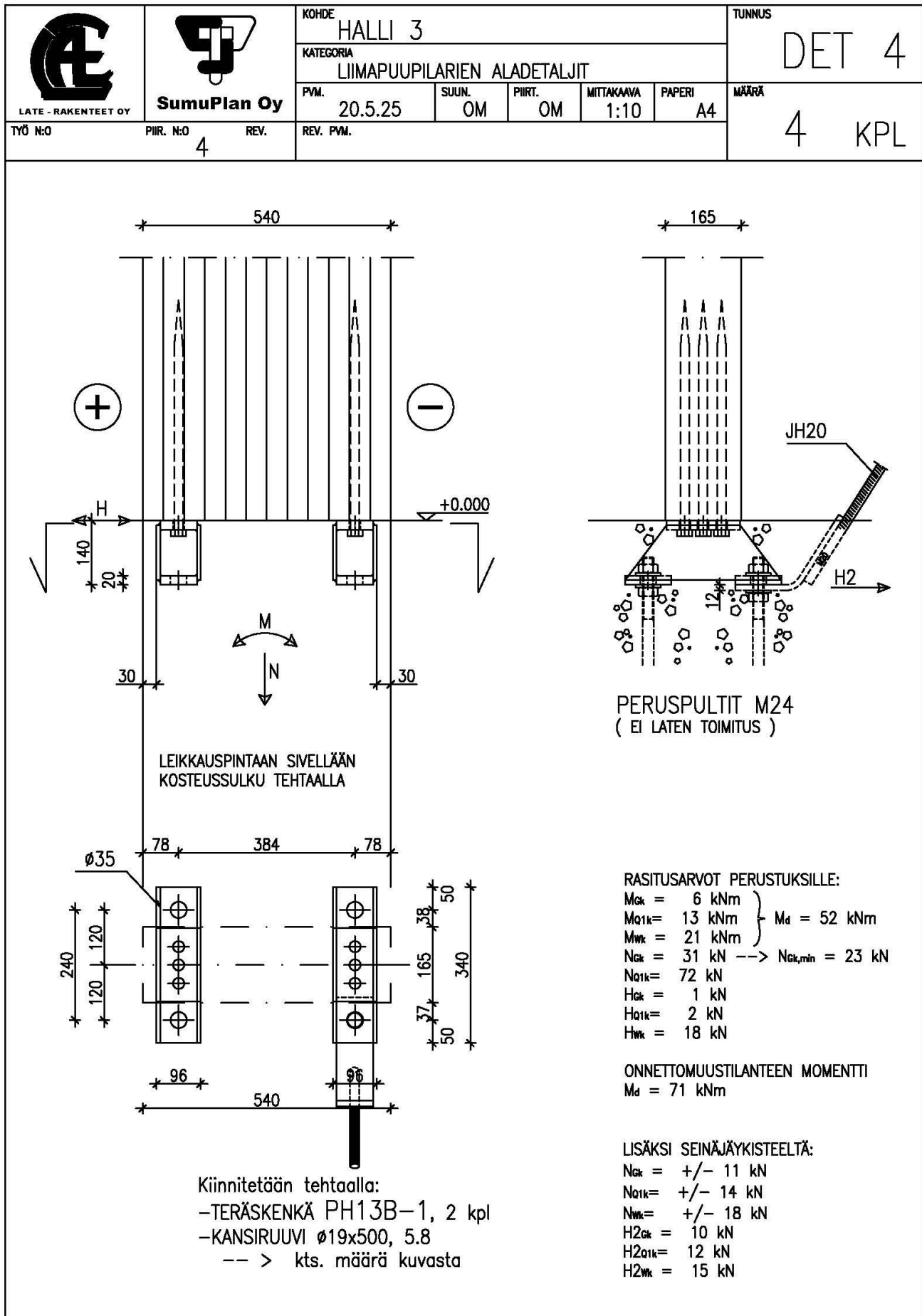


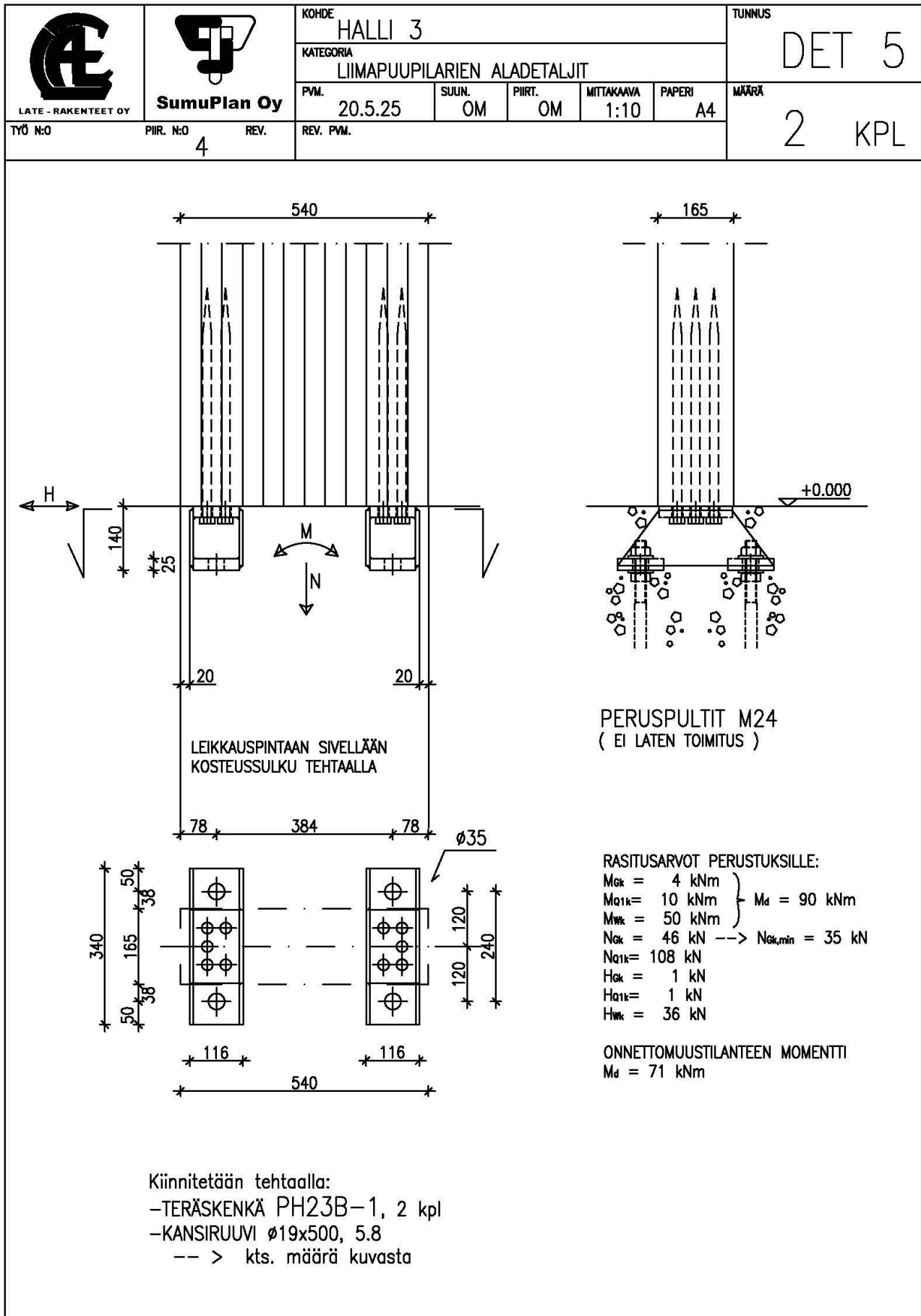
PERUSPULTIT M24  
( EI LATEN TOIMITUS )

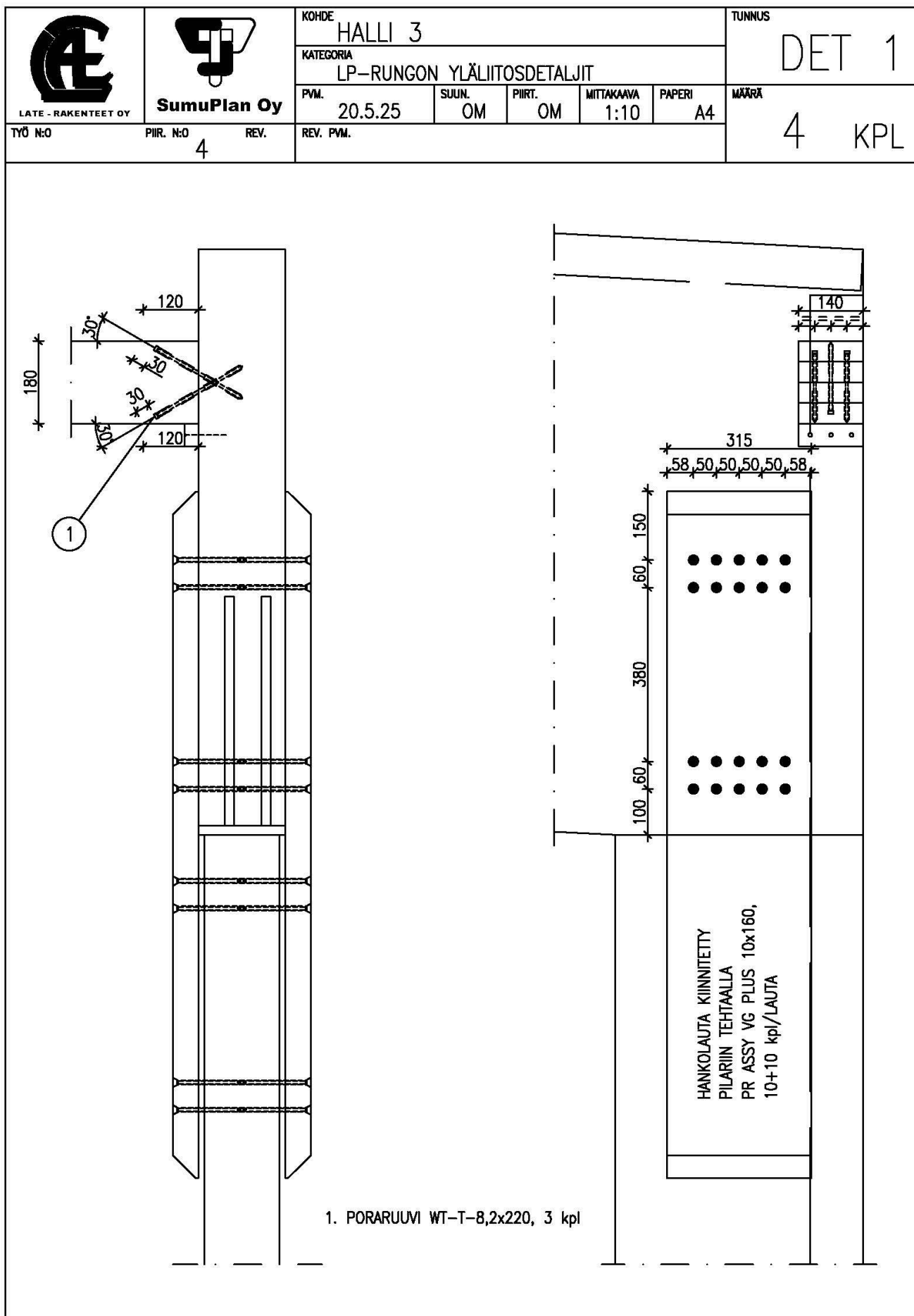
RASITUSARVOT PERUSTUKSILLE:



$M_{ok}$ = 0 kNm	} $M_d = 16$ kNm
$M_{otk}$ = 0 kNm	
$M_{wk}$ = 10 kNm	} $N_{d, min} = 26$ kN
$N_{ok}$ = 34 kN	
$N_{otk}$ = 80 kN	
$H_{ok}$ = 0 kN	
$H_{otk}$ = 0 kN	
$H_{wk}$ = 8 kN	
$H_{2wk}$ = 9 kN	

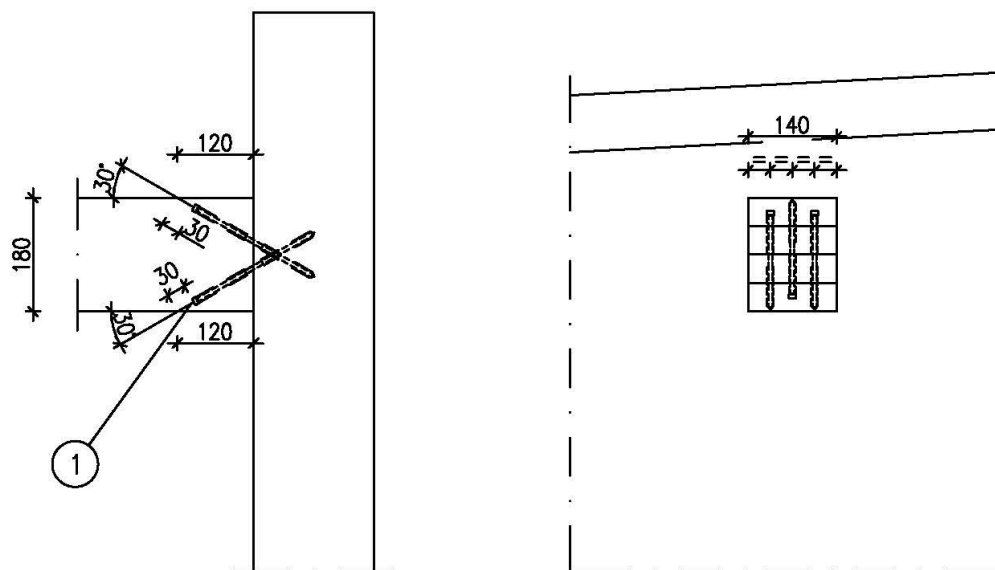
- Kiinnitetään tehtaalla:
- TERÄSKENKÄ PH13B-1, 2 kpl
  - KANSIRUUVI  $\phi 19 \times 500$ , 5,8
  - > kts. määrä kuvasta









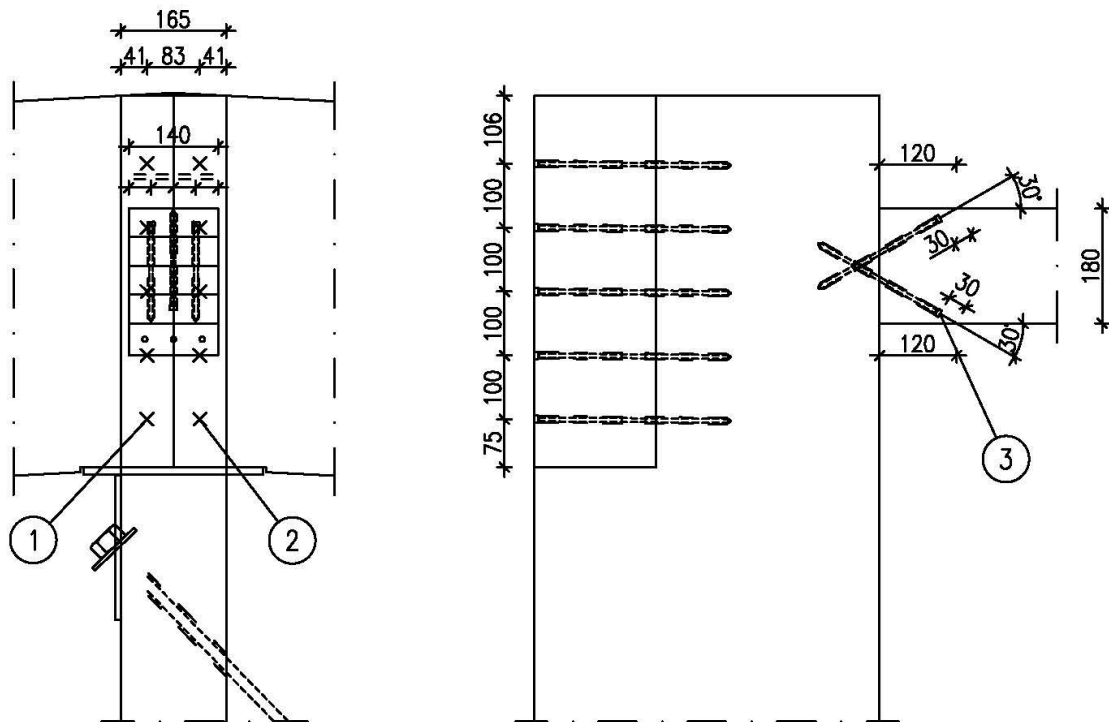
 LATE - RAKENTEET OY	 SumuPlan Oy	KOHDE HALLI 3					TUNNUS DET 2	
		KATEGORIA LP-RUNGON YLÄLIITOSDETALJIT						
TYÖ N:O	PIIR. N:O	REV.	PVM.	SUUN.	PIIRT.	MITTAKAAVA	PAPERI	MÄÄRÄ
	4		20.5.25	OM	OM	1:10	A4	4 KPL
REV. PVM.								



1. PORARUUVI WT-T-8,2x220, 3 kpl



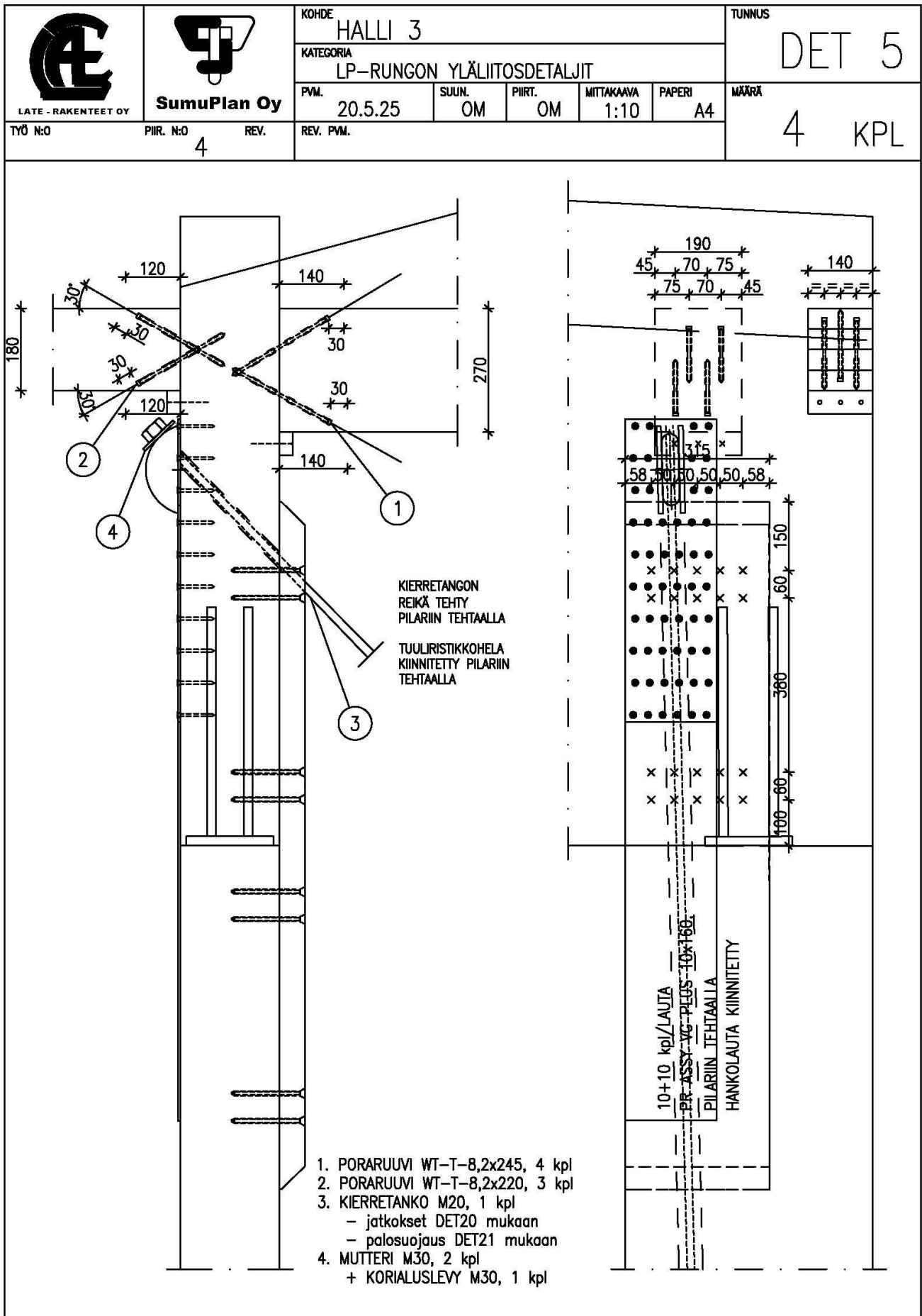
 LATE - RAKENTEET OY	 SumuPlan Oy	KOHDE HALLI 3					TUNNUS DET 4	
		KATEGORIA LP-RUNGON YLÄLIITOSDETALJIT						
		TYÖ N:O	PIIR. N:O 4	REV.	PVM. 20.5.25	SUUN. OM	PIIRT. OM	MITTAKAAVA 1:10
		REV. PVM.						

