

Liimapuu käsikirja

OSA 3



SUOMEN LIIMAPUUYHDISTYS RY JA PUUINFO OY

ALKUSANAT

Ensimmäinen ruotsalainen Limträhandboken julkaistiin 1979. Siitä tuli nopeasti puurakentajien arvostama suunnitteluopas, jonka myöhempiä painoksia käännettiin myös suomeksi ja norjaksi ja muokattiin vastaamaan paikallisia määräyksiä. Edellinen suomenkielinen Liimapuukäsikirja julkaistiin vuonna 2003.

Vuonna 2011 Arbio AB (Sveriges Skogsindustrier ja Svenskt Trä) Ruotsista, Norske Limtreprodusenters Forening Norjasta ja Puuinfo Oy (Puuinfo Oy ja Suomen Liimapuuyhdistys ry) käynnistivät yhteishankkeen, missä Liimapuukäsikirjaa laajennettiin ja se uudistettiin vastaamaan eurokoodijärjestelmää. Yhteishankkeessa laadittiin seuraavat kolme englanninkielistä Liimapuukäsikirjan käsikirjoitusta, joita ei sellaisenaan julkaistu

- Glulam Handbook, Volume I, joka sisältää liimapuutietoutta ja opastaa suunnittelussa
- Glulam Handbook, Volume II, joka antaa perus- ja taustatiedot liimapuurakenteiden mitoituksesta
- Glulam Handbook, Volume III, joka esittää mitoitusmenetelmät suppeassa muodossa ja laskentaesimerkein selvennettyinä.

Kukin osallistuva maa muokkasi englanninkielisistä käsikirjoituksista oman kansallisen liimapuukäsikirjansa, joissa on otettu huomioon kunkin maan eurokoodien kansallisissa liitteissä määritellyt parametrit.

Suomen osallistumisen yhteishankkeeseen ja suomenkielisen Liimapuukäsikirjan laatimisen rahoittivat Rakennustuotteiden Laatu Säätiö, Puuinfo Oy, Suomen Liimapuuyhdistys ry ja sen jäsenyritykset, joita ovat

- Anaika Wood Oy Ltd
- Finland Laminated Timber Oy Ltd
- Finnlamelli Oy
- Keitele Engineered Wood Oy
- Kestopalkki LPJ Oy
- Kohiwood Oy Ltd
- Lameco LHT Oy
- Late-Rakenteet Oy
- Metsä Wood, Kuningaspalkki
- Pölkky Oy
- Safewood Oy Ltd
- Stora Enso Wood Products Oy Ltd
- Versowood Oy

Projektin johtoryhmään ja toimitusneuvostoon kuuluivat

- Leif Cederlöf, Setra Trävaror AB, Ruotsi
- Roberto Crocetti, Lundin teknillinen korkeakoulu, Ruotsi
- Mikael Fonselius, Woodvalue, Suomi
- Johan Fröbel, Svenskt Trä, Ruotsi
- Holger Gross, Gross Production AB, Ruotsi
- Jouni Hakkarainen, Metsä Wood, Suomi
- Åge Holmestad, Moelven Limtre AS, Norja
- Thomas Johansson, Moelven Töreboda AB, Ruotsi
- Rune Karlsson, Rune Karlsson Byggprojektering i Hedemora, Ruotsi
- Tomi Koskenniemi, Versowood Oy, Suomi
- Greger Lindgren, Martinson Group AB, Ruotsi

- Harald Liven, Moelven Limtre AS, Norja.
- Päivi Myllylä, Suomen Liimapuuyhdistys ry, Suomi
- Gunnar Utskot, Vestlandske Limtre Industri AS, Norja
- Tero Vesanen, Suomen Liimapuuyhdistys ry, Suomi
- Liimapuukäsikirjan kuvituksesta vastasivat
- Cornelia Thelander, Thelander Arkitektur & Design AB, Ruotsi
- Vendela Martinae, Thelander Arkitektur & Design AB, Ruotsi

Graafisesta muotoilusta vastasivat

- Proservice Reklambyrå i Malmö AB, Ruotsi
- Rakennustuoteteollisuus RTT ry / puutuotejaosto
- Puuinfo Oy

Suomen osaprojektin johtoryhmään ja toimitusneuvostoon kuuluivat

- Tero Vesanen, Suomen Liimapuuyhdistys ry
- Päivi Myllylä, Suomen Liimapuuyhdistys ry
- Tomi Toratti, Rakennustuoteteollisuus RTT ry
- Mikael Fonselius, Woodvalue

Pohjoismaisen projektin tuloksena syntyneiden tiedostojen copyright on projektin osapuolilla

- Föreningen Sveriges Skogsindustrier
- Norske Limtreprodusenters Forening
- Puuinfo Oy ja Suomen Liimapuuyhdistys ry

GLULAM HANDBOOK, VOLUME III

Tämän kirjan tarkoitus on auttaa lukijaa suunnittelemaan liimapuurakenteita. Kirja on tarkoitettu Liimapuukäsikirjan osaa 2 täydentäväksi. Erityisesti tarkastellaan pitkien jännevälien rakenteita ja niiden liitosten suunnittelua. Lisäksi käsitellään liimapuurakenteiden heikkojen kohtien vahvistamista. Kirja on jaettu kahteen erilliseen osaan:

- A, johdanto missä on yhtälöt, käytettäviä arvoja ja suunnittelumenetelmiä
- B, kokoelma laskentaesimerkkejä

Kirja noudattaa pääasiassa standardia EN 1995-1-1 (eurokoodi 5). Muita suunnittelumenetelmiä on esitetty, kun ne puuttuvat eurokoodi 5:stä tai kun eurokoodi 5:n esittämä menettely ei kirjoittajien mielestä ole riittävä. Esimerkiksi reiällisten palkkien mitoitus, palkkien vetopuolen lähelle tulevat kuormat, palkkien vahvistaminen syitä vastaan kohtisuoraa vetoa vastaan on esitetty Saksan kansallisen liitteen DIN-EN 1995-1-1/NA mukaisesti. Kirjassa viitataan myös sveitsiläiseen standardiin SIA 265:2003 ja tutkimukseen ja käytännön kokemukseen perustuviin menetelmiin

Rakennusmääräysten, tutkimusraporttien ja muiden asiakirjojen tulkinta on kirjoittajien tekemä ja niiden tarkoitus on esittää vallitseva pohjoismainen mitoituskäytäntö. Esitetty aineisto on ohjeellinen; rakennesuunnittelija vastaa aina mitoituksesta.

Kirjan pääasiallinen kirjoittaja on Prof. Roberto Crocetti Lundin yliopistosta Ruotsista. Laskentaesimerkkien muokkaamisesta vastasi Simone Rossi, PhD opiskelija Trenton yliopistosta Italiasta, yhdessä Dr. Tiziano Sartorin kanssa, myös Trenton yliopistosta ja Luca Costan kanssa, joka on opiskellut Lundin yliopistossa. Prof. emeritus Kolbein Bell, NTNU, Trondheimistä Norjasta on tarkastanut käsikirjoituksen ja tehnyt siihen muutamia korjauksia ja muutosehdotuksia.

LIIMAPUUKÄSIKIRJA OSA 3

Suomenkielinen Liimapuukäsikirja Osa 3 on muokattu pohjoismaisessa projektissa laaditun englanninkielisen julkaisemattoman käsikirjoituksen Glulam Handbook, Volume III pohjalta. Pohjoismaisessa projektissa tehdyt tulkinnot eurokoodista voivat yksityiskohdissaan poiketa julkaisun RIL 205 tulkinnoista.

Tässä julkaisussa esitetyt säännöt ja lukuarvot perustuvat Suomen kansallisessa liitteessä annettuihin arvoihin, jotka on esitetty Ympäristöministeriön asetuksissa eurokoodistandardien soveltamisesta talonrakentamisessa ja Liikenneviraston vastaavissa sillanrakennusta koskevilla ohjeilla. Mahdollisista poikkeamista on huomautettu.

Suomenkielisen käännöksen ja asiasisällön muokkaamisen vastaamaan suomalaisia määräyksiä ja käytäntöjä tekivät

- Kirsti Riipola, Woodvalue
- Mikael Fonselius, Woodvalue

Käsikirjoituksen ovat tarkistaneet Tero Vesanen, Päivi Myllylä, Tomi Toratti sekä Suomen Liimapuuyhdistys ry:n jäsenyritykset.

ISBN 978-952-99868-4-2 (koko teos)

ISBN 978-952-99868-7-3 (osa 3)

Julkaisija ja copyright

- Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy

Suomen Liimapuuyhdistys ry toimii suomalaisen liimapuuteollisuuden kansallisena ja kansainvälisenä yhteistyöelimenä. Yhdistys ylläpitää liimapuun tuotanto- ja toimitustilastoja, osallistuu liimapuun eurooppalaiseen ja kansainväliseen standardisointiin, sekä edistää liimapuun menekkiä, tutkimusta ja kehitystä.

Puuinfon tehtävänä on luoda kysyntää puutuotteille rakentamisessa ja sisustamisessa. Päämääräänsä Puuinfo pyrkii välittämällä tutkittua ja puolueetonta tietoa puun käytöstä käyttäjäystävällisessä muodossa. Puuinfon omistavat perustajaosakkaat Metsäteollisuus ry, Suomen Sahat ry ja Suomen Puutavara- ja Rakennustarvikekauppiaasyhdistys SPY ry sekä Maa- ja Metsätaloustuottajain keskusliitto MTK ry.

Tämän kirjan kaikki oikeudet kuuluvat Suomen Liimapuuyhdistykselle ja Puuinfole. Sisältö on kansainvälisen tekijänoikeuslain suojaama. Näiden oikeuksien loukkaaminen on ankarasti kielletty.

Kaiki teksti, kuvaukset, kuvat ja taulukot edustavat yleistä tasoa eivätkä toimi osana mitään sopimusta. Liimapuukäsikirjassa esitettyyn tietoon tai ratkaisuihin ei saa viitata osana sopimusasiakirjoja. Kirjassa voi esiintyä teknisiä virheitä tai kirjoitusvirheitä tai muun tyyppistä epätarkkuutta. Puuinfo ja Suomen Liimapuuyhdistys eivät ota yhdessä tai erikseen mitään vastuuta näistä mahdollisista virheistä. Annettujen tietojen soveltamisesta ja soveltuvuudesta aiottuun käyttökohteeseen vastaa aina tiedon käyttäjä.

Verkossa julkaistavia Liimapuukäsikirjan osia 1-3 voidaan päivittää ilman eri ilmoitusta, tieto päivityksestä löytyy verkkosivulta www.liimapuu.fi ja www.puuinfo.fi. Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo eivät takaa tietojen virheettömyyttä eivätkä vastaa minkäänlaisista vahingoista, jotka saattavat johtua Liimapuukäsikirjan käytöstä.

Helsinki, helmikuussa 2015

Tero Vesanen ja Mikko Viljakainen

Osa A

ALKUSANAT	1
1 KÄYTETTY KOORDINAATISTO	6
2 PUUAINEN KOSTEUSMUODONMUUTOS	7
3 KUORMIEN AIKALUOKAT (SFS-EN 1995-1-1, 2.3.1.2)	8
4 KÄYTTÖLUOKAT (SFS-EN 1995-1-1, 2.3.1.3)	9
5 KUORMITUSYHDISTELMÄT	10
5.1 Murtorajatila (ULS)	10
5.2 Käyttörajatila (SLS)	11
Muodonmuutos	11
6 TERÄSRAKENTEIDEN YLEISIÄ MITOITUSSÄÄNTÖJÄ	14
7 PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU	22
8 NURJAHTAMATTOMIEN RAKENTEIDEN MURTORAJATILAT	26
9 NURJAHTAVIEN RAKENTEIDEN MURTORAJATILAT	35
10 POIKITTAISEN VEDON RASITTAMAT RAKENNEOSAT	44
10.1 Lovet	44
10.2 Palkin alareunaan liittyvät vetosauvat	46
10.3 Reiät	48
11 VAIHTUVA POIKKILEIKKAUS JA KAAREVAT MUODOT	52
11.1 Palkkien kiepahdus kun poikkileikkauksen korkeus ei ole vakio	54
12 KÄYTTÖRAJATILA	63
12.1 Yleistä	63
12.2 Taipumat	64
13 KIRVESMIESLIITOKSET	65
14 METALLISIN PUIKKOLIITTIMIN TEHDYT LIITOKSET	66
14.1 Yleistä	66
14.2 Puu-puu liitokset	69
14.3 Teräslevyin tehdyt liitokset	73
14.4 Upotetuin teräslevyin tehdyt liitokset	75
14.5 Liitinvälit	81
Naulauslevyin tehdyt liitokset	88
14.6 Liimatankoliitokset	92
15 PILAREIDEN TUKEMINEN NURJAHDUSTA VASTAAN	95
16 PALKKIEN TUKEMINEN KIEPAHDUSTA VASTAAN	96
17 LIIMAPUUN SUUNNITTELUARVOJA	99
18 VIITTAUKSET KIRJALLISUUTEEN	101
18.1 Viittaukset standardeihin	101

Liimapuukäsikirja osa 3 koostuu kahdesta osasta A ja B:

- Osa A sisältää johdannon, jossa on yhtälöt, käytettävät arvot, ja suunnittelumenetelmät
- Osa B sisältää kokoelman laskentaesimerkkejä

Osa B

Esimerkki 1:	Yksinkertainen palkki	103
Esimerkki 2:	Harjapalkki	110
Esimerkki 3:	Kaareva harjapalkki	117
Esimerkki 4:	Kaareva palkki	125
Esimerkki 5:	Pilari	132
Esimerkki 6:	Jäykistys	139
Esimerkki 7:	Ristikko	148
Esimerkki 8:	Lattiapalkin ja sen liitoksen mitoittaminen paloilanteessa	152
Esimerkki 9:	Kaarevanurkkainen kolminivelkehä	157
Esimerkki 10:	Kolminivelkaari	165
Esimerkki 11:	Reiällinen palkki	173
Esimerkki 12:	Kaarevan harjapalkin vahvisus harjalle syntyviä vetovoimia vastaan	178
Esimerkki 13:	Vetotangon liitos	182

Liimapuukäsikirja osa 3 koostuu kahdesta osasta A ja B:

- Osa A sisältää johdannon, jossa on yhtälöt, käytettävät arvot, ja suunnittelumenetelmät
- Osa B sisältää kokoelman laskentaesimerkkejä

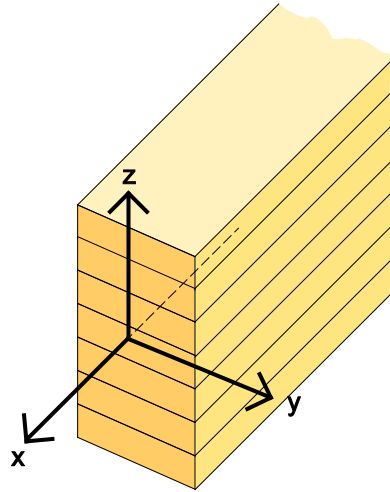
1 KÄYTETTY KOORDINAATISTO

Käytetty koordinaatisto on seuraava:

x-akseli rakennusosan pituussuunnassa

y-akseli poikkileikkaustasossa (painovoimaa vastaan kohtisuorassa)

z-akseli poikkileikkaustasossa (painovoiman vaikutussuunnassa)



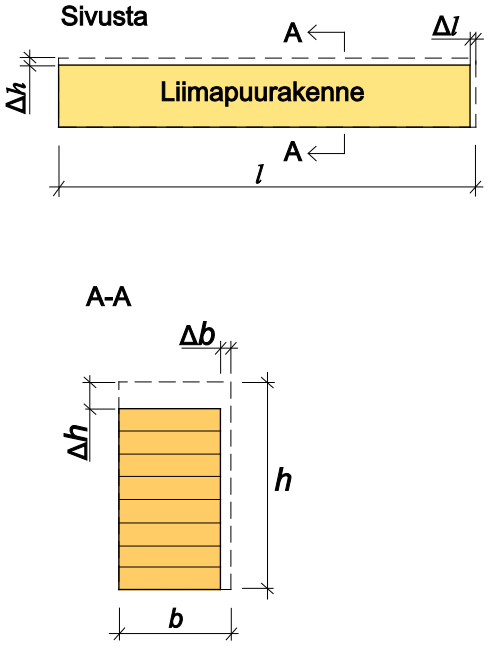
KUVA 1-1

Käytetty koordinaatisto

2 PUUAINEN KOSTEUSMUODONMUUTOS

TAULUKKO 2-1

Puuaineen kosteusmuodonmuutos

$\Delta h \text{ (tai } \Delta b) = \alpha_{\perp} \cdot \frac{\Delta \omega}{100} \cdot h \text{ (tai } \cdot b)$ $\Delta l = \alpha_{\parallel} \cdot \frac{\Delta \omega}{100} \cdot l$ missä: $\alpha_{\perp} = 0,24$ muodonmuutoskerroin kohtisuoraan syitä vasten $\alpha_{\parallel} = 0,01$ muodonmuutoskerroin syiden suunnassa h, b, l rakennusosan korkeus, leveys ja pituus $\Delta h, \Delta b, \Delta l$ rakennusosan korkeuden, leveyden ja pituuden muutos $\Delta \omega$ puuaineen kosteuspitoisuuden muutos prosentteina. Tavanomaisia $\Delta \omega$ arvoja ovat: lämmitetyssä sisätilassa olevat rakennusosat: $\Delta \omega = 4 \dots 6$ kylmässä sisätilassa olevat rakennusosat: $\Delta \omega = 2 \dots 3$ ulkona olevat rakennusosat: $\Delta \omega = 5 \dots 8$	
--	---

3 KUORMIEN AIKALUOKAT (SFS-EN 1995-1-1, 2.3.1.2)

TAULUKKO 3-1

Kuormien aikaluokat

Kuorman aika-luokka		Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka	Kuormitukset
Pysyvä	P	yli 10 vuotta	Oma paino Pysyvästi rakenteeseen kiinnitetyt koneet, laitteet ja kevyet väliseinät Maanpaine
Pitkäaikainen	L	6 kuukautta – 10 vuotta	Varastotilojen tavarakuormat (luokka E), vesisäiliökuorma
Keskipitkä	M	1 viikko – 6 kuukautta	Lumi Lattioiden ja parvekkeiden hyötykuorman pintakuormat luokissa A – D Autotallien ja liikennöintialueiden hyötykuormat (luokat F ja G) Kosteuden vaihtelun aiheuttamat kuormitukset
Lyhytaikainen	S	alle yksi viikko	Portaiden hyötykuormat Hyötykuorman pistekuorma (Q_k) Väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat Kunnossapito- tai henkilökuorma katolla (luokka H) Ajoneuvokuormat luokassa E Kuljetusvälinekuormat Asennuskuormat
Hetkellinen	I		Tuuli Onnettomuuskuorma

4 KÄYTTÖLUOKAT (SFS-EN 1995-1-1, 2.3.1.3)

4.1.1.1 Käyttöluokka 1

Useimpien havupuulajien kosteuspitoisuus ei ylitä 12 %, mikä vastaa olosuhteita joissa lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus ylittää 65 % vain muutamana viikkona vuodessa.

Esimerkkejä: Käyttöluokkaan 1 kuuluu puurakenne, joka on lämmitetyissä sisätiloissa tai vastaavissa kosteusoloissa. Käyttöluokkaan 1 voidaan yleensä lukea myös lämpöeristekerroksessa olevat rakenteet sekä palkit, joiden vetopuoli on lämmöneristeen sisällä.

Myös pysyvästi lämmitetyn rakennuksen seinärakenteet jotka on suojattu tiiviillä ja tuuletetulla verhouksella kuuluvat käyttöluokkaan 1.

4.1.1.2 Käyttöluokka 2

Useimpien havupuulajien kosteuspitoisuus ei ylitä 20 %, mikä vastaa olosuhteita joissa lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus ylittää 85 % vain muutamana viikkona vuodessa.

Esimerkkejä: Käyttöluokkaan 2 kuuluu ulkoilmassa kuivana oleva puurakenne. Rakenteen tulee olla katetussa ja tuuletetussa tilassa sekä alta ja sivuilta hyvin kastumiselta suojattu. Tähän käyttöluokkaan kuuluvat yleensä esimerkiksi rossipohjan ja kylmän ullakkotilan puurakenteet.

Myös ajoittain kylmillään olevien tuuletettujen rakennusten rakenteet joissa ei säilytetä kosteutta muodostavia aineita, kuten kesämökit, lämmittämättömät varastot ja autotallit ja maatalousrakennukset kuuluvat käyttöluokkaan 2.

4.1.1.3 Käyttöluokka 3

Useimpien havupuulajien kosteuspitoisuus ylittää 20 %, eli ne ovat kosteampia kuin käyttöluokassa 2.

Esimerkkejä: Käyttöluokkaan 3 kuuluu ulkona säälle alttiina, kosteassa tilassa tai veden välittömän vaikutuksen alaisena oleva puurakenne. Arvioitaessa puurakenteen säilyvyyttä käyttöluokka 3 jaetaan vielä kahteen erilaiseen kosteusaltistumisastetta kuvaavaan alaluokkaan (ks. EN 335-1:2006).

Myös maakosketuksessa olevat rakenteet ja telineet¹ kuuluvat käyttöluokkaan 3.

Puun tasapainokosteuden lisäksi käyttöluokan valinnassa tulee kiinnittää huomiota kosteuden vaihteluihin. Kosteuden vaihtelun vaikutus puurakenteeseen voi olla suurempi kuin suurenkin tasaisen kosteuden vaikutus. Käyttöluokassa 1 tulee kiinnittää erityistä huomiota puutavaran halkeiluvaaraan.

¹ Telineet eivät kuulu EN 1995-1-1 soveltamisalaan.

5 KUORMITUSYHDISTELMÄT

5.1 Murtorajatila (ULS)

Eurokoodi 0:n mukaan on tarkistettava tarvittaessa seuraavat murtorajatilat:

- Tasapaino (EQU)*. Tarkastelulla varmistetaan, ettei rakenne tai mikään sen osa ole epästabili. Tarkastelu tehdään esim. mitoitettaessa rakennuksen ankkurointia perustuksiin tai sellaisia jatkuvien palkkien laakereita, joihin kohdistuu nostovoimaa.
- Lujuus (STR)*. Tarkastelulla varmistetaan, ettei rakenne tai mikään sen osa murru jännitysten tai epästabiiliuden vuoksi. Muodonmuutoksien vaikutus rakenteen toimintaan pitää ottaa huomioon.
- Geotekninen (GEO)*. Tarkastelulla varmistetaan, että rakennuksen perustuksella on vaadittu lujuus ja jäykkyys.
- Väsyminen (FAT)*. Tarkastelulla varmistetaan, ettei rakenteeseen tule väsymismurtumaa.

Puulle ja puurakenteille määräävä murtorajatilatarkastelu on yleensä ULS(b) eli *STR*.

TAULUKKO 5-1

Eri luotettavuusluokkien² kuormakertoimet K_{FI} Suomessa

Luotettavuusluokka	Vaurioitumisen mahdolliset seuraamukset	K_{FI}
RC3	Suuri vakavan henkilövahingon riski	1,1
RC2	Keskisuuri vakavan henkilövahingon riski	1,0
RC1	Vähäinen vakavan henkilövahingon riski	0,9

TAULUKKO 5-2

Kuormien suunnitteluarvot rajatiloissa tasapainon menetys (EQU) ja lujuus (STR). Kuormakertoimet K_{FI} ks. Taulukko 2-1. Puurakenteilla tapaus STR 2 on yleensä murtorajatilassa määräävä.

Kuorman tyyppi	Kuormitusyhdistelmä (ks. SFS-EN 1990 kans. liite)		
	STR-1 (sarja B)	STR-2 (sarja B)	EQU (sarja A)
	<i>Lujuus</i>	<i>Lujuus</i>	<i>Vakavuus</i>
Pysyvä kuorma G			
Epäedullinen	$1,35 K_{FI} G_{kj, sup}$	$1,15 K_{FI} G_{kj, sup}$	$1,1 K_{FI} G_{kj, sup}$
Edullinen	$0,9 G_{kj, inf}$	$0,9 G_{kj, inf}$	$0,9 G_{kj, inf}$
Muuttuva kuorma Q			
Määräävä kuorma Q_{k1}	- - -	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$
Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat $\sum \psi_{0,i} Q_{k,i}$	$\gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,i} Q_{k,i}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

² RIL 205:ssä käytetään termiä seuraamusluokka, SFS-EN 1990 Suomen kansallisessa liitteessä luotettavuusluokka. Seuraamusluokkien sisältöä on selitetty laajasti kansallisen liitteen taulukossa B1(FI).

Määrävällä kuormitusyhdistelmällä on suurin vaikutus suunnittelussa (esim. suurin taivutusmomentti, leikkausvoima jne.). Sitä määritettäessä kuormitusyhdistelmät pitää muodostaa siten, että kukin muuttuva kuorma vuorollaan on määrävänä kuormana. Esimerkiksi kun tarkastellaan lujuusrajatilaa kaksitukisen palkin tapauksessa, niin kuormat ovat palkin oma paino ja pysyvä kuorma G_k , keskipitkän aikaluokan muuttuva kuorma $Q_{k,1}$ ja riippumaton hetkellinen kuorma $Q_{k,2}$. Kun sovelletaan murtorajatilaa STR-2, niin seuraavat kuormitusyhdistelmät pitää tarkistaa määritettäessä kuormien vaikutusta LC_i (esim. taivutusmomentin arvoon):

$$\begin{aligned} K_{FI} \cdot 1,35 \cdot G_k &\rightarrow LC_1 \\ K_{FI} (1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,1}) &\rightarrow LC_2 \\ K_{FI} (1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,2}) &\rightarrow LC_3 \\ K_{FI} (1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot \psi_{0,2} \cdot Q_{k,2}) &\rightarrow LC_4 \\ K_{FI} (1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,2} + 1,5 \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}) &\rightarrow LC_5 \end{aligned}$$

Kun otetaan huomioon muunnoskerroimen k_{mod} arvot eri aikaluokissa, määrävä suunnittelu-arvo saadaan vertaamalla seuraavien yhtälöiden suureita LC_d :

$$LC_d = \max \begin{cases} LC_1 / k_{mod, \text{pysyvä}} \\ LC_2 / k_{mod, \text{keskipitkä}} \\ LC_3 / k_{mod, \text{hetkellinen}} \\ LC_4 / k_{mod, \text{hetkellinen}} \\ LC_5 / k_{mod, \text{hetkellinen}} \end{cases}$$

Hyvin usein kattorakenteille $Q_{k,1}$ on lumikuorma ja $Q_{k,2}$ on tuulikuorma. Sellaisessa tapauksessa LC_2 ja LC_3 (kattokaltevuuden ollessa suuri) ovat tavallisesti määrävät kuormitusyhdistelmät.

5.2 Käyttörajatila (SLS)

Puurakenteiden mitoituksessa on tarkistettava seuraavat käyttörajatilat:

- Muodonmuutos
- Värähtelyt

Muodonmuutos

Kuormitusyhdistelmät on annettu Eurokoodi 0:ssa (SFS-EN 1990). Ne ovat:

- Ominaisarvojen yhdistelmä
- Tavallinen yhdistelmä
- Kvasipermanentti yhdistelmä

TAULUKKO 5-3

Käyttörajan kuormitusyhdistelmät SFS-EN 1990 mukaan. Yhdistelykertoimet ψ ks. Taulukko 5-4.

Kuorman tyyppi	Kuormitusyhdistelmä		
	Ominaisarvot ¹	Tavallinen ²	Kvasipermanentti ³
Pysyvä kuorma G	$1,0 \cdot G_K$	$1,0 \cdot G_K$	$1,0 \cdot G_K$
Muuttuva kuorma Q			
Määräävä kuorma Q_{K1}	$1,0 \cdot Q_{Ki}$	$\psi_{1,1} \cdot Q_{K,1}$	
Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat $\sum \psi_{0,i} \cdot Q_{K,i}$	$\psi_{0,i} \cdot Q_{K,i}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{K,i}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{K,i}$

¹ aiheuttaa pysyvän vaurion (palautumaton muodonmuutos)

² aiheuttaa tilapäisen suuren muodonmuutoksen (palautuva muodonmuutos)

³ aiheuttaa muodonmuutoksen kuormien pitkän vaikutusajan vuoksi (virumisen aiheuttama muodonmuutos)

TAULUKKO 5-4

Yhdistelykerroimet ψ SFS-EN 1990 mukaan. ψ_0 = muuttuvan kuorman yhdistelykerroin, ψ_1 muuttuvan kuorman tavallisesti toistuvan arvon yhdistelykerroin, ψ_2 muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin.

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

¹ Luokkajako otettu Ympäristöministeriön asetuksesta Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa 151007

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

^{**))} Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.

6 TERÄSRAKENTEIDEN YLEISIÄ MITOITUSSÄÄNTÖJÄ

TAULUKKO 6-1

Teräksen lujuuden suunnitteluarvo murtorajatilassa (ULS).

$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$	
$f_{ud} = \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$	
missä:	
f_{yd}	on myötörajan suunnitteluarvo
f_{ud}	on vetomurtolujuuden suunnitteluarvo
f_y	on myötörajan ominaisarvo
f_u	on vetomurtolujuuden ominaisarvo
γ_{M0}	on osavarmuusluku poikkileikkausluokasta riippumatta, $\gamma_{M0} = 1,00$ (myötämisen suhteen)
γ_{M2}	on osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen, $\gamma_{M2} = 1,25$

TAULUKKO 6-2

Materiaaliominaisuuksia

Kimmokerroin	$E = 210000 \text{ N/mm}^2$
Liukukerroin	$G = 81000 \text{ N/mm}^2$
Lämpölaajenemiskerroin	$\alpha = 12 (\mu\text{m/m})/^{\circ}\text{C}$
Poisson'n vakio	$\nu = 0,3$
Tiheys	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

TAULUKKO 6-3

Standardin EN 10025-2 mukaisten kuumavalssattujen rakenneterästen myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-1 Taulukko 3.1)

Teräslaji	Ainespaksuuden nimellisarvo t [mm]			
	$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 < t \leq 80 \text{ mm}$	
	$f_y [\text{N/mm}^2]$	$f_u [\text{N/mm}^2]$	$f_y [\text{N/mm}^2]$	$f_u [\text{N/mm}^2]$
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

TAULUKKO 6-4

Standardin EN 15048-1 mukaisten pulttien ja ruuvien myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-8 Taulukko 3.1)

Lujuusluokka	f_{yb} [N/mm ²]	f_{ub} [N/mm ²]
4.6	240	400
4.8	320	400
5.6	300	500
5.8	400	500
6.8	480	600
8.8	640	800
10.9	900	1000

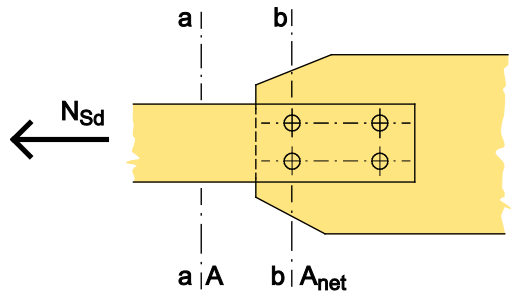
TAULUKKO 6-5

Pulttien nimellispinta-ala A_n ja nettopinta-ala A_s

Pultin tyyppi	Nimellishalkaisija d_n [mm]	Nimellispinta-ala A_n [mm ²]	Vedetty nettopinta-ala A_s [mm ²]
M12	12	113	84
M16	16	201	157
M20	20	314	245
M24	24	452	353
M27	27	572	459
M30	39	707	561

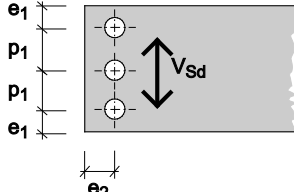
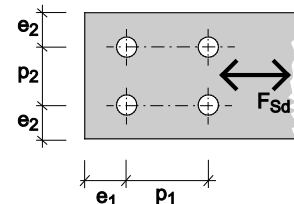
TAULUKKO 6-6

Nettopoikkileikkauksen murtuminen, EC3 kappale 6.2.3.

<u>Leikkaus a-a: poikkileikkaus</u> $N_{sd} \leq N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\gamma_{M0} = 1,0)$ <u>Leikkaus b-b: nettopoikkileikkaus</u> $N_{sd} \leq N_{Rd} = 0,9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (\gamma_{M2} = 1,25)$ missä: N_{sd} kuormittava normaalivoima, suunnittelu-arvo N_{Rd} kestävyys normaalivoimaa vastaan, suunnittelu-arvo f_y myötörajan ominaisarvo f_u vetomurtolujuuden ominaisarvo A nimellispoikkileikkauksen pinta-ala A_{net} nettopoikkileikkauksen pinta-ala γ_{M0} ja γ_{M2} osavarmuuskertoimet ($\gamma_{M0} = 1,0$ ja $\gamma_{M2} = 1,25$)	
--	--

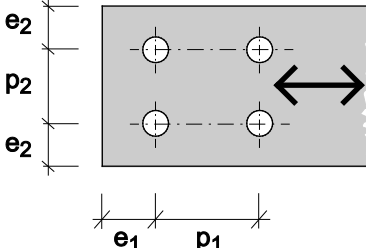
TAULUKKO 6-7

Pulttien etäisyydet ja käytetyt merkinnät, (a) leikkausrasitettu liitos, (b) vedetty tai puristettu liitos. (Merkintöjä e_2 ja p_2 käytetään myös vaikka mitattujen etäisyyksien suunta poikkeaa jännityksen suunnasta.)

a)  b) 	$1,2 \cdot d_0 \leq e_1 \leq \max \{12 \cdot t, 150 \text{ mm}\}$ $1,5 \cdot d_0 \leq e_2 \leq \max \{12 \cdot t, 150 \text{ mm}\}$ $2,2 \cdot d_0 \leq p_1 \leq \max \{14 \cdot t, 200 \text{ mm}\}$ $3,0 \cdot d_0 \leq p_2 \leq \max \{14 \cdot t, 200 \text{ mm}\}$			
	Suositellut etäisyydet [mm]			
	Pultti	$p_1; p_2$	e_1	e_2
	M12	40	30	25
	M16	55	40	30
	M20	70	50	40
	M24	80	60	50
	M27	90	70	55
	M30	100	75	60

TAULUKKO 6-8

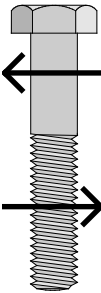
Pulttien reunapuristuskestävyyden ominaisarvo teräslevyn paksuuden t_p ollessa 10 mm. Arvot pätevät kun käytetään suositeltuja etäisyyksiä e_2 ja p_2 , ks. Taulukko 6-7. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan jakamalla ominaisarvo osavarmuuskertoimella $\gamma_{M2}=1,25$.

		$F_{b,Rk} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d$ $\alpha_b = \min \begin{cases} e_1 / (3 \cdot d_0) \\ p_1 / (3 \cdot d_0) - 0,25 \\ f_{ub} / f_u \\ 1 \end{cases}$ $k_1 = \min \begin{cases} e_1 / (3 \cdot d_0) - 1,7 \\ 2,5 \end{cases}$						
Pultin halkaisija d [mm]		12	16	20	22	24	27	30
Reiän halkaisija d_0 [mm]		13	18	22	24	26	30	33
Reunapuristuskestävyyden ominaisarvo [kN] ¹								
Pultin teräs-luokka	S235	83	107	136	151	166	182	204
	S275	99	127	163	181	198	218	244
	S355	118	151	193	214	235	258	289

¹ Muille levypaksuuksille t mm arvot saadaan kertomalla suhteella t/10.

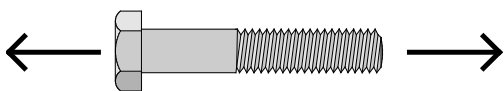
TAULUKKO 6-9

Leikkauskestävyyden ominaisarvo yhtä pultin leikettä kohti. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan jakamalla ominaisarvo osavarmuuskertoimella $\gamma_{M2}=1,25$.

		Kierteellisen osan leikkaus		$F_{v,Rk} = C_1 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ $C_1 = \begin{cases} 0,6 & \text{luokille 4.6 5.6 ja 8.8} \\ 0,5 & \text{luokille 4.8 5.8 6.8 ja 10.9} \end{cases}$				
Pultin halkaisija d [mm]	12	16	20	22	24	27	30	
Reiän halkaisija d ₀ [mm]	13	18	22	24	26	30	33	
Leikkauskestävyyden ominaisarvo [kN]								
Pultin teräsluokka	4.6	20	38	59	73	85	110	135
	5.6	25	47	73	91	106	138	168
	8.8	40	75	118	145	169	220	269
	10.9	42	78	122	151	176	229	280

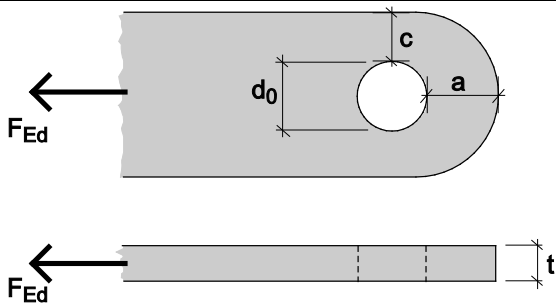
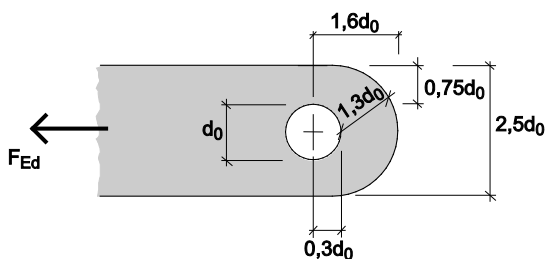
TAULUKKO 6-10

Vetokestävyyden ominaisarvo pulttia kohti. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan jakamalla ominaisarvo osavarmuuskertoimella $\gamma_{M2}=1,25$.

		$F_{t,Rk} = 0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s$						
Pultin halkaisija d [mm]		12	16	20	22	24	27	30
Vetokestävyyden ominaisarvo [kN]								
Pultin teräsluokka	4.6	30	56	88	109	127	165	202
	5.6	38	71	110	136	159	207	252
	8.8	61	113	176	218	254	330	404
	10.9	76	141	220	272	318	413	505

TAULUKKO 6-11

Akselitapillisen liitoksen mittavaatimukset SFS-EN 1993-1-8:2005 mukaan

Levyn paksuus t ja akselitapin paksuus d määrittäviä	
	$a \geq \frac{F_{E,d} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{2 \cdot d_0}{3}$ $c \geq \frac{F_{E,d} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{d_0}{3}$
Geometria määrittävä	
	$t \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{F_{E,d} \cdot \gamma_{M0}}{f_y}}$ $d_0 \leq 2,5 \cdot t$

TAULUKKO 6-12

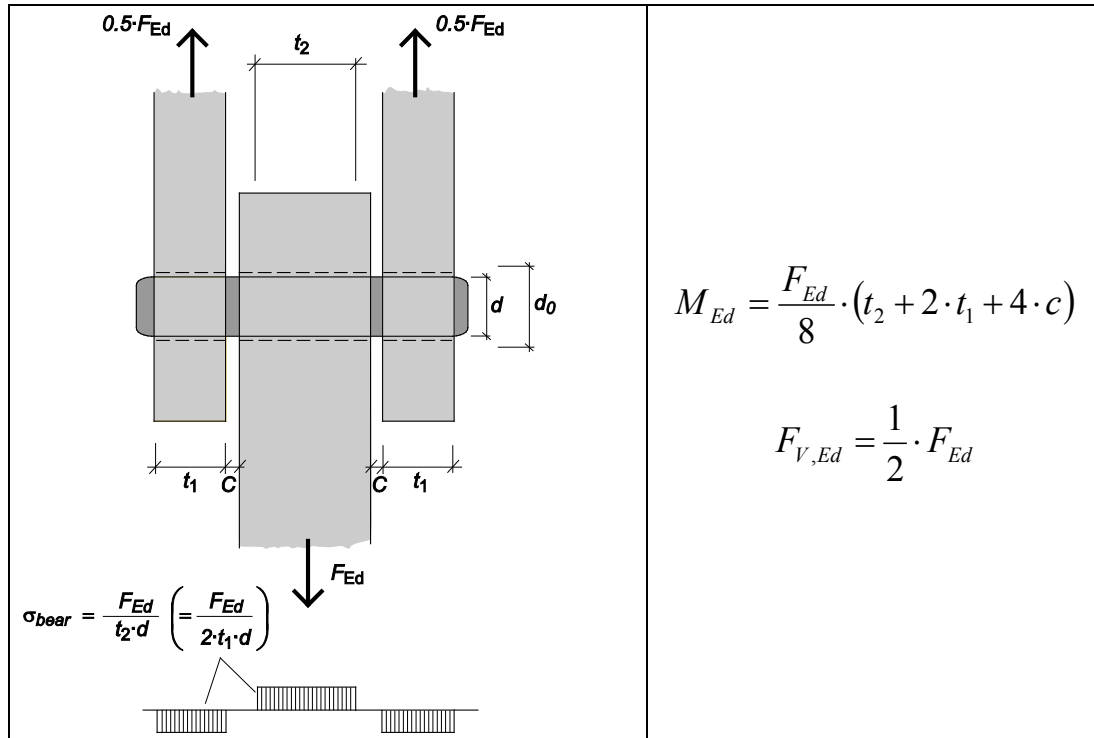
Akselitapillisen liitoksen mitoitusäännöt SFS-EN 1993-1-8:2005 mukaan

Murtumistapa	Vaatus
Akselitapin leikkautuminen (leikettä kohti)	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot A \cdot f_{u,p}}{\gamma_{M2}}$
Yhden levyn reunapuristuskestävyys	$F_{b,Rd} = \frac{1,5 \cdot t \cdot d \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
Akselitapin taivutuskestävyys	$M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot W \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}}$
Akselitapin yhdistetty leikkautuminen ja taivutus	$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (a)$
d	akselitapin halkaisija
f_y	akselitapin ja yhdistettävien levyjen myötörajoista pienempi
$f_{u,p}$	akselitapin vetomurtolujuus
$f_{y,p}$	akselitapin myötöraja
t	yhdistettävän levyn paksuus
A	akselitapin poikkileikkausala ($=\pi d^2/4$)
W	akselitapin taivutusvastus ($=\pi d^3/32$)

(a) M_{Ed} ja $F_{v,Ed}$ on määrittely, ks. Taulukko 6-13($\gamma_{M0} = 1,0$ ja $\gamma_{M2} = 1,25$)

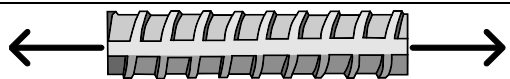
TAULUKKO 6-13

Kaksileikkeisen akselitapin taivutusmomentti ja leikkausvoima



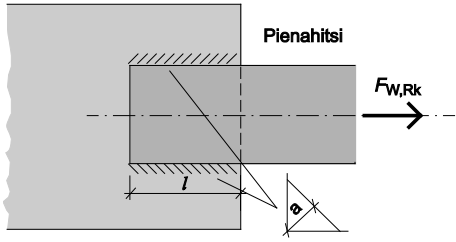
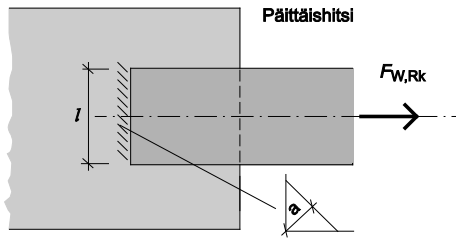
TAULUKKO 6-14

Puurakenteissa käytettyjen erikoistankojen vetokestävyyden ominaisarvoja. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan jakamalla ominaisarvo osavarmuuskertoimella $\gamma_{M2} = 1,25$.

		$F_{t,Rk} = f_{ub} \cdot A_s$				
Tangon nimellishalkaisija d [mm]	26,5	28	32	36	40	50
Halkaisija harjojen kohdalla [mm]	30	32	36	40	45	56
Nimellispinta-ala A _s [mm ²]	551	616	804	1018	1256	1963
Tangon teräsluokka (f _y /f _u)		Vetokestävyyden ominaisarvo [kN]				
GWS (950/1050)	579	-	844	1069	1319	-
GEWI (500/550)	-	339	442	-	691	1080

TAULUKKO 6-15

Pienahitsien ominaiskestävyksiä. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan jakamalla ominaisarvo osavarmuuskertoimella $\gamma_{M2}=1,25$.

			$F_{W,Rk} = \frac{f_u}{\sqrt{3}} \cdot \frac{a \cdot l^{(1)}}{\beta_w}$						
			$F_{W,Rk} = \frac{f_u}{\sqrt{2}} \cdot \frac{a \cdot l}{\beta_w}$						
a-mitta [mm]			3	4	5	6	7	8	9
Pienahitsin kestävyys ominaisarvo [kN] 100 mm pituudelle ²									
Teräs-luokka	S235 ($\beta_w=0,8$)	Sivu	78	104	130	156	182	208	234
		Pääty	95	127	159	191	223	255	286
	S275 ($\beta_w=0,85$)	Sivu	88	117	146	175	204	234	263
		Pääty	108	143	179	215	250	286	322
	S355 ($\beta_w=0,9$)	Sivu	98	131	163	196	229	262	294
		Pääty	120	160	200	240	280	320	361

(1) Yksittäisen pienahitsin kestävyys

(2) Muille pituuksille l mm kestävyys saadaan kertomalla suhteella $l/10$.

7 PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU

TAULUKKO 7-1

Puutuotteiden lujuuden suunnitteluarvo murtorajatilassa

$f_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_k}{\gamma_M}$	
missä:	
f_d	lujuuden suunnitteluarvo
f_k	lujuuden ominaisarvo
k_{mod}	muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman aikaluokan ja puuaineen kosteuspitoisuuden vaikutus
γ_M	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku, katso Taulukko 7-2

TAULUKKO 7-2

Murtorajatilassa käytettävät materiaalien osavarmuusluvut γ_M SFS-EN 1995-1-1 mukaan

Materiaali	γ_M
Sahatavara	1,4
Sahatavara, lujuusluokka C35 tai parempi	1,25
Liimapuu	1,25
LVL	1,2
Vaneri, OSB	1,2
Liitokset	*

* Liitoskestävyyden mitoitusarvon laskennassa käytetään liittyvän puutuotteen osavarmuuslukua γ_M . Mikäli liittimellä yhdistetään kahta tai useampaa puutuotetta, joilla on eri osavarmuusluku, käytetään liitoskestävyydelle näistä suurinta γ_M :n arvoa.

Vaihtoehtoisesti naula-, hakas-, pultti-, tappivaarna- ja ruuviliitoksen leikkauskestävyyden mitoitusarvo, F_v, R_d , voidaan laskea suoraan materiaalien mitoituslujuuksilla. Reunapuristuslujuuden ja ulosvetokestävyyden mitoitusarvoille, $f_{h,d}$ ja $F_{ax,Rd}$, käytetään kaavassa (2.14) kyseisen puutuotteen osavarmuuslukua ja k_{mod} -kerrointa. Teräksisen liittimen myötömomentin mitoitusarvolle käytetään osavarmuuslukua $M = 1,1$, jolloin $M_{y,Rd} = M_{y,Rk} / 1,1$.

Teräksisten liitoslevyjen ja -osien kestävydet todennetaan Eurokoodi 3:n mukaisella mitoituksella käyttäen SFS-EN 1993:n kansallisessa liitteessä annettuja materiaaliosavarmuuslukuja.

TAULUKKO 7-3

Lujuuden muunnoskertoimet eri käyttöluokissa ja aikaluokissa EC5

Materiaali	Standardi	Käyttö- luokka	Kuorman aikaluokka				
			P	L	M	S	I
Sahatavara	EN 14081-1	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
Liimapuu	EN 14080	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
LVL	EN 14374	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
Vaneri	EN 636						
	-1...-3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	-2...-3	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
OSB	-3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
	EN300						
	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90

TAULUKKO 7-4

Yhdistetyn liimapuun ominaislujuudet, kimmokertoimet ja tiheydet EN 14080:2013 mukaan. Yksiköt N/mm² ja kg/m³.

Ominaisuus	GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
<i>Lujuusarvot</i>							
Taivutus syiden suuntaan $f_{m,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Veto syiden suuntaan $f_{t,0,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
Veto syitä vastaan kohtisuoraan $f_{t,90,k}$				0,5			
Puristus syiden suuntaan $f_{c,0,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
Puristus syitä vastaan kohtisuoraan $f_{c,90,k}$				2,5			
Leikkauslujuus $f_{v,k}$ (leikkaus ja vääntö)				3,5			
Leikkauslujuus syitä vastaan kohtisuoraan $f_{r,k}$				1,2			
<i>Kimmokertoimet jännityksiä laskettaessa</i>							
Kimmokerroin $E_{0,05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
Kimmokerroin $E_{90,05}$				250			
Liukukerroin G_{05}				540			
<i>Kimmokertoimet muodonmuutoksia laskettaessa</i>							
Kimmokerroin $E_{0,mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
Kimmokerroin $E_{90,mean}$				300			
Liukukerroin G_{mean}				650			
<i>Tiheys</i>							
Ominaistiheys ρ_k	355	355	365	385	390	390	400
Keskimääräinen tiheys ρ_{mean}	390	390	400	420	430	430	440

TAULUKKO 7-5

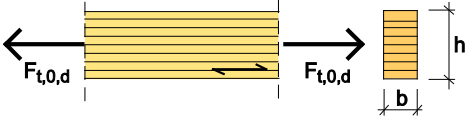
Homogeenisen liimapuun ominaislujuudet, kimmokertoimet ja tiheydet EN 14080:2013 mukaan. Yksiköt N/mm² ja kg/m³. Huomaa että ns. halkaistulla liimapuulla GL28h (saatu halkaisemalla GL30h kahdeksi osaksi) on samat lujuusominaisuudet kuin liimapuulla GL28h.

Ominaisuus	GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
<i>Lujuusarvot</i>							
Taivutus syiden suuntaan $f_{m,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Veto syiden suuntaan $f_{t,0,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
Veto syitä vastaan kohtisuoraan $f_{t,90,k}$				0,5			
Puristus syiden suuntaan $f_{c,0,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Puristus syitä vastaan kohtisuoraan $f_{c,90,k}$				2,5			
Leikkauslujuus $f_{v,k}$ (leikkaus ja vääntö)				3,5			
Leikkauslujuus syitä vastaan kohtisuoraan $f_{r,k}$				1,2			
<i>Kimmokertoimet jännityksiä laskettaessa</i>							
Kimmokerroin $E_{0,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
Kimmokerroin $E_{90,05}$				250			
Liukukerroin G_{05}				540			
<i>Kimmokertoimet muodonmuu- toksia laskettaessa</i>							
Kimmokerroin $E_{0,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
Kimmokerroin $E_{90,mean}$				300			
Liukukerroin G_{mean}				650			
<i>Tiheys</i>							
Ominaiistiheys ρ_k	340	370	385	405	425	430	440
Keskimääräinen tiheys ρ_{mean}	370	410	420	445	460	480	490

8 NURJAHTAMATTOMIEN RAKENTEIDEN MURTORAJATILAT

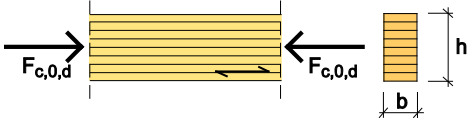
TAULUKKO 8-1

Veto syitä vastaan kohtisuoraan, EC5, kappale 6.1.2.

$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_{t,0,d}}{A_n} \leq f_{t,0,d}$ missä: $\sigma_{t,0,d}$ syynsuuntaisen vetojännityksen suunnitteluarvo $f_{t,0,d}$ syynsuuntaisen vetolujuuden suunnitteluarvo * $F_{t,0,d}$ syynsuuntaisen vetävän kuorman suunnitteluarvo A_n nettopoikkileikkauksen pinta-ala *laskettuna palkin korkeutta vastaavasta ominaisvetolujuudesta		
$h \leq 231 \text{ mm}$	$f_{t,k} \cdot 1,1$	
$231 \text{ mm} < h < 600 \text{ mm}$	$f_{t,k} \cdot \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}$	
$h \geq 600 \text{ mm}$	$f_{t,k}$	

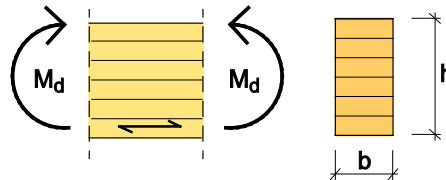
TAULUKKO 8-2

Puristus syitä vastaan kohtisuoraan, EC5, kappale 6.1.4

$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,0,d}}{A_n} \leq f_{c,0,d}$		
missä:		
$\sigma_{c,0,d}$	syynsuuntaisen puristusjännityksen suunnitteluarvo	
$f_{c,0,d}$	syynsuuntaisen puristuslujuuden suunnitteluarvo	
$F_{c,0,d}$	syynsuuntaisen puristavan kuorman suunnitteluarvo	
A_n	nettopoikkileikkauksen pinta-ala	

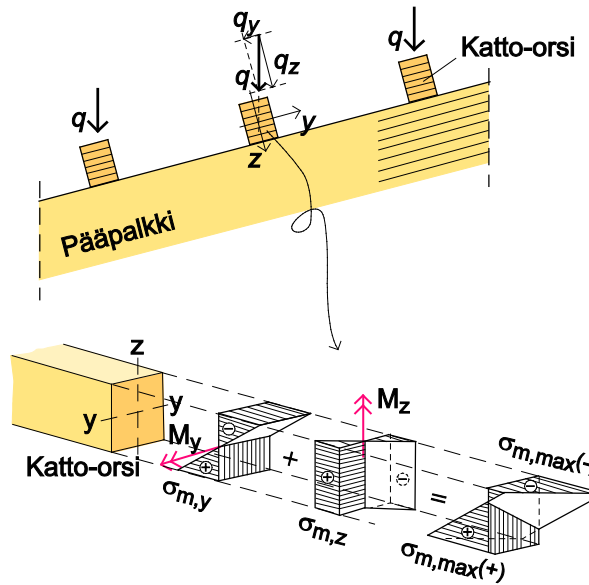
TAULUKKO 8-3

Taivutus pääakselin ympäri, EC5, kappale 6.1.6

$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_n} \leq f_{m,d}$ missä: $\sigma_{m,d}$ taivutusjännityksen suunnitteluarvo y-akselin suhteen $f_{m,d}$ taivutuslujuuden suunnitteluarvo* M_d taivutusmomentin suunnitteluarvo W_n nettopoikkileikkauksen taivutusvastus **laskettuna palkin korkeutta vastaavasta ominaistaivutuslujuudesta		
$h \leq 231 \text{ mm}$	$f_{m,k} \cdot 1,1$	
$231 \text{ mm} < h < 600 \text{ mm}$	$f_{m,k} \cdot \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}$	
$h \geq 600 \text{ mm}$	$f_{m,k}$	

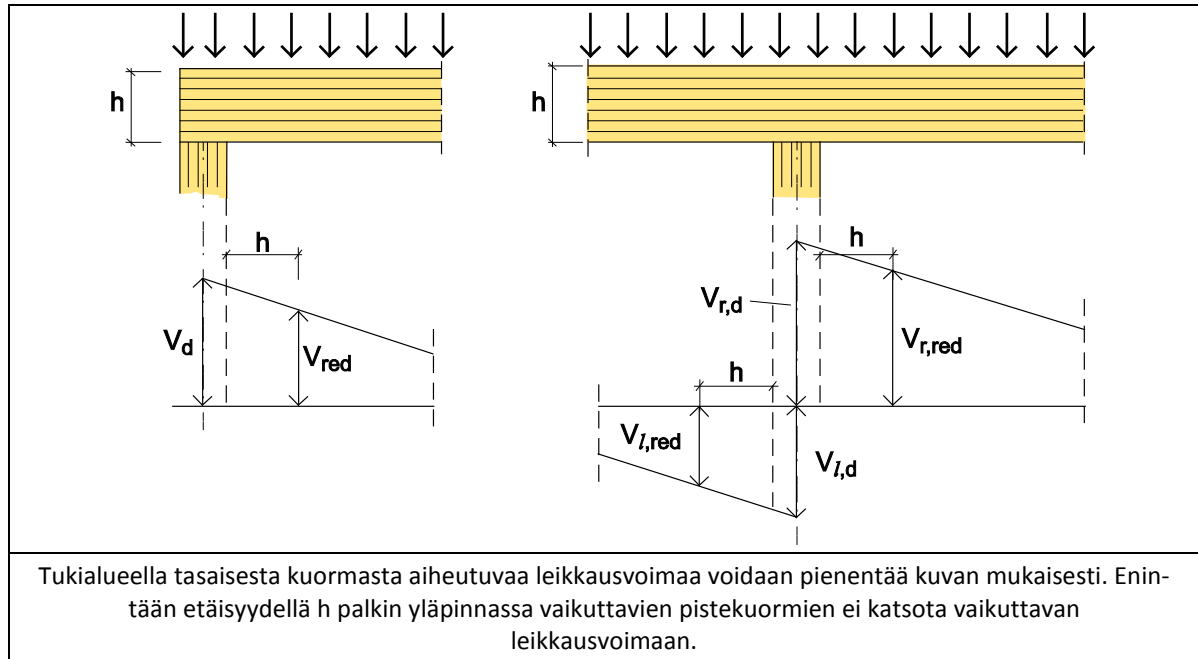
TAULUKKO 8-4

Taivutus kahden pääakselin ympäri, EC5, kappale 6.1.6.

$\frac{M_{y,d}}{W_{n,y} \cdot f_{m,y,d}} + 0,7 \cdot \frac{M_{z,d}}{W_{n,z} \cdot f_{m,z,d}} \leq 1$ ja $0,7 \cdot \frac{M_{y,d}}{W_{n,y} \cdot f_{m,y,d}} + \frac{M_{z,d}}{W_{n,z} \cdot f_{m,z,d}} \leq 1$ missä: $f_{m,y,d}$ taivutusjännityksen suunnitteluarvo y-akselin suhteen $f_{m,z,d}$ taivutusjännityksen suunnitteluarvo z-akselin suhteen $M_{y,d}$ taivutusmomentin suunnitteluarvo y-akselin suhteen $M_{z,d}$ taivutusmomentin suunnitteluarvo z-akselin suhteen W_{ny} nettopoikkileikkauksen taivutusvastus y-akselin suhteen W_{nz} nettopoikkileikkauksen taivutusvastus z-akselin suhteen	

TAULUKKO 8-5

Leikkausvoimat tukialueella.



TAULUKKO 8-6

Taivutuksen aiheuttama leikkausvoima, EC5, kappale 6.1.7.

$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{I \cdot b} \leq k_{cr} \cdot f_{v,d}$ missä: τ_d leikkausjännityksen suunnitteluarvo $f_{v,d}$ leikkauslujuuden suunnitteluarvo V_d leikkausvoiman suunnitteluarvo S poikkileikkauksen suurin staattinen momentti (suorakaidepoikkileikkaukselle $S = b \cdot h^2 / 8$) I poikkileikkauksen jäyhyysmomentti (suorakaidepoikkileikkaukselle $I = b \cdot h^3 / 12$) k_{cr} halkeamisen huomioonottava kerroin, lämmitetyissä sisätiloissa 0,67 ja kosteuden siirtymistä estävää pintakäsittelyä käytettäessä 1,0	
--	--

TAULUKKO 8-7

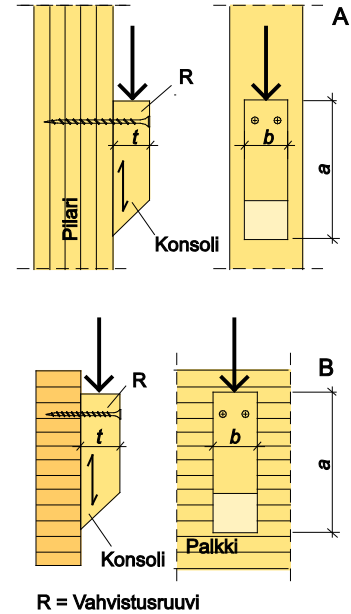
Leikkausvoiman siirtyminen konsoleilta.

$$\tau_d = \frac{V_d}{A^*} \leq \begin{cases} 0,5 \cdot f_{v,d} & \text{leikkaus // syihin nähden (Kuva A)} \\ f_{r,d} & \text{leikkaus } \perp \text{ syihin nähden (Kuva B)} \end{cases}$$

missä:

 τ_d leikkausjännityksen suunnitteluarvo $f_{v,d}$ leikkauslujuuden suunnitteluarvo $f_{r,d}$ syitä vastaan kohtisuoran suunnan leikkauslujuuden suunnitteluarvo V_d leikkausvoiman suunnitteluarvo A^* leikkausvoiman vaikutuspinta-ala
($A^* = b \cdot d$, missä $d = \min \{a, 8 \cdot t\}$)

Huom: Konsolin liimaus pilariin pitää tehdä valvotuissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa, mieluiten liimapuutehtaalla. Edelleen suositellaan aina käytettäväksi lujuuttavia ruuveja, kuten oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty, jos on todennäköistä että esiintyy vetoa syitä vastaan kohtisuoraan.

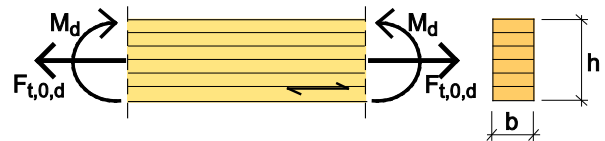


TAULUKKO 8-8

Yhdistetty taivutus ja aksiaalinen veto, EC5, kappale 6.2.3.

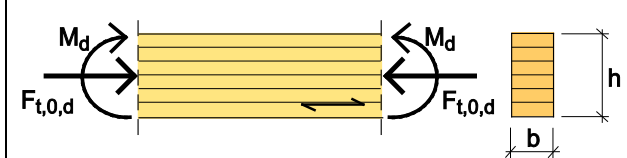
$$\frac{F_{t,0,d}}{A_n \cdot f_{t,0,d}} + \frac{M_d}{W_n \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

missä:

 $f_{t,0,d}$ syynsuuntaisen vetojännityksen suunnitteluarvo $f_{m,d}$ taivutuslujuuden suunnitteluarvo $F_{t,0,d}$ syynsuuntaisen vetävän kuorman suunnitteluarvo M_d taivutusmomentin suunnitteluarvo A_n nettopoikkileikkauksen pinta-ala W_n nettopoikkileikkauksen taivutusvastus

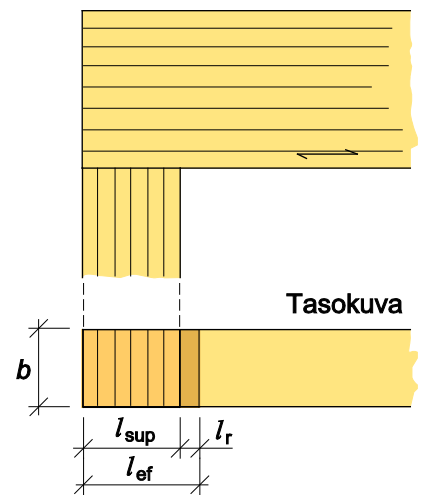
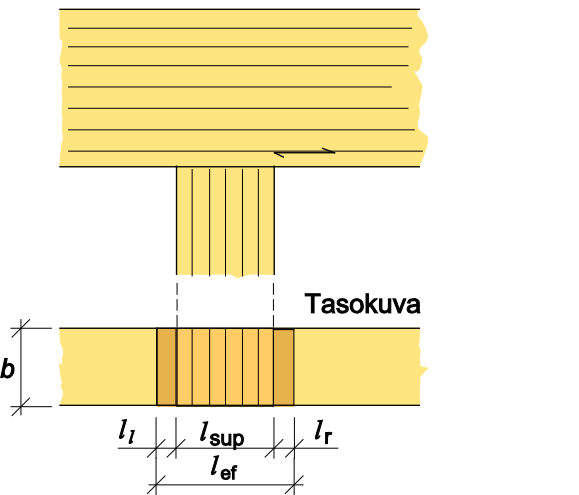
TAULUKKO 8-9

Yhdistetty taivutus ja aksiaalinen puristus, EC5, kappale 6.2.4

$\left(\frac{F_{c,0,d}}{A_n \cdot f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{M_d}{W_n \cdot f_{m,d}} \leq 1$ missä: $f_{c,0,d}$ syynsuuntaisen puristusjännityksen suunnitteluarvo $f_{m,d}$ taivutusjännityksen suunnitteluarvo $F_{c,0,d}$ syynsuuntaisen puristavan kuorman suunnitteluarvo M_d taivutusmomentin suunnitteluarvo A_n nettopoikkileikkauksen pinta-ala W_n nettopoikkileikkauksen taivutusvastus	
--	--

TAULUKKO 8-10

Tehollinen kosketuspinta-ala, puristus kohtisuoraan syitä vastaan, EC5, kappale 6.1.5.

Sivusta katsottuna	Sivusta katsottuna
 Tasokuva b l_{sup} l_r l_{ef}	 Tasokuva b l_l l_{sup} l_r l_{ef}
$l_{ef} = l_{sup} + l_l + l_r$ $A_{ef} = b \cdot (l_{sup} + l_l + l_r)$ missä: l_{ef} tehollinen tukipituus puristuksessa kohtisuoraan syitä vastaan A_{ef} tehollinen tukipinta-ala puristuksessa kohtisuoraan syitä vastaan b palkin leveys l_{sup} tuen pituus l_l ja l_r tuen näennäinen lisäpituus (= min {30 mm; l_{sup}})	

TAULUKKO 8-11 Tehollinen kosketuspinta-ala, puristus kulmassa α syitä vastaan (Colling, F., 2008).

$l_{ef} = l_{sup} + 30 \cdot \cos \alpha_1 \quad t_{ef} = t + 30 \cdot \cos \alpha_2$	$l_{ef} = l_{sup} + \min \left(\frac{l_i}{30 \cdot \sin \alpha} \right) + 30 \cdot \cos \gamma$

TAULUKKO 8-12

Puristus kohtisuoraan syitä vastaan, EC5, kappale 6.1.5 (k_1 on kirjoittajan suosittelema kerroin, jota ei ole Eurokoodissa).

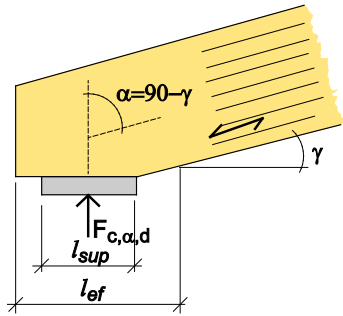
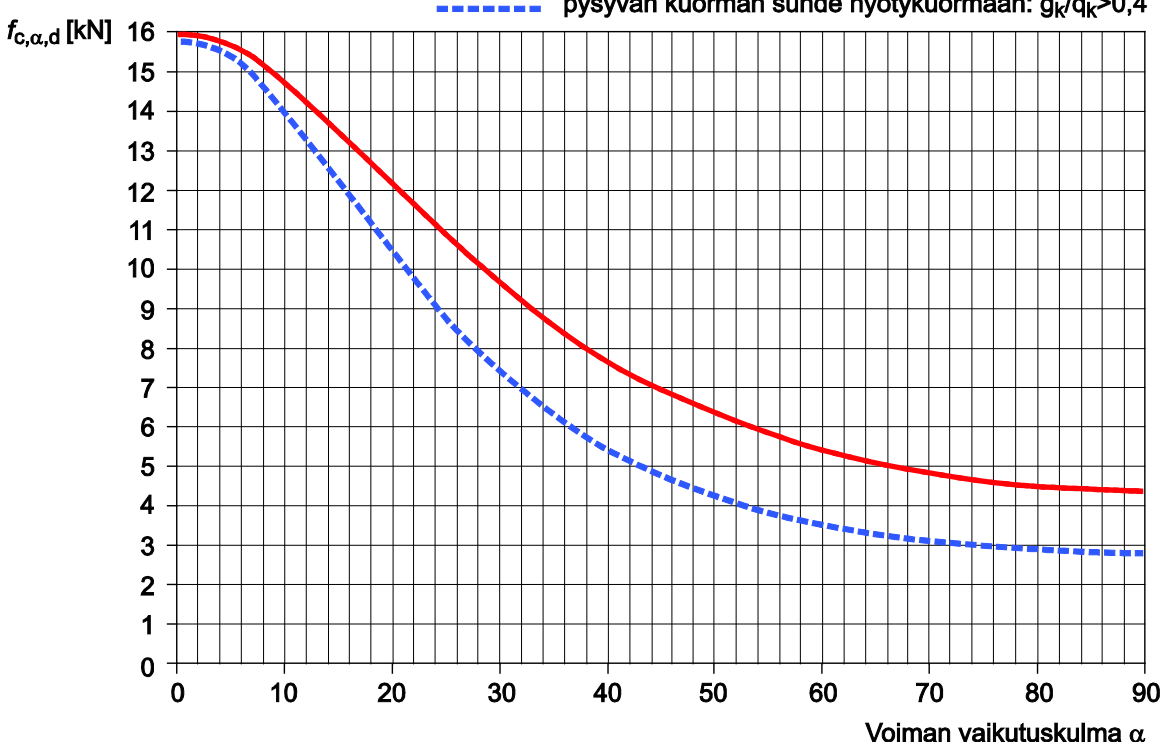
$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{l_{ef} \cdot b} \leq k_{c,90} \cdot k_1 \cdot f_{c,90,d}$ missä: $\sigma_{c,90}$ puristusjännitys kohtisuoraan syitä vastaan, suunnitteluarvo $f_{c,90,d}$ puristuslujuus kohtisuoraan syitä vastaan, suunnitteluarvo $F_{c,90,d}$ puristusvoima kohtisuoraan syitä vastaan, suunnitteluarvo l_{ef} tehollinen tukipinnan pituus (ks. Taulukko 8-10) $k_{c,90}$ puristuslujuuden kerroin ($k_{c,90} = 1,75$)* k_1 oman painon g_k ja hyötykuorman q_k välisen suhteen huomioitava kerroin. Huom. Eurokoodi 5 olettaa aina että $k_1 = 1$ <table border="1" data-bbox="319 1489 1037 1624"> <tr> <td>$g_k/q_k \leq 0,4$</td><td>$g_k/q_k > 0,4$</td></tr> <tr> <td>$k_1 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}} = \frac{\gamma_M}{k_{mod}}$</td><td>$k_1 = 1$</td></tr> </table>	$g_k/q_k \leq 0,4$	$g_k/q_k > 0,4$	$k_1 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}} = \frac{\gamma_M}{k_{mod}}$	$k_1 = 1$	
$g_k/q_k \leq 0,4$	$g_k/q_k > 0,4$				
$k_1 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}} = \frac{\gamma_M}{k_{mod}}$	$k_1 = 1$				

*Jos $l_{sup} > 400$ mm niin teholliseksi pituudeksi voidaan olettaa $l_{ef} = 400$ mm + l_r , ja puristuslujuuden kertomaksi

$k_{c,90} = 1,75$. Suurempaa tukipituutta kuin $l_{sup} > 600$ mm ei suositella. (Huomaa että Eurokoodi 5 suosittelee kerrointa $k_{c,90} = 1,75$ vain jos tukipituus $l_{sup} \leq 400$ mm. Jos tukipituus on suurempi, Eurokoodi 5 suosittelee käytettäväksi $l_{ef} = l_{sup}$ ja $k_{c,90} = 1$)

TAULUKKO 8-13

Puristus kulmassa α syitä vastaan, EC5, kappale 6.1.5 (k_1 on kirjoittajan suosittelema kerroin, jota ei ole Eurokoodissa).

$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_{c,\alpha,d}}{l_{ef} \cdot b} \leq f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot k_1 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$ missä $\sigma_{c,\alpha,d}$ puristusjännitys kulmassa α syitä vastaan, suunnitteluarvo $f_{c,\alpha,d}$ puristuslujuus kulmassa α syitä vastaan, suunnitteluarvo $f_{c,90,d}$ puristuslujuus kohtisuoraan syitä vastaan, suunnitteluarvo $f_{c,0,d}$ puristuslujuus syiden suunnassa, suunnitteluarvo $F_{c,\alpha,d}$ puristusvoima kulmassa α syitä vastaan, suunnitteluarvo l_{ef} tehollinen tukipinnan pituus (ks. Taulukko 8-11) $k_{c,90}$ puristuslujuuden kerroin ($k_{c,90} = 1,75$) jos $l_{sup} \leq 400$ mm. k_1 oman painon g_k ja hyötykuorman q_k välisen suhteen huomioonottava kerroin. Huom. Eurokoodi 5 olettaa aina että $k_1 = 1$		
$g_k/q_k \leq 0,4$	$g_k/q_k > 0,4$	
$k_1 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}} = \frac{\gamma_M}{k_{mod}}$	$k_1 = 1$	
$f_{c,\alpha,d}$ arvot liimapuulle GL30c. Käyttöluokka 1. Kuorman aikaluokka keskipitkä.		
$f_{c,\alpha,d}$ [kN] — pysyvän kuorman suhde hyötykuormaan: $g_k/q_k \leq 0,4$ - - - pysyvän kuorman suhde hyötykuormaan: $g_k/q_k > 0,4$  Voiman vaikutuskulma α		

TAULUKKO 8-14

Tukialueen vahvistaminen puurakenneruuveilla, Bejtka, I. et al., 2006.

$$R_{90,k} = \min \begin{cases} k_{c,90} \cdot b \cdot l_{ef,1} \cdot f_{c,90,k} + n \cdot \min(R_{ax,k}; R_{kl,k}) \\ b \cdot l_{ef,2} \cdot f_{c,90,k} \end{cases}$$

$$R_{90,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{90,k}}{\gamma_m}$$

missä

$R_{90,k}$ Puristusvoiman kestävyys tuella syitä vastaan kohtisuoraan, ominaisarvo

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

$f_{c,90,k}$ puristuslujuus kohtisuoraan syitä vastaan, ominaisarvo

b palkin leveys

l_{ef} ruuvien kierteisen osan pituus

l_{sup} tukipinnan pituus

$l_{ef,1} = l_{sup} + 30 \text{ mm}$

$l_{ef,2} = l_{sup} + 0,25 \cdot l_{ef} \cdot e^{3,3 \cdot \frac{l_{ef}}{h}}$

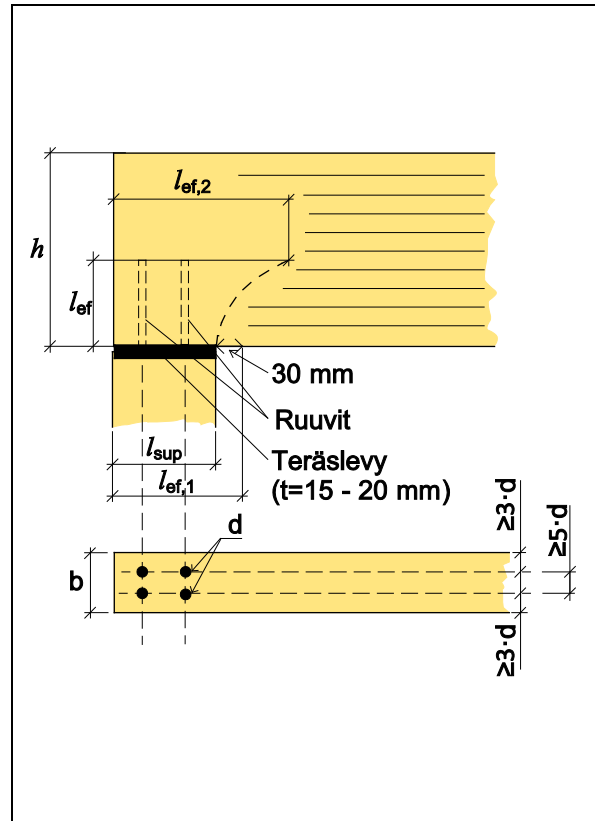
n vahvistavien ruuvien lukumäärä

$R_{ax,k}$ ruuvien läpivetolujuuden ominaisarvo ($\approx$ ruuvien ulosvetolujuus). Yleensä ruuvien valmistaja ilmoittaa tämän.

$R_{kl,k}$ ruuvien nurjahduskestävyyden ominaisarvo, ks. Taulukko 8-15

k_{mod} lujuuden muunnoskerroin, ks. Taulukko 7-3

$\gamma_M = 1,2$



TAULUKKO 8-15

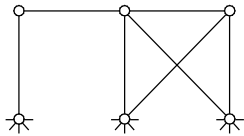
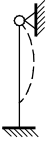
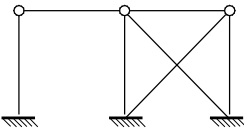
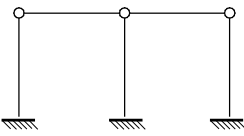
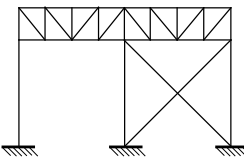
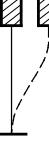
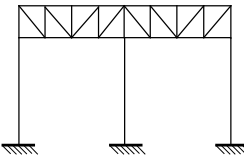
Tukialueen vahvistaminen puurakennerruuveilla; ruuvien nurjahduskestävyys, Bejtka, I. et al., 2006

$R_{kl,k} = k_c \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \right) \cdot f_{y,k}$	
	missä
k_c	nurjahduskerroin
$k_c = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel} \leq 0,2 \\ \left(k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2} \right)^{-1} & \text{kun } \lambda_{rel} > 0,2 \end{cases}$	
$k = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (\lambda_{rel} - 0,2) + \lambda_{rel}^2]$	
λ_{rel}	suhteellinen hoikkuus
$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}}$	
N_{pl}	ruuvien myötölujuus
$N_{pl} = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot f_{y,k}$	
N_{cr}	ruuvien nurjahduskestävyys
$N_{cr} = \sqrt{c_h \cdot E_s \cdot I_s}$	
c_h	vaakasوران jäykkyyden vakio
$c_h = (0,19 + 0,012 \cdot d) \cdot \rho_k$	
d	ruuvien kierteellisen osan halkaisija (suurempi)
d_m	ruuvien sydänosan halkaisija (pienempi)
$f_{y,k}$	ruuvien myötöraja
E_s	ruuviaineen kimmokerroin (esim. teräkselle: $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$)
I_s	ruuvien sydänosan jähyysmomentti
$I_s = \pi \cdot (d_m)^4 / 64$	

9 NURJAHTAVIEN RAKENTEIDEN MURTORAJATILAT

TAULUKKO 9-1

Tyypillisten puristettujen sauvojen nurjahduspituuksia. $\beta = L_E / L$, missä L_E on sauvan tehollinen pituus (nurjahduspituus) ja L sauvan geometrinen pituus. Suunnittelussa käytettäväksi suositellut β -arvot poikkeavat teoreettisista, sillä niissä on otettu huomioon, ettei täydellistä kiinnitystä yleensä esiinny käytännössä.