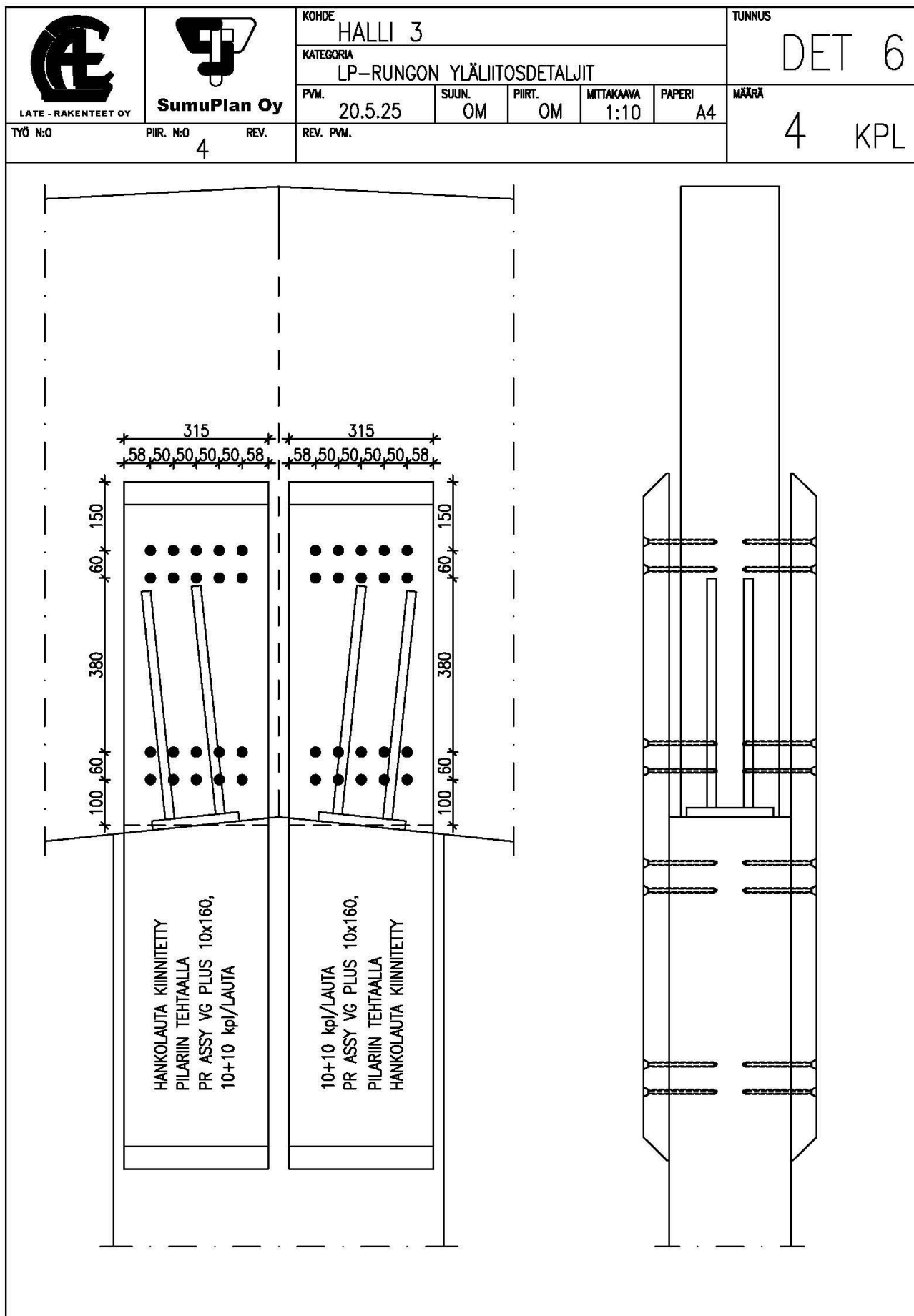




KIERRETANGON  
REIKÄ TEHTY  
PILARIIN TEHTAALLA

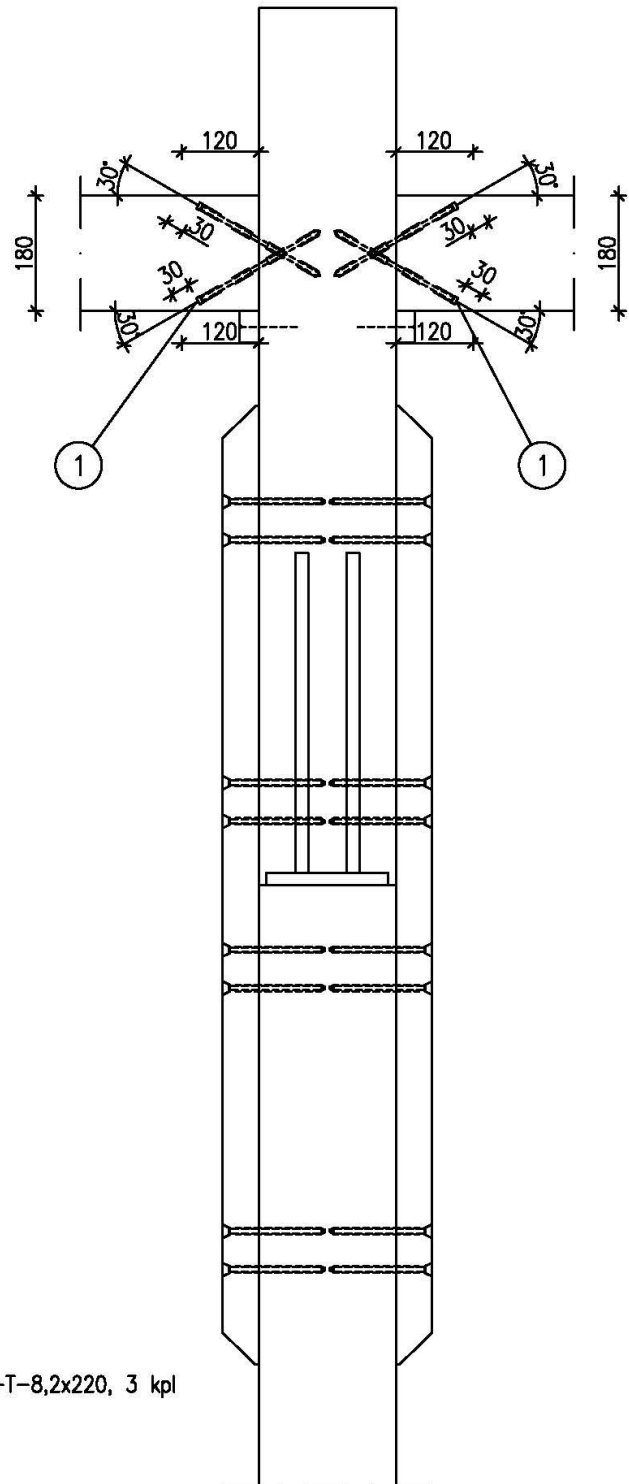
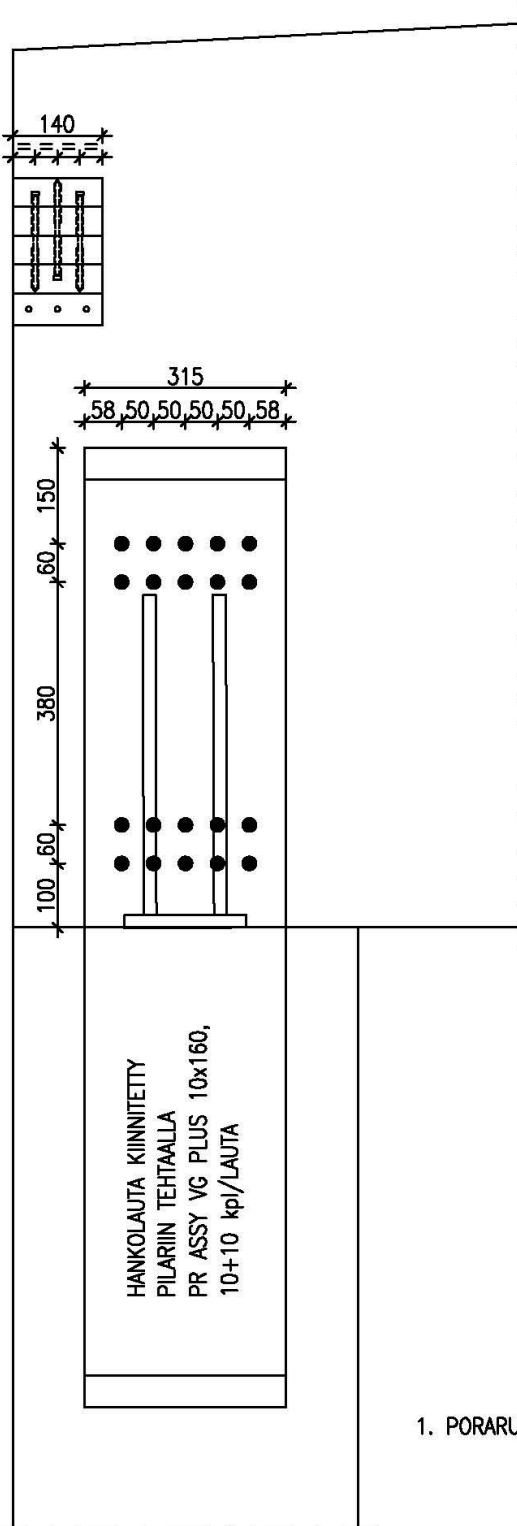
TUULIRISTIKKOHELA  
KIINNITETTY PILARIIN  
TEHTAALLA


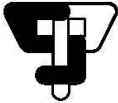
1. PORARUUVI WT-T-8,2x300, 5 kpl
2. PORARUUVI WT-T-8,2x300, 5 kpl
3. PORARUUVI WT-T-8,2x220, 3 kpl