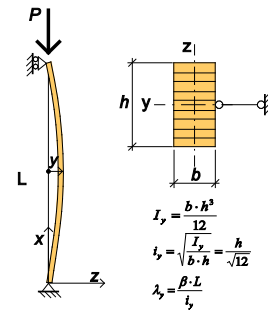
Malli	Tyypillinen esimerkki	Teoreettinen β -arvo	Suosittelun β -arvo
		1,0	1,0
		0,7	0,85
		2,0	2,25
		0,5	0,7
		1,0	1,2

TAULUKKO 9-2

Nurjahduskuorma ja suhteellinen hoikkuus. (Sauva on oletettu jäykistetyksi y-suunnassa, joten nurjahtaminen voi tapahtua vain y-akselin suhteen.)

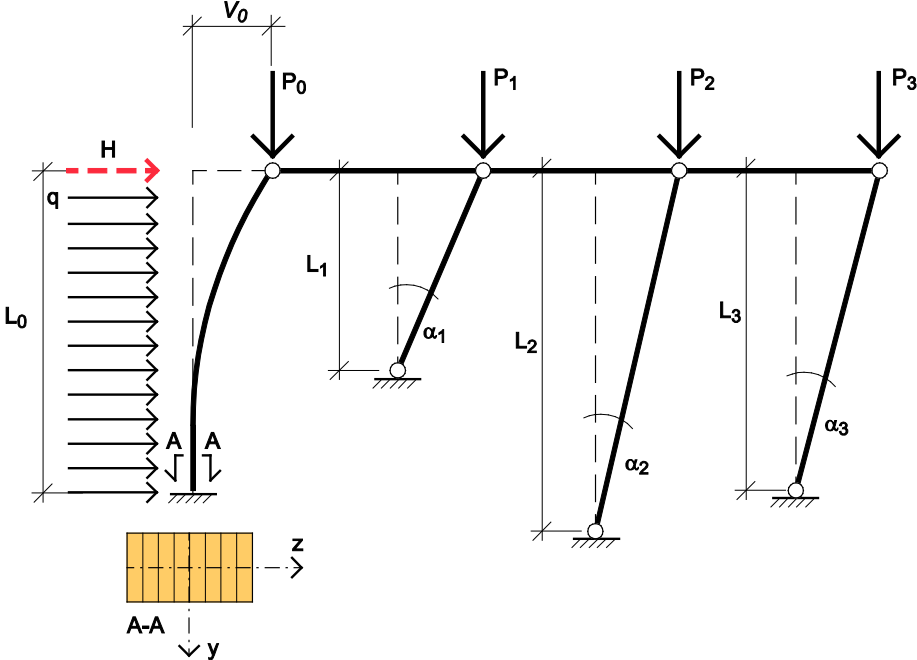
Nurjahduskuorma $P_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E_{0,05} \cdot I_y}{L_E^2}$	
Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k} \cdot A}{P_{cr}}} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$	
missä:	
P_{cr}	nurjahduskuorma
$f_{c,0,k}$	puristuslujuus syiden suunnassa, ominaisarvo
A	poikkileikkauksen pinta-ala
$E_{0,05}$	kimmokertoimen ominaisarvo
I_y	poikkileikkauksen jäyhyysmomentti y-akselin suhteen
L_E	sauvan nurjahduspituus, $= \beta L$, ks. Taulukko 9-1

Nurjahdus z-akselin suhteen
(nurjahdus estetty y-suunnassa)



TAULUKKO 9-3

Yhdessä toimivien eripituisten ulokepilarien nurjautaminen, Åkerlund, S., 1984.

	
Alkuepäkeskeisyys (keskiarvo)	$\alpha_m = 0,003 + 0,015/\sqrt{n}$
Pilareiden yläpäässä vaikuttava kaatava voima alkuepäkeskeisyydestä	$H = \frac{\alpha_m \cdot \sum_1^n P_i + v_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{P_0}{P_{cr}}} \cdot \sum_1^n \frac{P_i}{L_i}}{1 - \frac{L_0^3}{3 \cdot E_{0,05} \cdot I_y} \cdot \frac{1}{1 - \frac{P_0}{P_{cr}}} \cdot \sum_1^n \frac{P_i}{L_i}}$
Ulokepilareiden stabiiliuden tarkistaminen	Ks. Taulukko 9-1 ja Taulukko 9-2
missä: n molemmista päistään nivelellisten pilarien lukumäärä ($n = 3$ kuvan esimerkissä) v_0 kuormien aiheuttama ulokepilarin yläpään siirtymä (ilman kaatavan voiman "H" vaikutusta). Kuvan esimerkitapauksessa: $v_0 = \frac{q \cdot L_0^2}{8 \cdot E \cdot I_y}$	
P_{cr}	ulokepilarin nurjautuskuorma (Ks. Taulukko 9-1 ja Taulukko 9-2)
I_y	poikkileikkauksen jäyhyysmomentti y-akselin suhteen
$E_{0,05}$	kimmokertoimen ominaisarvo

TAULUKKO 9-4

Puristetut sauvat, EC5 luku 6.3.2.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,0,d}}{A_n} \leq k_c \cdot f_{c,0,d}$$

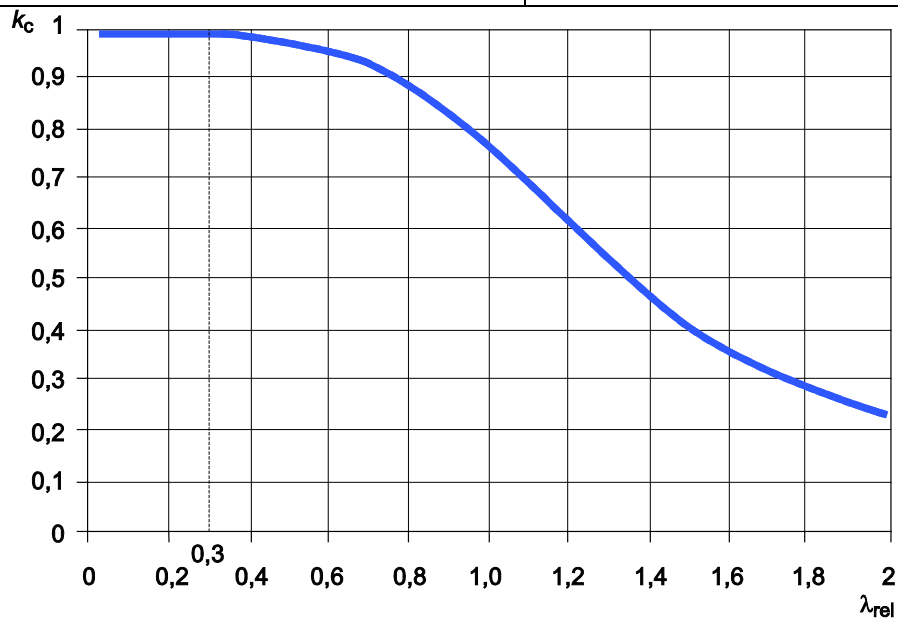
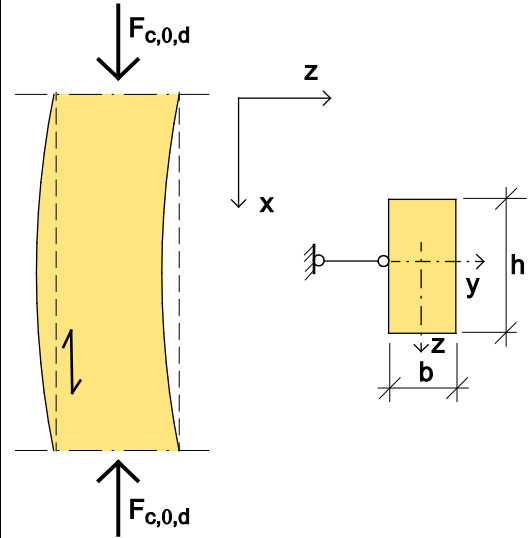
missä:

 $\sigma_{c,0,d}$ puristusjännitys syyn suunnassa, suunnitteluarvo $f_{c,0,d}$ puristuslujuus syyn suunnassa, suunnitteluarvo $F_{c,0,d}$ puristusvoima syyn suunnassa, suunnitteluarvo A_n nettopoikkileikkauspinta-ala k_c nurjahduskerroin

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel} \leq 0,3 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} & \text{kun } \lambda_{rel} > 0,3 \end{cases}$$

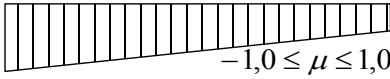
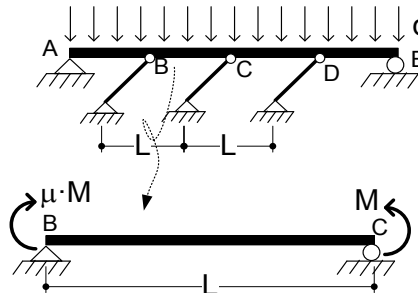
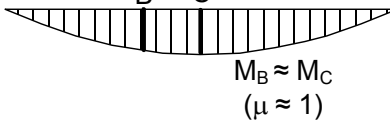
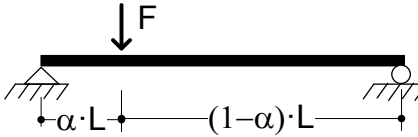
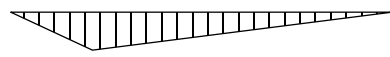
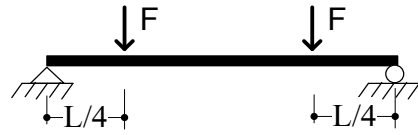
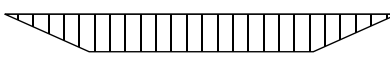
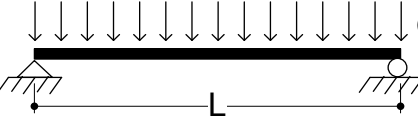
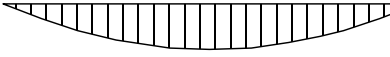
missä:

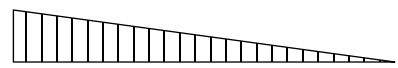
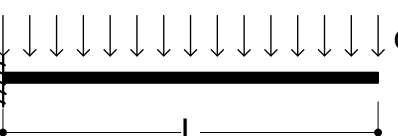
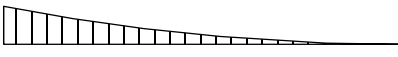
$$k = 0,5 \cdot [1 + 0,1 \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2]$$

 λ_{rel} , ks. Taulukko 9-2

TAULUKKO 9-5

Tyypillisten taivutettujen sauvojen nurjahduspituuksia. Nurjahdustukien etäisyys L . $\beta_{LT} = L_{ef}/L$, missä L_{ef} on sauvan nurjahduspituus ja L sauvan geometrinen pituus. Oletetut reunaehdot ja tuentatapaukset esitetty kuvissa. Vääntyminen tuilla on estetty, mutta kiepahtaminen tukien välillä voi vapaasti tapahtua.

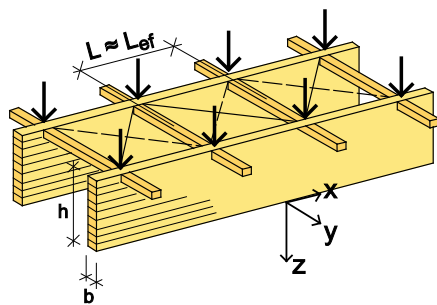
Staattinen toiminta	Momenttikuvio	$\beta_{LT} = L_{ef}/L$
1. 		$0,6 + 0,4 \cdot \mu (\geq 0,4)$
2. 		1,0
3. 		$0,56 + 0,74 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)$ (a)
4. 		1,0 (a)
5. 		0,9 (a)

6.			0,8 (a)
7.			0,5 (a)

(a) Nurjahduspituuden suhde jänneväliin pätee kun palkin kuormitus on keskeinen. Jos kuorma tulee palkille sen yläpinnan välityksellä, niin L_{ef} :n arvoa pitää suurentaa $2h$ verran, ja sitä voidaan pienentää $0,5h$ verran jos kuorma tulee palkille sen alareunan välityksellä (h on palkin korkeus)

TAULUKKO 9-6

Kriittinen taivutusmomentti M_{cr} ja suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,m}$.

<u>Kriittinen taivutusmomentti</u> $M_{cr} = \frac{\pi}{L_{ef}} \sqrt{(E_{0,05} \cdot I_z) \cdot (G_{0,05} \cdot K_v)}$ <u>Suhteellinen hoikkuus</u> $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k} \cdot W}{M_{cr}}} \approx \frac{1}{b} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot L_{ef} \cdot f_{m,k}}{0,78 \cdot E_{0,05}}}$ missä: M_{cr} kriittinen taivutusmomentti $f_{m,k}$ taivutuslujuuden ominaisarvo b palkin leveys h palkin korkeus W taivutusvastus ($=b \cdot h^2/6$) $E_{0,05}$ kimmokertoimen ominaisarvo $G_{0,05}$ liukukertoimen ominaisarvo K_v vääntöjäykkyys ($\approx b^3 \cdot h/3$) I_z poikkileikkauksen jäyhyysmomentti z-akselin suhteen L_{ef} nurjahduspituus	
---	--

TAULUKKO 9-7

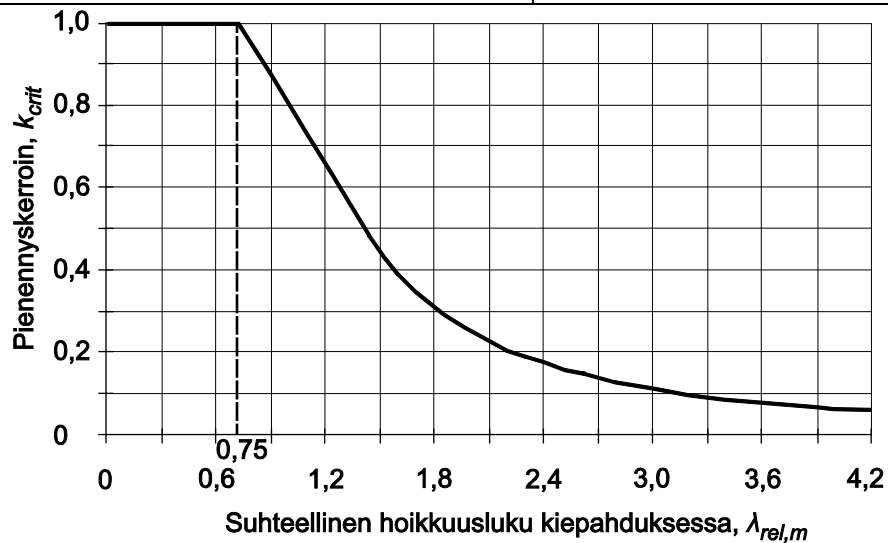
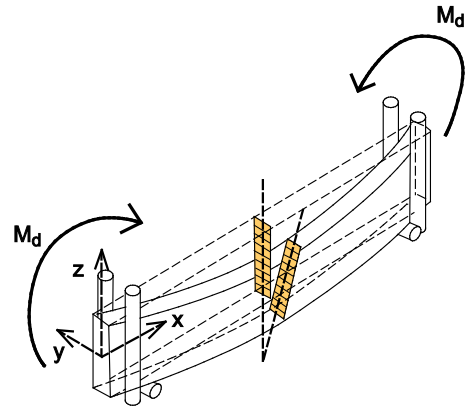
Taivutetut sauvat, EC5 luku 6.3.3.

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

missä:

 $\sigma_{m,d}$ taivutusjännitys, suunnitteluarvo $f_{m,d}$ taivutuslujuus, suunnitteluarvo M_d taivutusmomentti, suunnitteluarvo W_n nettopoikkileikkauksen taivutusvastus k_{crit} kiepahduskerroin^(a)

$$k_{crit} = \begin{cases} 1,0 & \text{for } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{for } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \left(\frac{1}{\lambda_{rel,m}} \right)^2 & \text{for } \lambda_{rel,m} > 1,4 \end{cases}$$

 $\lambda_{rel,m}$ ks. Taulukko 9-6

(a) Huomaa että jos jompikumpi seuraavista ehdoista täyttyy, niin kiepahdus ei ole todennäköinen ja

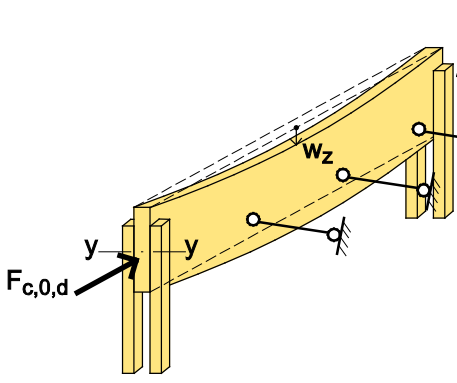
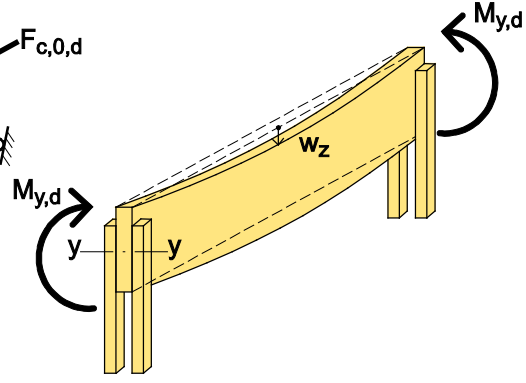
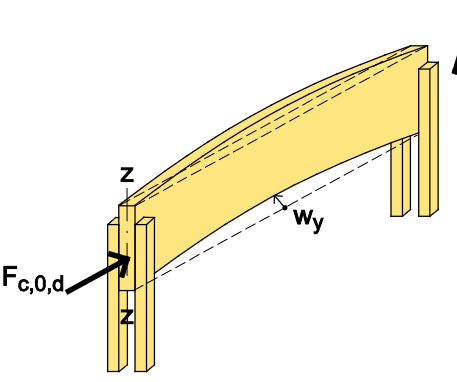
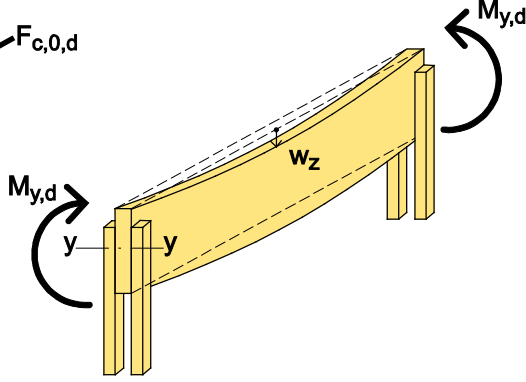
$$k_{crit} = 1$$

i. $(L_{ef} \cdot h) / b^2 \leq 140$

ii. $h / b \leq \sim 4$

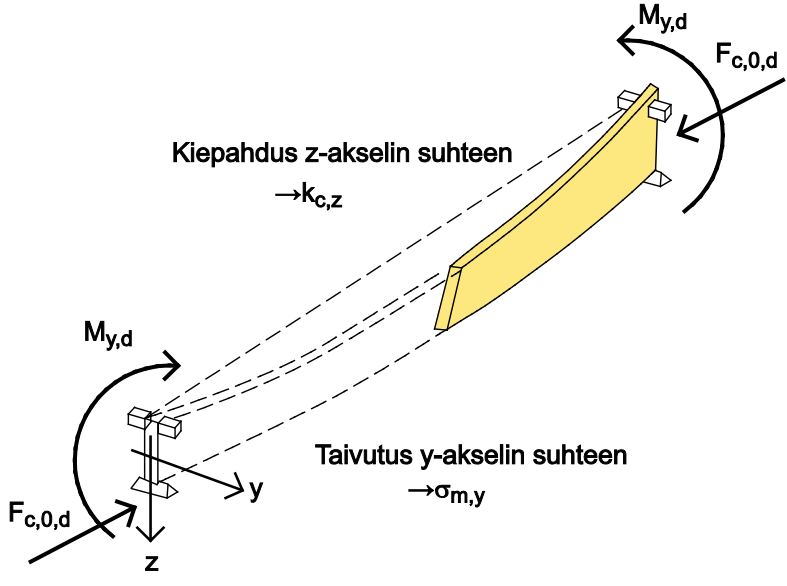
TAULUKKO 9-8

Puristetut ja taivutetut sauvat (kiepahdus estetty, $\lambda_{rel,m} \leq 0,75$), EC5 luku 6.3.2.

 Nurjahdus y-akselin suhteen → $k_{c,y}$  Taivutus y-akselin suhteen → $\sigma_{m,y}$	
$\frac{F_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot (A_n \cdot f_{c,0,d})} + \frac{M_{y,d}}{W_{n,y} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$	
 Nurjahdus z-akselin suhteen → $k_{c,z}$  Taivutus y-akselin suhteen → $\sigma_{m,y}$	
$\frac{F_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot (A_n \cdot f_{c,0,d})} + 0,7 \cdot \frac{M_{y,d}}{W_{n,y} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$	
$F_{c,0,d}$ $M_{y,d}$ $f_{c,0,d}$ $f_{m,y,d}$ A_n W_{ny} $k_{c,y}$ ja $k_{c,z}$	puristusvoima syiden suunnassa, suunnitteluarvo taivutusmomentti y-akselin suhteen, suunnitteluarvo puristuslujuus syiden suunnassa, ominaisarvo taivutuslujuus y-akselin suhteen, suunnitteluarvo nettopoikkileikkauksen pinta-ala nettopoikkileikkauksen taivutusvastus y-akselin suhteen kiepahduskertoimet y- ja z-akselien suhteen

TAULUKKO 9-9

Puristetut ja taivutetut sauvat (kiepahdusta ei estetty, $\lambda_{rel,m} > 0,75$), EC5 luku 6.3.3

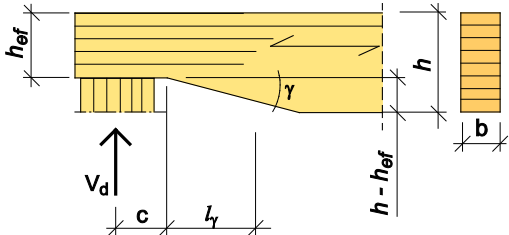
	
$\frac{F_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot (A_n \cdot f_{c,0,d})} + \left[\frac{M_{y,d}}{k_{crit} \cdot (W_{n,y} \cdot f_{m,y,d})} \right]^2 \leq 1$	
$F_{c,0,d}$ $M_{y,d}$ $f_{c,0,d}$ $f_{m,y,d}$ A_n W_{ny} $k_{c,z}$ k_{crit}	puristusvoima syiden suunnassa, suunnitteluarvo taivutusmomentti y-akselin suhteen, suunnitteluarvo puristuslujuus syiden suunnassa, ominaisarvo taivutuslujuus y-akselin suhteen, suunnitteluarvo nettopoikkileikkauksen pinta-ala nettopoikkileikkauksen taivutusvastus y-akselin suhteen nurjahduskerroin z-akselin suhteen kiepahduskerroin

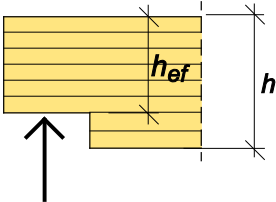
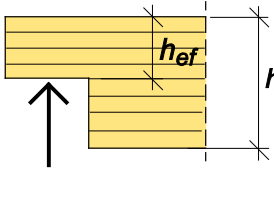
10 POIKITTAISEN VEDON RASITTAMAT RAKENNEOSAT

10.1 Lovet

TAULUKKO 10-1

Lovetut rakenneosat, EC5 luku 6.5.

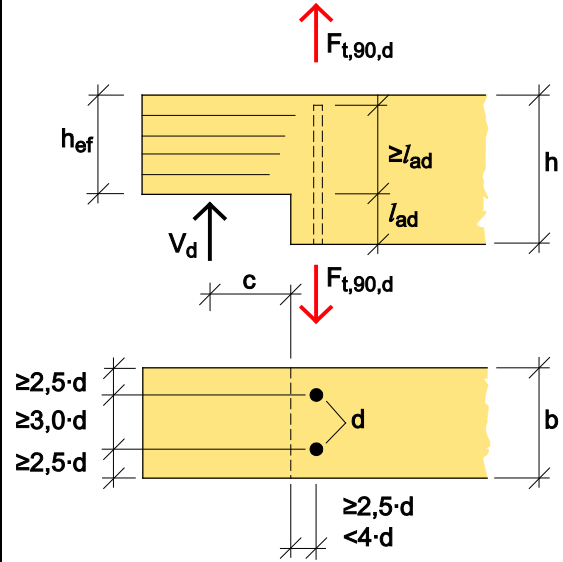
$\tau_d = \frac{3}{2} \frac{V_d}{b \cdot h_{ef}} \leq k_v \cdot f_{v,d}$		
$k_v = \min \left\{ 1; \frac{6,5 \cdot \left(1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \cdot \left(\sqrt{\alpha \cdot (1 - \alpha)} + 0,8 \cdot \frac{c}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \right\}$ missä:		
τ_d	leikkausjännityksen suunnitteluvarvo	
$f_{v,d}$	leikkauslujuuden suunnitteluvarvo	
V_d	leikkausvoiman suunnitteluvarvo	
i	$= l_\gamma / (h - h_{ef})$	
α	$= h_{ef} / h$	

	
$\frac{h_{ef}}{h} = 0,75 \Rightarrow k_v \approx 0,4 - 0,5$	$\frac{h_{ef}}{h} = 0,50 \Rightarrow k_v \approx 0,3 - 0,4$

TAULUKKO 10-2

Lovettujen rakenneosien vahvistaminen puurakenneruuveilla, DIN-EN 1995-1-1/NA.

$F_{t,90,d} = 1,3 \cdot V_d \cdot (3 \cdot (1 - \alpha)^2 - 2 \cdot (1 - \alpha)^3)$	
tarkista $F_{t,90,d} \leq n_r \cdot R_{t,d}$ missä:	
$F_{t,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran vetovoiman suunnitteluarvo
$R_{t,d}$	vahvistamiseen käytetyn ruuvien tai liimatangon aksiaalinen lujuus; vetolujuus tai ulosvetolujuus, kumpi vain on pienempi. Liimatangon tai ruuvien tartuntapituutena käytetään arvoa $l_{ad} = h - h_{ef}$, ks. kuva oikealla.
n_r	vahvistavien ruuvien lukumäärä
V_d	leikkausvoiman suunnitteluarvo
α	$= h_{ef} / h$
d	ruuvien sileän osan halkaisija, $d \leq 20$ mm



10.2 Palkin alareunaan liittyvät vetosauvat

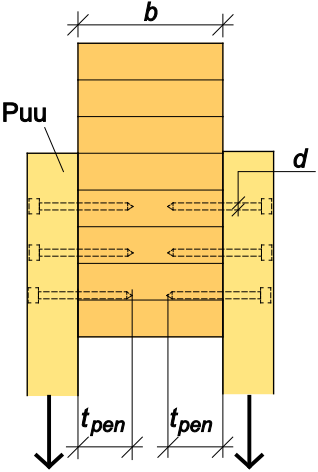
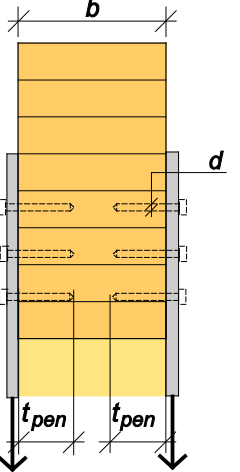
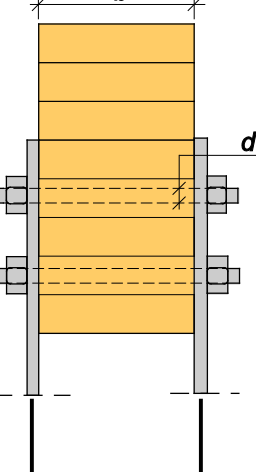
TAULUKKO 10-3

Vinon sauvan liitosvoimat, DIN-EN 1995-1-1/NA

$F_{90,Rd} = k_s \cdot k_r \cdot \left(6,5 + \frac{18 \cdot h_e^2}{h^2} \right) \cdot (t_{ef} \cdot h)^{0,8} \cdot f_{t,90,d}$ $k_s = \max \left\{ 1; 0,7 + \frac{1,4 \cdot a_r}{h} \right\} \quad \text{ja} \quad k_r = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i} \right)^2}$ tarkista että $F_{90,d} \leq F_{v,Ed}$ (Jos $a_r/h > 1$ ja $F_{v,Ed} > 0,5 \cdot F_{90,Rd}$ niin liitos pitäisi vahvistaa, ks. Taulukko 10-5) missä	
$F_{v,Ed}$	voiman syitä vastaan kohtisuoran komponentin suunnitteluarvo N
$F_{90,Rd}$	rakennusosan kestävyys halkeamista vastaan N
$f_{t,90,d}$	vetolujuus kohtisuoraan syitä vastaan, suunnitteluarvo N/mm ²
k_s	kerroin jonka avulla otetaan huomioon syidensuuntaisten liitinrivien liitinten keskinäinen etäisyys
k_r	kerroin jonka avulla otetaan huomioon että liitinrivejä on useampi kuin yksi
h_e	kuormitetun reunan etäisyys kauimpana olevaan liittimeen mm; liimatangoilla h_e on etäisyyden projektio $l_{ad} \cdot \sin \alpha$
a_r	liitinrivin uloimpien liittimien keskiöiden välinen etäisyys syiden suunnassa, katso kuvasta
h	rakennusosan korkeus mm
t_{ef}	liittimen tehollinen tartuntapituus mm (ks. Taulukko 10-4)
n	liitinrivien lukumäärä
h_i	kuormittamattoman reunan etäisyys tarkasteltavasta liitinrivistä, katso kuvasta
Poikkileikkauksille joille $h_e/h > 0,7$ tämä tarkastelu on riittävä. Liitoksia, joissa $h_e/h < 0,2$ pitäisi kuormittaa vain lyhytaikaisilla kuormilla (esim. tuulenpaineen aiheuttama noste).	

TAULUKKO 10-4

Eri liitostyyppien tehollinen tartuntapituus, DIN-EN 1995-1-1/NA.

Puu-puu tai puu-puulevy liitetty- nä nauloilla tai ruuveilla	Puu ja teräslevy liitettyinä nauiloil- la	Puu-puu tai puu-teräs liitettyinä pultein tai tappivaaroin
		
$t_{ef} = \min\{b; 2 \cdot t_{pen}; 24 \cdot d\}$	$t_{ef} = \min\{b; 2 \cdot t_{pen}; 30 \cdot d\}$	$t_{ef} = \min\{b; 12 \cdot d\}_{(a)}$

Ruuvi-liitoksille pätee: $t_{ef} = \min\{b; 2 \cdot t_{pen}; 12 \cdot d\}$

TAULUKKO 10-5

Palkin vahvistaminen kun liitos aiheuttaa vetoa syitä vastaan kohtisuoraan, DIN-EN 1995-1-1/NA.

$F_{t,90,d} = [1 - 3 \cdot \alpha^2 + 2 \cdot \alpha^3] \cdot F_{v,Ed}$ tarkista että $F_{t,90,d} \leq n_r \cdot R_{t,d}$ missä		
$F_{t,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran vetovoiman suunnittelu-arvo	
$F_{v,Ed}$	vetovoiman syitä vastaan kohtisuoraan olevan komponentin suunnittelu-arvo	
$R_{t,d}$	vahvistamiseen käytetyn ruuvin tai liimatangon aksiaalinen lujuus; vetolujuus tai ulosvetolujuus, kumpi vain on pienempi. Liimatangon tai ruuvin tartuntapituutena käytetään arvoa $l_{ad} = \min(l_{ad,t}, l_{ad,c})$ ks. kuva oikealla.	
n_r	vahvistavien ruuvien lukumäärä	
α	$= h_e / h$	
d	ruuvin sileän osan halkaisija, $d \leq 20$ mm	

10.3 Reiät

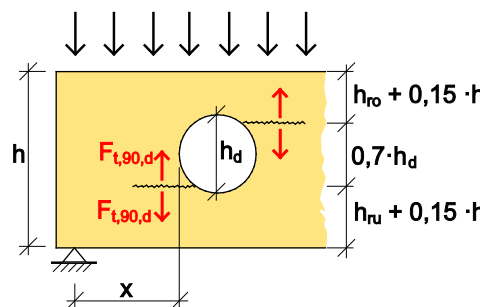
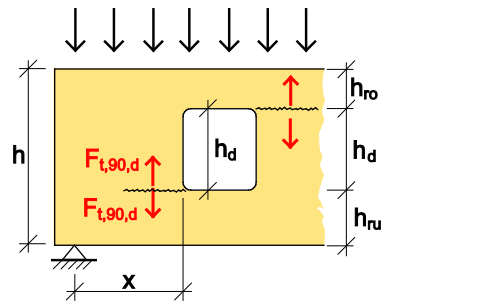
TAULUKKO 10-6

Reiällisten palkkien geometriset vaatimukset, DIN-EN 1995-1-1/NA. (Huomaa että DIN-EN 1995-1-1/NA ehdottaa $r \geq 15$ mm ja reiän enimmäiskorkeudeksi $h_d \leq 0,15h$. Kirjoittaja kuitenkin ehdottaa arvoja $r \geq 25$ mm ja $h_d \leq 0,3h$)

(reikää ei tarvitse ottaa suunnittelussa huomioon jos sen halkaisija $d \leq 50$ mm ja se sijaitsee neutraaliakselin lähellä tai tuella hyvin lähellä ylänurkkaa)						
$l_v \geq h$	$l_z \geq 1,5h$ tai vähintään 300 mm	$l_A \geq 0,5h$	$h_{ro} \geq 0,35h$ $h_{ru} \geq 0,35h$	$a \leq 0,4h$	$h_d \leq 0,3h$	$r \geq 25$ mm

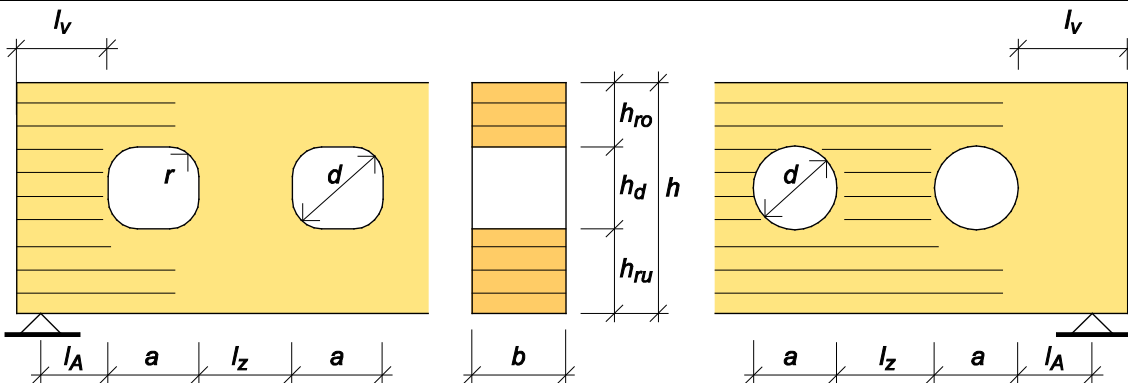
TAULUKKO 10-7

Reiällisten palkkien reiän reunassa vaikuttavan vetovoiman suunnitteluarvo, DIN-EN 1995-1-1/NA

$F_{t,90,d} = F_{t,90,V,d} + F_{t,90,M,d}$ missä $F_{t,V,d} = \frac{V_d \cdot h_d}{4 \cdot h} \cdot \left[3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right]$ ja $F_{t,M,d} = 0,008 \cdot \frac{M_d}{h_r}$ $\sigma_{t,90,d} = \frac{F_{t,90,d}}{0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b} \leq k_{t,90} \cdot f_{t,90,d}$ tarkista että missä			
V_d	leikkausvoiman suunnitteluarvo reiän reunassa (siis etäisyydellä "x" tuelta)		
M_d	taivutusmomentin suunnitteluarvo reiän reunassa (siis etäisyydellä "x" tuelta)		
b	palkin leveys		
$h_r =$	min $(h_{ro} + 0,15 \cdot h_d; h_{ru} + 0,15 \cdot h_d)$ pyöreille rei'ille		
$h_r =$	min $(h_{ro}; h_{ru})$ suorakaiteen muotoisille rei'ille		
$l_{t,90} =$	$0,35 \cdot h_d + 0,5 \cdot h$ pyöreille rei'ille		
$l_{t,90} =$	$0,5 \cdot (h_d + h)$ suorakaiteen muotoisille rei'ille		
$k_{t,90} =$	min $(1; (450/h)^{0,5})$, missä h on palkin korkeus		

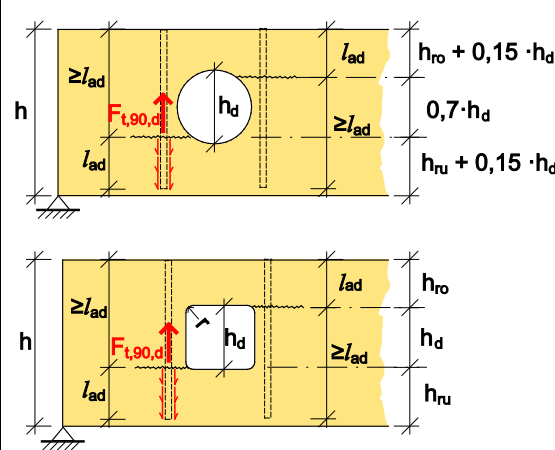
TAULUKKO 10-8

Reiällisten palkkien vahvistaminen ruuveilla tai liimatangoilla; geometriset vaatimukset DIN-EN 1995-1-1/NA mukaan. (Huomaa että DIN-EN 1995-1-1/NA ehdottaa $r \geq 15$ mm ja reiän enimmäiskorkeudeksi $h_d \leq 0,15h$. Kirjoittaja kuitenkin ehdottaa arvoja $r \geq 25$ mm ja $h_d \leq 0,3h$)

						
(reikää ei tarvitse ottaa suunnittelussa huomioon, jos sen halkaisija $d \leq 50$ mm ja se sijaitsee neutraaliakselin lähellä tai tuella hyvin lähellä ylänurkkaa)						
$l_v \geq h$	$l_z \geq 1,0h$ tai vähintään 300 mm	$l_A \geq 0,5h$	$h_{ro} \geq 0,25h$ $h_{ru} \geq 0,25h$	$a \leq 1,0h$ $a \leq 2,5h_d$	$h_d \leq 0,4h$	$r \geq 25$ mm

TAULUKKO 10-9

Reiällisten palkkien vahvistaminen, DIN-EN 1995-1-1/NA.

tarkista että $F_{t,90,d} \leq n_r \cdot R_{t,d}$		
missä		
$F_{t,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran vetovoiman suunnitteluarvo (ks. Taulukko 10-2)	
$R_{t,d}$	vahvistamiseen käytetyn ruuvin tai liimatangon aksiaalinen lujuus; vetolujuus tai ulosvetolujuus, kumpi vain on pienempi. Liimatangon tai ruuvin tartuntapituutena käytetään arvoa l_{ad} $l_{ad} = h_{ro}$ tai h_{ru} , pyöreille rei'ille tai $l_{ad} = \min \{h_{ro} + 0,15; h_{ru} + 0,15 \cdot h_d\}$ suorakaitteen muotoisille rei'ille, katso kuva	
n_r	vahvistavien ruuvien lukumäärä reiän toisella puolella (oikealla tai vasemmalla puolella)	

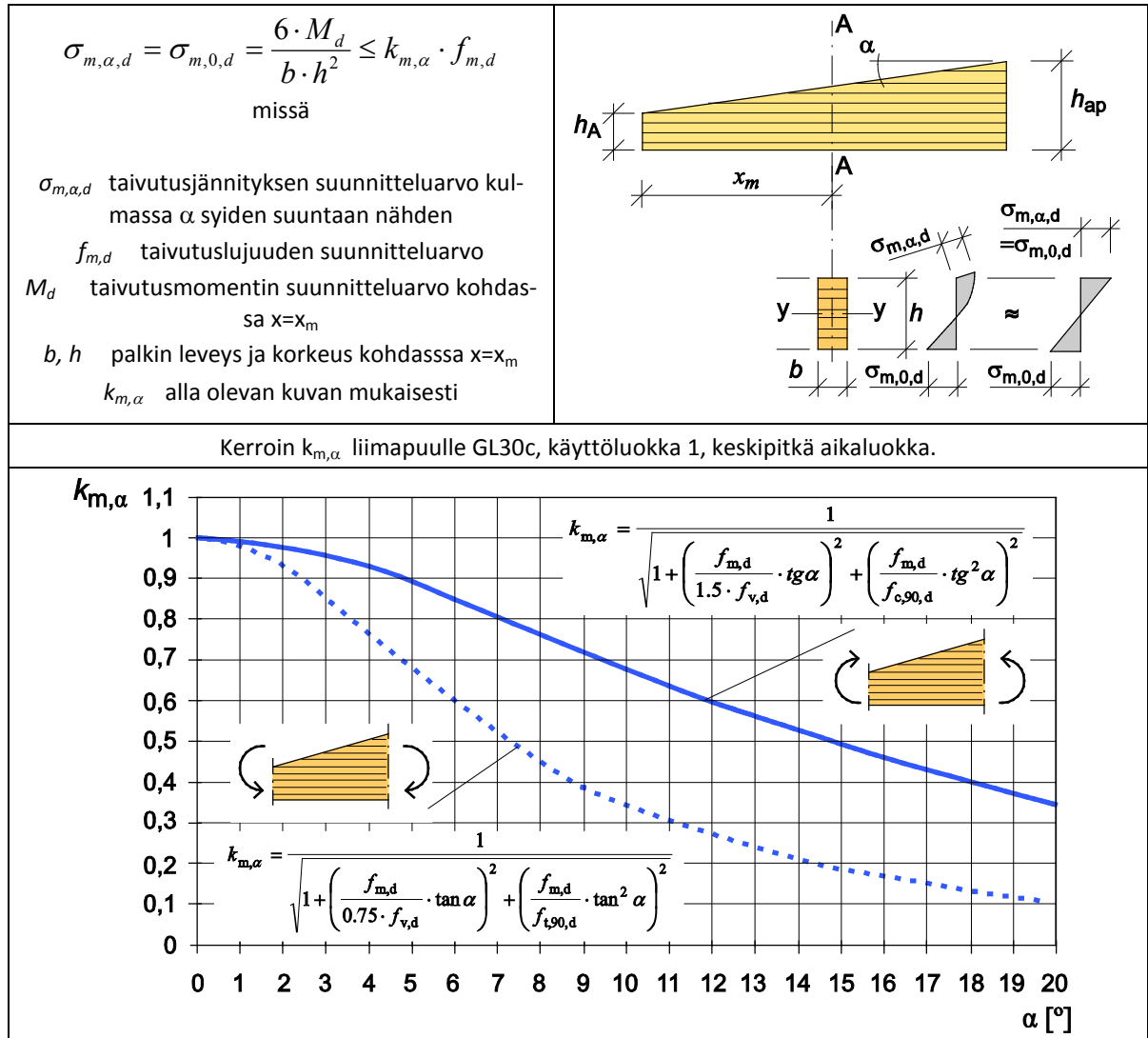
Huomaa että reiän kummallakin puolella tulee käyttää vain yhtä ruuviriviä kriittisessä poikkileikkauksessa, ks. esimerkiksi Taulukko 10-10

TAULUKKO 11-2

Tasaisesti kuormitettujen yksinkertaisten palkkien sen poikkileikkauksen sijainti, missä taivutusjännitykset ovat suurimmat, $x_m = x\{\sigma_{m\max}\}$.

	$x_m = \frac{l_{ap}}{h_{ap}/h_A + 2 \cdot l_{ap}/l - 1}$ $h_x = h_A + \frac{x_m}{l_{ap}} \cdot (h_{ap} - h_A)$
	$x_m = \frac{l \cdot h_A}{2 \cdot h_{ap}}$ $h_x = h_A \cdot (2 - h_A/h_{ap})$
	$x_m = \frac{l \cdot h_A}{2 \cdot h_1}$ $h'_x = h_A \cdot (2 - h_A/h_1)$
	$x_m = \frac{l}{1 + h_{ap}/h_A}$ $h_x = \frac{2 \cdot h_{ap}}{1 + h_{ap}/h_A}$

TAULUKKO 11-3

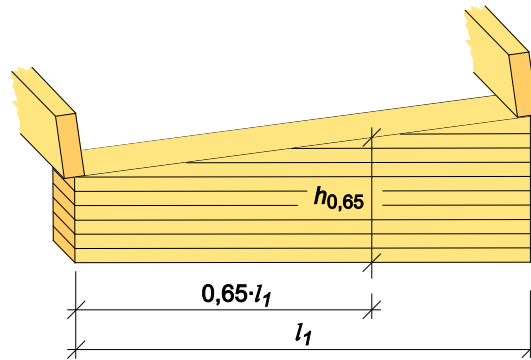
Taivutusjännitys kohdassa x_m , EC5 luku 6.4.2.

11.1 Palkkien kiepahdus kun poikkileikkauksen korkeus ei ole vakio

Kun palkin korkeus ei ole vakio, niin kiepahdus pitää tarkistaa kahdessa alueessa. Nämä ovat:

- suurimman taivutuslujuuden $\sigma_{m,d}$ määrittelemä alue
- epäedullisimman kiepahduskertoimen k_{crit} määrittelemä alue

Colling, F., 2008 mukaan yksinkertaisen palkin kiepahtaminen pitää tarkistaa etäisyydellä $0,65 \cdot l_1$ tukea lähinnä olevasta sivutuennasta, missä l_1 on kiepahduspituus, ks. Kuva 11-1.

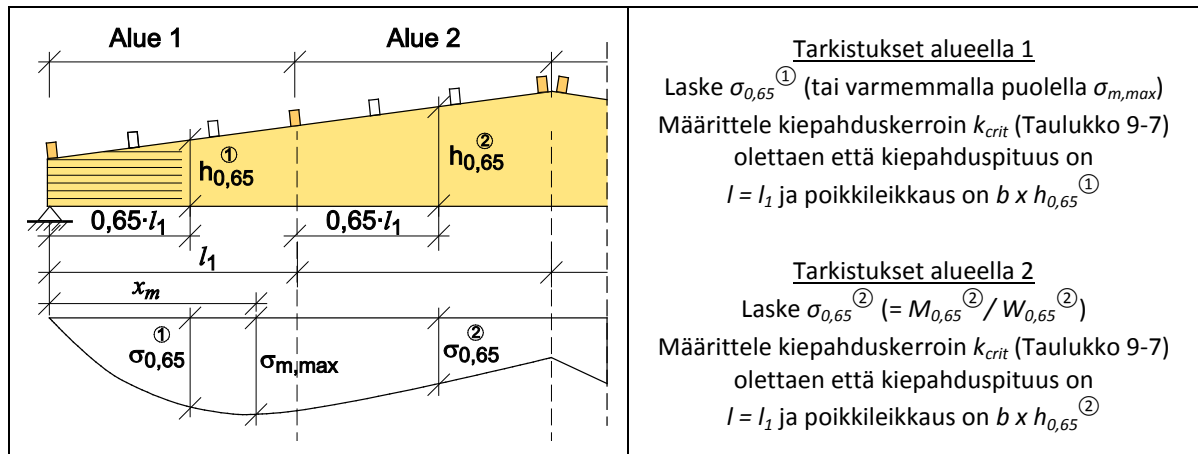


KUVA 11-1

Kiepahduksen kannalta kriittisen poikkileikkauksen sijainti.

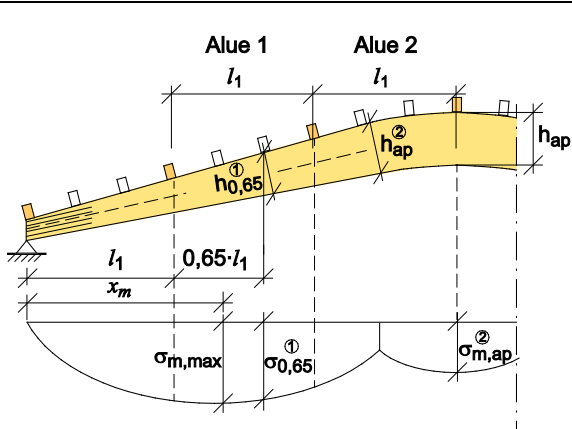
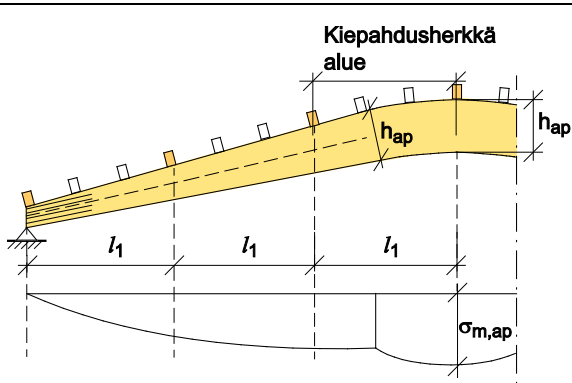
TAULUKKO 11-4

Harjapalkkien kiepahdus, Colling, F., 2008.



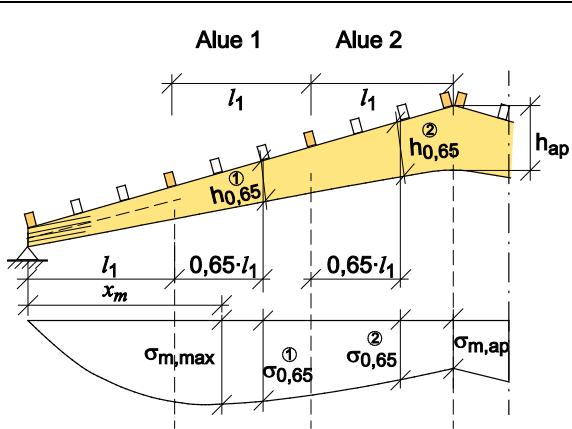
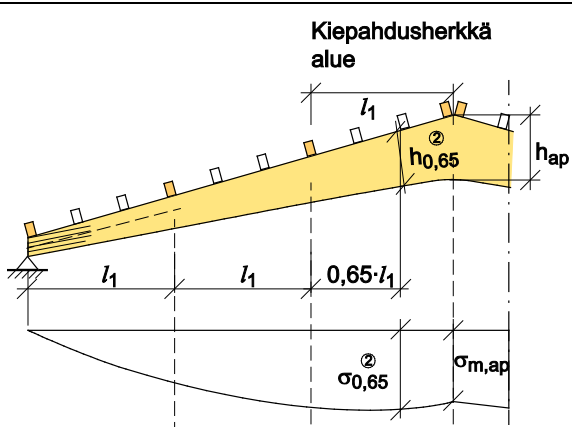
TAULUKKO 11-5

Kaarevien palkkien kiepahdus, Colling, F., 2008.

Tapaus 1: Suurin taivutusrasitus palkin lineaarisella osalla	
	<u>Tarkistukset alueella 1</u> Laske $\sigma_{0,65}^{①}$ (tai varmemmalla puolella $\sigma_{m,max}$) Määrittele kiepahduskerroin k_{crit} (Taulukko 9-7) olettaen että kiepahduspituus on $l = l_1$ ja poikkileikkaus on $b \times h_{0,65}^{①}$ <u>Tarkistukset alueella 2</u> Laske $\sigma_{m,ap,d} (= M_{ap,d} / W_{ap})$ Määrittele kiepahduskerroin k_{crit} olettaen että kiepahduspituus on $l = l_1$ ja poikkileikkaus on $b \times h_{ap}$
Tapaus 2: Suurin taivutusrasitus palkin kaarevalla osalla	
	Tarkista kiepahdus Laske $\sigma_{m,ap,d} (= M_{ap,d} / W_{ap})$ Määrittele kiepahduskerroin k_{crit} olettaen että kiepahduspituus on $l = l_1$ ja poikkileikkaus on $b \times h_{ap}$

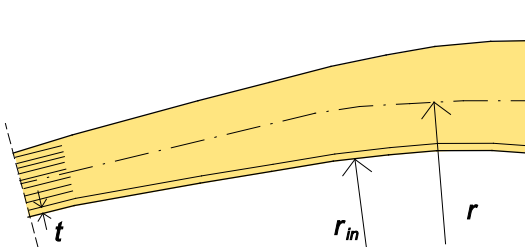
TAULUKKO 11-6

Kaarevien harjapalkkien kiepahdus, Colling, F., 2008.

Tapaus 1: Suurin taivutusrasitus palkin lineaarisella osalla	
	<u>Tarkistukset alueella 1</u> Laske $\sigma_{0,65}^{(1)}$ (tai varmemmalla puolella $\sigma_{m,max}$) Määrittele kiepahduskerroin k_{crit} (Taulukko 9-7) olettaen että kiepahduspituus on $l = l_1$ ja poikkileikkaus on $b \times h_{0,65}^{(1)}$ <u>Tarkistukset alueella 2</u> Laske $\sigma_{0,65}^{(2)} (= M_{0,65}^{(2)} / W_{0,65}^{(2)})$ Määrittele kiepahduskerroin k_{crit} olettaen että kiepahduspituus on $l = l_1$ ja poikkileikkaus on $b \times h_{0,65}^{(2)}$ (tai varmemmalla puolella $b \times h_{ap}$)
Tapaus 2: Suurin taivutusrasitus palkin kaarevalla osalla	
	Tarkista kiepahdus Laske $\max \{ \sigma_{m,ap,d}; \sigma_{0,65}^{(2)} \}$ siis $\max \{ M_{ap,d} / W_{ap,m,ap,d}; M_{0,65}^{(2)} / W_{0,65}^{(2)} \}$ Määrittele kiepahduskerroin k_{crit} olettaen että kiepahduspituus on $l = l_1$ ja poikkileikkaus on $b \times h_{0,65}^{(2)}$ (tai varmemmalla puolella $b \times h_{ap}$)

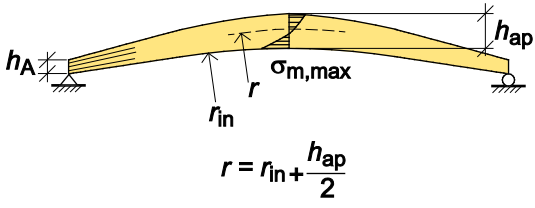
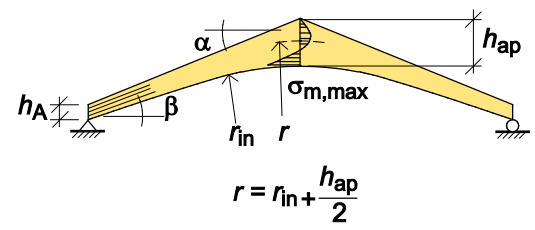
TAULUKKO 11-7

Harjan taivutusjännitys, EC5 luku 6.4.3

$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h_{ap}^2} \leq k_r \cdot f_{m,d}$ missä $\sigma_{m,d}$ harjan taivutusjännityksen suunnitteluarvo $f_{m,d}$ taivutuslujuuden suunnitteluarvo M_d harjan taivutusmomentin suunnitteluarvo b, h_{ap} palkin leveys ja korkeus harjalla k_l ks Taulukko 11-13 $k_r = \begin{cases} 1 & \text{kun } r_{in} \geq 240 \cdot t \\ 0,76 + \frac{r_{in}}{1000 \cdot t} & \text{kun } r_{in} < 240 \cdot t \end{cases}$	
--	--

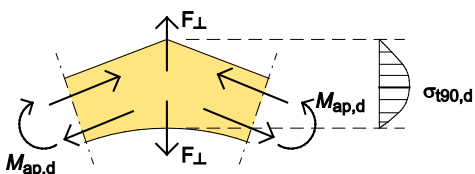
TAULUKKO 11-8

Harjan taivutusjännityksen laskemiseksi tarvittavat k_l -arvot, EC5 luku 6.4.3.

 $r = r_{in} + \frac{h_{ap}}{2}$	$k_l = 1 + 0,35 \cdot \frac{h_{ap}}{r} + 0,6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2$
 $r = r_{in} + \frac{h_{ap}}{2}$	$k_l = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3$ $k_1 = 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha$ $k_2 = 0,5 - 8 \cdot \tan \alpha$ $k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \tan \alpha - 7,8 \cdot \tan^2 \alpha$ $k_4 = 6 \cdot \tan^2 \alpha$ α tulee olla $\leq 15^\circ$

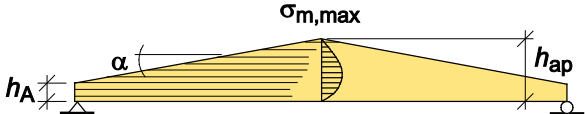
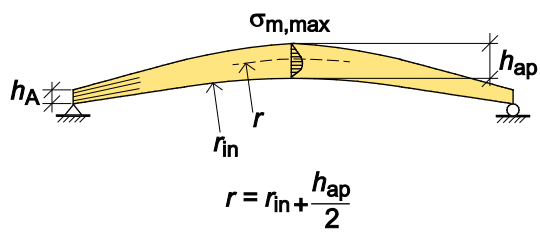
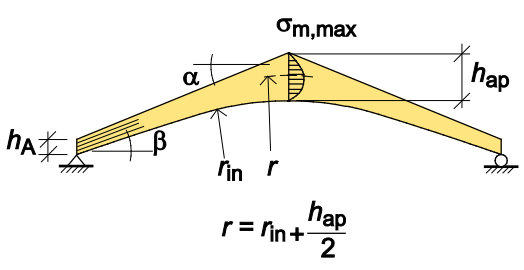
TAULUKKO 11-9

Vetojäännitys syitä vastaan kohtisuoraan, EC5 luku 6.4.3.

$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h_{ap}^2} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}$ missä $\sigma_{t,90,d}$ vetojäännitys syitä vastaan kohtisuoraan huipussa, suunnitteluarvo $f_{m,d}$ vetolujuus syitä vastaan kohtisuoraan huipussa, suunnitteluarvo M_d taivutusmomentti huipussa, suunnitteluarvo k_{dis} ks. Taulukko 11-11 $k_{vol} = (V_0/V)^{0,2}$ liimapuulle vertailutilavuus $V_0 = 0.01 \text{ m}^3$ ja V on harjavyöhykkeen jännitetty tilavuus m^3 (ks. Taulukko 11-11). V:n arvo saa olla enintään 2/3 palkin kokonaistilavuudesta k_p ks. Taulukko 11-10	
	

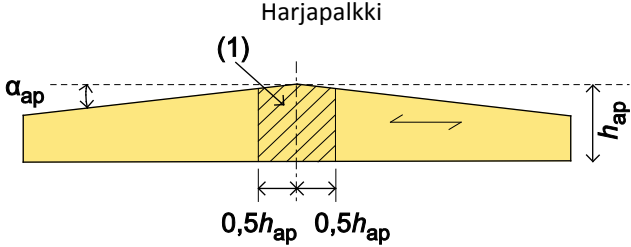
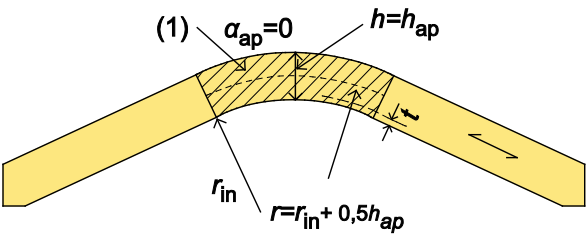
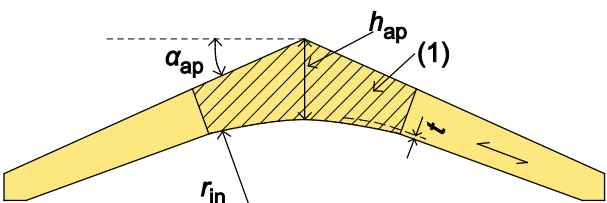
TAULUKKO 11-10

Sytä vastaan kohtisuoraan olevan vetojännityksen laskemiseksi tarvittavat k_p arvot, EC5 luku 6.4.3.

	$k_p = 0,2 \cdot \tan \alpha$ α tulisi olla $\leq 10^\circ$
 $r = r_{in} + \frac{h_{ap}}{2}$	$k_p = 0,25 \cdot \frac{h_{ap}}{r}$
 $r = r_{in} + \frac{h_{ap}}{2}$	$k_p = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2$ $k_1 = 0,2 \cdot \tan \alpha$ $k_2 = 0,25 - 1,5 \cdot \tan \alpha + 2,6 \cdot \tan^2 \alpha$ $k_3 = 2,1 \cdot \tan \alpha - 4 \cdot \tan^2 \alpha$

TAULUKKO 11-11

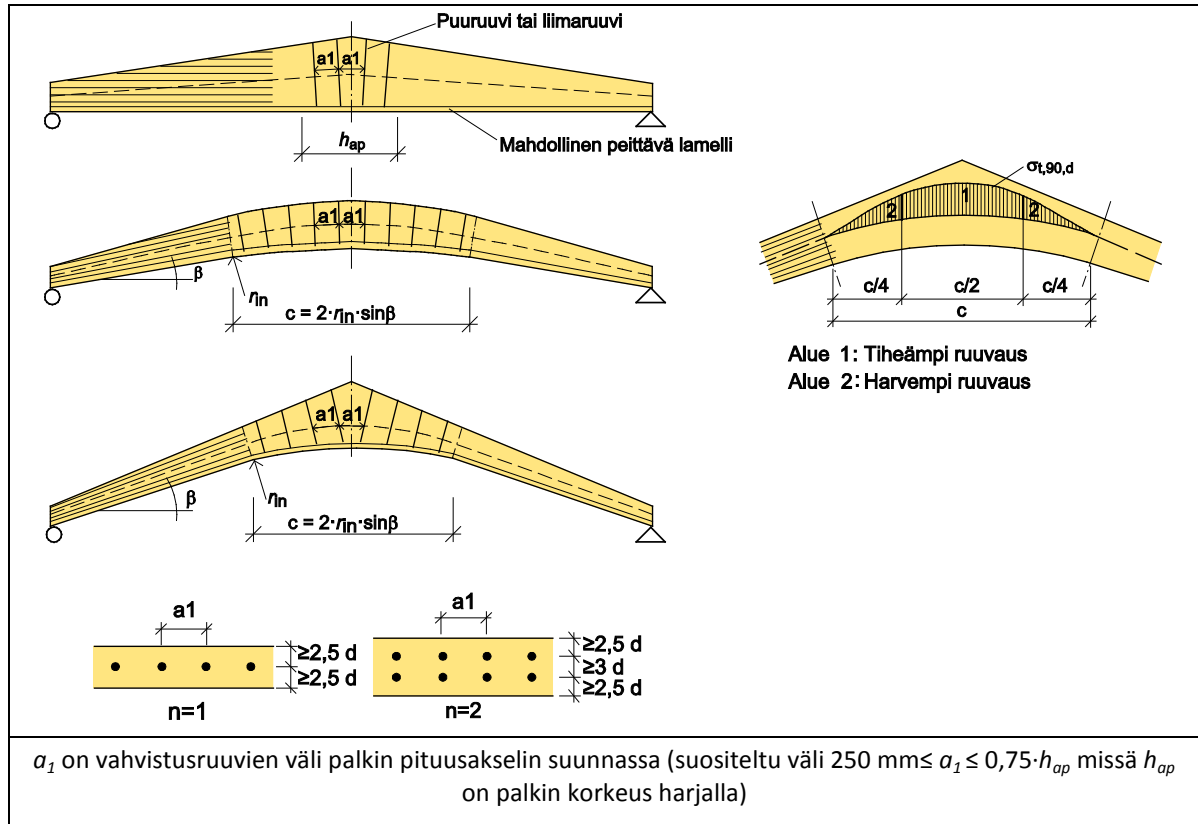
Tyypillisten palkkien k_{dis} -arvot ja tilavuus V , EC5 luku 6.4.3 (b on palkin leveys).

Palkin tyyppi	k_{dis}	V
Harjapalkki 	1,4	$\sim b \cdot (h_{ap})^2$
Kaareva 	1,4	Kaarevan osan tilavuus (1)*
Kaareva harjapalkki 	1,7	Kaarevan osan tilavuus (1)*

* V :n arvo saa olla enintään 2/3 palkin kokonaistilavuudesta

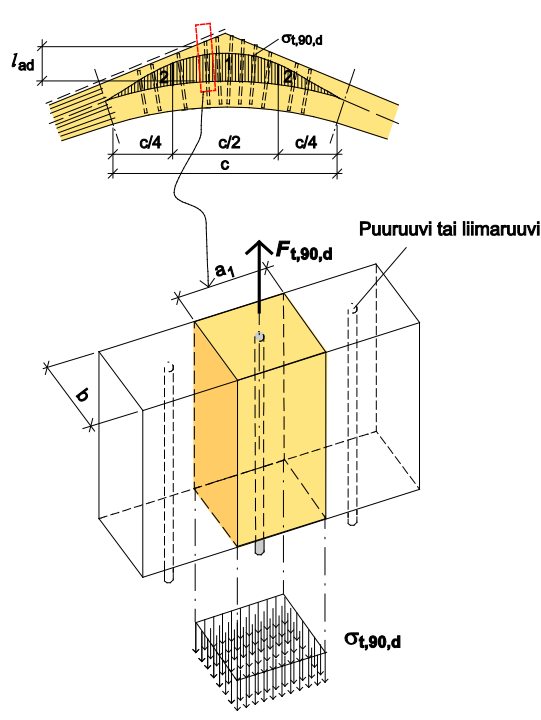
TAULUKKO 11-12

Vahvistavien ruuvien tai liimatankojen sijoittaminen, DIN-EN 1995-1-1/NA.



TAULUKKO 11-13

Palkin vahvistaminen syitä vastaan kohtisuoraan olevia vetojännityksiä vastaan.

Harjan keskialueella vaikuttava vetovoima syitä vastaan kohtisuoraan, suunnitteluarvo $F_{t,90,d} = \frac{\sigma_{t,90,d} \cdot b \cdot a_1}{n}$ Harjan ulkoneljänneksillä vaikuttava vetovoima syitä vastaan kohtisuoraan, suunnitteluarvo $F_{t,90,d} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_{t,90,d} \cdot b \cdot a_1}{n}$ tarkista että $F_{t,90,d} \leq R_{t,d}$ missä $\sigma_{t,90,d}$ vetojännitys syitä vastaan kohtisuoraan hui- pussa, suunnitteluarvo b palkin leveys a_1 vahvistuksien väli palkin pituusakselin suun- nassa (suositeltu väli $250 \text{ mm} \leq a_1 \leq 0,75 \cdot h_{ap}$ missä h_{ap} on palkin korkeus harjalla). Ks. Tau- lukko 11-12 n vahvistavien ruuvien lukumäärä kohtisuoraan palkin pituusakselia vastaan ($n=1$ tai 2). Ks. Taulukko 11-12 R_{td} vahvistamiseen käytetyn ruuvin tai liimatang- on aksiaalinen lujuus; vetolujuus tai ulosveto- lujuus, kumpi vain on pienempi. Liimatangon tai ruuvin tartuntapituutena käytetään arvoa l_{ad}, katso kuvasta			
--	--	---	--

12 KÄYTTÖRAJATILA

12.1 Yleistä

Taipumien laskennassa käytetään yleensä kimmokertoimien ja liukukertoimien keskiarvoja. Kuormitusajan vaikutus otetaan huomioon määrittelemällä kimmokertoimen pitkäaikainen arvo yhtälöstä

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{1 + k_{def}}$$

missä k_{def} ottaa huomioon kosteuden vaikutuksen muodonmuutokseen. k_{def} arvot ks. Taulukko 12-1.

TAULUKKO 12-1

Puutuotteiden k_{def} -arvoja, SFS-EN 1995-1-1.

Materiaali	Standardi	Käyttöluokka		
		1	2	3
Sahatavara	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Liimapuu	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL syrjällä	EN 14374	0,60	0,80	2,00
Ristiviilullinen LVL lappeella	EN 14374	0,80	1,00	2,50
Vaneri	EN 636	0,80	1,00	2,50
OSB	EN300			
	OSB/2	2,25	-	-
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	-

TAULUKKO 12-2

Siirtymäkertoimen K_{ser} arvot leikkausta ja liitintä kohti kahden puun ja puun ja puulevyn välisissä liitoksissa. ρ_m on puun keskimääräinen tiheys ja d on liittimen halkaisija mm. Jos liitettävien osien keskimääräiset tiheydet ρ_{m1} ja ρ_{m2} poikkeavat toisistaan, käytetään niiden tulon neliöjuurta $\rho_m = (\rho_{m1} \cdot \rho_{m2})^{0,5}$

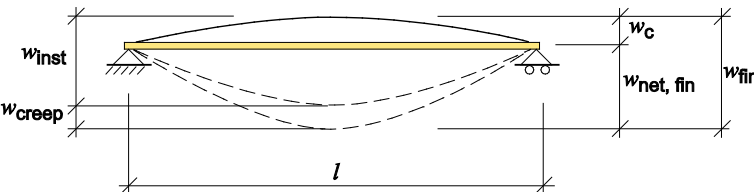
Liitintyyppi	K_{ser} [N/mm]
Tappivaarnat Pultit ^(a) Ruuvit Naulat (esiporausta käytettäessä)	$\rho_m^{1,5} d / 23$
Naulat (ilman esiporausta)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 30$

^(a) Reiän mahdollinen välys on lisättävä liitoksen siirtymään

12.2 Taipumat

TAULUKKO 12-3

Taipumien laskeminen. Käsiteltävät kuormitusyhdistelmät, ks Taulukko 5-3. k_{def} -arvot, ks. Taulukko 12-1. ψ_2 -arvot ks. Taulukko 5-4.

	w_{inst}	hetkellinen taipuma
	w_{creep}	viruman aiheuttama taipuma
	w_c	mahdollinen esikorotus
	w_{fin}	lopullinen taipuma
	$w_{net,fin}$	lopullinen nettotaipuma
-	Tarkasteltavan kuormitusyhdistelmän aiheuttama hetkellinen taipuma	
	w_{inst}	
-	Viruman aiheuttama taipuma	
	$w_{creep,p} = k_{def} \cdot w_{inst}$	pysyvästä kuormasta
	$w_{creep,v} = \psi_2 \cdot k_{def} \cdot w_{inst}$	muuttuvista kuormista
-	Lopullinen taipuma	
	$w_{fin} = w_{inst} + \sum w_{creep,i}$	
-	Lopullinen nettotaipuma	
	$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c$	

TAULUKKO 12-4

Esimerkkejä eri kuormitusyhdistelmien taipumarajoista. Ulokkeiden taipuma jännevälin suhteen saa olla kaksinkertainen.

	Rakennusosa	w_{inst}^*	w_{fin}^{**}	$w_{net,fin}^{***}$
EC5 luku	Kaksitukinen palkki	$L/300 \dots L/500$	$L/150 \dots L/300$	$L/250 \dots L/350$
	Ulokepalkki	$L/150 \dots L/250$	$L/75 \dots L/150$	$L/125 \dots L/175$
EC5 Suomen kansallinen liite	Pääkannattimet	$L/400$	$L/200$	$L/300$
	Orret ja muut toisiokannattimet	-	$L/150$	$L/200$
	Rakennuksen vaaka-siirtymä			$H/300$
Ruotsissa suositellut arvot	Kattopalkit	$L/300 \dots L/375$	$L/250 \dots L/300$	$L/160 \dots L/200$
	Lattiapalkit	$L/400 \dots L/600$	$L/300$	$L/200 \dots L/250$

* Koskee Suomessa pelkästään lattioita

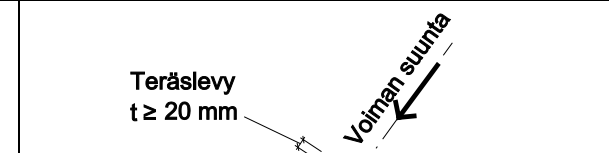
** Koskee Suomessa esikorotettuja rakenteita sekä tukipisteiden välillä kaarevia ja taitteellisia rakenteita

*** Koskee Suomessa kaikkia suoria rakenteita

13 KIRVESMIESLIITOKSET

TAULUKKO 13-1

Liitoksen kestävyys, sveitsiläisen normin SIA 265:2003 mukaan.

Liittyvien osien välissä ei ole teräslevyä 	Liittyvien osien välissä on teräslevyä 
Puristuslujuus kulmassa α syihin nähden	
$f_{c,\alpha,d} \leq \frac{0,8 \cdot f_{c,0,d} \cdot f_{c,90,d}}{0,8 \cdot f_{c,0,d} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,90,d} \cdot \cos^2 \alpha}$	$f_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d} \cdot f_{c,90,d}}{f_{c,0,d} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,90,d} \cdot \cos^2 \alpha}$

TAULUKKO 13-2

Kirvesmiesliitosten suunnittelu, SIA 265:2003 kirjoittajan mukailemana.

	Loven syvyys t	Leikkautuvan osan pituus a	Vinosauvan paksuus d
Vähimmäisarvot	$t \geq \frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot f_{c,\alpha,d}} \quad (a)$	$a \geq \frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot 0,5 \cdot f_{v,d}}$	$d \geq \frac{F_d}{b \cdot f_{c,\alpha,d}} \quad (b)$
Enimmäisarvot	$t \leq h/4 \quad \text{kun } \beta \leq 50^\circ \quad (c)$ $t \leq h/6 \quad \text{kun } \beta \geq 60^\circ$	$a \leq 8 \cdot t \quad (d)$	—

(a) määritettäessä lujuutta $f_{c,\alpha,d}$, käytetään arvoa $\alpha = 0,5 \cdot \beta$

(b) määritettäessä lujuutta $f_{c,\alpha,d}$, käytetään arvoa $\alpha = \beta$

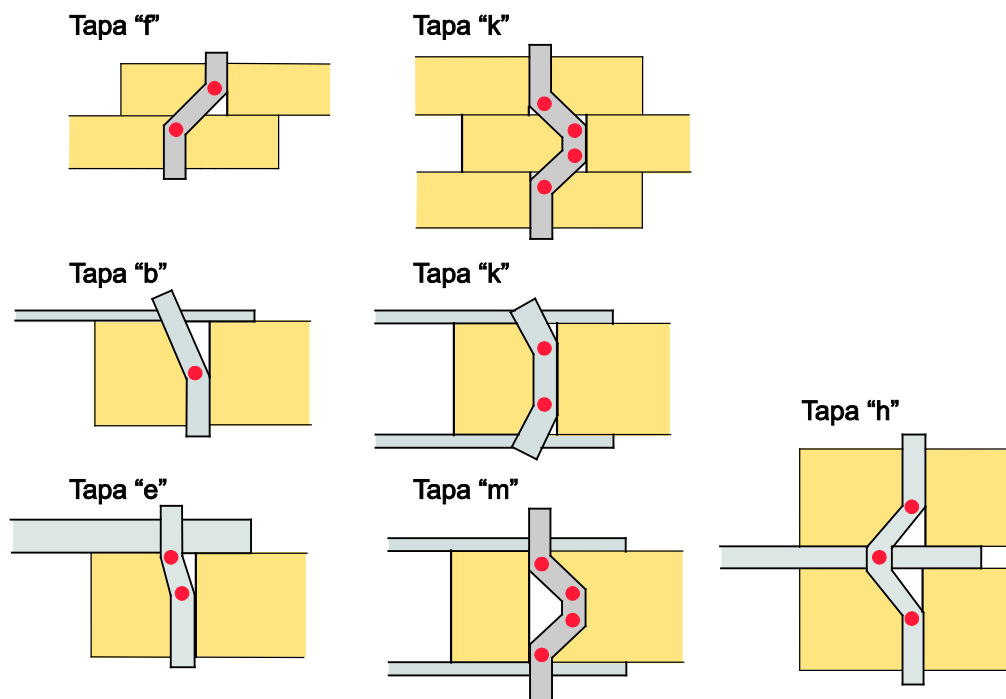
(c) kun $50^\circ < \beta < 60^\circ$ voidaan t määrittää lineaarisella interpolaatiolla

(d) Taulukossa annettua suurempaa leikkautuvan osan pituutta (a) voidaan käyttää. Kuitenkin jos $a > 8 \cdot t$, niin liitoksen lujuus pitää laskea käyttämällä arvoa $a = 8 \cdot t$.