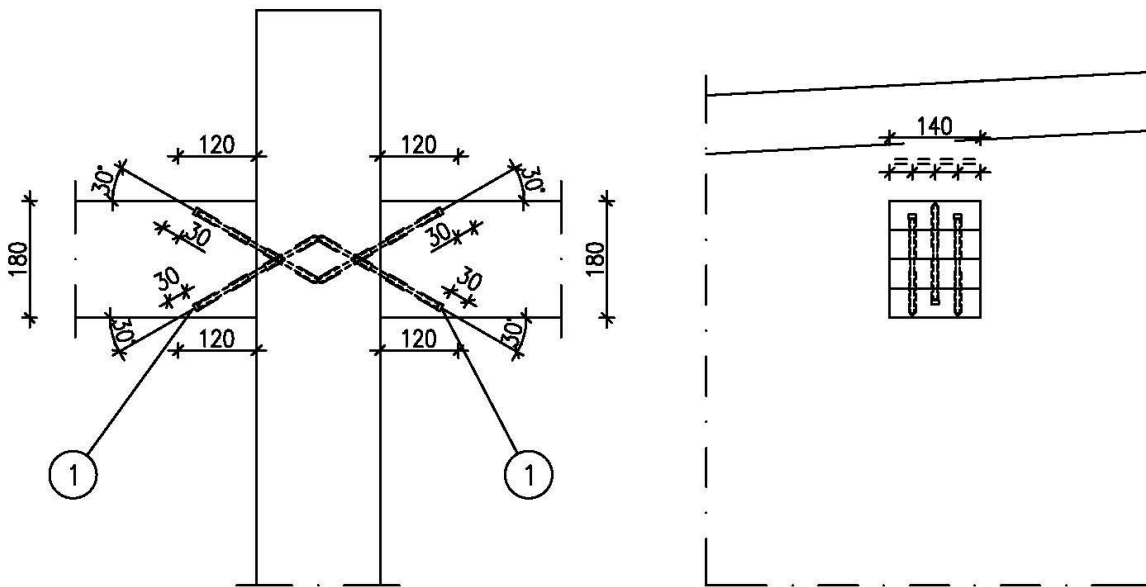





 LATE - RAKENTEET OY	 SumuPlan Oy	KOHDE HALLI 3					TUNNUS DET 7	
		KATEGORIA LP-RUNGON YLÄLIITOSDETALJIT						
		TYÖ N:O	PIIR. N:O 4	REV.	PVM. 20.5.25	SUUN. OM	PIIRT. OM	MITTAKAAVA 1:10

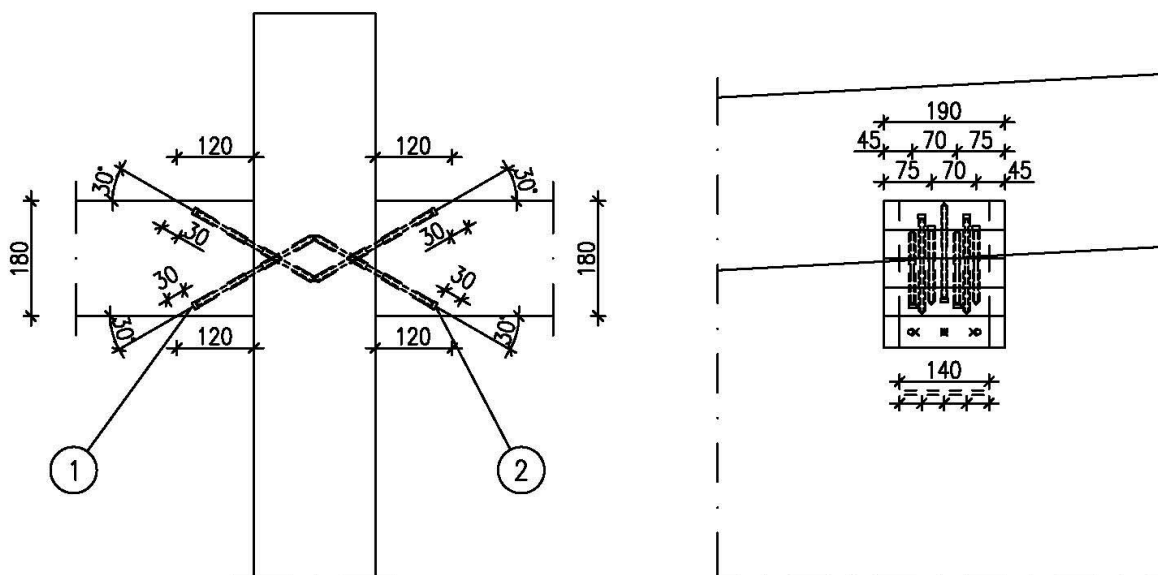


 LATE - RAKENTEET OY	 SumuPlan Oy	KOHDE HALLI 3				TUNNUS DET 8			
		KATEGORIA LP-RUNGON YLÄLIITOSDETALJIT							
TYÖ N:o	PIIR. N:o	REV.	PVM.	SUUN.	PIIRT.	MITTAKAAVA	PAPERI	MÄÄRÄ	
	4		20.5.25	OM	OM	1:10	A4	8 KPL	
			REV. PVM.						



1. PORARUUVI WT-T-8,2x220, 3 kpl

 LATE - RAKENTEET OY	 SumuPlan Oy	KOHDE HALLI 3					TUNNUS DET 9
		KATEGORIA LP-RUNGON YLÄLIITOSDETALJIT					
		PVM. 20.5.25	SUUN. OM	PIIRT. OM	MITTAKAAVA 1:10	PAPERI A4	MÄÄRÄ 4 KPL
TYÖ N:O	PIIR. N:O 4	REV.	REV. PVM.				



1. PORARUUVI WT-T-8,2x220, 3 kpl
2. PORARUUVI WT-T-8,2x220, 3 kpl

**Kuormat:****Yläpohjan omapaino:**

Yläpohjan rakenne:  $g_{k,y,p} := 0.6 \frac{kN}{m^2}$

Ripustus:  $g_{k,r} := 0.2 \frac{kN}{m^2}$

Omapaino ilman liimapuuta:  $g_{k,1} := g_{k,y,p} + g_{k,r} = 0.8 \frac{kN}{m^2}$

**Lumikuorma:**

Lumikuorma maassa:  $S_k := 2.5 \frac{kN}{m^2}$

Katon tuulensuojakerroin:  $C_e := 1$

Lämpötilakerroin:  $C_t := 1$

Muotokerroin:  $\mu_1 := 0.8$

Lumikuorma katolla:  $q_{k,1} := C_e \cdot C_t \cdot \mu_1 \cdot S_k = 2 \frac{kN}{m^2}$

**Tuulikuorma:**

Tuulen maastoluokka III

Rakennuksen korkeus:  $h := 9 \text{ m}$

Tuulen puuskanopeus:  $q_{p0} := 0.47 \frac{kN}{m^2}$

Rakennekerroin:  $C_s C_d := 1.0$

**Tuulikuorma pitkälle sivulle**

Tuulen puoleinen sivu:  $C_f := 1.28$

$$q_{w,k,a} := C_s C_d \cdot C_f \cdot q_{p0} = 0.602 \frac{kN}{m^2}$$

Suojan puoleinen sivu (imu):  $C_{f,2} := 0.9$

$$q_{w,k,b} := C_s C_d \cdot C_{f,2} \cdot q_{p0} = 0.423 \frac{kN}{m^2}$$

**Tuulikuorma lyhyemmälle sivulle:**

Tuulen puoleinen sivu:  $C_f = 1.28$

$$q_{w,k,a,2} := C_s C_d \cdot C_f \cdot q_{p0} = 0.602 \frac{kN}{m^2}$$

Suojan puoleinen sivu (imu):  $C_{f,3} := 0.8$

$$q_{w,k,b,2} := C_s C_d \cdot C_{f,3} \cdot q_{p0} = 0.376 \frac{kN}{m^2}$$

**Mastopilarit**

Liimapuun lujuusluokka: GL30c

Käyttöluokka: 2

Seuraamusluokka: CC2

$K_{FI} := 1.0$

Kuorman aikaluokka: keskipitkä/hetkellinen

$k_{mod} := 1.1$

Paloluokka P3

**Palkin ominaisuudet:**Materiaalin osavarmuusluku:  $\gamma_M := 1.25$ 

Taivutus:	$f_{m,k} := 30 \frac{N}{mm^2}$	$f_{m,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 26.4 \frac{N}{mm^2}$
-----------	--------------------------------	---

Puristus:	$f_{c,0,k} := 24.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,0,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 21.56 \frac{N}{mm^2}$
-----------	------------------------------------	--

	$f_{c,90,k} := 2.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 2.2 \frac{N}{mm^2}$
--	------------------------------------	--

Leikkaus:	$f_{v,k} := 3.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{v,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 3.08 \frac{N}{mm^2}$
-----------	---------------------------------	---

Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} := 13000 \frac{N}{mm^2}$	$E_{0,05} := 10800 \frac{N}{mm^2}$
---------------	--------------------------------------	------------------------------------

**Mitat:**

$b := 215 \text{ mm}$	$h := 540 \text{ mm}$	$A := b \cdot h = (1.161 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$
-----------------------	-----------------------	--

$L := 6280 \text{ mm}$	$H := 9 \text{ m}$	$B := 34.9 \text{ m}$
------------------------	--------------------	-----------------------

Palkin pituus:	$L_p := 23.855 \text{ m}$
----------------	---------------------------

Räystäät:	$l_r := 800 \text{ mm}$
-----------	-------------------------

Kehäjako	$s := 7.1 \text{ m}$
----------	----------------------

3-aukkoisten kattoelementtien jatkuvuuden huomioiva kerroin:	$k := 1.10$
--	-------------

**Kuormat:**

Yläpohjan rakenne:  $g_{k,yp} := 0.6 \frac{kN}{m^2}$

$$g_{k,r} := 0.2 \frac{kN}{m^2}$$

Omapaino ilman liimapuuta:  $g_{k,1} := g_{k,yp} + g_{k,r} = 0.8 \frac{kN}{m^2}$

Liimapuu mahapalkki:  $g_{k,2} := 1.525 \frac{kN}{m}$

Lumikuorma:  $q_k := 2 \frac{kN}{m^2}$

Tuulikuorma:  $q_{w,k} := 0.602 \frac{kN}{m^2}$

Tuulikuorma imu:  $q_{w,k,2} := 0.282 \frac{kN}{m^2}$

$$\psi_{0,2} := 0.7$$

**Runko:**

$$N_{g,k1} := \frac{s \cdot k \cdot g_{k,1} \cdot (L_p + 2 \cdot l_r) + g_{k,2} \cdot L_p}{2} = 97.711 \text{ kN}$$