14 METALLISIN PUIKKOLIITTIMIN TEHDYT LIITOKSET

14.1 Yleistä

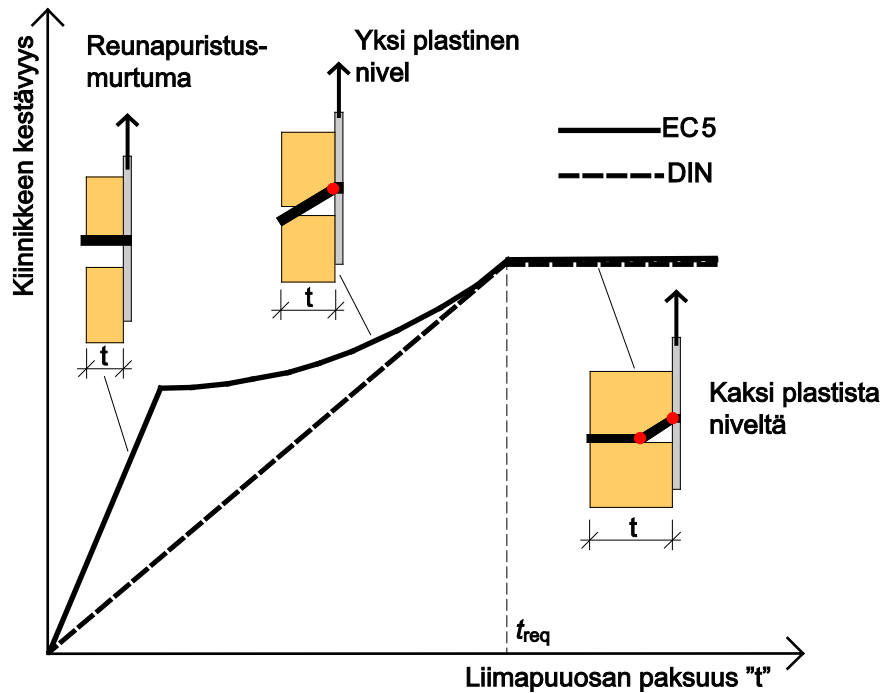
Tässä luvussa esitetyt liitosten laskentasäännöt perustuvat pääasiassa Eurokoodi 5:n lähestymistapaan. Liitokset pitäisi aina kuitenkin suunnitella niin, että niiden murtumistapa on sitkeä. Sen vuoksi tämän luvun taulukoissa (Taulukko 14-3 - Taulukko 14-11) on annettu kutakin liitinpaksuutta vastaavat materiaalityypit siten että saadaan vain sitkeitä murtumistapoja ja näiden yhdistelmien kestävyys. Haurasmurtumat on suljettu materiaalityypin valinnalla pois. Erityisesti valitussa esitystavassa pyritään siihen että liittimeen muodostuu yksi tai kaksi plastista niveltä mikä vastaa murtumistapoja f ja k puu-puu liitoksissa ja murtumistapoja b, e, h ja m teräslevy-puu liitoksissa, ks. KUVA 14-1. Näihin murtumistapoihin päästään paksuntamalla puuosia tai pienentämällä liittimen halkaisijaa.



KUVA 14-1

Liitosten sitkeät murtumistavat

Jos käytetään taulukoissa (Taulukko 14-3 - Taulukko 14-11) esitettyjä ohuempia puuosia tai paksumpia liittimiä niin murtumistavasta tulee hauras ja liitoksen kestävyys laskemiseen pitäisi käyttää EC5 luvun 8.2 mukaisia yhtälöitä. Haurasmurtuman tapauksessa DIN-EN 1995 1-1/NA:2010-12 esittää nopean ja varmallan puolella olevan tavan liitoksen kestävyys arviointiin. Sen mukaan sitkeän murtumistavan kestävyys voidaan pienentää lineaarisesti puuosan paksuuksien suhteella, jolloin kestävyys jää hieman EC5 luvun 8.2 mukaista pienemmäksi. KUVA 14-2 havainnollistaa tätä eroa sellaisen yksileikkeisen liitoksen tapauksessa, missä käytetään paksua teräslevyä.



KUVA 14-2

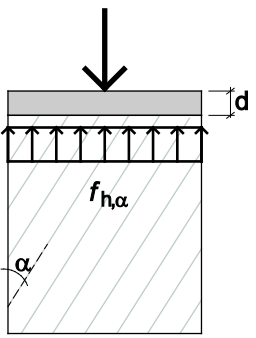
Yksileikkeinen liitos, missä käytetään paksua teräslevyä. EC5:n ja DINin mukaan laskettujen liittimien kestävyysien välinen ero.

Puurakenteiden liitosten laskennassa käytettäviä suureita

$F_{v,Rk}$	yhden liittimen ominaiskestävyys leikettä kohti
$f_{h,i,k}$	liitettävän osan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo
t_i	liitettävän osan paksuus (tai naulan tai ruuvin tunkeumasyvyyys)
d	liittimen halkaisija
$M_{y,Rk}$	liittimen myötömomentin ominaisarvo
$\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$	liitettävien osien 1 ja 2 reunapuristuslujuuksien suhde. Yksileikkeisissä liitoksissa osien numeroinnilla ei ole merkitystä. Kaksileikkeisissä puu-puu liitoksissa osa 2 tarkoittaa keskimmäistä osaa.

TAULUKKO 14-1

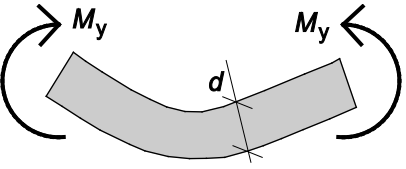
Reunapuristuslujuuden ominaisarvo liimapuulle GL30c ($\rho_k = 390 \text{ kg/m}^3$)

Liimapuun GL 30c reunapuristuslujuus $f_{h,\alpha,k}$ [N/mm ²]									
			Liittimillä esiporatut reiät $f_{h,\alpha,k} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{(1,35 + 0,015 \cdot d) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$ Naulat ilman esiporausta ($d \leq 6 \text{ mm}$): $f_{h,k} = 0,082 \cdot d^{-0,3} \cdot \rho_k$						
Liittimen halkaisija d [mm]		4 ^(a)	8	10	12	16	20	24	30
Kulma α syysuuntaan nähden	0°	21,1	29,4	28,8	28,1	26,9	25,6	24,3	22,4
	20°	21,1	27,9	27,2	26,5	25,1	23,8	22,4	20,5
	40°	21,1	24,6	23,9	23,1	21,6	20,2	18,8	16,8
	60°	21,1	21,8	20,9	20,1	18,6	17,2	15,9	14,0
	80°	21,1	20,2	19,4	18,6	17,1	15,7	14,4	12,6
	90°	21,1	20,0	19,2	18,4	16,9	15,5	14,2	12,4

^(a) ilman esiporausta

TAULUKKO 14-2

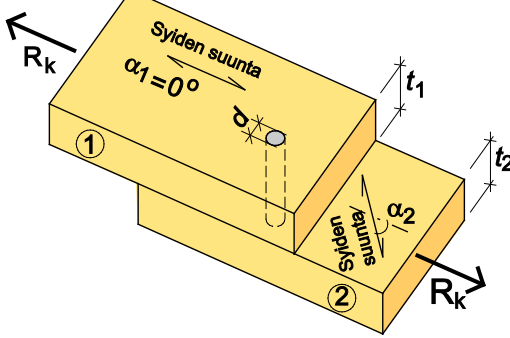
Eräistä tyypillisistä teräslajeista tehtyjen pulttien ja tappien myötömomenttien ominaisarvoja

Myötömomentti $M_{y,k}$ [kN·mm]									
			$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$						
Liittimen halkaisija d [mm]		4	8	10	12	16	20	24	30
Liittimen teräslaji tai lujuusluokka	S355	-	34,10	60,91	97,85	206,7	369,3	593,3	1060
	4.6/4.8	-	26,74	47,77	76,75	162,1	289,6	465,3	831
	5.6/5.8	-	33,43	59,72	95,93	202,7	362,1	581,6	1039
	f _u =600	6,62	-	-	-	-	-	-	-
	8.8	-	53,49	95,55	153,49	324,3	579,3	930,6	1662

14.2 Puu-puu liitokset

TAULUKKO 14-3

Yksileikkeinen puu-puu liitos. Puun tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kaksi plastista niveltä ja tätä vastaava liitoksen leikkauskestävyys. Puuosat liimapuuta GL30c, liittimet terästä S355. Vastaa-
vat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M), missä $\gamma_M=1,2$.

			$R_k = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (a)$					
			$t_1 \geq t_{1,req} = 1.15 \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}}$					
			$t_2 \geq t_{2,req} = 1.15 \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}}$					
d = 8 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	47 mm	0°	47 mm	0°	46 mm	0°	45 mm
	0°	47 mm	30°	51 mm	60°	57 mm	90°	59 mm
		R _k = 4,6 kN		R _k = 4,5 kN		R _k = 4,2 kN		R _k = 4,1 kN
d = 10 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	57 mm	0°	56 mm	0°	55 mm	0°	55 mm
	0°	57 mm	30°	61 mm	60°	69 mm	90°	73 mm
		R _k = 6,8 kN		R _k = 6,6 kN		R _k = 6,2 kN		R _k = 6,1 kN
d = 12 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	67 mm	0°	65 mm	0°	64 mm	0°	63 mm
	0°	67 mm	30°	67 mm	60°	72 mm	90°	86 mm
		R _k = 9,3 kN		R _k = 9,1 kN		R _k = 8,6 kN		R _k = 8,3 kN
d = 16 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	86 mm	0°	84 mm	0°	83 mm	0°	82 mm
	0°	86 mm	30°	97 mm	60°	107 mm	90°	113 mm
		R _k = 15,3 kN		R _k = 14,5 kN		R _k = 13,9 kN		R _k = 13,5 kN
d = 20 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	105 mm	0°	105 mm	0°	101 mm	0°	100 mm
	0°	105 mm	30°	111 mm	60°	134 mm	90°	142 mm
		R _k = 22,4 kN		R _k = 21,9 kN		R _k = 20,0 kN		R _k = 19,4 kN

d= 24 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	125 mm	0°	123 mm	0°	119 mm	0°	118 mm
	0°	125 mm	30°	138 mm	60°	161 mm	90°	172 mm
	$R_k = 30,3 \text{ kN}$		$R_k = 29 \text{ kN}$		$R_k = 26,9 \text{ kN}$		$R_k = 26,0 \text{ kN}$	

$$R_{k,red} = R_k \cdot \min \left\{ \frac{t_1}{t_{1,req}}; \frac{t_2}{t_{2,req}} \right\}$$

^(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ tai $t_2 < t_{2,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä

TAULUKKO 14-4

Kaksileikkeinen puu-puu liitos. Puun tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kaksi plastista niveltä ja tätä vastaava liitoksen leikkauskestävyys. Puuosat liimapuuta GL30c, pultit tai tapit terästä S355. Sauva 2 on keskisauva. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M=1,2$.

$$R_k = 2 \cdot \left(1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \right)$$
$$t_1 \geq t_{1,req} = 1.15 \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}}$$
$$t_2 \geq t_{2,req} = 1.15 \cdot \left(4 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}}$$

d = 8 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	47 mm	0°	47 mm	0°	46 mm	0°	45 mm
	0°	39 mm	30°	43 mm	60°	49 mm	90°	52 mm
	$R_k = 9,2 \text{ kN}$		$R_k = 9,0 \text{ kN}$		$R_k = 8,5 \text{ kN}$		$R_k = 8,3 \text{ kN}$	
d = 10 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	57 mm	0°	56 mm	0°	55 mm	0°	55 mm
	0°	47 mm	30°	52 mm	60°	60 mm	90°	63 mm
	$R_k = 13,6 \text{ kN}$		$R_k = 13,2 \text{ kN}$		$R_k = 12,5 \text{ kN}$		$R_k = 12,2 \text{ kN}$	
d = 12 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	67 mm	0°	65 mm	0°	64 mm	0°	63 mm
	0°	55 mm	30°	61 mm	60°	71 mm	90°	76 mm
	$R_k = 18,7 \text{ kN}$		$R_k = 18,2 \text{ kN}$		$R_k = 17,2 \text{ kN}$		$R_k = 16,7 \text{ kN}$	
d = 16 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	86 mm	0°	84 mm	0°	83 mm	0°	82 mm
	0°	71 mm	30°	83 mm	60°	93 mm	90°	100 mm
	$R_k = 30,7 \text{ kN}$		$R_k = 29,1 \text{ kN}$		$R_k = 27,7 \text{ kN}$		$R_k = 26,9 \text{ kN}$	
d = 20 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	105 mm	0°	105 mm	0°	101 mm	0°	100 mm
	0°	87 mm	30°	93 mm	60°	117 mm	90°	125 mm
	$R_k = 44,7 \text{ kN}$		$R_k = 43,7 \text{ kN}$		$R_k = 40,1 \text{ kN}$		$R_k = 38,8 \text{ kN}$	

d= 24 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	125 mm	0°	123 mm	0°	119 mm	0°	118 mm
	0°	104 mm	30°	117 mm	60°	141 mm	90°	152 mm
	R_k = 60,5 kN		R_k = 58,0 kN		R_k = 53,8 kN		R_k = 52,0 kN	

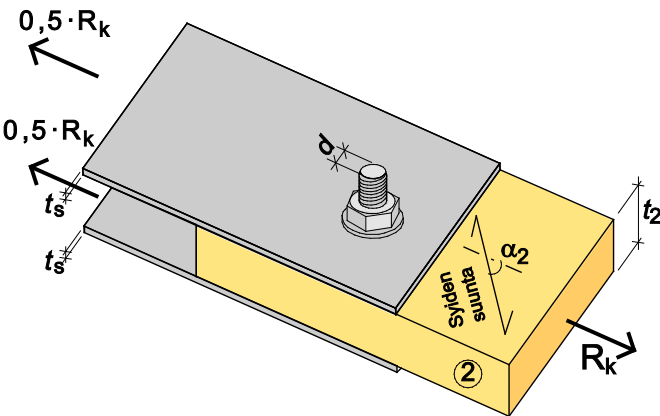
$$R_{k,red} = R_k \cdot \min \left\{ \frac{t_1}{t_{1,req}}; \frac{t_2}{t_{2,req}} \right\}$$

^(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ tai $t_2 < t_{2,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä

14.3 Teräslevyin tehdyt liitokset

TAULUKKO 14-5

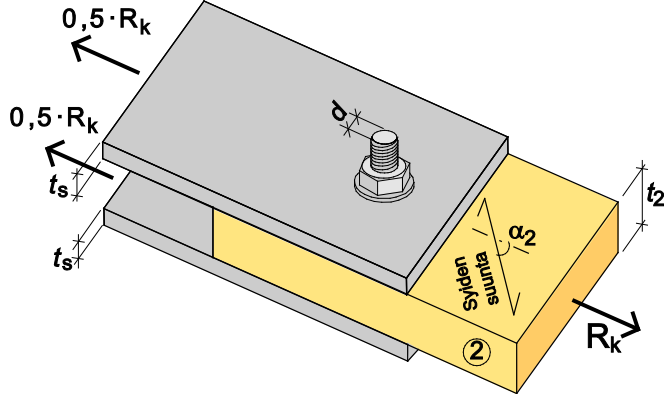
Kaksileikkeinen teräs-puu liitos, ohuet teräslevyt. Puun tarvittava vähimmäispaksuus, jotta liittimeen muodostuu plastinen nivel, ja tätä vastaava liitoksen leikkauskestävyys. Puuosat liimapuuta GL30c, pultti terästä 4.8. Jos teräslevyn paksuus on suurempi kuin $0,4d$ voidaan liitoksen kestävyyttä laskettaessa ottaa huomioon köysivaikutus $R_{k,tot}=R_k + \Delta R_k$. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M=1,2$.

			$R_k = 2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} \quad (a)$					
			$0,4 \cdot d < t_s \leq 0,5 \cdot d$					
			$t_2 \geq t_{2,req} = 1,15 \cdot (2 \cdot \sqrt{2}) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}}$					
d = 8 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 3,0 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	35 mm	30°	37 mm	60°	40 mm	90°	42 mm
	$R_k = 8,2 \text{ kN}$		$R_k = 7,7 \text{ kN}$		$R_k = 7,0 \text{ kN}$		$R_k = 6,7 \text{ kN}$	
d = 10 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 4,7 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	42 mm	30°	44 mm	60°	49 mm	90°	51 mm
	$R_k = 12,1 \text{ kN}$		$R_k = 11,4 \text{ kN}$		$R_k = 10,3 \text{ kN}$		$R_k = 9,8 \text{ kN}$	
d = 12 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 6,9 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	49 mm	30°	52 mm	60°	58 mm	90°	61 mm
	$R_k = 16,6 \text{ kN}$		$R_k = 15,6 \text{ kN}$		$R_k = 14,0 \text{ kN}$		$R_k = 13,4 \text{ kN}$	
d = 16 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 12,8 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	63 mm	30°	70 mm	60°	76 mm	90°	80 mm
	$R_k = 27,2 \text{ kN}$		$R_k = 24,6 \text{ kN}$		$R_k = 22,6 \text{ kN}$		$R_k = 21,5 \text{ kN}$	
d = 20 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 20,0 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	77 mm	30°	81 mm	60°	94 mm	90°	99 mm
	$R_k = 39,6 \text{ kN}$		$R_k = 37,9 \text{ kN}$		$R_k = 32,5 \text{ kN}$		$R_k = 30,8 \text{ kN}$	
d = 24 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 28,8 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	92 mm	30°	100 mm	60°	114 mm	90°	120 mm
	$R_k = 53,6 \text{ kN}$		$R_k = 49,4 \text{ kN}$		$R_k = 43,3 \text{ kN}$		$R_k = 41 \text{ kN}$	
d = 30 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 45,9 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$
	0°	114 mm	30°	125 mm	60°	145 mm	90°	154 mm
	$R_k = 76,8 \text{ kN}$		$R_k = 70,2 \text{ kN}$		$R_k = 60,8 \text{ kN}$		$R_k = 57,3 \text{ kN}$	

(a) Jos $t_2 < t_{2,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_2 / t_{2,req}$

TAULUKKO 14-6

Kaksileikkeinen teräs-puu liitos, paksut teräslevyt. Puun tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kolme plastista niveltä ja tätä vastaava liitoksen leikkauskestävyys. Puuosat liimapuuta GL30c, pultti terästä 4.8. Jos teräslevyn paksuus on suurempi kuin $0,4d$ voidaan liitoksen kestävyttä laskettaessa ottaa huomioon köysivaikutus $R_{k,tot}=R_k + \Delta R_k$. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M=1,2$.

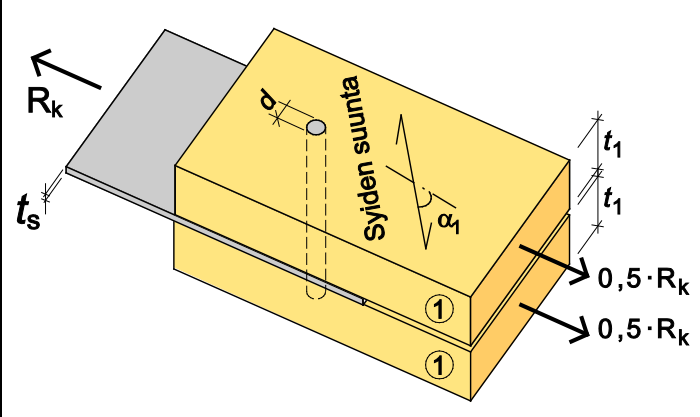
					$R_k = 2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,2,k} \cdot d}$ (a)				
					$t_s \geq d$				
					$t_2 \geq t_{2,req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}}$				
d = 8 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 3,0 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	49 mm	30°	52 mm	60°	57 mm	90°	59 mm	
	R_k = 11,5 kN		R_k = 10,9 kN		R_k = 9,9 kN		R_k = 9,5 kN		
d = 10 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 4,7 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	59 mm	30°	63 mm	60°	69 mm	90°	73 mm	
	R_k = 17,1 kN		R_k = 16,1 kN		R_k = 14,5 kN		R_k = 13,9 kN		
d = 12 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 6,9 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	69 mm	30°	74 mm	60°	82 mm	90°	86 mm	
	R_k = 23,4 kN		R_k = 22,0 kN		R_k = 19,8 kN		R_k = 18,9 kN		
d = 16 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 12,8 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	89 mm	30°	99 mm	60°	107 mm	90°	113 mm	
	R_k = 38,4 kN		R_k = 34,8 kN		R_k = 32,0 kN		R_k = 30,5 kN		
d = 20 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 20,0 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	109 mm	30°	114 mm	60°	133 mm	90°	141 mm	
	R_k = 56,0 kN		R_k = 53,6 kN		R_k = 45,9 kN		R_k = 43,6 kN		
d = 24 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 28,8 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	130 mm	30°	141 mm	60°	161 mm	90°	170 mm	
	R_k = 75,8 kN		R_k = 69,8 kN		R_k = 61,2 kN		R_k = 58,0 kN		
d = 30 mm ($\Delta R_k = F_{ax}/4 = 45,9 \text{ kN}$)	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	α_2	$t_{2,req}$	
	0°	162 mm	30°	177 mm	60°	205 mm	90°	217 mm	
	R_k = 108,7 kN		R_k = 99,2 kN		R_k = 85,9 kN		R_k = 81,0 kN		

(a) Jos $t_2 < t_{2,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_2 / t_{2,req}$

14.4 Upotetuin teräslevyin tehdyt liitokset

TAULUKKO 14-7

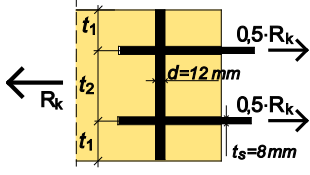
Upotetuin teräslevyin tehty liitos, yksi levy. Puun tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kolme plastista niveltä ja tätä vastaava liitoksen leikkauskestävyys. Puuosat liimapuuta GL30c, liitin terästä S355. Teräslevyn paksuudeksi on oletettu $d/1,5$ missä d on liittimen paksuus. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella $(k_{\text{mod}}/\gamma_M)$, missä $\gamma_M=1,2$.

	$R_k = 2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d}$ (a)							
	$t_s \geq 0,5 \cdot d$							
	$t_1 \geq t_{1,req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}} - 0,5 \cdot t_s$							
d = 8 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	57 mm	30°	60 mm	60°	66 mm	90°	69 mm
	$R_k = 12,2 \text{ kN}$		$R_k = 11,5 \text{ kN}$		$R_k = 10,5 \text{ kN}$		$R_k = 10 \text{ kN}$	
d = 10 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	68 mm	30°	73 mm	60°	81 mm	90°	84 mm
	$R_k = 18,0 \text{ kN}$		$R_k = 17,0 \text{ kN}$		$R_k = 15,3 \text{ kN}$		$R_k = 14,7 \text{ kN}$	
d = 12 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	80 mm	30°	85 mm	60°	95 mm	90°	100 mm
	$R_k = 24,7 \text{ kN}$		$R_k = 23,2 \text{ kN}$		$R_k = 20,9 \text{ kN}$		$R_k = 20,0 \text{ kN}$	
d = 16 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	103 mm	30°	110 mm	60°	124 mm	90°	131 mm
	$R_k = 40,5 \text{ kN}$		$R_k = 37,8 \text{ kN}$		$R_k = 33,7 \text{ kN}$		$R_k = 32,1 \text{ kN}$	
d = 20 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	126 mm	30°	136 mm	60°	155 mm	90°	163 mm
	$R_k = 59,0 \text{ kN}$		$R_k = 54,8 \text{ kN}$		$R_k = 48,4 \text{ kN}$		$R_k = 46,0 \text{ kN}$	
d = 24 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	149 mm	30°	162 mm	60°	186 mm	90°	197 mm
	$R_k = 79,9 \text{ kN}$		$R_k = 73,6 \text{ kN}$		$R_k = 64,5 \text{ kN}$		$R_k = 61,1 \text{ kN}$	
d = 30 mm	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$	α_1	$t_{1,req}$
	0°	186 mm	30°	190 mm	60°	221 mm	90°	235 mm
	$R_k = 114,6 \text{ kN}$		$R_k = 104,6 \text{ kN}$		$R_k = 90,6 \text{ kN}$		$R_k = 85,4 \text{ kN}$	

(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_1/t_{1,req}$

TAULUKKO 14-8

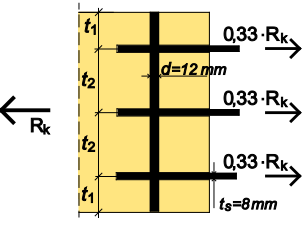
Upotetuin teräslevyin tehty liitos, kaksi levyä. Jokaisen keskellä olevan puuosan paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kolme plastista niveltä. Reunoilla olevien puuosien paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu yksi plastinen nivel kummankin reunaosan kohdalle. Teräslevyn paksuus t_s on 8 mm ja sille tehdyn uran leveys t_{sl} 10 mm. Pultin halkaisija d on 12 mm ja teräsluokka S355. Puuosat liimapuuta GL30c. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M=1,2$.

		$R_k = R_{k,centre} + R_{k,lateral}$ $R_{k,centre} = 2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d}$ $R_{k,lateral} = 2 \cdot \begin{cases} f_{h,k} \cdot d \cdot t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) & \text{if } \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} < t_1 \leq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} & \text{if } t_1 \geq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \end{cases}$ $t_1 > \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$ $t_2 \geq t_{2,req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$ (a)				
$\alpha = 0^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	29 mm	88 mm	146 mm	≥ 83 mm	88 mm	≥ 255 mm
	$R_k = 43$ kN			$R_k = 53$ kN		
$\alpha = 30^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	31 mm	93 mm	154 mm	≥ 88 mm	93 mm	≥ 270 mm
	$R_k = 40$ kN			$R_k = 50$ kN		
$\alpha = 60^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	33 mm	103 mm	170 mm	≥ 98 mm	103 mm	≥ 298 mm
	$R_k = 36$ kN			$R_k = 45$ kN		
$\alpha = 90^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	35 mm	107 mm	176 mm	≥ 102 mm	107 mm	≥ 311 mm
	$R_k = 34$ kN			$R_k = 43$ kN		

(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_1 / t_{1,req}$

TAULUKKO 14-9

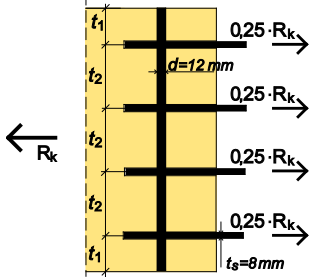
Upotetuin teräslevyin tehty liitos, kolme levyä. Jokaisen keskellä olevan puuosan paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kolme plastista niveltä. Reunoilla olevien puuosien paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu yksi plastinen nivel kummankin reunaosan kohdalle. Teräslevyn paksuus t_s on 8 mm ja sille tehdyn uran leveys t_{sl} 10 mm. Pultin halkaisija d on 12 mm ja teräsluokka S355. Puuosat liimapuuta GL30c. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M = 1,2$.

		$R_k = R_{k,centre} + R_{k,lateral}$ $R_{k,centre} = 2 \cdot \left(2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} \right)$ $R_{k,lateral} = 2 \cdot \begin{cases} f_{h,k} \cdot d \cdot t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) & \text{if } \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} < t_1 \leq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} & \text{if } t_1 \geq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \end{cases}$ $t_1 > \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$ (a) $t_2 \geq t_{2req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$				
$\alpha = 0^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	29 mm	88 mm	235 mm	≥ 83 mm	88 mm	≥ 343 mm
	$R_k = 69$ kN			$R_k = 79$ kN		
$\alpha = 30^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	31 mm	93 mm	248 mm	≥ 88 mm	93 mm	≥ 363 mm
	$R_k = 65$ kN			$R_k = 74$ kN		
$\alpha = 60^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	33 mm	103 mm	272 mm	≥ 98 mm	103 mm	≥ 400 mm
	$R_k = 58$ kN			$R_k = 67$ kN		
$\alpha = 90^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	35 mm	107 mm	283 mm	≥ 102 mm	107 mm	≥ 417 mm
	$R_k = 60$ kN			$R_k = 64$ kN		

(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_1 / t_{1,req}$

TAULUKKO 14-10

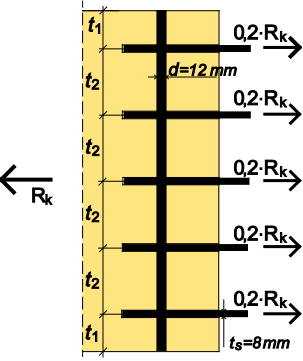
Upotetuin teräslevyin tehty liitos, neljä levyä. Jokaisen keskellä olevan puuosan paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kolme plastista niveltä. Reunoilla olevien puuosien paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu yksi plastinen nivel kummankin reunaosan kohdalle. Teräslevyn paksuus t_s on 8 mm ja sille tehdyn uran leveys t_{sl} 10 mm. Pultin halkaisija d on 12 mm ja teräsluokka S355. Puuosat liimapuuta GL30c. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M = 1,2$.

		$R_k = R_{k,centre} + R_{k,lateral}$ $R_{k,centre} = 3 \cdot \left(2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} \right)$ $R_{k,lateral} = 2 \cdot \begin{cases} f_{h,k} \cdot d \cdot t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) & \text{if } \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} < t_1 \leq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} & \text{if } t_1 \geq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \end{cases}$ $t_1 > \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$ (a) $t_2 \geq t_{2req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$				
$\alpha = 0^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	29 mm	88 mm	323 mm	≥ 83 mm	88 mm	≥ 432 mm
	$R_k = 96$ kN			$R_k = 106$ kN		
$\alpha = 30^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	31 mm	93 mm	341 mm	≥ 88 mm	93 mm	≥ 457 mm
	$R_k = 90$ kN			$R_k = 99$ kN		
$\alpha = 60^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	33 mm	103 mm	375 mm	≥ 98 mm	103 mm	≥ 503 mm
	$R_k = 81$ kN			$R_k = 90$ kN		
$\alpha = 90^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	35 mm	107 mm	390 mm	≥ 102 mm	107 mm	≥ 524 mm
	$R_k = 77$ kN			$R_k = 85$ kN		

(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_1 / t_{1,req}$

TAULUKKO 14-11

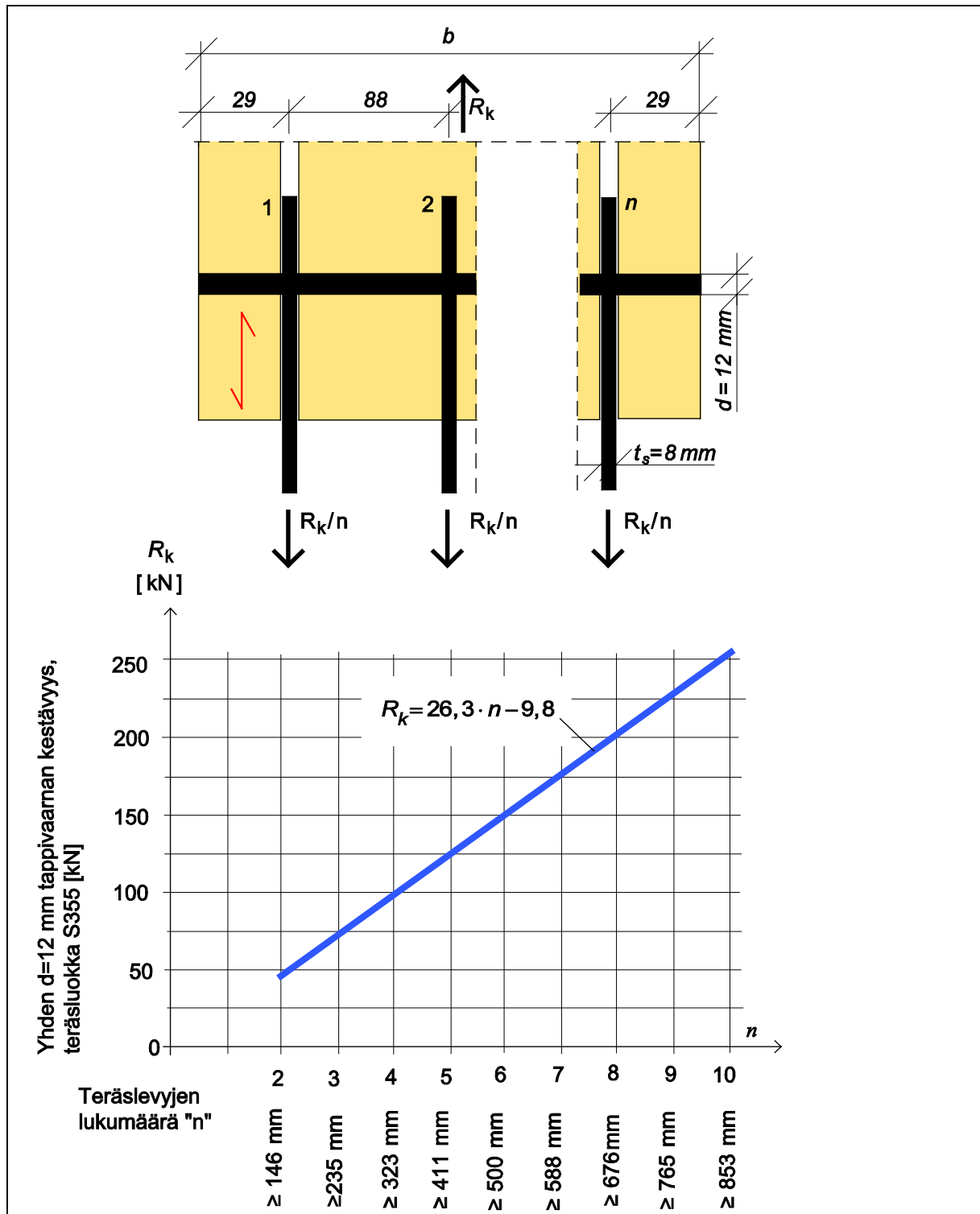
Upotetuin teräslevyin tehty liitos, viisi levyä. Jokaisen keskellä olevan puuosan paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu kolme plastista niveltä. Reunoilla olevien puuosien paksuus on tarvittava vähimmäispaksuus jotta liittimeen muodostuu yksi plastinen nivel kummankin reunaosan kohdalle. Teräslevyn paksuus t_s on 8 mm ja sille tehdyn uran leveys t_{sf} 10 mm. Pultin halkaisija d on 12 mm ja teräsluokka S355. Puuosat liimapuuta GL30c. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M = 1,2$.

		$R_k = R_{k,centre} + R_{k,lateral}$ $R_{k,centre} = 4 \cdot \left(2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} \right)$ $R_{k,lateral} = 2 \cdot \begin{cases} f_{h,k} \cdot d \cdot t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) & \text{if } \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} < t_1 \leq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} & \text{if } t_1 \geq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \end{cases}$ $t_1 > \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$ $t_2 \geq t_{2req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$ (a)				
$\alpha = 0^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	29 mm	88 mm	411 mm	≥ 83 mm	88 mm	≥ 520 mm
	$R_k = 122$ kN			$R_k = 132$ kN		
$\alpha = 30^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	31 mm	93 mm	435 mm	≥ 88 mm	93 mm	≥ 550 mm
	$R_k = 115$ kN			$R_k = 124$ kN		
$\alpha = 60^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	33 mm	103 mm	477 mm	≥ 98 mm	103 mm	≥ 605 mm
	$R_k = 103$ kN			$R_k = 112$ kN		
$\alpha = 90^\circ$	$t_{1,min}$	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}	t_1	$t_2 = t_{2,req}$	t_{TOT}
	35 mm	107 mm	497 mm	≥ 102 mm	107 mm	≥ 631 mm
	$R_k = 99$ kN			$R_k = 107$ kN		

(a) Jos $t_1 < t_{1,req}$ niin liitoksen kestävyys voidaan laskea yhtälöstä $R_{k,red} = R_k \cdot t_1 / t_{1,req}$

TAULUKKO 14-12

Upotetuin teräslevyihin tehty liitos, n levyä, kuormitettu syiden suunnassa ($n \geq 2$). Keskellä olevien puuosien paksuus on 78 mm, jolloin upotettujen teräslevyjen keskinäinen etäisyys on 88 mm. Reunalla olevien puuosien paksuus on 24 mm. Teräslevyjen paksuus on 8 mm ja niille tehdyn uran leveys 10 mm. Tappivaarnan paksuus on 12 mm, teräsluokka S355. Puuaine on liimapuuta GL30c. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M), missä $\gamma_M = 1,2$.



14.5 Liitinvälit

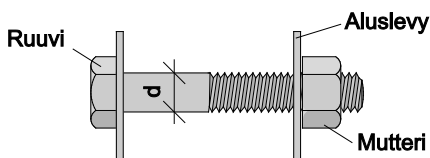
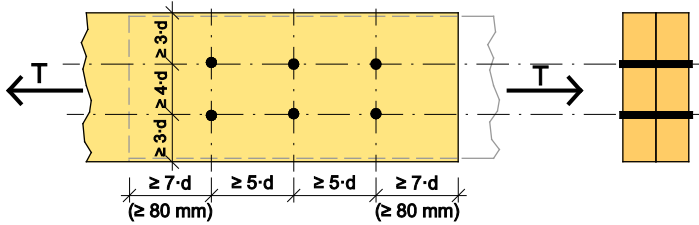
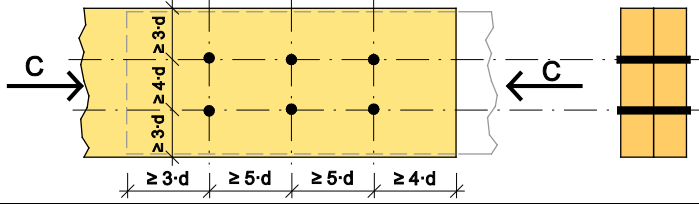
TAULUKKO 14-13

Tiukasti sovitettujen pulttien ja tappivaarujen vähimmäisvälit, -reunaetäisyydet ja pienimmät etäisyydet sauvan päistä syiden suunnassa kuormitetuissa sauvoissa.

Etäisyydet/ välit	liitinten välillä		kuormitettuun päähän	kuormittamat- tomaan päähän	reunaan
	$a_{\perp}$	$a_{//}$	$a_{//}$	$a_{//}$	$a_{\perp}$
	$3 \cdot d$	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$	$3 \cdot d$
$d = 8 \text{ mm}$	24 mm	40 mm	56 mm	24 mm	24 mm
$d = 12 \text{ mm}$	36 mm	60 mm	84 mm	36 mm	36 mm
$d = 16 \text{ mm}$	48 mm	80 mm	112 mm	48 mm	48 mm
$d = 20 \text{ mm}$	60 mm	100 mm	140 mm	60 mm	60 mm
$d = 24 \text{ mm}$	72 mm	120 mm	168 mm	72 mm	72 mm

TAULUKKO 14-14

Pulttien vähimmäisvälit, -reunaetäisyydet ja pienimmät etäisyydet sauvan päistä syiden suunnassa kuormite-
tuissa sauvoissa.

		Vedossa  Puristuksessa 			
Etäisyydet/ välit	liitinten välillä		kuormitettuun päähän	kuormittamat- tomaan päähän	reunaan
	$a_{\perp}$	$a_{//}$	$a_{//}$	$a_{//}$	$a_{\perp}$
	$4 \cdot d$	$5 \cdot d$	$\min\{7 \cdot d; 80\}$	$3 \cdot d$	$4 \cdot d$
$d = 8 \text{ mm}$	32 mm	40 mm	80 mm	24 mm	32 mm
$d = 12 \text{ mm}$	48 mm	60 mm	84 mm	36 mm	48 mm
$d = 16 \text{ mm}$	64 mm	80 mm	112 mm	48 mm	64 mm
$d = 20 \text{ mm}$	80 mm	100 mm	140 mm	60 mm	80 mm
$d = 24 \text{ mm}$	96 mm	120 mm	168 mm	72 mm	96 mm

TAULUKKO 14-15

Tiukasti sovitettujen pulttien ja tappivaarujen vähimmäisvälit, -reunaetäisyydet ja pienimmät etäisyydet sauvan päistä syiden suuntaan nähden vinosti kuormitetuissa sauvoissa.

Vedetty diagonaali			Puristettu diagonaali			
Etäisyydet/ välit	liitinten välillä		kuormitettuun päähän	kuormittamat- tomaan päähän	reunaan	
	a _⊥	a _∥	a _∥	a _∥	a _⊥	
	3,5·d (vinosauvas- sa)	määräytyy arvosta a _⊥ vaakasuorassa sauvassa	max{7·d; 80} (vinosauvassa)	3·d	3·d	
Liittimen halkaisija [mm]	8	28 mm	—	80 mm	24 mm	24 mm
	10	35mm	—	80 mm	30 mm	30 mm
	12	42 mm	—	84 mm	36 mm	36 mm
	16	56 mm	—	112 mm	48 mm	48 mm
	20	70 mm	—	140 mm	60 mm	60 mm
	24	84 mm	—	168 mm	72 mm	72 mm

<i>Välit vaakasuorassa sauvassa</i>	8	26mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	24 mm
		35mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		40mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	10	33mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	30 mm
		44mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		50mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	12	39mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	36 mm
		52mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		60mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	16	52mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	48 mm
		70mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		80mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	20	65mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	60 mm
		87mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		100mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	24	78mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	72 mm
		104mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		120mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				

TAULUKKO 14-16

Pulttien vähimmäisvälit, -reunaetäisyydet ja pienimmät etäisyydet sauvan päistä syiden suuntaan nähden viinosti kuormitetuissa sauvoissa.

Vedetty diagonaali				Puristettu diagonaali			
Etäisyydet/ välit	liitinten välillä		kuormitettuun päähän	kuormittamat- tomaan päähän	reunaan		
	a _⊥	a _{//}	a _{//}	a _{//}	a _⊥		
	4 · d (vinosauvas- sa)	määräytyy arvosta a _⊥ vaakasuorassa sauvassa	max{7 · d; 80} (vinosauvassa)	4 · d	3 · d		
(4 · 5) · d (vaa- kasuorassa sau- vassa)							
Välit vinosauvassa r	8	32 mm	—	80 mm	32 mm	24 mm	
	10	40 mm	—	80 mm	40 mm	30 mm	
	12	48 mm	—	84 mm	48 mm	36 mm	
	16	64 mm	—	112 mm	64 mm	48 mm	
	20	80 mm	—	140 mm	80 mm	60 mm	
	24	96 mm	—	168 mm	96 mm	72 mm	

Välit vaakasuorassa sauvasa	8	26mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	24 mm
		35mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		40mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	10	33mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	30 mm
		44mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		50mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	12	39mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	36 mm
		52mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		60mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	16	52mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	48 mm
		70mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		80mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	20	65mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	60 mm
		87mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		100mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				
	24	78mm ($\gamma \leq 40^\circ$)	–	–	–	72 mm
		104mm ($40^\circ < \gamma \leq 60^\circ$)				
		120mm ($60^\circ < \gamma \leq 90^\circ$)				

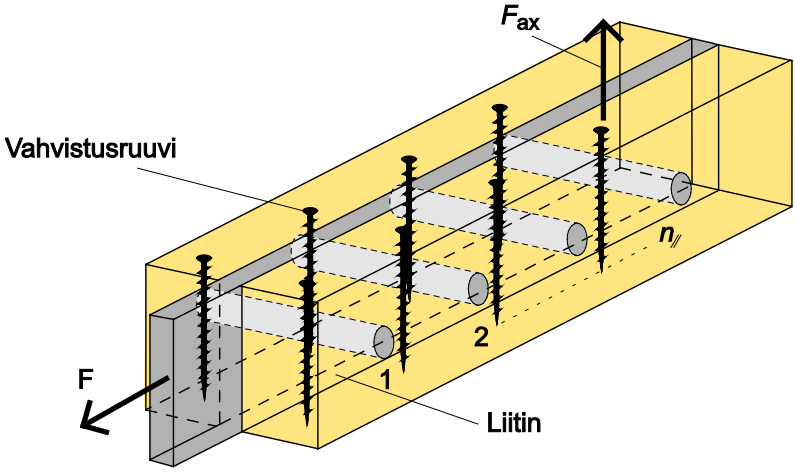
TAULUKKO 14-17

Useiden perättäisten pulttien tai tappivaarujen muodostama liitos; liittimien tehollinen lukumäärä n_{eff} , EC5 luku 8.5.1.

Kuormitus syiden suunnassa	Kuormitus syitä vastaan kohtisuorassa
$n_{ef } = \min \left\{ n_{ }^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{ }}{13 \cdot d}} \right.$	$n_{ef } = n_{ }$
$n_{ef\perp} = n_{\perp}$	$n_{ef\perp} = n_{\perp}$
$n_{ef,TOT} = n_{ef } \cdot n_{\perp}$	$n_{ef,TOT} = n_{ } \cdot n_{\perp}$

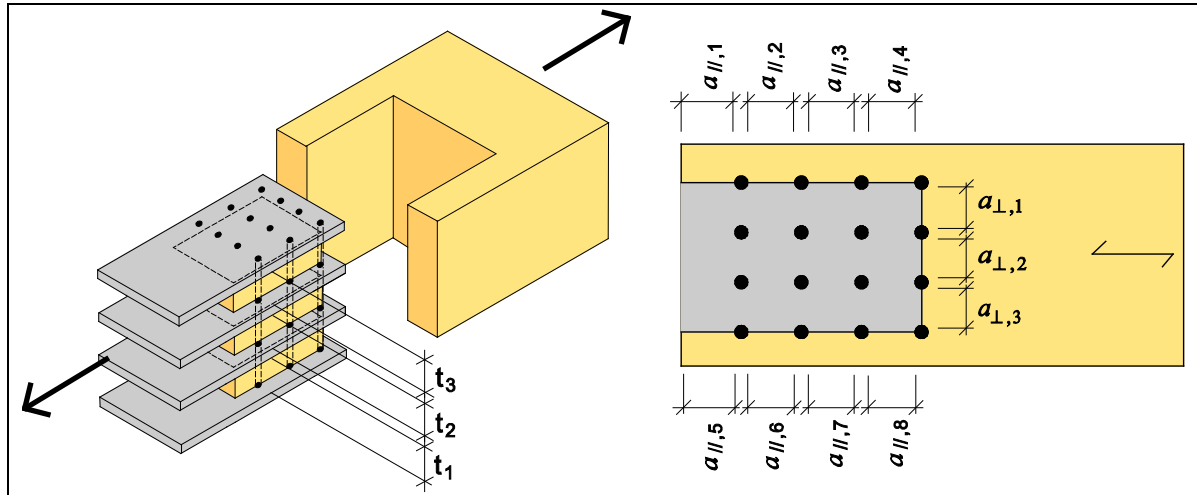
TAULUKKO 14-18

Useiden perättäisten pulttien tai tappivaarujen muodostama liitos puurakenneruuveilla vahvistettuna; liitinten tehollinen lukumäärä n_{eff} .

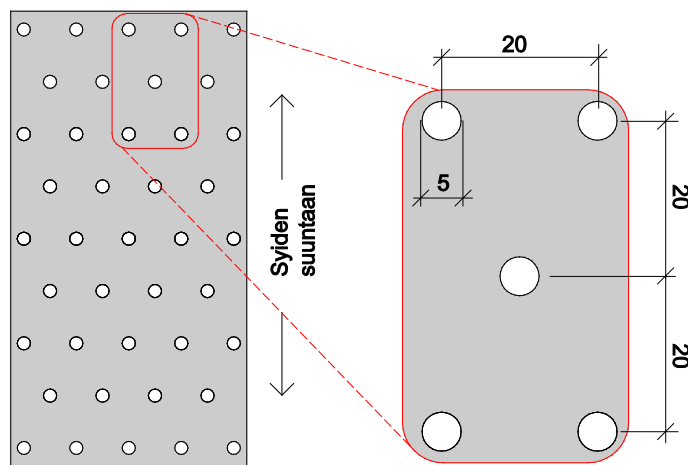
	
Liitinten tehollinen lukumäärä syiden suunnassa	$n_{ef //} = n_{//}$
Aksiaalinen voima jolle vahvistusruuvit on mitoitettava	$F_{ax} = 0,3 \cdot \frac{F_d}{n_{//} \cdot n_{tm}}$ missä $n_{//}$: liitinten lukumäärä (4 yläkuvassa) n_{tm}: puuosien lukumäärä (2 yläkuvassa)

TAULUKKO 14-19

Usean tappivaarnatyypin liittimen muodostaman liitoksen lohkomurtuma, EC5 liite A, kirjoittajien suosittelemin yksinkertaistuksin. Lohkomurtuman riskin pienentämiseksi vedetyissä sauvoissa ei pitäisi käyttää enempää kuin viittä syynsuuntaista liitintä peräkkäin.

	
Ominaiskestävyys kun murtuminen tapahtuu liitinryhmän piiriä pitkin	$F_{bs,Rk} = \max \begin{cases} 1,5 A_{net,t} f_{t0k} \\ 0,7 A_{net,v} f_{vk} \end{cases}$
Vetojännityksen rasittama nettopinta-ala	$A_{net,t} = \sum_i a_{\perp,i} \cdot \sum_j t_j$
Leikkausjännityksen rasittama nettopinta-ala	$A_{net,v} = \sum_i a_{\parallel,i} \cdot \sum_j t_j$
Vetolujuus syiden suunnassa, ominaisarvo	f_{t0k}
Leikkauslujuuden ominaisarvo	f_{vk}

Naulauslevyin tehdyt liitokset

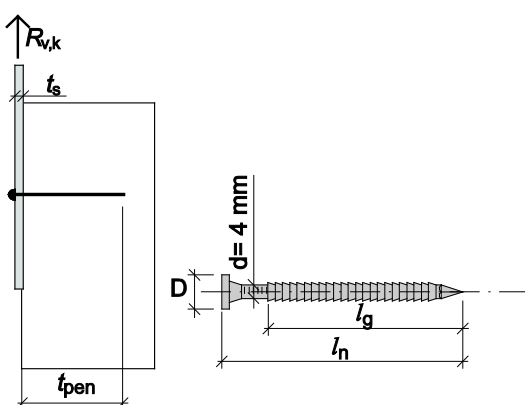


KUVA 14-3

Nimellishalkaisijaltaan 4 mm ankkurinaulojen kanssa käytettävä teräksinen naulauslevy, jossa on tyypillinen reikäkuvio. Levyn paksuus on yleensä 2...6 mm.

TAULUKKO 14-20

Naulauslevyllä tehty liitos. Levyn paksuus vaihtelee 2 ... 6 mm. Naulan halkaisija $d = 4$ mm, $f_{u,k} \geq 600$ N/mm². Puuaine liimapuuta GL30c. Köysivaikutusta ei ole otettu huomioon. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M = 1,2$.

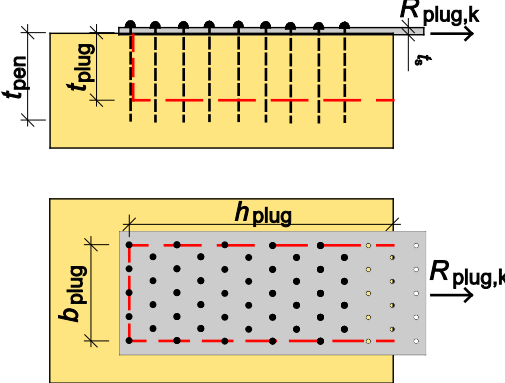
		$R_k = \begin{cases} 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} & \text{if } t_s \leq \frac{d}{2} \\ 1,15 \cdot 2 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} & \text{if } t \geq d \end{cases}$ $t_{pen,req} \geq 1,15 \cdot (\sqrt{2} + 2) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \quad \text{if } t_s \leq \frac{d}{2}$ $t_{pen,req} \geq 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}} \quad \text{if } t \geq d$	
Levyn paksuus t_s	Vaadittu tunkeumasyyvyys $t_{pen,req}$	Suositeltu naulan pituus l_n	Kestävyys $R_k^{(a)}$
2 mm	35 mm	40 ... 50 mm	1,22 kN
2,5 mm	36 mm	40 ... 50 mm	1,34 kN
3 mm	38 mm	50 mm	1,47 kN
4 ... 6 mm	41 mm	50 ... 60 mm	1,72 kN

(a) Jos $t_{pen} < t_{pen,req}$, niin kestävyys voidaan laskea yhtälöstä

$$R_{k,red} = R_k \cdot \frac{t_{pen}}{t_{pen,req}}$$

TAULUKKO 14-21

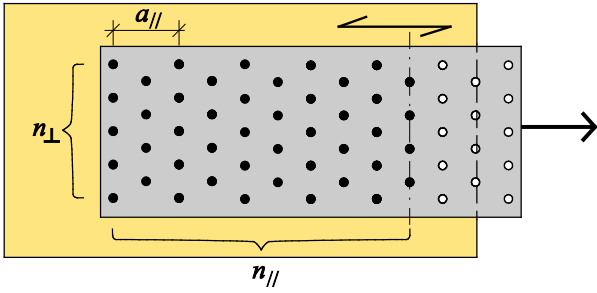
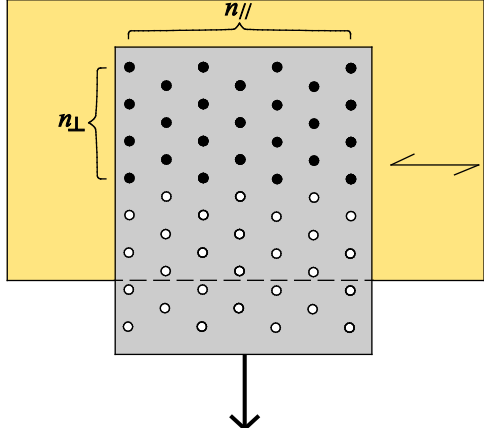
Naulauslevyllä tehdyn liitoksen kestävyys lohkomurtumaa vastaan. Levyn paksuus 2 ... 6 mm. Naulan halkaisija $d = 4 \text{ mm}$, $f_{u,k} \geq 600 \text{ N/mm}^2$. Puuaine liimapuuta GL30c. Vastaavat suunnitteluarvot saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella $(k_{\text{mod}}/\gamma_M)$, missä $\gamma_M = 1,2$. EC5 liite A, kirjoittajien suosittelemin yksinkertaistuksin.

			$R_{\text{plug},k} = \max \begin{cases} 1,5 \cdot b_{\text{plug}} \cdot t_{\text{plug}} \cdot f_{t,0,k} \\ 0,7 \cdot (2 \cdot h_{\text{plug}} \cdot t_{\text{plug}} + h_{\text{plug}} \cdot b_{\text{plug}}) \cdot f_{v,k} \end{cases}$ $f_{t,0,k} = 20 \text{ MPa}$ $f_v = 3,5 \text{ MPa}$	
Levyn paksuus t_s	Naulan pituus l_n	Irtoavan osan korkeus t_{plug}	Kestävyys $R_{\text{plug},k}^{(a)}$	
			$\frac{h_{\text{plug}}}{b_{\text{plug}}} \leq 4,1$	$\frac{h_{\text{plug}}}{b_{\text{plug}}} > 4,1$
2 mm	40 ... 50 mm	17 mm	$510 \cdot b_{\text{plug}}^{(a)}$	$83 \cdot h_{\text{plug}} + 2,4 \cdot b_{\text{plug}} \cdot h_{\text{plug}}^{(a)}$
2,5 mm	40 ... 50 mm	18 mm	$540 \cdot b_{\text{plug}}^{(a)}$	$88 \cdot h_{\text{plug}} + 2,4 \cdot b_{\text{plug}} \cdot h_{\text{plug}}^{(a)}$
3 mm	50 mm	19 mm	$570 \cdot b_{\text{plug}}^{(a)}$	$93 \cdot h_{\text{plug}} + 2,4 \cdot b_{\text{plug}} \cdot h_{\text{plug}}^{(a)}$
4 ... 6 mm	50 ... 60 mm	20 mm	$600 \cdot b_{\text{plug}}^{(a)}$	$98 \cdot h_{\text{plug}} + 2,4 \cdot b_{\text{plug}} \cdot h_{\text{plug}}^{(a)}$

^(a) b_{plug} ja h_{plug} [mm]. $R_{\text{plug},k}$ [N].

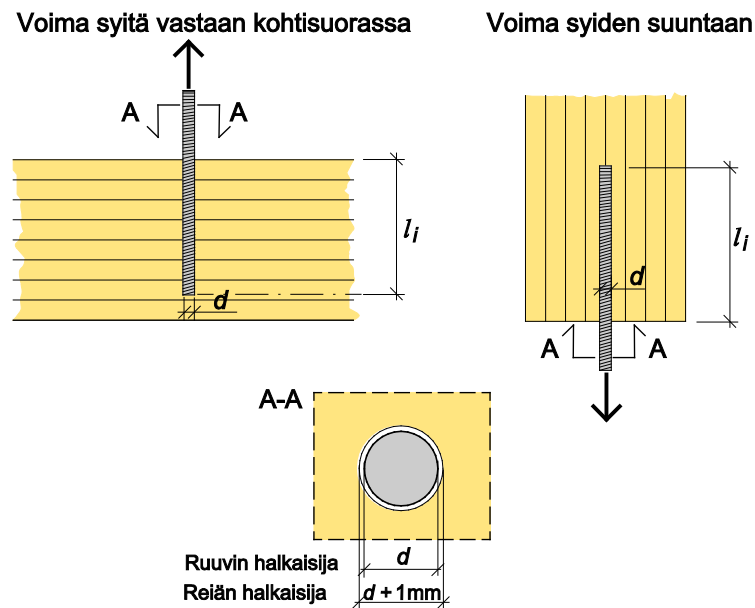
TAULUKKO 14-22

Useiden perättäisten naulojen muodostama esiporaamaton liitos; liittimien tehollinen lukumäärä n_{eff} , EC5 luku 8.3.1

Kuormitus syiden suuntaan			Kuormitus syitä vastaan kohtisuoraan	
				
$n_{ef \parallel} = n_{\parallel}^{k_{ef}}$	Naulaväli	k_{ef}	$n_{ef \parallel} = n_{\parallel}$	
	$a_{\parallel} \geq 14 \cdot d$	1,0		
	$a_{\parallel} \geq 10 \cdot d$	0,85		
	$a_{\parallel} \geq 7 \cdot d$	0,7		
	Väliarvoille voidaan käyttää lineaarista interpolaatiota			
$n_{ef \perp} = n_{\perp}$			$n_{ef \perp} = n_{\perp}$	
$n_{ef, TOT} = n_{ef \parallel} \cdot n_{\perp}$			$n_{ef, TOT} = n_{\parallel} \cdot n_{\perp}$	

14.6 Liimatankoliitokset

Tässä esitetyt mitoitusäännöt perustuvat ruotsalaiseen käytäntöön.



KUVA 14-4

Liimatankoliitokset, joissa tanko on kuormitettu kohtisuorassa syitä vastaan (vasen kuva) ja syiden suunnassa (oikea kuva). Tangon tyypillinen läpimitta on 10...20 mm. Teräsluokka on tavallisesti 4.8 tai 8.8. Puuhun poratun reiän halkaisija on 1 mm suurempi kuin tangon nimellishalkaisija. Käytettävä liima on tavallisesti PUR- (polyuretaani) tai EPX- (epoksi) liima.

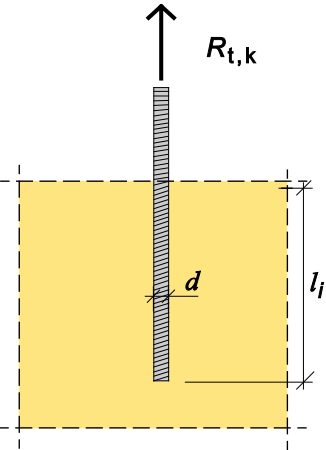
TAULUKKO 14-23

Liimatankojen suositellut keskinäiset etäisyydet ja reunaetäisyydet

Tangon tyyppi	Suosittelut tankoväli $a_1 (=4 \cdot d)$	Suosittelu etäisyys reunasta $a_2 (=2,5 \cdot d)$
M10	40 mm	25 mm
M12	48 mm	30 mm
M16	64 mm	40 mm
M20	80 mm	50 mm

TAULUKKO 14-24

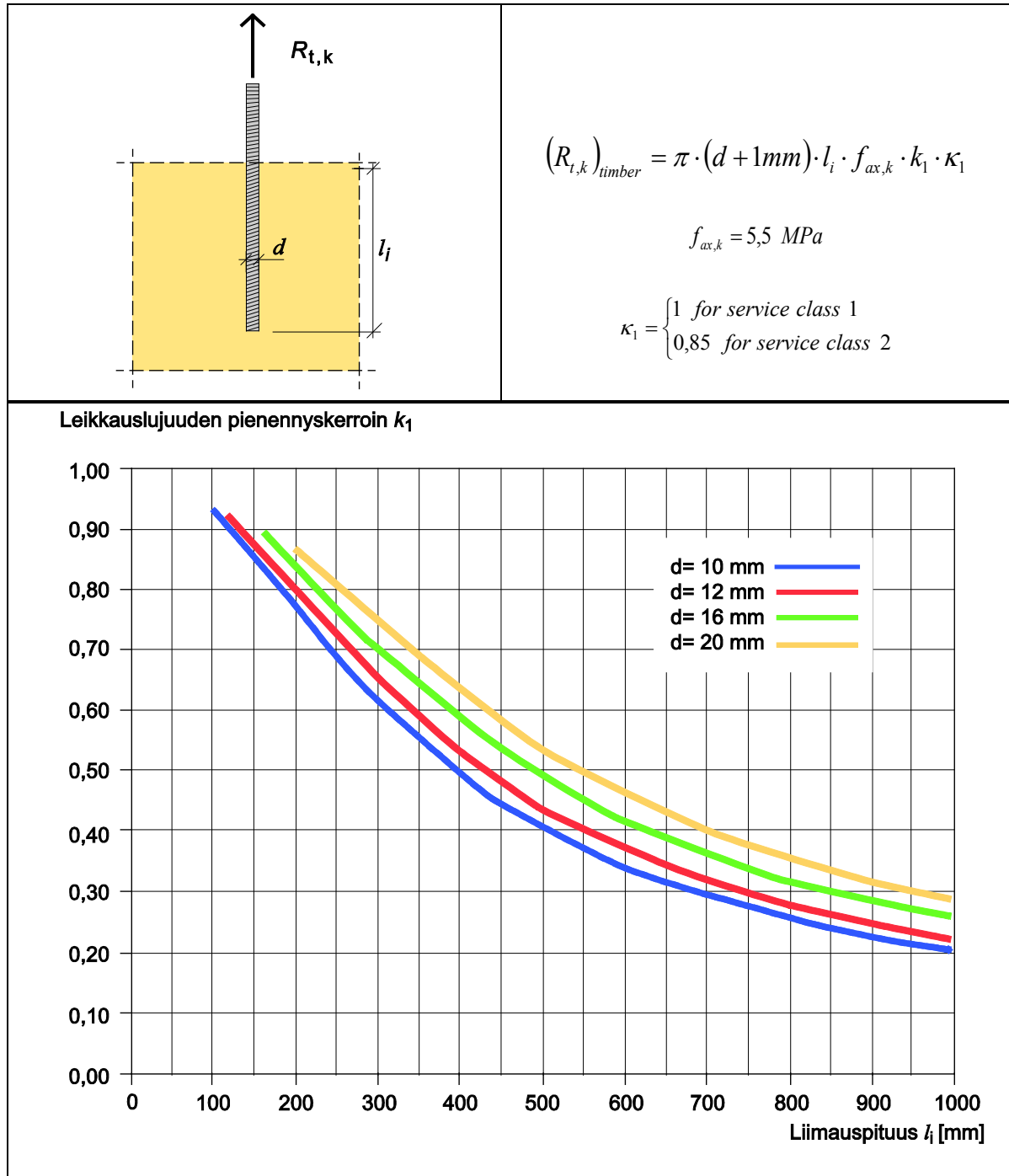
Pituussuunnassa kuormitettujen liimatankojen kestävyys käyttöluokassa 1 SITACin hyväksynnän No. 1396/78 mukaan. Kaikkien tankojen liimauspituus on 350 mm. Tankojen nimellispaksuus $d=10\ldots 20$ mm. Puu-aine liimapuuta GL30c. Terästangon vetokestävyys suunnitteluarvo $(R_{t,d})_{rod}$ saadaan jakamalla ominaisarvo osavarmuuskertoimella $\gamma_{M2}=1,25$. Terästangon ulosvetokestävyys suunnitteluarvo $(R_{t,d})_{timber}$ saadaan kertomalla ominaisarvo suhteella (k_{mod}/γ_M) , missä $\gamma_M=1,2$.

		$(R_{t,k})_{rod} = 0,6 \cdot f_{t,0,k} \cdot A_s$ $(R_{t,k})_{timber} = \pi \cdot (d + 1mm) \cdot l_i \cdot f_{ax,k} \cdot k_1 \cdot \kappa_1$ $f_{ax,k} = 5,5 \text{ MPa}$ $\kappa_1 = \begin{cases} 1 & \text{for service class 1} \\ 0,85 & \text{for service class 2} \end{cases}$ $k_1 = \begin{cases} 0,55 & \text{for M10} \\ 0,59 & \text{for M12} \\ 0,64 & \text{for M16} \\ 0,69 & \text{for M20} \end{cases}$	
Teräs-luokka	Tangon tyyppi	Tangon kestävyys vetoa vastaan $(R_{t,k})_{rod}$	Tangon kestävyys ulosvetoa vastaan ⁽¹⁾ $(R_{t,k})_{timber}$
4.8	M10	13,9 kN	36,8 kN
	M12	20,2 kN	46,3 kN
	M16	37,7 kN	66,3 kN
	M20	58,8 kN	87,3 kN
5.8	M10	17,4 kN	36,8 kN
	M12	25,3 kN	46,3 kN
	M16	47,1 kN	66,3 kN
	M20	73,5 kN	87,3 kN
8.8	M10	27,8 kN	36,8 kN
	M12	40,5 kN	46,3 kN
	M16	75,4 kN	66,3 kN
	M20	117,6 kN	87,3 kN

⁽¹⁾ Arvot pätevät käyttöluokassa 1. Käyttöluokassa 2 $(R_{t,d})_{timber}$ pitää kertoa kertoimella $\kappa_1 = 0,85$.

TAULUKKO 14-25

Leikkauslujuuden pienennyskerroimen k_1 riippuvaisuus liimauspituudesta l_i . Puuaine liimapuuta GL30c.

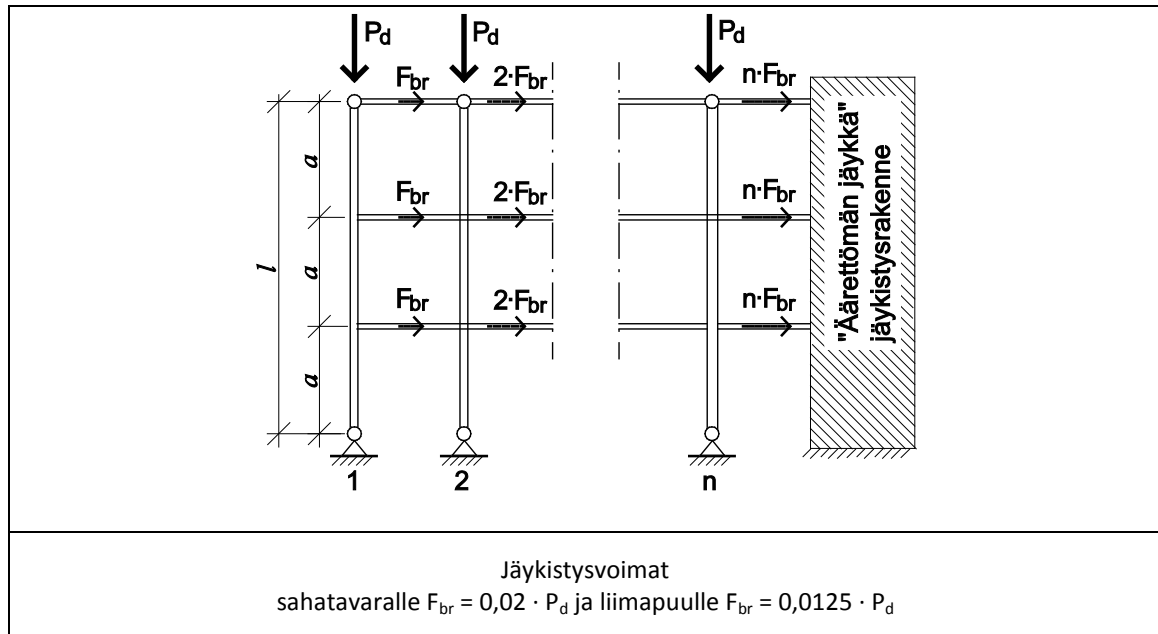


⁽¹⁾ Arvot pätevät käyttöluokassa 1. Käyttöluokassa 2 $(R_{t,d})_{timber}$ pitää kertoa kertoimella $\kappa_1 = 0,85$.

15 PILAREIDEN TUKEMINEN NURJAHDUSTA VASTAAN

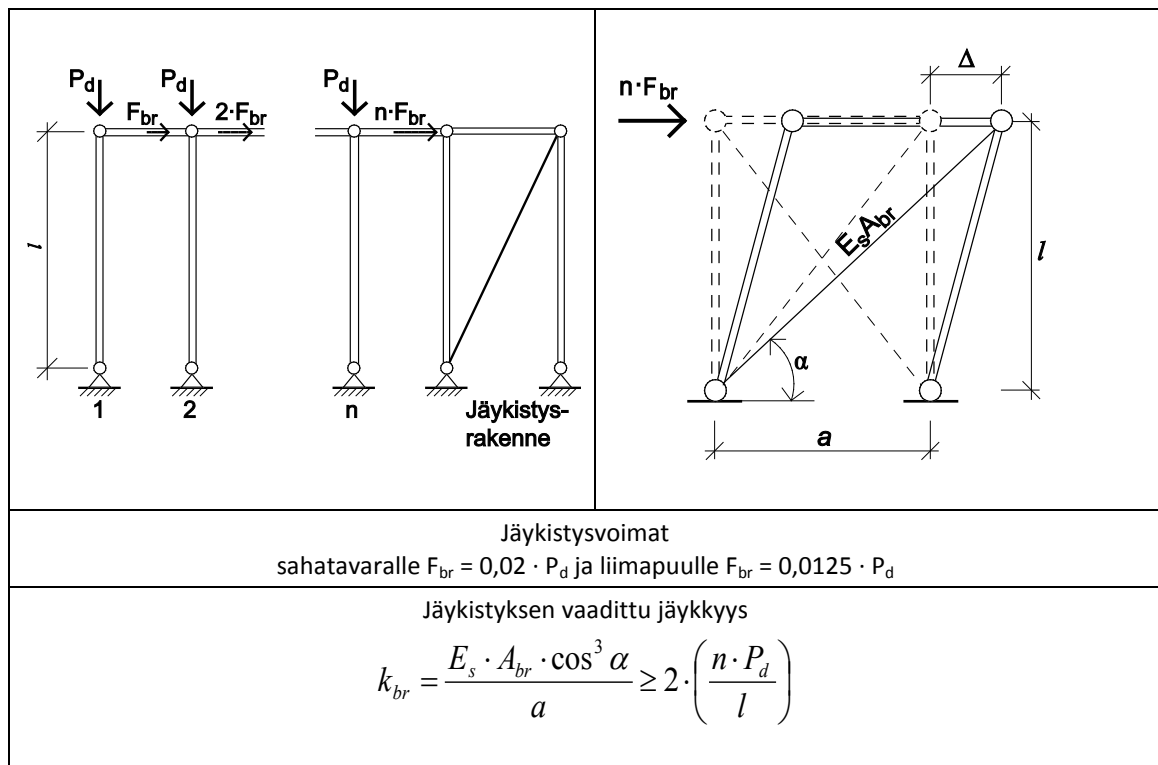
TAULUKKO 15-1

Yhdessä toimiviin pilareihin syntyvät jäykistysvoimat jäykisteen muodostuessa äärettömän jäykästä jäykistyelementistä.



TAULUKKO 15-2

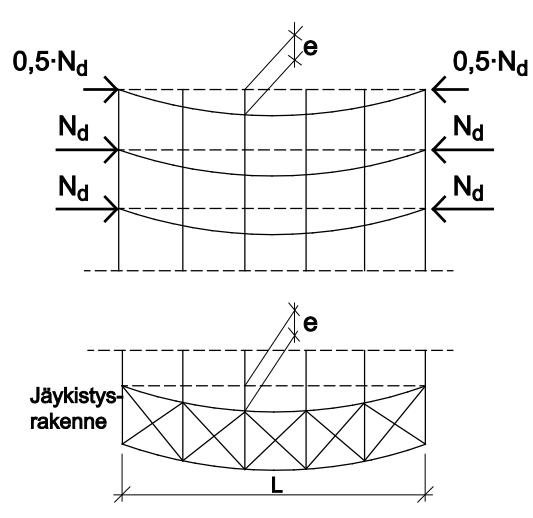
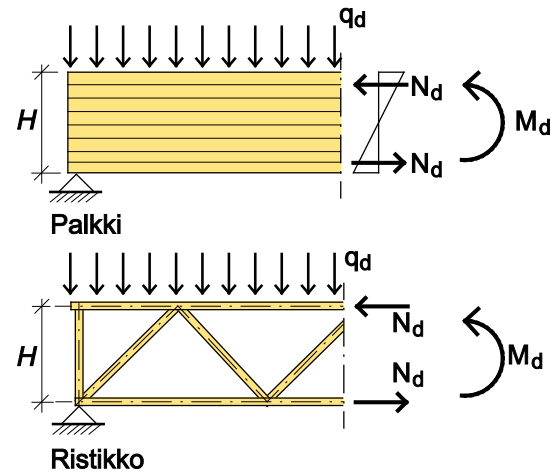
Yhdessä toimiviin pilareihin syntyvät jäykistysvoimat jäykisteen muodostuessa ristikkäisistä teräsvanteista.



16 PALKKIEN TUKEMINEN KIEPAHDUSTA VASTAAN

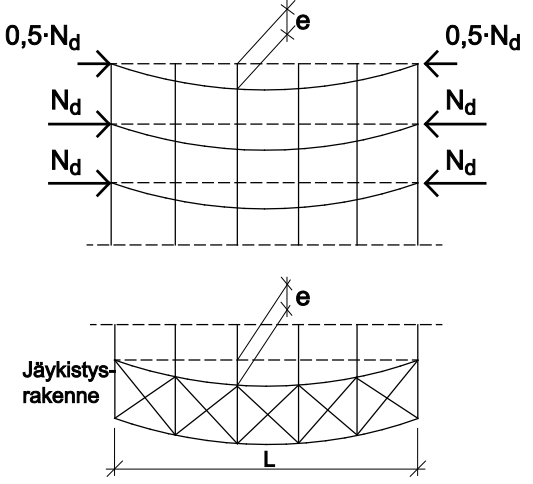
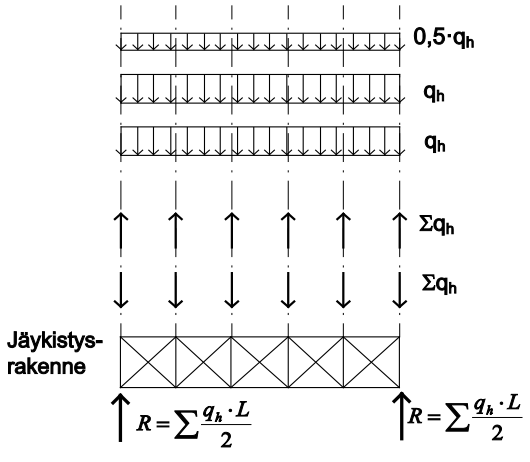
TAULUKKO 16-1

Yksinkertaisiin palkkeihin ja ristikkoihin syntyvät puristusvoimat oman painon aiheuttamasta taivutusmomentista ja alkuepäkeskeisyydestä.

Tasokuva (alkukaarevuus liioiteltuna)		Sivukuva		
				
Taivutusmomentti	"Vastaava" puristusvoima N_d		Poikkema tasomaisuudesta	
	Palkki	Ristikko	Alkuepäkeskeisyys	Epäkeskeisyyden lopullinen arvo
$M_d = \frac{q_d \cdot L^2}{8}$	$N_d = \frac{3 \cdot M_d}{2 \cdot H}$	$N_d = \frac{M_d}{H}$	$e_{init} \leq \frac{L}{500}$	$e_{fin} \leq \frac{L}{250}$

TAULUKKO 16-2

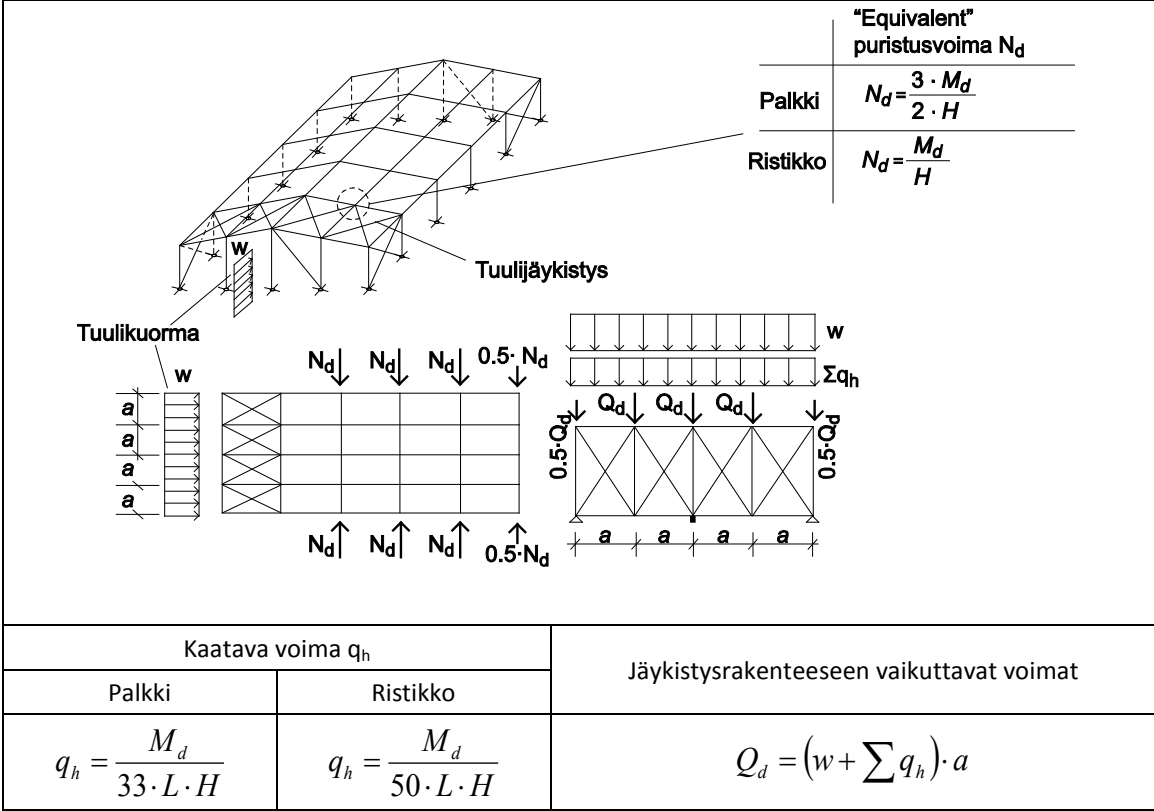
Yksinkertaisiin palkkeihin ja ristikkoihin syntyvät poikittaiset kaatavat voimat. Jäykistysrakenteet pitää mitoittaa näille voimille.