**Lisävaakavoima:**

$$H_{gt,k} := \frac{N_{g,k1}}{150} = 0.651 \text{ kN} \quad \rightarrow \quad M_{g,k} := H_{gt,k} \cdot L = 4.091 \text{ kN} \cdot m$$

**Lumi:**

$$N_{q,k1} := \frac{s \cdot k \cdot q_k \cdot (L_p + 2 \cdot l_r)}{2} = 198.804 \text{ kN}$$

**Lisävaakavoima**

$$H_{qt,k} := \frac{N_{q,k1}}{150} = 1.325 \text{ kN} \quad \rightarrow \quad M_{q,k} := H_{qt,k} \cdot L = 8.323 \text{ kN} \cdot m$$

**Tuuli:**

Tuulikuorma  $W_{k,1} := s \cdot q_{w,k} = 4.274 \frac{kN}{m}$

Tuulikuorma imu  $W_{k,2} := s \cdot q_{w,k,2} = 2.002 \frac{kN}{m}$

Tuulikuorman aiheuttama momentti:

$$M_{w,k} := \left( \frac{W_{k,1} \cdot L^2 + W_{k,2} \cdot L^2}{2} \right) \cdot 0.5 = 61.883 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tuulikuorman aiheuttama leikkausvoima

$$V_{w,k} := \frac{L \cdot (W_{k,1} + W_{k,2})}{2} = 19.708 \text{ kN}$$

Kuormitustapa:

KT2 100%op + 70% lumi +100% tuuli

$$N_d := 1.15 \cdot N_{g,k1} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot N_{q,k1} = 321.111 \text{ kN}$$

$$V_d := 1.15 \cdot H_{gt,k} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot H_{gt,k} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot V_{w,k} = 22.834 \text{ kN}$$

$$M_d := 1.15 \cdot M_{g,k} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot M_{q,k} + 1.5 \cdot M_{w,k} = 106.268 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### Nurjahduskestävyys

Nurjahduspituus

$$L_{c,z} := 2.5 \cdot L = 15.7 \text{ m}$$

$$L_{c,y} := 1 \cdot L = 6.28 \text{ m}$$

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = (2.821 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

$$I_z := \frac{h \cdot b^3}{12} = (4.472 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 155.885 \text{ mm}$$

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 62.065 \text{ mm}$$

Hoikkuusluku

$$\lambda_y := \frac{I_{c,z}}{i_y} = 100.716$$

$$\lambda_z := \frac{I_{c,y}}{i_z} = 101.184$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1.527$$

$$\lambda_{rel,z} := \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1.534$$

kerroin sauvan alkukäyräydelle (liimapuu)  $\beta_c := 0.1$ 

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) = 1.727$$

$$k_z := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2) = 1.738$$

$$k_{c,y} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0.395 \leq 1$$

$$k_{c,z} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = 0.391 \leq 1$$

$$\sigma_{c,0,d} := \frac{N_d}{A} = 2.766 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} = 10.17 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$k_m := 0.7$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.71 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.598 \leq 1$$

**Kiepahduskestävyys:**

$$\text{Kiepahdustuentäväli:} \quad a := L = 6.28 \text{ m}$$

$$\text{Tehollinen kiepahdustuentäväli:} \quad l_{ef} := 0.8 \cdot L = 5.024 \text{ m}$$

$$c := 0.7$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m.crit} := \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0.05} = 128.812 \frac{N}{mm^2}$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel.m} := \sqrt{\frac{f_{m.k}}{\sigma_{m.crit}}} = 0.483$$

$$k_{crit} := 1 \quad , \text{ kun } \lambda_{rel.m} \leq 1$$

Mitoitusehto:

$$\left( \frac{\sigma_{m.y.d}}{k_{crit} \cdot f_{m.d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c.0.d}}{k_{c.z} \cdot f_{c.0.d}} = 0.476 \leq 1$$

**Leikkauskestävyys**

$$k_{cr} := 1.0$$

$$b_{ef} := k_{cr} \cdot b = 215 \text{ mm}$$

$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = 0.295 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_d = 0.295 \frac{N}{mm^2} \leq f_{v.d} = 3.08 \frac{N}{mm^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau_d}{f_{v.d}} = 0.096 \leq 1$$

**Mastopilarikehän siirtymä**

Hetkellinen taipuma pysyvä:

$$W_{inst.G} := \frac{H_{gt.k} \cdot L^3}{3 \cdot E_{0.05} \cdot I_y} = 1.765 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma lumikuormasta:

$$W_{inst.Q} := \frac{H_{gt.k} \cdot L^3}{3 \cdot E_{0.mean} \cdot I_y} = 2.983 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma tuulikuormasta:

$$W_{inst.W} := \frac{\left( \frac{W_{k.1} + W_{k.2}}{2} \right) \cdot L^4}{8 \cdot E_{0.mean} \cdot I_y} = 16.636 \text{ mm}$$

Virumaluku:  $k_{def} := 0.6$  $\psi_{2.Q} := 0.2$        $\psi_{2.W} := 0$ 

Lopputaipuma:

$$W_{net.fin.G} := (1 + k_{def}) \cdot W_{inst.G} = 2.824 \text{ mm}$$

$$W_{net.fin.W} := (1 + \psi_{2.W} \cdot k_{def}) \cdot W_{inst.W} = 16.636 \text{ mm}$$

$$W_{net.fin.Q} := (\psi_{0.2} + \psi_{2.Q} \cdot k_{def}) \cdot W_{inst.G} = 1.447 \text{ mm}$$

$$W_{net.fin} := W_{net.fin.G} + W_{net.fin.W} + W_{net.fin.Q} = 20.907 \text{ mm}$$

Mitoitusehto:

$$W_{net.fin} = 20.907 \text{ mm} \leq W_{net.fin.sall} := \frac{H}{300} = 30 \text{ mm}$$

Käyttöaste:

$$\frac{W_{net.fin}}{W_{net.fin.sall}} = 0.697 \leq 1$$

**Nurkkapilarit**

Liimapuun lujuluokka: GL30c

Käyttöluokka: 2

Seuraamusluokka: CC2

$K_{FI} := 1.0$

Kuorman aikaluokka: keskipitkä/hetkellinen

$k_{mod} := 1.1$

Paloluokka P3

**Palkin ominaisuudet:**Materiaalin osavarmuusluku:  $\gamma_M := 1.25$ 

Taivutus:	$f_{m,k} := 30 \frac{N}{mm^2}$	$f_{m,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 26.4 \frac{N}{mm^2}$
-----------	--------------------------------	---

Puristus:	$f_{c,0,k} := 24.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,0,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 21.56 \frac{N}{mm^2}$
-----------	------------------------------------	--

	$f_{c,90,k} := 2.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 2.2 \frac{N}{mm^2}$
--	------------------------------------	--

Leikkaus:	$f_{v,k} := 3.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{v,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 3.08 \frac{N}{mm^2}$
-----------	---------------------------------	---

Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} := 13000 \frac{N}{mm^2}$	$E_{0,05} := 10800 \frac{N}{mm^2}$
---------------	--------------------------------------	------------------------------------

**Mitat:**

$b := 165 \text{ mm}$	$h := 540 \text{ mm}$	$A := b \cdot h = (8.91 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$
-----------------------	-----------------------	---

$L := 7440 \text{ mm}$	$H := 9 \text{ m}$
------------------------	--------------------

Pilari jako:	$L_p := 7 \text{ m}$
--------------	----------------------

Räystäät:	$l_r := 800 \text{ mm}$
-----------	-------------------------

Kehäjako	$s := 3.5 \text{ m}$
----------	----------------------

**Kuormat:**

Yläpohjan rakenne:  $g_{k,yp} := 0.6 \frac{kN}{m^2}$

$$g_{k,r} := 0.2 \frac{kN}{m^2}$$

Omapaino ilman liimapuuta:  $g_{k,1} := g_{k,yp} + g_{k,r} = 0.8 \frac{kN}{m^2}$

Liimapuu mahapalkki:  $g_{k,2} := 1.525 \frac{kN}{m}$

Lumikuorma:  $q_k := 2 \frac{kN}{m^2}$

Tuulikuorma:  $q_{w,k} := 0.602 \frac{kN}{m^2}$

Tuulikuorma imu:  $q_{w,k,2} := 0.282 \frac{kN}{m^2}$

$$\psi_{0,2} := 0.7$$

**Runko:**

$$N_{g,k1} := \frac{s \cdot g_{k,1} \cdot (L_p + 2 \cdot l_r) + g_{k,2} \cdot L_p}{2} = 17.378 \text{ kN}$$

**Lisävaakavoima:**

$$H_{gt,k} := \frac{N_{g,k1}}{150} = 0.116 \text{ kN} \quad \rightarrow \quad M_{g,k} := H_{gt,k} \cdot L = 0.862 \text{ kN} \cdot m$$

**Lumi:**

$$N_{q,k1} := \frac{s \cdot q_k \cdot (L_p + 2 \cdot l_r)}{2} = 30.1 \text{ kN}$$

**Lisävaakavoima**

$$H_{qt,k} := \frac{N_{q,k1}}{150} = 0.201 \text{ kN} \quad \rightarrow \quad M_{q,k} := H_{qt,k} \cdot L = 1.493 \text{ kN} \cdot m$$

**Tuuli:**

Tuulikuorma  $W_{k,1} := s \cdot q_{w,k} = 2.107 \frac{kN}{m}$

Tuulikuorma imu  $W_{k,2} := s \cdot q_{w,k,2} = 0.987 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tuulikuorman aiheuttama momentti:

$$M_{w,k} := \left( \frac{W_{k,1} \cdot L^2 + W_{k,2} \cdot L^2}{2} \right) \cdot 0.5 = 42.816 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tuulikuorman aiheuttama leikkausvoima

$$V_{w,k} := \frac{L \cdot (W_{k,1} + W_{k,2})}{2} = 11.51 \text{ kN}$$

Kuormitustapa:

KT2 100%op + 70% lumi +100% tuuli

$$N_d := 1.15 \cdot N_{g,k1} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot N_{q,k1} = 51.589 \text{ kN}$$

$$V_d := 1.15 \cdot H_{gt,k} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot H_{gt,k} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot V_{w,k} = 12.429 \text{ kN}$$

$$M_d := 1.15 \cdot M_{g,k} + 1.5 \cdot \psi_{0,2} \cdot M_{q,k} + 1.5 \cdot M_{w,k} = 66.783 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### Nurjahduskestävyys