Tasokuva (alkukaarevuus liioiteltuna)	Vastaavat kaatavat voimat
	
"Vastaavan" kaatavan voiman q_h arvo kun $L < 15$ m	
Palkki ^a	Ristikko
$q_h = \frac{M_d}{33 \cdot L \cdot H}$	$q_h = \frac{M_d}{50 \cdot L \cdot H}$

^a Katso tarkemmin YM:n asetus

TAULUKKO 16-3

Esimerkki suunnitelmasta missä poikittaiset kaatavat voimat ja tuulikuormat vaikuttavat samanaikaisesti. Yleensä tarkistetaan kaksi kuormitusyhdistelmää, jotka ovat 1) lumikuorma vallitsevana kuormana (aikaansaa suurimman kaatavan voiman) ja 2) tuulikuorma vallitsevana kuormana (aikaansaa pienimmän kaatavan voiman).



17 LIIMAPUUN SUUNNITTELUARVOJA

TAULUKKO 17-1

Yhdistetyn liimapuun GL30c lujuuksien ja kimmokertoimien suunnitteluarvot eri aikaluokissa ja käyttöluokissa 1 ja 2 EN 14080:2013 ja EC5 Suomen kansallisen liitteen mukaan. Käyttöluokan 3 lujuusarvot saadaan kertomalla taulukon arvot luvulla 0,78. Käyttöluokan 3 jäykkyyssarvot ovat samat kuin taulukossa. Ominaisuudet N/mm².

Ominaisuus	Kuormitusyhdistelmän lyhytaikaisin kuorma (Esimerkit ks. Taulukko 3-1)				
	P (Pysyvä)	L (Pitkäaikainen)	M (Keskipitkä)	S (Lyhytaikainen)	I (Hetkellinen)
Taivutus // f_m	15,0	17,5	20,0	22,5	27,5
Veto // $f_{t,0}$	9,8	11,4	13,0	14,6	17,9
Veto $\perp f_{t,90}$	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5
Puristus // $f_{c,0,g,k}$	12,3	14,3	16,3	18,4	22,5
Puristus $\perp f_{c,90}$	1,3	1,5	1,7	1,9	2,3
Leikkaus f_v	1,8	2,0	2,3	2,6	3,2
Leikkaus syitä vastaan kohtisuoraan f_r	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
Kimmokerroin // taipumia laskettaessa	13000	13000	13000	13000	13000
Kimmokerroin // vakavuustarkasteluissa	10800	10800	10800	10800	10800
Kimmokerroin // II asteen analyysissä ^a	10830	10830	10830	10830	10830
Liukukerroin taipumia laskettaessa	650	650	650	650	650
Liukukerroin vakavuustarkasteluissa	540	540	540	540	540

^aII-asteen analyysissä käytetään kimmokertoimena arvoa E_{mean}/γ_M

TAULUKKO 17-2

Homogeenisen liimapuun GL30h lujuuksien ja kimmokertoimien suunnitteluarvot eri aikaluokissa ja käyttöluokissa 1 ja 2 EN 14080:2013 ja EC5 Suomen kansallisen liitteen mukaan. Käyttöluokan 3 lujuusarvot saadaan kertomalla taulukon arvot luvulla 0,78. Käyttöluokan 3 jäykkyyssarvot ovat samat kuin taulukossa. Ominaisuudet N/mm².

Ominaisuus	Kuormitusyhdistelmän lyhytaikaisin kuorma (Esimerkit ks. Taulukko 3-1)				
	P (Pysyvä)	L (Pitkäaikainen)	M (Keskipitkä)	S (Lyhytaikainen)	I (Hetkellinen)
Taivutus // f_m	15,0	17,5	20,0	22,5	27,5
Veto // $f_{t,0}$	12,0	14,0	16,0	18,0	22,0
Veto $\perp f_{t,90}$	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5
Puristus // $f_{c,0,g,k}$	15,0	17,5	20,0	22,5	27,5
Puristus $\perp f_{c,90}$	1,3	1,5	1,7	1,9	2,3
Leikkaus f_v	1,8	2,0	2,3	2,6	3,2
Leikkaus syitä vastaan kohtisuoraan f_r	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
Kimmokerroin // taipumia laskettaessa	13600	13600	13600	13600	13600
Kimmokerroin // vakavuustarkasteluissa	11300	11300	11300	11300	11300
Kimmokerroin // II asteen analyysissä ^a	11330	11330	11330	11330	11330
Liukukerroin taipumia laskettaessa	650	650	650	650	650
Liukukerroin vakavuustarkasteluissa	540	540	540	540	540

^aII-asteen analyysissä käytetään kimmokertoimena arvoa E_{mean}/γ_M

18 VIITTAUKSET KIRJALLISUUTEEN

- Bejtka, I, Blass, H. J. (2006): Self-tapping screws as reinforcements in beam supports, CIB-W18, Meeting 39, Florence, Italy.
- Ed, D., Hasselqvist, F. (2011): Timber compression strength perpendicular to the grain - testing of glulam beams with and without reinforcement, Master's thesis at the Division of Structural Engineering, Lund University, Lund, Sweden.
- Colling, F. (2008): Holzbau Grundlagen, Bemessungshilfen 2., überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Germany.
- Design of Timber Structures (2011), Swedish forest industries federation, Stockholm, Sweden.
- Essential to Eurocode 3, Design manual for steel structures in building (1991), ECCS, Advisory committee 5, Application of Eurocode 3.
- Gustafsson, P. J. (2008): Tests of wooden cleats oriented along fibre, technical report, ISSN 0281-6679, Division of Structural Mechanics, Lund University.
- Limträhandboken (2001), Svenskt Trä, Stockholm, Sweden.
- Piazza, M., Tomasi, R. and Modena, R. (2005). Strutture in Legno (Timber Structures), in Italian, Hoepli, Milan, Italy.
- Thelandersson S. (2011): Design of Timber Structures, Collection of rules and formulas for design according to Eurocode 5, Swedish Wood, Stockholm, Sweden.
- Typgodkännande 1396/78. (2012). I limträ inlimmad skruv. (National technical approval 1396/78. 'Bonded-in rod for glulam')
- Åkerlund, S., Stål- och träkonstruktioner AK II, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1984.

18.1 Viittaukset standardeihin

- Australian Standards AS 1720.1 (1997): Timber structures Part 1: Design methods.
- DIN EN 1995-1-1/NA (2010). National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings
- DIN EN 1995-1-1/NA/A1 (2012). National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings; Amendment A1. (Draft standard).
- EN 1990, Eurocode 0: Basis of structural design, CEN, European Committee for Standardization
- EN 1991-1-1, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-1: General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings CEN, European Committee for Standardization
- EN 1991-1-3, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-3: General actions. Snow loads, CEN, European Committee for Standardization
- EN 1991-1-4, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-4: General actions. Wind actions CEN, European Committee for Standardization
- EN 1991-1-5, Eurocode 1: Actions on structures, CEN, European Committee for Standardization
- EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, European Committee for Standardization

EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints, CEN, European Committee for Standardization

EN 14080:2013: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements, CEN, European Committee for Standardization

ISO/DIS International Organization for Standardization, (1968, 1975) 1995. Fire Resistance Tests of Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements, ISO Recommendation R83

RIL 205-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi.

SIA 265:2003, Timber Structures, Swiss Society of Engineers and Architects, Zürich, Switzerland

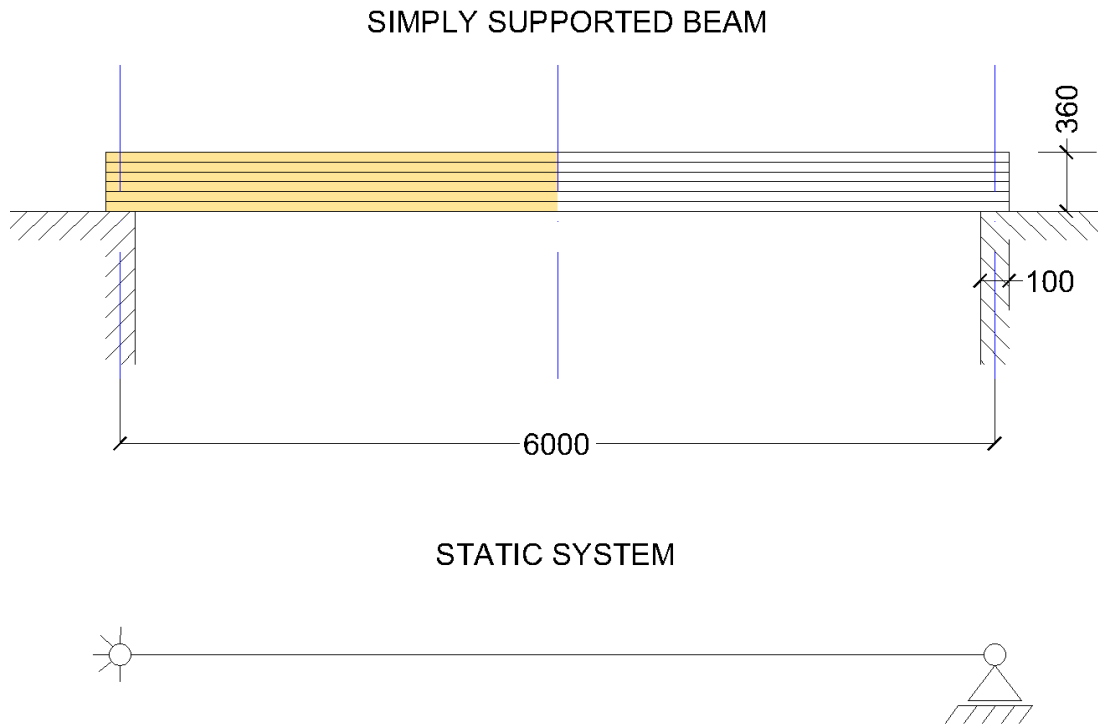
SFS EN 1995-1-1, Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa

Esimerkki 1: Yksinkertainen palkki

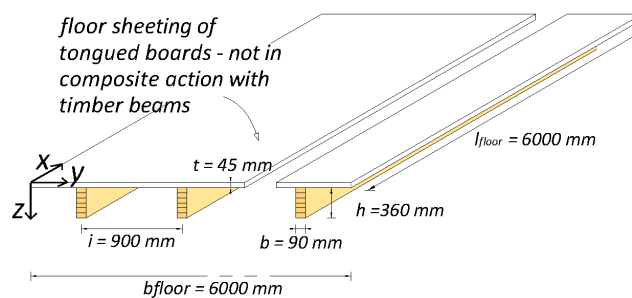
1.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva palkki ja osoita että se täyttää vaatimukset



Mitat määritetään kohdan 1.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Palkki liimapuuta	GL30c
Lattia ponttilautaa	C24
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Hyötykuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



1.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Variable load = hyötykuorma)

Structural		$g_{k1} = 0.2 \quad \text{kN/m}$
Non – structural	$G_{k2} = 0.5 \quad \text{kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i = 0.5 \cdot 0.9 = 0.5 \quad \text{kN/m}$
Variable load	$Q_k = 2 \quad \text{kN/m}^2$	$q_k = Q_k \cdot i = 2 \cdot 0.9 = 1.8 \quad \text{kN/m}$

1.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990-1-1 luku 6.4.3)

Yhdistelmä 1: (Pysyvä kuorma, $k_{\text{mod}}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \cdot \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.10 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (0.20 + 0.45) = 0.97 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä, symmetrinen kuorma, $k_{\text{mod}}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot q_k] = 1.10 \cdot [1.15 \cdot (0.20 + 0.45) + 1.50 \cdot 1.80] = 3.79 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Murtorajatilan määräävät kuormitusyhdistelmät

$$\frac{q_{dI}}{k_{\text{mod},1}} = \frac{1}{0.6} = 1.6 < \frac{q_{dII}}{k_{\text{mod},2}} = \frac{3.8}{0.8} = 4.7$$

joten yhdistelmä 2 on määräävä.

1.4. Alustava suunnittelu

$$b = 90 \quad \text{mm}$$

$$h = \frac{L_{\text{tot}}}{17} = \frac{6 \cdot 10^3}{17} = 353 \quad \text{mm} \quad >>> \quad h = 360 \quad \text{mm}$$

1.5. Murtorajatilatarkastelut

a. Puristus syitä vastaan kohtisuoraan

$$N_{Ed} = q_{dII} \cdot \frac{L_{\text{tot}}}{2} = 3.79 \cdot \frac{6}{2} = 11.38 \quad \text{kN}$$

$$\sigma_{c90d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot l_{\text{support}}} = \frac{11.38 \cdot 10^3}{90 \cdot (100 + 30)} = 0.97 \quad \text{MPa}$$

Puristuksen syitä vastaan kohtisuorassa pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.3)

$$\frac{\sigma_{c90d}}{f_{c90d} \cdot k_{c,90}} = \frac{0.97}{1.67 \cdot 1.75} = 0.33 < 1 \text{ OK}$$

b. Leikkaus

Leikkausjännityksen suunnittelu-arvo τ_d määritetään leikkausvoiman pienennetystä arvosta tuella V_{red} , ks. Liimapuukäsikirja osa 3

$$V_{Ed} = q_{dIII} \cdot \frac{L_{tot}}{2} = 3.79 \cdot \frac{6}{2} = 11.38 \text{ kN}$$

$$V_{red} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L_{tot}} \cdot \left(\frac{L_{tot}}{2} - \frac{b_{support}}{2} - h \right) = \frac{2 \cdot 11.4}{6} \cdot \left(\frac{6}{2} - \frac{0.1}{2} - 0.4 \right) = 9.8 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{3 \cdot V_{red}}{2 \cdot b \cdot h} = \frac{3 \cdot 9.82 \cdot 10^3}{2 \cdot 90 \cdot 360} = 0.45 \text{ MPa}$$

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{0.45}{2.33 \cdot 0.67} = 0.29 < 1 \text{ OK}$$

c. Taivutusmomentti

Lattialaudat estävät kiepahduksen

$$M_{Ed} = q_{dIII} \cdot \frac{L_{tot}^2}{8} = 3.79 \cdot \frac{6^2}{8} = 17.07 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{md} = \frac{6 \cdot M_{Ed}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 17.07 \cdot 10^6}{90 \cdot 360^2} = 8.78 \text{ MPa}$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.11)

$$\frac{\sigma_{md}}{f_{md} \cdot k_h} = \frac{8.78}{20 \cdot 1.05} = 0.42 < 1 \text{ OK}$$

1.6. Käyttörajoitilatarkastelut

a. Taipuma

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää

Yhdistelmä 1: (Pysyvät kuormat)	$q_{sls,1} = (g_{k1} + g_{k2}) = 0.7 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Hyötykuorma)	$q_{sls,2} = q_k = 1.8 \frac{kN}{m}$

Hetkellinen taipuma jänteen keskellä, ks. Glulam Handbook Vol. II, luku " Serviceability limit state - Deformations ". Taipuma on laskettu tasaisesta kuormasta

$$w_I = \frac{5}{384} \cdot \frac{L_{tot}^4}{E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{6000^4}{13000 \cdot \frac{90 \cdot 360^3}{12}} = 3.7 \frac{mm \cdot m}{kN}$$

Leikkausvoimien aiheuttamaa taipumaa ei oteta huomioon

Hetkellinen taipuma pysyvältä kuormasta

$$w_{inst,permanent} = w_I \cdot q_{sls,1} = 3.7 \cdot 0.7 = 2.4 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma hyötykuormasta

$$w_{inst,variable} = w_I \cdot q_{sls,2} = 3.7 \cdot 1.8 = 6.7 \text{ mm}$$

Hetkelliselle taipumalle asetettu vaatimus, EN 1995-1-1 (FI) kohta 7.2

$$w_{inst,permanent} + w_{inst,variable} = 9.1 \text{ mm} < \frac{L_{tot}}{400} = 15 \text{ mm} >>> \text{OK}$$

Lopputaipuma pysyvältä kuormasta

$$w_{final,perm} = w_{inst,permanent} \cdot (1 + k_{def}) = 2.4 \cdot (1 + 0.6) = 3.9 \text{ mm}$$

Lopputaipuma hyötykuormasta

$$w_{final.variable} = w_{inst.variable} \cdot (1 + \psi^2 \cdot k_{def}) = 6.7 \cdot (1 + 0.3 \cdot 0.6) = 7.9 \quad mm$$

Lopputaipuma kokonaisuudessaan

$$w_{final.tot} = w_{final.variable} + w_{final.perm} = 7.9 + 3.9 = 11.7 \quad mm$$

Lopputaipumalle asetettu vaatimus, EN 1995-1-1 (FI) kohta 7.2

$$w_{final.tot} = 11.7 \quad mm < \frac{L_{tot}}{300} = 20 \quad mm \quad \mathbf{OK}$$

b. Värähtelyt *Huom: Suomen kansallinen menettely poikkeaa tästä, EN 1995-1-1 (FI) kohta 7.3.3*

Lattian taivutusjäykkyys y-akselin suhteen leveysyksikköä kohti

$$EI_l = E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \cdot \frac{1}{i} = 13000 \cdot 10^6 \cdot \frac{0.09 \cdot 0.36^3}{12} \cdot \frac{1}{0.9} = 5054400 \quad N \cdot \frac{m^2}{m}$$

Lattian taivutusjäykkyys x-akselin suhteen leveysyksikköä kohti

$$EI_b = E_{0mean, floor} \cdot \frac{t^3}{12} = 11000 \cdot 10^6 \cdot \frac{0.045^3}{12} = 83531.25 \quad N \cdot \frac{m^2}{m}$$

missä t on laatan paksuus

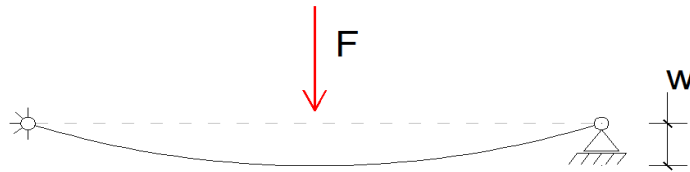
Massa pinta-alayksikköä kohti

$$m = 72 \quad kg/m^2$$

Ominaisvärähdysluku (EN 1995-1-1 luku 7.2)

$$f_l = \frac{\pi}{2 \cdot L_{tot}} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} = \frac{3.14}{2 \cdot 6^2} \cdot \sqrt{\frac{5054400}{72}} = 11.55 \quad Hz$$

Lattian pienin ominaistaajuus $f_1 > 8 \text{ Hz}$. Voidaan siis noudattaa EN 1995-1-1 luvun 7.3.3 menettelyä.



Taipuma jänneävin keskellä olevasta pistekuormasta

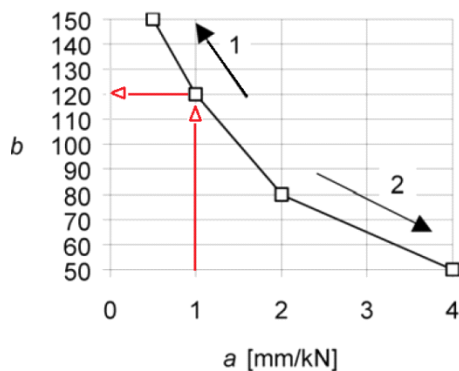
$$\frac{w}{F} = \frac{\frac{12 \cdot F \cdot 6000^3}{48 \cdot 13000 \cdot 90 \cdot 360^3} \cdot 10^3}{F} = 0.989 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Parametri a valitaan suuremmaksi kuin w/F mutta pienemmäksi kuin $1,5 \text{ mm/kN}$

chose $a = 1$

$$\frac{w}{F} = 0.989 < a = 1 < 1.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

EN 1995-1-1 kuvan 7.2 mukaan



$$a = 1 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} \gg b = 120$$

Ensimmäisen kertaluokan värähtelyjen lukumäärä joiden ominaistaajuus on enintään 40 Hz

$$\eta_{40} = \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b_{tot}}{L_{tot}} \right)^4 \cdot \frac{EI_I}{EI_b} \right]^{0.25} = \left[\left[\left(\frac{40}{11.55} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{6}{6} \right)^4 \cdot \frac{5.05 \times 10^6}{8.35 \times 10^4} \right]^{0.25} = 5.08$$

Yksikköimpulssin aiheuttama värähtelynopeuden alkuarvo

$$v = \frac{4 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot \eta_{40})}{m \cdot b \cdot L_{tot} + 200} = 0.0003 \frac{\text{N}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Värähtelylle asetettu ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 7.4)

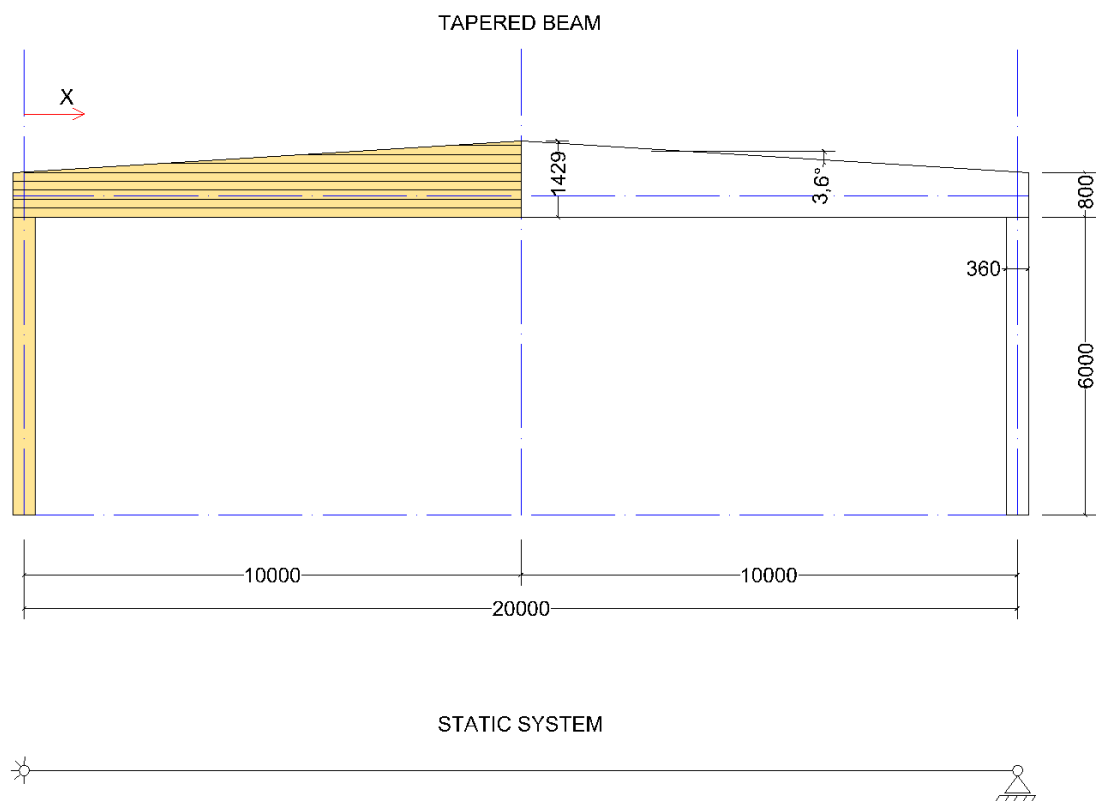
modal damping ratio $\zeta = 0.01$

$$v = 0.0003 < \frac{(f_I \cdot \zeta - 1)}{b} = \frac{11.55 \cdot 0.01 - 1}{120} = 0.01 \frac{N}{m \cdot s^2} >>> \mathbf{OK}$$

Esimerkki 2: Harjapalkki

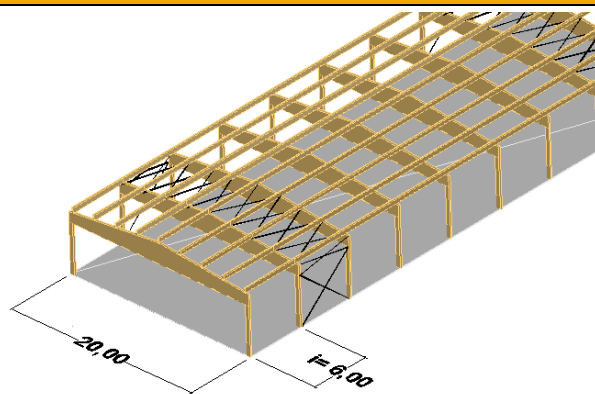
2.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva harjapalkki ja osoita että se täyttää vaatimukset



Mitat määritetään kohdan 2.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Palkki liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Lumikuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



2.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa)

Structural		$g_{k1} = 1.1 \text{ kN/m}$
Non – structural	$G_{k2} = 0.6 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.6 \cdot 6 \cdot 1.1 = 4 \text{ kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.25 \text{ kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.25 \cdot 6 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 6.6 \text{ kN/m}$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

2.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990-1-1 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1: (Pysyvä kuorma, $k_{mod}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (1.1 + 3.96) = 7.53 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä, symmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_k \right] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.1 + 3.96) + 1.5 \cdot 6.6] = 17.29 \frac{kN}{m}$

Murtorajatilan määräävät kuormitusyhdistelmät

$$\frac{q_{dI}}{k_{mod.1}} = \frac{7.5}{0.6} = 12.6 < \frac{q_{dII}}{k_{mod.2}} = \frac{17.3}{0.8} = 21.6$$

joten yhdistelmä 2 on määräävä.

2.4. Alustava suunnittelu

Alustava suunnittelu perustuu Glulam Handbook Vol. II, lukuun "Tapered, curved and pitch cambered beams"

Palkki

$$b = \frac{L_{tot}}{110} = \frac{20 \cdot 10^3}{110} = 182 \text{ mm} >>> b = 190 \text{ mm}$$

$$h_0 = \frac{L_{tot}}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{q_{dII}}{b \cdot 0.9 \cdot f_{md}}} - \tan(\alpha) \right) = \frac{20 \cdot 10^3}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{17.29}{190 \cdot 0.9 \cdot 20}} - \tan(3.6^\circ) \right) = 751.99 \text{ mm} >>> h_0 = 800 \text{ mm}$$

$$h_{apex} = \frac{L_{tot}}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{q_{dII}}{b \cdot 0.9 \cdot f_{md}}} + \tan(\alpha) \right) = \frac{20 \cdot 10^3}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{17.3}{190 \cdot 0.9 \cdot 20}} + \tan(3.6^\circ) \right) = 1381.1 \text{ mm} >>> h_{apex} = 1429 \text{ mm}$$

Pilari

$$h_{col.min} = \frac{q_{dII} \cdot \frac{L_{tot}}{2}}{b \cdot k_c \cdot 90 \cdot f_{c90d}} = \frac{17.29 \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{2}}{190 \cdot 1.75 \cdot 1.67} = 312.0 \text{ mm} >>> h_{col} = 360 \text{ mm}$$

Pilarin sivumitta on määritelty palkin kohtisuoraan syitä vastaan olevan puristuslujuuden perusteella. Pilarin nurjahdustarkastelu on esitetty esimerkissä 6

2.5. Sisäiset voimat ja momentit

Leikkaus

$$V = 172.9 \cdot kN$$



Taivutusmomentti

$$M = 865 \cdot kN \cdot m$$



2.6. Murtorajatilatarkastelut

a. Leikkaus

Leikkausjännityksen suunnitteluvarvo τ_d määritetään leikkausvoiman pienennetystä arvosta tuella V_{red} , ks. Liimapuukäsikirja osa 3

$$V_{red} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L_{tot}} \cdot \left(\frac{L_{tot}}{2} - \frac{h_{col}}{2} - h_0 \right) = 156 \quad kN$$

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_{red}}{2 \cdot b \cdot h_0} = \frac{3 \cdot 155.96 \cdot 10^3}{2 \cdot 190 \cdot 800} = 1.54 \quad MPa$$

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau_d}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{1.54}{2.33 \cdot 0.67} = 0.98 < 1 \quad OK$$

b. Puristus tuella syitä vastaan kohtisuoraan

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot (h_{col} + 30)} = \frac{172.91 \cdot 10^3}{190 \cdot (360 + 30)} = 2.33 \quad MPa$$

Puristus syitä vastaan kohtisuoraan (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.3)

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c90} f_{c90,d}} = \frac{2.33}{1.75 \cdot 1.67} = 0.8 < 1 \quad OK$$

Koska $g_k < 0.4$, s_k , $f_{c,90,d}$ voidaan tarvittaessa korvata arvolla $f_{c,90,k}$, ks. Liimapuukäsikirja osa 3

c. Rasetuimman poikkileikkauksen taivutusjännitys

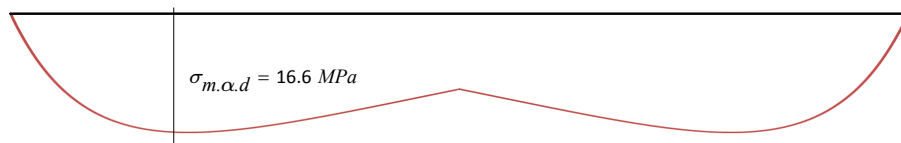
$$x_{max} = \frac{L_{tot} \cdot h_0}{2 \cdot h_{apex}} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 800}{2 \cdot 1429} = 5598.3 \text{ mm}$$

$$M_{xmax} = \frac{q_{dl} \cdot x_{max}}{2} \cdot (L_{tot} - x_{max}) = \frac{17.3 \cdot 5.6}{2} \cdot \left(\frac{20 \cdot 10^3}{10} - 5.6 \right) = 697 \text{ kNm}$$

$$h_{xmax} = h_0 + x_{max} \cdot \tan(\alpha) = 800 + 5598.3 \cdot \tan(3.6^\circ) = 1152.2 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6M_{xmax}}{b \cdot h_{xmax}^2} = \frac{6 \cdot 697 \cdot 10^6}{190 \cdot 1152.2^2} = 16.6 \text{ MPa}$$

Taivutusjännityskuvio



Taivutuslujuuden suunnitteluarvoa pitää pienentää kertoimella $k_{m,\alpha}$, joka ottaa huomioon taivutusjännityksen, leikkajännityksen ja puristusjännityksen yhteisvaikutuksen

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{md}}{1.5 \cdot f_{vd}} \cdot \tan(\alpha) \right)^2 + \left[\frac{f_{md}}{f_{c90d}} \cdot (\tan(\alpha))^2 \right]^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{20}{1.5 \cdot 2.33} \cdot \tan(3.6^\circ) \right)^2 + \left(\frac{20}{1.67} \cdot \tan(3.6^\circ) \right)^2}} = 0.94$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.38)

$$\frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{md}} = \frac{16.58}{0.94 \cdot 20} = 0.88 < 1 \text{ OK}$$

d. Taivutusjännitys harjalla

$$\sigma_{md} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} = 1.11 \cdot \frac{6 \cdot 864.55 \cdot 10^6}{190 \cdot 1429^2} = 14.83 \text{ MPa}$$

Harjan taivutusjännitystä kasvatetaan kertoimella k_l , joka ottaa huomioon että neutraaliakseli ei ole poikkileikkauksen keskellä (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.43)

$$k_l = 1 + 1.4 \cdot \tan(\alpha) + 5.4 \cdot (\tan(\alpha))^2 = 1 + 1.4 \cdot \tan(3.6^\circ) + 5.4 \cdot \tan(3.6^\circ)^2 = 1.11$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.41)

$$\frac{\sigma_{md}}{f_{md}} = \frac{14.83}{20} = 0.74 < 1 \text{ OK}$$

e. Harjalla syitä vastaan kohtisuoraan syntyvä vetojännitys

$$k_p = 0.2 \cdot \tan(\alpha) = 0.2 \cdot \tan(3.6^\circ) = 0.013$$

$$\sigma_{t90d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} - 0.6 \cdot \frac{q_{dII}}{b} = 0.01 \cdot \frac{6 \cdot 864.55 \cdot 10^6}{190 \cdot 1429^2} - 0.6 \cdot \frac{17.29}{190} = 0.1 \text{ MPa}$$

$$Vol \cong b \cdot h_{apex}^2 = 0.19 \cdot 1.429^2 = 0.388 \text{ m}^3 \quad k_{vol} = \left(\frac{V_0}{Vol} \right)^{0.2} = \left(\frac{0.01}{0.388} \right)^{0.2} = 0.481$$

Harjalla syitä vastaan kohtisuoraan syntyvän vetojännityksen pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.50)

$$\frac{\sigma_{t90d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90d}} = \frac{0.11}{1.4 \cdot 0.48 \cdot 0.33} = 0.51 < 1 \text{ OK}$$

f. Kiepahdustarkastelu

Palkin kiepahtamista rajoittaa orsien muodostama jäykistysrakenne, jonka tukipisteiden etäisyys on 1,80 m. Poikkileikkauksen korkeuden katsotaan olevan orsiväleittäin vakio. Kiepahdus tarkistetaan rasitetuimmassa poikkileikkauksessa, kohdassa $x=x_{max}$

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6M_{xmax}}{b \cdot h_{xmax}^2} = \frac{6 \cdot 697 \cdot 10^6}{190 \cdot 1152.2^2} = 16.6 \text{ MPa}$$

Tehollinen kiepahduspituus:	$L_{0z} = 1.80 \text{ m}$
Kriittinen taivutusjännitys:	$\sigma_{cr,m} = \frac{\pi}{L_{0z} \cdot W_y} \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{0.05} \cdot I_{tor}} = \frac{\pi}{1.8 \cdot 10^3 \cdot \frac{1152.2^2 \cdot 190}{6}} \cdot \sqrt{10800 \cdot \frac{1152.2 \cdot 190^3}{12} \cdot 542 \cdot \frac{190^3 \cdot 1152.2}{3}} = 132.3 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{cr,m}}} = \sqrt{\frac{30}{132.3}} = 0.5$
Kiepahduserroin:	$k_{crit} = 1$

Kiepahduserroin on 1. Siten kiepahtamista ei tarvitse tarkastella.

2.7. Käyttörajatilatarkastelut

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää

Yhdistelmä 1: (Pysyvät kuormat)	$q_{sls,1} = (g_{k1} + g_{k2}) = 5.1 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Lumikuorma)	$q_{sls,2} = s_k = 6.6 \frac{kN}{m}$

Hetkellinen taipuma harjalla, ks. Glulam Handbook Vol. II, " Serviceability limit state – Deformations ".
Taipuma on laskettu tasaisesta yksikkökuormasta q_1

$$h_e = h_0 + 0.33 \cdot L_{tot} \cdot \tan(\alpha) = 1215.2 \quad mm$$

$$w_I = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_1 L_{tot}^4}{E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h_e^3}{12}} + 0.35 \cdot \frac{q_1 L_{tot}^2}{G_{mean} \cdot b \cdot (h_{apex} + h_0)} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1 \cdot 20000^4}{13000 \cdot \frac{190 \cdot 1215.24^3}{12}} + 0.35 \cdot \frac{1 \cdot 20000^2}{650 \cdot 190 \cdot (1429 + 800)} = 6.15 \frac{mm}{kN}$$

Missä

Leikkausvoiman aiheuttama taipuma:

$$w_{shear} = 0.35 \cdot \frac{L_{tot}^2}{G_{mean} \cdot b \cdot (h_{apex} + h_0)} = 0.51 \quad \frac{w_{shear}}{w_I} = 8.3\%$$

Taivutusmomentin aiheuttama taipuma:

$$w_{bending} = \frac{5}{384} \cdot \frac{L_{tot}^4}{E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h_e^3}{12}} = 5.64 \quad \frac{w_{bending}}{w_I} = 91.7\%$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormasta

$$w_{inst,permanent} = w_I \cdot q_{sls,1} = 6.1 \cdot 5.1 = 31.1 \quad mm$$

Hetkellinen taipuma lumikuormasta

$$w_{inst,snow} = w_I \cdot q_{sls,2} = 6.1 \cdot 6.6 = 40.6 \quad mm$$

Hetkelliselle taipumalle asetettu vaatimus (Suomessa ei ole tätä vaatimusta)

$$w_{inst,permanent} + w_{inst,snow} = 71.7 \quad mm \quad > \quad \frac{L_{tot}}{300} = 67 \quad mm \quad \text{NO}$$

Lopputaipuma pysyvistä kuormasta

$$w_{final,perm} = w_{inst,permanent} \cdot (1 + k_{def}) = 31.1 \cdot (1 + 0.6) = 49.8 \quad mm$$

Lopputaipuma lumikuormasta

$$w_{final.snow} = w_{inst.snow} \cdot (1 + \psi_{2snow} \cdot k_{def}) = 40.6 \cdot (1 + 0.2 \cdot 0.6) = 45.4 \text{ mm}$$

Lopputaipuma kokonaisuudessaan

$$w_{final.tot} = w_{final.snow} + w_{final.perm} = 45.4 + 49.8 = 95.2 \text{ mm}$$

Lopputaipumalle asetettu vaatimus, ks. EN 1995-1-1 (FI) kohta 7.2

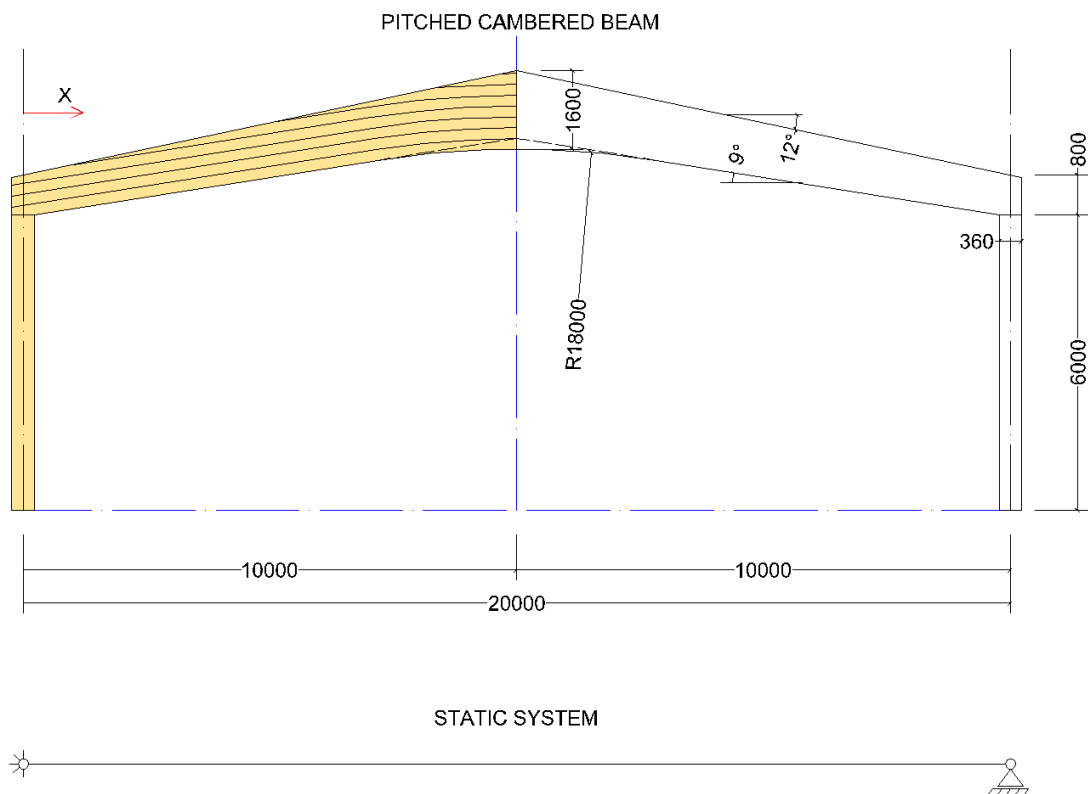
$$w_{final.tot} = 95.2 \text{ mm} < \frac{L_{tot}}{200} = 100 \text{ mm} \quad \mathbf{OK}$$

Alkutaipumaa koskeva ehto ei täyty. Suomessa ei kuitenkaan ole tätä vaatimusta.