Nurjahduspituus

$$L_{c,z} := 2.5 \cdot L = 18.6 \text{ m}$$

$$L_{c,y} := 1 \cdot L = 7.44 \text{ m}$$

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = (2.165 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

$$I_z := \frac{h \cdot b^3}{12} = (2.021 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 155.885 \text{ mm}$$

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 47.631 \text{ mm}$$

Hoikkuusluku

$$\lambda_y := \frac{I_{c,z}}{i_y} = 119.319$$

$$\lambda_z := \frac{I_{c,y}}{i_z} = 156.199$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1.809$$

$$\lambda_{rel,z} := \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.368$$

kerroin sauvan alkukäyräydelle (liimapuu)  $\beta_c := 0.1$

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) = 2.212$$

$$k_z := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2) = 3.407$$

$$k_{c,y} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0.287 \leq 1$$

$$k_{c,z} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = 0.171 \leq 1$$

$$\sigma_{c,0,d} := \frac{N_d}{A} = 0.579 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} = 8.328 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$k_m := 0.7$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.409 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.378 \leq 1$$

**Kiepahduskestävyys:**

$$\text{Kiepahdustuentäväli:} \quad a := L = 7.44 \text{ m}$$

$$\text{Tehollinen kiepahdustuentäväli:} \quad l_{ef} := 0.8 \cdot L = 5.952 \text{ m}$$

$$c := 0.7$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m.crit} := \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0.05} = 64.037 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel.m} := \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m.crit}}} = 0.684$$

$$k_{crit} := 1 \quad , \text{ kun } \lambda_{rel.m} \leq 1$$

Mitoitusehto:

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = 0.257 \leq 1$$

**Leikkauskestävyys**

$$k_{cr} := 1.0$$

$$b_{ef} := k_{cr} \cdot b = 165 \text{ mm}$$

$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = 0.209 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_d = 0.209 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_{v,d} = 3.08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = 0.068 \leq 1$$

**Mastopilarikehän siirtymä**

Hetkellinen taipuma pysyvä:

$$W_{inst.G} := \frac{H_{gt.k} \cdot L^3}{3 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 0.565 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma lumikuormasta:

$$W_{inst.Q} := \frac{H_{gt.k} \cdot L^3}{3 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 0.979 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma tuulikuormasta:

$$W_{inst.W} := \frac{\left( \frac{W_{k.1} + W_{k.2}}{2} \right) \cdot L^4}{8 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 21.051 \text{ mm}$$

Virumaluku:  $k_{def} := 0.6$  $\psi_{2.Q} := 0.2$        $\psi_{2.W} := 0$ 

Lopputaipuma:

$$W_{net,fin.G} := (1 + k_{def}) \cdot W_{inst.G} = 0.904 \text{ mm}$$

$$W_{net,fin.W} := (1 + \psi_{2.W} \cdot k_{def}) \cdot W_{inst.W} = 21.051 \text{ mm}$$

$$W_{net,fin.Q} := (\psi_{0.2} + \psi_{2.Q} \cdot k_{def}) \cdot W_{inst.G} = 0.463 \text{ mm}$$

$$W_{net,fin} := W_{net,fin.G} + W_{net,fin.W} + W_{net,fin.Q} = 22.418 \text{ mm}$$

Mitoitusehto:

$$W_{net,fin} = 22.418 \text{ mm} \leq W_{net,fin,sall} := \frac{H}{300} = 30 \text{ mm}$$

Käyttöaste:

$$\frac{W_{net,fin}}{W_{net,fin,sall}} = 0.747 \leq 1$$

**Tuulipilarit**

Liimapuun lujuluokka: GL30c

Käyttöluokka: 2

Seuraamusluokka: CC2

$K_{FI} := 1.0$

Kuorman aikaluokka: keskipitkä/hetkellinen

$k_{mod} := 1.1$

Paloluokka P3

**Palkin ominaisuudet:**Materiaalin osavarmuusluku:  $\gamma_M := 1.25$ 

Taivutus:	$f_{m,k} := 30 \frac{N}{mm^2}$	$f_{m,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 26.4 \frac{N}{mm^2}$
-----------	--------------------------------	---

Puristus:	$f_{c,0,k} := 24.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,0,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 21.56 \frac{N}{mm^2}$
-----------	------------------------------------	--

	$f_{c,90,k} := 2.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 2.2 \frac{N}{mm^2}$
--	------------------------------------	--

Leikkaus:	$f_{v,k} := 3.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{v,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 3.08 \frac{N}{mm^2}$
-----------	---------------------------------	---

Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} := 13000 \frac{N}{mm^2}$	$E_{0,05} := 10800 \frac{N}{mm^2}$
---------------	--------------------------------------	------------------------------------

**Mitat:**

$b := 165 \text{ mm}$	$h := 540 \text{ mm}$	$A := b \cdot h = (8.91 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$
-----------------------	-----------------------	---

$L := 8900 \text{ mm}$	$H := 9 \text{ m}$	$B := 8 \text{ m}$
------------------------	--------------------	--------------------

Pilari jako:	$L_p := 7 \text{ m}$
--------------	----------------------

Räystäät:	$l_r := 800 \text{ mm}$
-----------	-------------------------

mastopilarikehien k-jako:	$s := 7 \text{ m}$
---------------------------	--------------------

$C_s C_d := 1$

$C_f := 0.9$	$\psi_{0,2} := 0.7$
--------------	---------------------

**Kuormat:**

Yläpohjan rakenne:

$$g_{k,y,p} := 0.6 \frac{kN}{m^2}$$

$$g_{k,r} := 0.2 \frac{kN}{m^2}$$

Omapaino ilman liimapuuta:

$$g_{k,1} := g_{k,y,p} + g_{k,r} = 0.8 \frac{kN}{m^2}$$

Liimapuu mahapalkki:

$$g_{k,2} := 1.525 \frac{kN}{m}$$

Lumikuorma:

$$q_k := 2 \frac{kN}{m^2}$$

Tuulen nopeuspaine:

$$q_p := 0.47 \frac{kN}{m^2}$$

Seinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$$q_{w,k} := C_s C_d \cdot C_f \cdot q_p \cdot B = 3.384 \frac{kN}{m}$$

Seinän tuulikuorma murtorajatilassa

$$q_{w,d} := 1.5 \cdot K_{FI} \cdot q_{w,k} = 5.076 \frac{kN}{m}$$

Pilarin pystykuorma murtorajatilassa

$$N_d := (1.15 \cdot K_{FI} \cdot g_{k,1} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,2} \cdot q_k) \cdot \frac{s}{2} \cdot B + 1.15 \cdot K_{FI} \cdot g_{k,2} \cdot B = 98.59 \text{ kN}$$

Pilarin taivutusmomentti tuulikuormasta murtorajatilassa

$$M_d := \frac{q_{w,d} \cdot L^2}{8} = 50.259 \text{ kN} \cdot m$$

Pilarin leikkausvoima tuulikuormasta murtorajatilassa

$$V_d := \frac{5 \cdot q_{w,d} \cdot L}{8} = 28.235 \text{ kN}$$

**Nurjahduskestävyys**

Nurjahduspituus

$$L_{c,z} := 2.5 \cdot L = 22.25 \text{ m}$$

$$L_{c,y} := 1 \cdot L = 8.9 \text{ m}$$

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = (2.165 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

$$I_z := \frac{h \cdot b^3}{12} = (2.021 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 155.885 \text{ mm}$$

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 47.631 \text{ mm}$$

Hoikkuusluku

$$\lambda_y := \frac{L_{c,z}}{i_y} = 142.734$$

$$\lambda_z := \frac{L_{c,y}}{i_z} = 186.852$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.164$$

$$\lambda_{rel,z} := \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.833$$

kerroin sauvan alkukäyräydelle (liimapuu)  $\beta_c := 0.1$ 

$$k_y := 0.5 \cdot \left( 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) = 2.935$$

$$k_z := 0.5 \cdot \left( 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) = 4.639$$

$$k_{c,y} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0.203 \leq 1$$

$$k_{c,z} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = 0.12 \leq 1$$

$$\sigma_{c,0,d} := \frac{N_d}{A} = 1.107 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} = 6.267 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$k_m := 0.7$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.49 \leq 1 \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.593 \leq 1$$

### Kiepahduskestävyys:

Kiepahdustuentaväli:  $a := L = 8.9 \text{ m}$

Tehollinen kiepahdustuentaväli:  $l_{ef} := L + 2 \cdot h = 9.98 \text{ m}$

$$c := 0.7$$

Suurakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} := \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} = 38.191 \frac{N}{mm^2}$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} := \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0.886$$

$$k_{crit} := 1, \text{ kun } \lambda_{rel,m} \leq 1$$

Mitoitusehto:

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = 0.483 \leq 1$$

**Leikkauskestävyys**

$$k_{cr} := 1.0$$

$$b_{ef} := k_{cr} \cdot b = 165 \text{ mm}$$

$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = 0.475 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_d = 0.475 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq f_{v,d} = 3.08 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = 0.154 \leq 1$$

**Taipuma**

Pilarin jäyhyysmomentti

$$I_y = (2.165 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Hetkellinen taipuma

$$w_{inst,Q} := \frac{q_{w,k} \cdot L^4}{185 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 4.077 \text{ mm}$$

Mitoitusehto

$$w_{net,sall} := \frac{L}{300} = 29.667 \text{ mm}$$

$$w_{inst,Q} = 4.077 \text{ mm} \leq w_{net,sall} = 29.667 \text{ mm}$$

Käyttöaste:

$$\frac{w_{inst,Q}}{w_{net,sall}} = 0.137 \leq 1$$

**Mahapalkki**

Liimapuun lujuusluokka: GL30c

Käyttöluokka: 2

Seuraamusluokka: CC2

$$K_{FI} := 1.0$$

Kuorman aikaluokka: keskipitkä

$$k_{mod} := 0.8$$

Paloluokka P3

**Palkin ominaisuudet:**Materiaalin osavarmuusluku:  $\gamma_M := 1.25$ 

Taivutus:	$f_{m,k} := 30 \frac{N}{mm^2}$	$f_{m,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 19.2 \frac{N}{mm^2}$
-----------	--------------------------------	---

Veto:	$f_{t,90,k} := 0.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{t,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} = 0.32 \frac{N}{mm^2}$
-------	------------------------------------	---

Puristus:	$f_{c,0,k} := 24.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,0,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 15.68 \frac{N}{mm^2}$
-----------	------------------------------------	--

	$f_{c,90,k} := 2.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 1.6 \frac{N}{mm^2}$
--	------------------------------------	--

Leikkaus:	$f_{v,k} := 3.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{v,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$
-----------	---------------------------------	---

Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} := 13000 \frac{N}{mm^2}$	$E_{0,05} := 10800 \frac{N}{mm^2}$
---------------	--------------------------------------	------------------------------------

Liukkerroin:	$G_{0,mean} := 650 \frac{N}{mm^2}$	$G_{0,05} := 540 \frac{N}{mm^2}$
--------------	------------------------------------	----------------------------------

Tiheys:	$\rho_{mean} := 430 \frac{kg}{m^3}$	$g_p := \rho_{mean} \cdot g = 4.217 \frac{kN}{m^3}$
---------	-------------------------------------	---

**Mahapalkin mitat:**

$h_1 := 1370 \text{ mm}$	$h_2 := 2016 \text{ mm}$	$h_3 := 1370 \text{ mm}$	$b := 215 \text{ mm}$
--------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------------------

Kaarevuussäde	$r := 2000000 \text{ mm}$
---------------	---------------------------

Palkin pituus:	$L := 23855 \text{ mm}$
Tuen pituus:	$l_A := 540 \text{ mm}$
Palkin jänneväli:	$L_0 := L - l_A = 23.315 \text{ m}$
k-jako:	$s := 7100 \text{ mm}$
Lamellin paksuus	$t := 45 \text{ mm}$
Kiepahdustukiväli:	$a := 2500 \text{ mm}$
Yläreunan kaltevuus:	$\alpha := \text{atan}\left(\frac{1}{19}\right) = 3.013^\circ$

**Kuormat:**

Palkin omapaino:  $g_{k,2} := \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot b \cdot g_p = 1.535 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

3- aukkoisten kattoelementtien jatkuvuuden huomioiva kerroin:  $k := 1.15$

$$P_d := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot (g_{k,1} \cdot s \cdot k + g_{k,2}) + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot (q_{k,1} \cdot s \cdot k) = 33.772 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_d := \frac{P_d \cdot L_0^2}{8} = (2.295 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_d := \frac{P_d \cdot L_0}{2} = 393.697 \text{ kN}$$

**Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa:**

Mitoittavan PL:n kohta  $x_{max} := \frac{h_1}{2 \cdot h_2} \cdot L_0 = 7.922 \text{ m}$

Taivutusmomentti kyseisessä kohdassa

$$M_{d,max} := \frac{P_d \cdot L_0 \cdot x_{max}}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_{max}}{L_0}\right) = (2.059 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Mitoittavan PL:n korkeus

$$h_x := h_1 + x_{max} \cdot \tan(\alpha) = 1.787 \text{ m}$$

Taivutusjännitys mitoittavan poikkileikkauksen kohdalla

$$\sigma_{m,\alpha,d} := \frac{6 \cdot M_{d,max}}{b \cdot h_x^2} = 17.996 \frac{N}{mm^2}$$

Pienennyskerroin, kun viistetty reuna on puristettu:

$$k_{m,\alpha} := \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{m,d}}{1.5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan(\alpha) \right)^2 + \left( \frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan(\alpha) \right)^2}} = 0.957$$

Mitoitusehto:

$$\sigma_{m,\alpha,d} = 17.996 \frac{N}{mm^2} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d} = 18.377 \frac{N}{mm^2}$$

Käyttöaste:

$$\frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}} = 0.979 \leq 1.0$$

### Taivutuskestävyys harjalla

Taivutusmomentti  $M_d = (2.295 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$

Taivutusjännitys harjalla  $\sigma_{m,d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h_2^2} = 15.757 \frac{N}{mm^2}$

Ulomman lamellin sisäpuolen kaarevuussäde  $r_{in} := r - t = (2 \cdot 10^6) \text{ mm}$

$$\frac{r_{in}}{t} = 4.444 \cdot 10^4 > 240 \quad \text{eli} \quad k_r := 1.0$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_r \cdot f_{m,d}} = 0.821 \leq 1.0$$

**Kiepahduskestävyys**

Korkeus mitoittavassa PL:ssa

$$\bar{h} := h_x = 1.787 \text{ m}$$

Taivutusjännitys mitoittavassa PL:ssa

$$\sigma_{m,\alpha,d} = 17.996 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tehollinen kiepahdustuenväli

$$l_{ef} := a = 2.5 \text{ m}$$

 $c := 0.7$  (liimapuu GL30c)

Kriittinen taivutusjännitys

$$\sigma_{m,crit} := \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0.05} = 78.225 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Palkin suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel} := \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0.619$$

 $k_{crit} := 1$  kun  $\lambda_{rel} = 0.619 < 0.75$ 

Mitoitusehto

$$\sigma_{m,\alpha,d} = 17.996 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} = 19.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = 0.937$$

**Leikkauskestävyys tuella**

$$V_{red} := V_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_1 + l_A}{L_0}\right) = 338.311 \text{ kN}$$

 $k_{cr} := 1$ 

Tehollinen leveys

$$b_{ef} := k_{cr} \cdot b = 0.215 \text{ m}$$

Leikkajännitys

$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b_{ef} \cdot h_1} = 1.723 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto

$$\tau_d = 1.723 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_{v,d} = 2.24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = 0.769 \leq 1$$

**Taipuma**

KRT kuormat:

$$\text{Omapaino} \quad g_k := g_{k,2} + s \cdot (g_{k,1}) = 7.215 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Lumikuroma} \quad q_{k,lumi} := s \cdot q_{k,1} = 14.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Tarkasteltava korkeus} \quad h_t := h_w = 1.787 \text{ m}$$

$$\text{Jäyhyyshmomentti} \quad I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = (1.022 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^4$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormista

$$w_{inst,G} := \frac{5 \cdot g_k \cdot L_0^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} + 0.35 \cdot \frac{g_k \cdot L_0^2}{G_{0,mean} \cdot b \cdot (h_1 + h_2)} = 23.788 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvassa kuormassa

$$w_{inst,Q} := \frac{5 \cdot q_{k,lumi} \cdot L_0^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} + 0.35 \cdot \frac{q_{k,lumi} \cdot L_0^2}{G_{0,mean} \cdot b \cdot (h_1 + h_2)} = 46.818 \text{ mm}$$

$$\text{Virumaluku} \quad k_{def} := 0.6$$

$$\text{Liikkuvan kuorman muuttuva osuus} \quad \psi_{2,1} := 0.2$$

Kokonaistaipuma

$$w_{fin} := (1 + k_{def}) \cdot w_{inst,G} + (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) \cdot w_{inst,Q} = 90.497 \text{ mm}$$

Sallittutaipuma

$$w_{sall} := \frac{L_0}{200} = 116.575 \text{ mm}$$

Lopputaipuma

$$\text{Ennakkokorotus L/400} \quad w_c := \frac{L}{400} = 59.638 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} := w_{fin} - w_c = 30.859 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin,sall} := \frac{L_0}{300} = 77.717 \text{ mm}$$

Mitoitusehto

$$\frac{w_{net,fin}}{w_{net,fin,sall}} = 0.397 \leq 1.0$$

**Tukipainekestävyys**

$$V_d = 393.697 \text{ kN}$$

$$\text{Tehollinen tukipinnan pituus} \quad l_{c,90,ef} := l_A + 30 \text{ mm} = 570 \text{ mm}$$

Tukipainekerroin

$$k_{c,90} := 1.75$$

$$k_{c,L} := \frac{l_{c,90,ef}}{l_A} \cdot k_{c,90} = 1.847$$

$$\sigma_{c,90,d} := \frac{V_d}{b \cdot l_A} = 3.391 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} = 3.391 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq k_{c,L} \cdot f_{c,90,d} = 2.956 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Atraihelan mitoitus**

$$\text{Lujuus:} \quad f_y := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Halkaisija:} \quad d := 20 \text{ mm}$$

$$\text{Pinta-ala:} \quad A_{tanko} := \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 314.159 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tartuntapituus:} \quad L_a := 540 \text{ mm}$$

$$\text{Tankojen määrä:} \quad n := 4$$

$$d_{ef} := 1.25 \cdot d = 25 \text{ mm} \quad \gamma_{m,s} := 1.1$$

$$N_d := V_d = 393.697 \text{ kN}$$

Liimasauvan tartuntalujuus:

$$f_{a,k} := 6.5 \cdot \left(1 - \frac{L_a}{100 \cdot d}\right) \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} = 4.745 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{a,d} := \frac{f_{a,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 3.037 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Terästankoliitoksen tartuntavoimakapasiteetti

$$N_{R,d,teräs} := \frac{f_y}{\gamma_M} \cdot n \cdot A_{tanko} = 502.655 \text{ kN}$$

$$N_{R,d,liimaus} := n \cdot \pi \cdot d_{ef} \cdot f_{a,d} \cdot L_a = 515.181 \text{ kN}$$

Mitoitusehto (koko tukireaktio siirtyy liimatankojen kautta)

$$N_d = 393.697 \text{ kN} \leq N_{R,d,teräs} = 502.655 \text{ kN}$$

$$N_d = 393.697 \text{ kN} \leq N_{R,d,liimaus} = 515.181 \text{ kN}$$

Puristusjännitys pilarissa teräslevyn alueella

$$A := 190 \text{ mm} \cdot 190 \text{ mm} = (3.61 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} := \frac{N_d}{A} = 10.906 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Pilarin puristuslujuus syysuunnassa mitoitusehto:

$$\sigma_{c,0,d} = 10.906 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq f_{c,0,d} = 15.68 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Teräslevyn taivutusmomentti tukireaktiossa

$$e := 40 \text{ mm} \quad b_{teräs} := 80 \text{ mm}$$

$$M_{d,teräs} := \frac{\sigma_{c,0,d} \cdot e^2}{2} \cdot b_{teräs} = (6.98 \cdot 10^5) \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Teräslevyn taivutusjännitys

$$W := \frac{b_{teräs} \cdot t^2}{6} = (2.7 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{b,d} := \frac{M_{d,teräs}}{W} = 25.851 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Teräslevyn taivutuslujuus

$$f_k := 355 \frac{N}{mm^2} \qquad f_d := \frac{f_k}{1.1} = 322.727 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$\sigma_{b,d} = 25.851 \frac{N}{mm^2} \leq f_d = 322.727 \frac{N}{mm^2}$$

Leikkausvoimakkestävyys

$$V_d = 393.697 \text{ kN}$$

$$V_{red} = 338.311 \text{ kN}$$

$$x_{m,2} := \frac{l_A}{20} = 27 \text{ mm}$$

$$h_{m,2} := h_1 + x_{m,2} = (1.397 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$\tau_{d,hela} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b \cdot h_{m,2}} = 1.69 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{d,hela} = 1.69 \frac{N}{mm^2} \leq f_{v,d} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$$

**Tasakorkeapalkki**

Liimapuun lujuusluokka: GL30c

Käyttöluokka: 2

Seuraamusluokka: CC2

$$K_{FI} := 1.0$$

Kuorman aikaluokka: keskipitkä

$$k_{mod} := 0.8$$

Paloluokka P3

**Palkin ominaisuudet:**Materiaalin osavarmuusluku:  $\gamma_M := 1.25$ 

Taivutus:	$f_{m,k} := 30 \frac{N}{mm^2}$	$f_{m,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 19.2 \frac{N}{mm^2}$
Veto:	$f_{t,90,k} := 0.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{t,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} = 0.32 \frac{N}{mm^2}$
Puristus:	$f_{c,0,k} := 24.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,0,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 15.68 \frac{N}{mm^2}$
	$f_{c,90,k} := 2.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{c,90,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 1.6 \frac{N}{mm^2}$
Leikkaus:	$f_{v,k} := 3.5 \frac{N}{mm^2}$	$f_{v,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$
Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} := 13000 \frac{N}{mm^2}$	$E_{0,05} := 10800 \frac{N}{mm^2}$
Liukkerroin:	$G_{0,mean} := 650 \frac{N}{mm^2}$	$G_{0,05} := 540 \frac{N}{mm^2}$
Tiheys:	$\rho_{mean} := 430 \frac{kg}{m^3}$	$g_p := \rho_{mean} \cdot g = 4.217 \frac{kN}{m^3}$

**Mitat:**

$$h := 1305 \text{ mm}$$

$$b := 190 \text{ mm}$$

$$\text{Palkin pituus: } L := 15540 \text{ mm}$$

$$\text{Tuen pituus: } b_{l.v} := 165 \text{ mm} \quad b_{l.o} := 540 \text{ mm}$$

$$\text{Palkin jänneväli: } L_0 := L - \frac{b_{l.v} + b_{l.o}}{2} = 15.188 \text{ m}$$

$$\text{Räystäspituus } l_r := 800 \text{ mm}$$

$$\text{k-jako } k := 7100 \text{ mm}$$

**Kuormat:**

$$\text{Yläpohjan rakenne: } g_{k.y.p} := 0.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Ripustus: } g_{k.r} := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Omapaino ilman liimapuuta: } g_{k.1} := g_{k.y.p} + g_{k.r} = 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Liimapuu: } g_{k.2} := h \cdot b \cdot g_p = 1.046 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Lumikuorma: } q_k := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Lumikuorma KRT: } p_{q,k} := q_k \cdot k = 14.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Yläpohjan omapaino KRT: } p_{g,k} := g_{k.1} \cdot k + g_{k.2} = 6.726 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Kuormat:**

$$P_d := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot (g_{k.1} \cdot k + g_{k.2}) + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot (q_k \cdot k) = 29.034 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Taivutuskestävyys**

$$M_d := \frac{P_d \cdot L_0^2}{8} = 837.135 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{m,d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} = 15.523 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$\sigma_{m,d} = 15.523 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_{m,d} = 19.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Leikkauskestävyys**

$$V_d := \frac{P_d \cdot L_0}{2} = 220.48 \text{ kN}$$

$$k_{cr} := 1$$

$$b_{ef} := k_{cr} \cdot b = 190 \text{ mm}$$

$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = 1.334 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_d = 1.334 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_{v,d} = 2.24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = 0.595$$

**Leikkauskestävyys maksimitaivutusjännityksen kohdalla**

$$I := \frac{b \cdot h^3}{12} = (3.519 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

$$S := \frac{b \cdot h^2}{8} = (4.045 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

$$\tau_{d,max} := \frac{V_d \cdot S}{I \cdot b} = 1.334 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_{d,max} = 1.334 \frac{N}{mm^2} \leq k_{cr} \cdot f_{v,d} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$$

### Leikkausjännitys tuella (vasen)

$$V_{red} := V_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h + b_{l,v}}{L_0}\right) = 180.195 \text{ kN}$$

$$\tau_{d,v} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b \cdot h} = 1.09 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_{d,v} = 1.09 \frac{N}{mm^2} \leq f_{v,d} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$$

### Leikkausjännitys tuella (oikea)

$$V_{red,2} := V_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h + b_{l,o}}{L_0}\right) = 174.751 \text{ kN}$$

$$\tau_{d,o} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b \cdot h} = 1.09 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$\tau_{d,o} = 1.09 \frac{N}{mm^2} \leq f_{v,d} = 2.24 \frac{N}{mm^2}$$

### Tukipainekestävyys (vasen)

$$V_d = 220.48 \text{ kN}$$

Tehollinen tukipaine pituus:

$$l := b_{l,v} = 165 \text{ mm} \quad l_{c,90,ef} := l + 30 \text{ mm} = 195 \text{ mm}$$

Tukipainekerroin:

$$k_{c,90} := 1.75$$

$$k_c := \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} = 2.068$$

$$\sigma_{c,90,d} := \frac{V_d}{b \cdot l} = 7.033 \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitusehto:

$$\sigma_{c,90,d} = 7.033 \frac{N}{mm^2} \leq k_c \cdot f_{c,90,d} = 3.309 \frac{N}{mm^2}$$

### Atrainhelan mitoitus

Lujuus:  $f_y := 500 \frac{N}{mm^2}$

Halkaisija:  $d := 20 \text{ mm}$

Pinta-ala:  $A_{tanko} := \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 314.159 \text{ mm}^2$

Tartuntapituus:  $L_a := 540 \text{ mm}$

Tankojen määrä:  $n := 2$

Lamellin paksuus:  $t := 45 \text{ mm}$

$d_{ef} := 1.25 \cdot d = 25 \text{ mm}$        $\gamma_{m,s} := 1.1$

$N_d := V_d = 220.48 \text{ kN}$

Liimasauvan tartuntalujuus:

$$f_{a,k} := 6.5 \cdot \left(1 - \frac{L_a}{100 \cdot d}\right) \cdot \frac{N}{mm^2} = 4.745 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{a,d} := \frac{f_{a,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 3.037 \frac{N}{mm^2}$$

Terästankoliitoksen tartuntavoimakapasiteetti

$$N_{R,d,teräs} := \frac{f_y}{\gamma_M} \cdot n \cdot A_{tanko} = 251.327 \text{ kN}$$

$$N_{R,d,liimaus} := n \cdot \pi \cdot d_{ef} \cdot f_{a,d} \cdot L_a = 257.59 \text{ kN}$$

Mitoitusehto (koko tukireaktio siirtyy liimatankojen kautta)

$$N_d = 220.48 \text{ kN} \leq N_{R.d.teräs} = 251.327 \text{ kN}$$

$$N_d = 220.48 \text{ kN} \leq N_{R.d.liimaus} = 257.59 \text{ kN}$$

Puristusjännitys pilarissa teräslevyn alueella

$$A := 90 \text{ mm} \cdot 180 \text{ mm} = (1.62 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{c.0.d} := \frac{N_d}{A} = 13.61 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Pilarin puristuslujuus syysuunnassa mitoitusehto:

$$\sigma_{c.0.d} = 13.61 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_{c.0.d} = 15.68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teräslevyn taivutusmomentti tukireaktiossa

$$e := 40 \text{ mm} \quad b_{teräs} := 90 \text{ mm}$$

$$M_{d.teräs} := \frac{\sigma_{c.0.d} \cdot e^2}{2} \cdot b_{teräs} = (9.799 \cdot 10^5) \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Teräslevyn taivutusjännitys

$$W := \frac{b_{teräs} \cdot t^2}{6} = (3.038 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{b.d} := \frac{M_{d.teräs}}{W} = 32.26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teräslevyn taivutuslujuus

$$f_k := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_d := \frac{f_k}{1.1} = 322.727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mititusehto:

$$\sigma_{b.d} = 32.26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_d = 322.727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Tukipainekestävyys (oikea)**

$$V_d = 220.48 \text{ kN}$$

Tehollinen tukipaine pituus:

$$l_2 := b_{i,o} = 540 \text{ mm} \quad l_{c,90,ef,2} := l_2 + 30 \text{ mm} = 570 \text{ mm}$$

Tukipaine kerroin:

$$k_{c,2} := \frac{l_{c,90,ef,2}}{l} \cdot k_{c,90} = 6.045$$

$$\sigma_{c,90,d,2} := \frac{V_d}{b \cdot l_2} = 2.149 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto:

$$\sigma_{c,90,d,2} = 2.149 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq k_c \cdot f_{c,90,d} = 3.309 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Kiepahduskestävyys:**

Tehollinen kiepahdustuenväli  $a := 2500 \text{ mm}$   $l_{ef} := a = 2.5 \text{ m}$

$c := 0.7$  (liimapuu GL30c)

Kriittinen taivutusjännitys

$$\sigma_{m,crit} := \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0.05} = 83.652 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Palkin suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel} := \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0.599$$

$k_{crit} := 1$  kun  $\lambda_{rel} = 0.599 < 0.75$

Mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} = 15.523 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} = 19.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = 0.808$$

**Taipuma:**

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = (3.519 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

Hetkellinen taipuma pysyvstä kuormasta:

$$w_{inst.G} := \frac{5 \cdot p_{g.k} \cdot L^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 23.571 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvasta kuormasta:

$$w_{inst.Q} := \frac{5 \cdot p_{g.k} \cdot L^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 11.164 \text{ mm}$$

Virumaluku:  $k_{def} := 0.6$  (liimapuu, käyttöluokka 2)

Liikkuvan kuorman muuttuva osuus:  $\psi_{2.1} := 0.2$

$$w_{fin} := (1 + k_{def}) \cdot w_{inst.G} + (1 + \psi_{2.1} \cdot k_{def}) \cdot w_{inst.Q} = 50.218 \text{ mm}$$

Mitoitusehto:

$$w_{fin} = 50.218 \text{ mm} \leq w_{fin.sall} := \frac{L_0}{200} = 75.938 \text{ mm}$$