Esimerkki 3: Kaareva harjapalkki

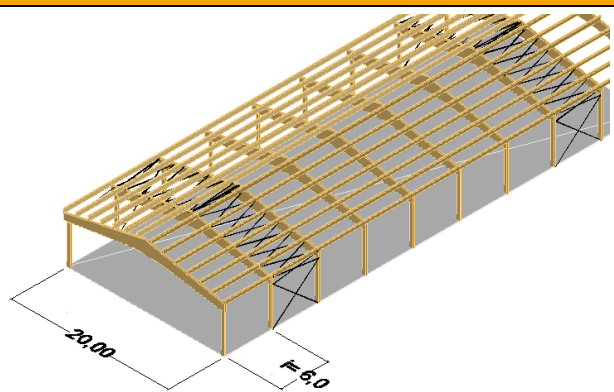
3.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva kaareva harjapalkki ja osoita että se täyttää vaatimukset



Mitat määritetään kohdan 3.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Palkki liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Lumikuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



3.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa)

Structural		$g_{k1} = 1.2 \quad \text{kN/m}$
Non – structural	$G_{k2} = 0.60 \quad \text{kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.60 \cdot 6 \cdot 1.1 = 4 \quad \text{kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.5 \quad \text{kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 6 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 7.9 \quad \text{kN/m}$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

3.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990-1-1 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1 (Pysyvä kuorma, $k_{\text{mod}}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (1.2 + 3.96) = 7.68 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä, symmetrinen kuorma, $k_{\text{mod}}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_k \right] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.2 + 3.96) + 1.5 \cdot 7.92] = 19.6 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Murtorajatilaa määräävät kuormitusyhdistelmät

$$\frac{q_{dI}}{k_{\text{mod},1}} = \frac{7.68}{0.6} = 12.8 < \frac{q_{dII}}{k_{\text{mod},2}} = \frac{19.6}{0.8} = 24.5$$

joten yhdistelmä 2 on määräävä.

3.4. Alustava suunnittelu

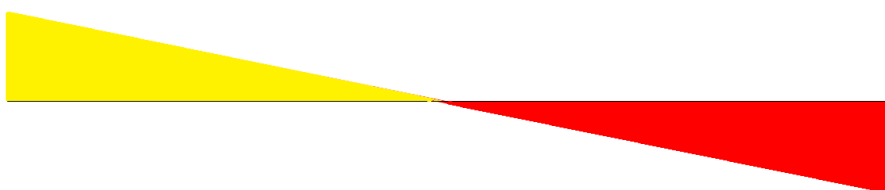
Palkki

$$\begin{aligned} r &\geq 10 \quad \text{m} &>>> &r = 18 \quad \text{m} \\ b = \frac{L_{\text{tot}}}{100} &= \frac{20 \cdot 10^3}{100} = 200 \quad \text{mm} &>>> &b = 215 \quad \text{mm} \\ h_{\text{apex}} = \frac{L_{\text{tot}}}{13} &= \frac{20 \cdot 10^3}{13} = 1538 \quad \text{mm} &>>> &h_{\text{apex}} = 1600 \quad \text{mm} \\ h_0 = \frac{L_{\text{tot}}}{30} &= \frac{20 \cdot 10^3}{30} = 667 \quad \text{mm} &>>> &h_0 = 800 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

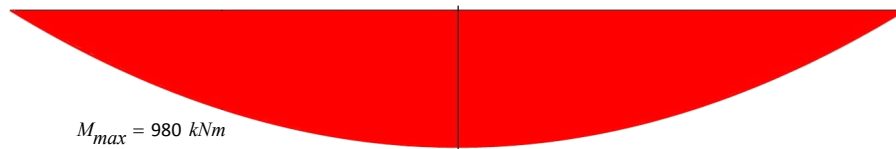
3.5. Sisäiset voimat ja momentit

Leikkaus

$$V = 196 \cdot \text{kN}$$



Taivutusmomentti



3.6. Murtorajatilatarkastelut

a. Leikkaus

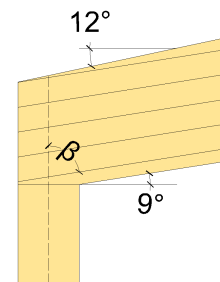
Leikkausjännityksen suunnitteluarvo τ_d määritetään leikkausvoiman pienennetystä arvosta tuella V_{red} , ks. Liimapuukäsikirja osa 3

$$V_{red} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L_{tot}} \cdot \left(\frac{L_{tot}}{2} - \frac{h_{col}}{2} - h_0 \right) = \frac{2 \cdot 195.95}{20 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{20 \cdot 10^3}{2} - \frac{360}{2} - 800 \right) = 176.75 \quad kN$$

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_{red}}{2 \cdot b \cdot h_0} = \frac{3 \cdot 176.75 \cdot 10^3}{2 \cdot 215 \cdot 800} = 1.54 \quad MPa$$

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau_d}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{1.54}{2.33 \cdot 0.67} = 0.99 < 1 \quad OK$$

b. Puristus tuella kulmassa β syitä vastaan

In this example a column with a depth of 360 mm is considered:

$$\beta = 90^\circ - \alpha_{int} = 90^\circ - 9^\circ = 81^\circ$$

The compression stress at the support is:

$$\sigma_{c,\beta,d} = \frac{q_{dII} \cdot L_{tot}}{2 \cdot b_{col} (h_{col} + 30 \cdot \cos(9^\circ))} = \frac{19.6 \cdot 20 \cdot 10^3}{2 \cdot 215 \cdot (360 + 30 \cdot \cos(9^\circ))} = 2.34 \quad MPa$$

Puristuslujuus kulmassa β syitä vastaan

$$f_{c\beta d} = \frac{f_{c0d}}{\left(\frac{f_{c0d}}{(k_{c,90} f_{c90k})} \cdot (\sin(\beta))^2 + (\cos(\beta))^2 \right)} = \frac{16.33}{\frac{16.33}{1.75 \cdot 2.5} \cdot \sin(81^\circ)^2 + \cos(81^\circ)^2} = 4.45 \quad MPa$$

Koska $g_k < 0,4 s_k$, $f_{c,90,d}$ voidaan korvata arvolla $f_{c,90,k}$ ks. Liimapuukäsikirja osa 3

Puristuksen kulmassa β syitä vastaan pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.16)

$$\frac{\sigma_{c,\beta,d}}{f_{c\beta d}} = \frac{2.34}{4.45} = 0.53 < 1 \quad OK$$

c. Rasitetuimman poikkileikkauksen taivutusjännitys

$$x_{max} = \frac{L_{tot} \cdot h_0}{2 \cdot h_{apex}} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 800}{2 \cdot 1600} = 5000 \text{ mm}$$

$$M_{x,max} = \frac{q_{dII} \cdot x_{max}}{2} \cdot (L_{tot} - x_{max}) = \frac{19.6 \cdot 5}{2} \cdot (20 - 5) = 734.8 \text{ kNm}$$

$$h_{x,max} = 848 + \left(x_{max} - \frac{h_{col}}{2} \right) \cdot (\tan(\alpha_{ext}) - \tan(\alpha_{int})) \cdot \cos(\alpha_{int}) = 848 + \left(5000 - \frac{360}{2} \right) \cdot (\tan(12^\circ) - \tan(9^\circ)) \cdot \cos(9^\circ) = 1105.9 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6M_{x,max}}{b \cdot h_{x,max}^2} = \frac{6 \cdot 734.8 \cdot 10^6}{215 \cdot 1105.9^2} = 16.8 \text{ MPa}$$

Taivutusjännityskuvio



Taivutuslujuuden suunnitteluarvoa pitää pienentää kertoimella $k_{m,\alpha}$, joka ottaa huomioon taivutusjännityksen, leikkausjännityksen ja puristusjännityksen yhteisvaikutuksen

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{md}}{1.5 \cdot f_{vd}} \cdot \tan(\Delta\alpha) \right)^2 + \left[\frac{f_{md}}{f_{c90d}} \cdot (\tan(\Delta\alpha))^2 \right]^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{20}{1.5 \cdot 2.33} \cdot \tan(12^\circ - 9^\circ) \right)^2 + \left(\frac{20}{1.67} \cdot \tan(12^\circ - 9^\circ) \right)^2}} = 0.96$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.38)

$$\frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{md}} = \frac{16.77}{0.96 \cdot 20} = 0.88 < 1 \quad \text{OK}$$

d. Taivutusjännitys harjalla

Harjan taivutusjännitystä kasvatetaan kertoimella k_h , joka ottaa huomioon että neutraaliakseli ei ole poikkileikkauksen keskellä (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.43)

$$k_1 = 1 + 1.4 \cdot \tan(\alpha_{ext}) + 5.4 \cdot (\tan(\alpha_{ext}))^2 = 1 + 1.4 \cdot \tan(12^\circ) + 5.4 \cdot \tan(12^\circ)^2 = 1.54$$

$$k_2 = 0.35 - 8 \cdot \tan(\alpha_{ext}) = 0.35 - 8 \cdot \tan(12^\circ) = -1.35$$

$$k_3 = 0.6 + 8.3 \cdot \tan(\alpha_{ext}) - 7.8 \cdot (\tan(\alpha_{ext}))^2 = 0.6 + 8.3 \cdot \tan(12^\circ) - 7.8 \cdot \tan(12^\circ)^2 = 2.01$$

$$k_4 = 6 \cdot (\tan(\alpha_{ext}))^2 = 6 \cdot \tan(12^\circ)^2 = 0.27$$

$$R = R_{int} + 0.5 \cdot h_{apex} = 18 \cdot 10^3 + 0.5 \cdot 1.6 \times 10^3 = 1.88 \times 10^4 \text{ mm}$$

$$k_l = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R} \right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R} \right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R} \right)^3 = 1.54 + -1.35 \cdot \frac{1.6 \times 10^3}{1.88 \times 10^4} + 2.01 \cdot \left(\frac{1.6 \times 10^3}{1.88 \times 10^4} \right)^2 + 0.27 \cdot \left(\frac{1.6 \times 10^3}{1.88 \times 10^4} \right)^3 = 1.44$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{md} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} = 1.44 \cdot \frac{6 \cdot 979.77 \cdot 10^6}{215 \cdot 1600^2} = 15.39 \text{ MPa}$$

Kaarevien lamellien kohdalla taivutuslujuutta pitää pienentää kertoimella k_r (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.49)

$$\frac{R_{int}}{45} = \frac{18 \cdot 10^3}{45} = 400$$

$$k_r = 1.0$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.41)

$$\frac{\sigma_{md}}{k_r \cdot f_{md}} = \frac{15.39}{1.20} = 0.77 < 1 \quad \text{OK}$$

e. Harjalla syitä vastaan kohtisuoraan syntyvä vetojännitys

Kerroin k_p (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.56)

$$k_5 = 0.2 \cdot \tan(\alpha_{ext}) = 0.2 \cdot \tan(12^\circ) = 0.04$$

$$k_6 = 0.25 - 1.5 \cdot \tan(\alpha_{ext}) + 2.6 \cdot (\tan(\alpha_{ext}))^2 = 0.25 - 1.5 \cdot \tan(12^\circ) + 2.6 \cdot \tan(12^\circ)^2 = 0.05$$

$$k_7 = 2.1 \cdot \tan(\alpha_{ext}) - 4 \cdot (\tan(\alpha_{ext}))^2 = 2.1 \cdot \tan(12^\circ) - 4 \cdot \tan(12^\circ)^2 = 0.27$$

$$k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R} \right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R} \right)^2 = 0.04 + 0.05 \cdot \frac{1.6 \times 10^3}{1.88 \times 10^4} + 0.27 \cdot \left(\frac{1.6 \times 10^3}{1.88 \times 10^4} \right)^2 = 0.05$$

Vetojännitys (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.54)

$$\sigma_{t90d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} - 0.6 \cdot \frac{q_{dII}}{b} = 0.05 \cdot \frac{6 \cdot 979.77 \cdot 10^6}{215 \cdot 1600^2} - 0.6 \cdot \frac{19.6}{215} = 0.46 \text{ MPa}$$

Vetolujuus kohtisuoraan syitä vastaan pitää kertoa kertoimilla k_{vol} ja k_{dis} (EN 1995-1-1 Yhtälöt 6.51 ja 6.52)

$$Vol = b \cdot \left[(R_{int} + h_{apex})^2 \cdot \sin(\alpha_{int}) \cdot (\cos(\alpha_{int}) - \sin(\alpha_{int}) \cdot \tan(\alpha_{ext} - \alpha_{int})) - R_{int}^2 \cdot \frac{\alpha_{int} \cdot \pi}{180^\circ} \right] = 1.713 \text{ m}^3$$

$$k_{dis} = 1.7$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{Vol} \right)^{0.2} = \left(\frac{0.01}{1.713} \right)^{0.2} = 0.357$$

Harjalla syitä vastaan kohtisuoraan syntyvän vetojännityksen pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.50)

$$\frac{\sigma_{t90d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90d}} = \frac{0.46}{1.7 \cdot 0.36 \cdot 0.33} = 2.29 > 1 \quad \text{NO}$$

Palkki pitää vahvistaa harjalla poikittaisia vetojännityksiä vastaan; vahvistuksen tekeminen esitetään esimerkissä 16

f. Kiepahdustarkastelu

Palkin kiepahtamista rajoittaa orsien muodostama jäykistysrakenne, jonka tukipisteiden etäisyys on 1,80 m. Poikkileikkauksen korkeuden katsotaan olevan orsiväleittäin vakio. Kiepahdus tarkistetaan rasitetuimmassa poikkileikkauksessa, kohdassa $x=x_{\max}$

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6M_{x,\max}}{b \cdot h_{x,\max}^2} = \frac{6 \cdot 734.83 \cdot 10^6}{215 \cdot 1105.89^2} = 16.77 \text{ MPa}$$

Tehollinen kiepahduspituus:	$L_{0z} = 1.80 \text{ m}$
Kriittinen taivutusjännitys:	$\sigma_{cr,m} = \frac{\pi}{L_{0z} \cdot W_y} \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{0.5} \cdot I_{tor}} = \frac{\pi}{1.8 \cdot 10^3 \cdot \frac{1105.9^2 \cdot 215}{6}} \cdot \sqrt{10800 \cdot \frac{1105.9 \cdot 215^3}{12} \cdot 542 \cdot \frac{215^3 \cdot 1105.9}{3}} = 176.5 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{cr,m}}} = \sqrt{\frac{30}{176.5}} = 0.4$
Kiepahduserroin:	$k_{crit} = 1$

Kiepahduserroin on 1. Siten kiepahtamista ei tarvitse tarkastella.

3.7. Käyttörajoitilataukset

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää

Yhdistelmä 1: (Pysyvät kuormat)	$q_{sls,1} = g_{k1} + g_{k2} = 5.2 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Lumikuorma)	$q_{sls,2} = s_k = 7.9 \frac{kN}{m}$

Hetkellinen taipuma harjalla, ks. Glulam Handbook Vol. II, "Serviceability limit state – Deformations". Taipuma on laskettu tasaisesta yksikkökuormasta q_{11}

$$k_I = 0.15 + 0.85 \cdot \frac{h_0}{h_{apex}} = 0.58$$

$$w_{I,bending} = \frac{5}{384} \cdot \frac{L_{tot}^4}{E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h_{apex}^3}{12}} \cdot \frac{1}{k_I} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_{ext} + \alpha_{int}}{2}\right)} = \frac{5}{384} \cdot \frac{20000^4}{13000 \cdot \frac{215 \cdot 1600^3}{12}} \cdot \frac{1}{0.6} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{12^\circ + 9^\circ}{2}\right)} = 3.9 \quad mm \cdot \frac{m}{kN}$$

$$w_{I,shear} = 1.2 \cdot \frac{L_{tot}^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot b \cdot h_0} \cdot \frac{2 \cdot h_0^{\frac{2}{3}}}{h_0^{\frac{3}{3}} + h_{apex}^{\frac{3}{3}}} = 0.4 \quad mm \cdot \frac{m}{kN}$$

Leikkausvoimien aiheuttamaa taipumaa ei oteta huomioon

$$w_I = w_{I,bending} = 3.9 \quad mm \cdot \frac{m}{kN}$$

Hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta

$$w_{inst,permanent} = w_I \cdot q_{sls,1} = 3.9 \cdot 5.2 = 19.9 \quad mm$$

Hetkellinen taipuma lumikuormasta

$$w_{inst,snow} = w_I \cdot q_{sls,2} = 3.9 \cdot 7.9 = 30.6 \quad mm$$

Hetkelliselle taipumalle asetettu vaatimus (Suomessa ei ole tätä vaatimusta)

$$w_{inst,permanent} + w_{inst,snow} = 50.5 \quad mm < \frac{L_{tot}}{300} = 66. \quad mm \quad \text{OK}$$

Lopputaipuma pysyvästä kuormasta

$$w_{final,perm} = w_{inst,permanent} \cdot (1 + k_{def}) = 19.9 \cdot (1 + 0.6) = 31.9 \quad mm$$

Lopputaipuma lumikuormasta

$$w_{final,snow} = w_{inst,snow} \cdot (1 + \psi_{2snow} \cdot k_{def}) = 30.6 \cdot (1 + 0.2 \cdot 0.6) = 34.3 \quad mm$$

Lopputaipuma kokonaisuudessaan

$$w_{final,tot} = w_{final,snow} + w_{final,perm} = 34.3 + 31.9 = 66.2 \quad mm$$

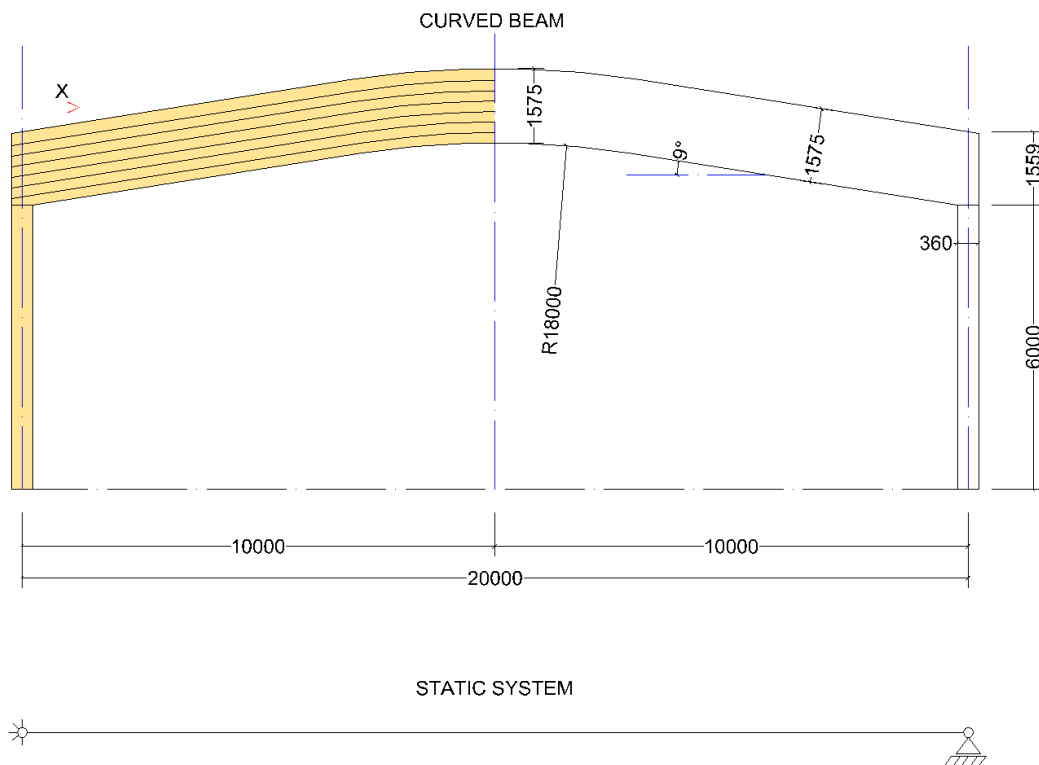
Lopputaipumalle asetettu vaatimus, ks. EN 1995-1-1 (FI) kohta 7.2

$$w_{final,tot} = 66.2 \text{ mm} < \frac{L_{tot}}{200} = 100 \text{ mm} \quad \mathbf{OK}$$

Esimerkki 4: Kaareva palkki

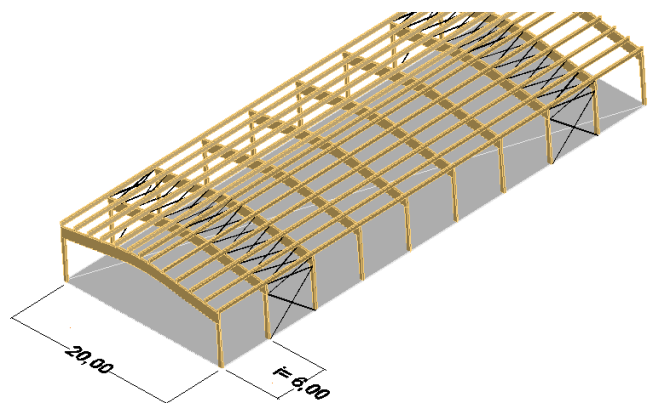
4.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva kaareva palkki ja osoita että se täyttää vaatimukset



Mitat määritetään kohdan 4.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Palkki liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuserroin	$\gamma_g = 1,15$
Lumikuorman osavarmuuserroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuserroin	$\gamma_M = 1,2$



4.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa)

Structural		$g_{k1} = 1 \text{ kN/m}$
Non - structural	$G_{k2} = 0.50 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.5 \cdot 6 \cdot 1.1 = 3.3 \text{ kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 6 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 7.92 \text{ kN/m}$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

4.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990-1-1 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1: (Pysyvä kuorma, $k_{mod}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \cdot \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (1 + 3.3) = 6.4 \text{ kN/m}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä, symmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1 + 3.3) + 1.5 \cdot 7.92] = 18.51 \text{ kN/m}$

Murtorajatilan määräävät kuormitusyhdistelmät

$$\frac{q_{dI}}{k_{mod.1}} = \frac{6.4}{0.6} = 10.7 < \frac{q_{dII}}{k_{mod.2}} = \frac{18.5}{0.8} = 23.1$$

joten yhdistelmä 2 on määräävä.

4.4. Alustava suunnittelu

Alustava suunnittelu perustuu Glulam Handbook Vol. II lukuun "Tapered, curved and pitch cambered beams"

A beam with a constant cross section is chosen

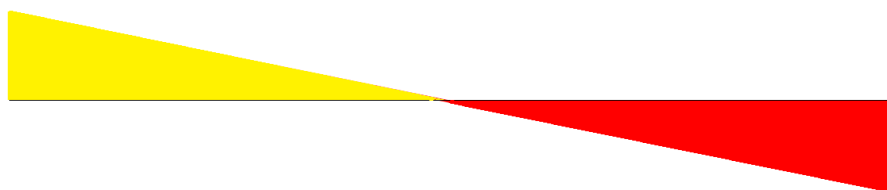
$$b = \frac{L_{tot}}{120} = \frac{20 \cdot 10^3}{120} = 167 \text{ mm} \gg \gg \gg b = 165 \text{ mm}$$

$$h_{apex} = \frac{L_{tot}}{13} = \frac{20 \cdot 10^3}{13} = 1538 \text{ mm} \gg \gg \gg h_{apex} = 1575 \text{ mm}$$

4.5. Sisäiset voimat ja momentit

Leikkaus

$$V = 185.1 \text{ kN}$$



Taivutusmomentti

$$M_{max} = 925.4 \text{ kNm}$$

4.6. Murtorajatilatarkastelut

a. Leikkaus

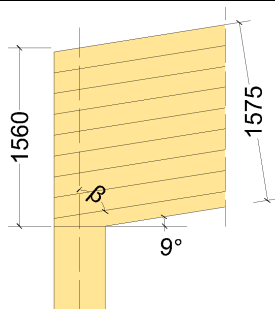
Leikkausjännityksen suunnitteluarvo τ_d määritetään leikkausvoiman pienennetystä arvosta tuella V_{red} , katso Liimapuukäsikirja osa 3

$$V_{red} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L_{tot}} \cdot \left(\frac{L_{tot}}{2} - \frac{h_{col}}{2} - h_0 \right) = \frac{2 \cdot V}{20 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{20 \cdot 10^3}{2} - \frac{360}{2} - 1559 \right) = 152.89 \text{ kN}$$

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_{red}}{2 \cdot b \cdot h_0} = \frac{3 \cdot 152.89 \cdot 10^3}{2 \cdot 165 \cdot 1559} = 0.89 \text{ MPa}$$

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau_d}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{0.89}{2.33 \cdot 0.67} = 0.57 < 1 \quad \text{OK}$$

b. Puristus kulmassa β syitä vastaan

In this example a column with a depth of 360 mm is considered

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 9^\circ = 81^\circ$$

The compression stress at the support is

$$\sigma_{c,\beta,d} = \frac{q_{dII} \cdot L_{tot}}{2 \cdot b_{col} (h_{col} + 30 \cdot \cos(9^\circ))} = \frac{18.51 \cdot 20 \cdot 10^3}{2 \cdot 165 \cdot (360 + 30 \cdot \cos(9^\circ))} = 2.88 \text{ MPa}$$

Puristuslujuus kulmassa β syitä vastaan (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.16)

$$f_{c\beta d} = \frac{f_{c0d}}{\left(\frac{f_{c0d}}{k_{c90} f_{c90d}} \right) \cdot (\sin(\beta))^2 + (\cos(\beta))^2} = \frac{16.33}{\frac{16.33}{1.75 \cdot 1.67} \cdot \sin(81^\circ)^2 + \cos(81^\circ)^2} = 2.98 \text{ MPa}$$

Puristuksen kulmassa β syitä vastaan pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.16)

$$\frac{\sigma_{c,\beta,d}}{f_{c\beta d}} = \frac{2.88}{2.98} = 0.97 < 1 \quad \text{OK}$$

c. Taivutusjännitykset

Harjan taivutusjännitystä kasvatetaan kertoimella k_I , joka ottaa huomioon että neutraaliakseli ei ole poikkileikkauksen keskellä (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.43)

$$\begin{aligned}
 k_I &= 1 + 1.4 \cdot \tan(\alpha_{apex}) + 5.4 \cdot (\tan(\alpha_{apex}))^2 = 1 + 1.4 \cdot \tan(0) + 5.4 \cdot \tan(0)^2 = 1 \\
 k_2 &= 0.35 - 8 \cdot \tan(\alpha_{apex}) = 0.35 - 8 \cdot \tan(0) = 0.35 \\
 k_3 &= 0.6 + 8.3 \cdot \tan(\alpha_{apex}) - 7.8 \cdot (\tan(\alpha_{apex}))^2 = 0.6 + 8.3 \cdot \tan(0) - 7.8 \cdot \tan(0)^2 = 0.6 \\
 k_4 &= 6 \cdot (\tan(\alpha_{apex}))^2 = 6 \cdot \tan(0)^2 = 0 \\
 R &= R_{int} + 0.5 \cdot h_{apex} = 18 \cdot 10^3 + 0.5 \cdot 1575 = 18788 \text{ mm} \\
 k_I &= k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R}\right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R}\right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R}\right)^3 = 1 + 0.35 \cdot \frac{1.58 \times 10^3}{1.88 \times 10^4} + 0.6 \cdot \left(\frac{1.58 \times 10^3}{1.88 \times 10^4}\right)^2 + 0 \cdot \left(\frac{1.58 \times 10^3}{1.88 \times 10^4}\right)^3 = 1.03 \\
 \sigma_{md} &= k_I \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} = 1.03 \cdot \frac{6 \cdot 925.38 \cdot 10^6}{165 \cdot 1575^2} = 14.02 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Kaarevien lamellien kohdalla taivutuslujuutta pitää pienentää kertoimella k_r (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.49)

$$\begin{aligned}
 \frac{R_{int}}{45} &= \frac{18 \cdot 10^3}{45} = 400 \\
 k_r &= 1.0
 \end{aligned}$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.41)

$$\frac{\sigma_{md}}{k_r \cdot f_{md}} = \frac{14.02}{1 \cdot 20} = 0.7 < 1 \quad \text{OK}$$

d. Harjalla syitä vastaan kohtisuoraan syntyvä vetojännitys

Kerroin k_p (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.56)

$$\begin{aligned}
 k_5 &= 0.2 \cdot \tan(\alpha_{apex}) = 0.2 \cdot \tan(0^\circ) = 0 \\
 k_6 &= 0.25 - 1.5 \cdot \tan(\alpha_{apex}) + 2.6 \cdot (\tan(\alpha_{apex}))^2 = 0.25 - 1.5 \cdot \tan(0^\circ) + 2.6 \cdot \tan(0^\circ)^2 = 0.25 \\
 k_7 &= 2.1 \cdot \tan(\alpha_{apex}) - 4 \cdot (\tan(\alpha_{apex}))^2 = 2.1 \cdot \tan(0^\circ) - 4 \cdot \tan(0^\circ)^2 = 0 \\
 k_p &= k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R}\right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{apex}}{R}\right)^2 = 0 + 0.25 \cdot \frac{1575}{18787.5} + 0 \cdot \left(\frac{1575}{18787.5}\right)^2 = 0.021
 \end{aligned}$$

Vetojännitys (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.54)

$$\sigma_{t90d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} - 0.6 \cdot \frac{q_{dII}}{b} = 0.02 \cdot \frac{6 \cdot 925.38 \cdot 10^6}{165 \cdot 1575^2} - 0.6 \cdot \frac{18.51}{165} = 0.22 \text{ MPa}$$

Vetolujuus kohtisuoraan syitä vastaan pitää kertoa kertoimilla k_{vol} ja k_{dis} (EN 1995-1-1 Yhtälöt 6.51 ja 6.52)

$$Vol = b \cdot h_{apex} \cdot (2 \cdot R_{int} + h_{apex}) \cdot \alpha \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = 0.17 \cdot 1.58 \cdot (2 \cdot 18 + 1.58) \cdot 9^\circ \cdot \frac{3.14}{180^\circ} = 1.53 \text{ m}^3$$

$$k_{dis} = 1.4$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{Vol} \right)^{0.2} = \left(\frac{0.01}{1.533} \right)^{0.2} = 0.365$$

Harjalla syitä vastaan kohtisuoraan syntyvän vetojännityksen pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.50)

$$\frac{\sigma_{t90d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90d}} = \frac{0.22}{1.4 \cdot 0.37 \cdot 0.33} = 1.27 > 1 \quad NO$$

Palkki pitää vahvistaa harjalla poikittaisia vetojännityksiä vastaan

e. Kiepahdustarkastelu

Palkin kiepahtamista rajoittaa jäykistysrakenteen tukipisteiden etäisyys on 1,80 m.

Tehollinen kiepahduspituus:	$L_{0z} = 1.80 \text{ m}$
Kriittinen taivutusjännitys:	$\sigma_{cr,m} = \frac{\pi}{L_{0z} \cdot W_y} \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{0.05} \cdot I_{tor}} = \frac{\pi}{1.80 \cdot 10^3 \cdot \frac{1575^2 \cdot 165}{6}} \cdot \sqrt{10800 \cdot \frac{1575 \cdot 165^3}{12} \cdot 542 \cdot \frac{165^3 \cdot 1575}{3}} = 73 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{cr,m}}} = \sqrt{\frac{30}{73}} = 0.6$
Kiepahduskerroin:	$k_{crit} = 1$

Kiepahduskerroin on 1. Siten kiepahtamista ei tarvitse tarkastella.

4.7. Käyttörajoitilatarkastelut

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää

Yhdistelmä 1: (Pysyvät kuormat)	$q_{sls,1} = g_{k1} + g_{k2} = 4.3 \frac{kN}{m}$
---	--

Yhdistelmä 2:
(Lumikuorma)

$$q_{sls,2} = s_k = 7.9 \frac{kN}{m}$$

Hetkellinen taipuma harjalla, ks. Glulam Handbook Vol. II.
Taipuma on laskettu tasaisesta yksikkökuormasta q_1

$$w_I = \left(\frac{5}{384} \cdot \frac{1 \cdot L_{tot}^4}{E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h_0^3}{12}} + 1.2 \cdot \frac{L_{tot}^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot b \cdot h_0} \right) \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{2\alpha}{2}\right)} = \left[\frac{5}{384} \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)^4}{13000 \cdot \frac{165 \cdot 1559^3}{12}} + 1.2 \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{8 \cdot 650 \cdot 165 \cdot 1559} \right] \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{2 \cdot 9^\circ}{2}\right)} = 3.5 \frac{mm \cdot m}{kN}$$

Missä

Leikkausvoiman aiheuttama taipuma: $w_{shear} = 1.2 \cdot \frac{L_{tot}^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot b \cdot h_{apex}} = 0.36$ $\frac{w_{shear}}{w_I} = 10\%$

Taivutusmomentin aiheuttama taipuma: $w_{bending} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1 \cdot L_{tot}^4}{E_{0mean} \cdot \frac{b \cdot h_0^3}{12}} = 3.08$ $\frac{w_{bending}}{w_I} = 90\%$

Hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta

$$w_{inst,permanent} = w_I \cdot q_{sls,1} = 3.5 \cdot 4.3 = 15 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma lumikuormasta

$$w_{inst,snow} = w_I \cdot q_{sls,2} = 3.5 \cdot 7.9 = 27.5 \text{ mm}$$

Hetkelliselle taipumalle asetettu vaatimus (Suomessa ei ole tätä vaatimusta)

$$w_{inst,permanent} + w_{inst,snow} = 42.5 \text{ mm} < \frac{L_{tot}}{300} = 66.6 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

Lopputaipuma pysyvästä kuormasta

$$w_{final,perm} = w_{inst,permanent} \cdot (1 + k_{def}) = 15 \cdot (1 + 0.6) = 23.9 \text{ mm}$$

Lopputaipuma lumikuormasta

$$w_{final,snow} = w_{inst,snow} \cdot (1 + \psi_{2snow} \cdot k_{def}) = 27.54 \cdot (1 + 0.2 \cdot 0.6) = 30.85 \text{ mm}$$

Lopputaipuma kokonaisuudessaan

$$w_{final,tot} = w_{final,snow} + w_{final,perm} = 30.8 + 23.9 = 54.8 \text{ mm}$$

Lopputaipumalle asetettu vaatimus, ks. EN 1995-1-1 (FI) kohta 7.2

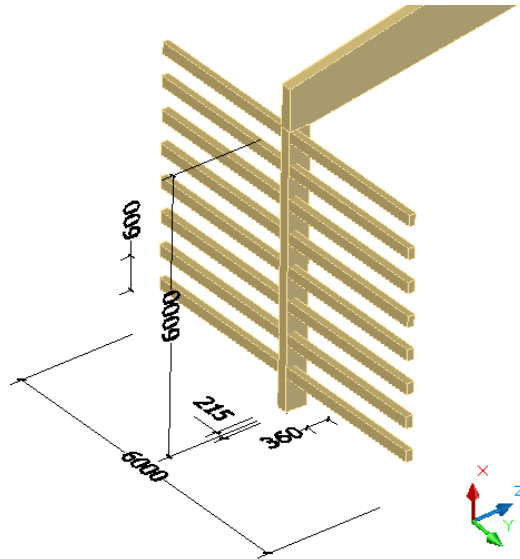
$$w_{final,tot} = 54.8 \text{ mm} < \frac{L_{tot}}{200} = 100 \text{ mm} \quad \mathbf{OK}$$

Esimerkki 5: Pilari

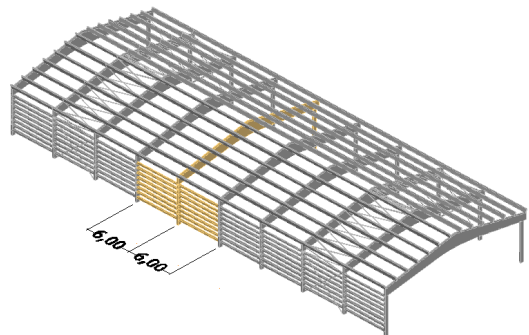
5.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva pilari ja osoita että se täyttää vaatimukset

Yläpäästään vapaan pilarin kiertyminen y-akselin ympäri on estetty alapäässä. Esimerkin 3 kaareva harjapalkki tukeutuu näihin pilareihin.



Palkki liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Muuttuvien kuormien osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



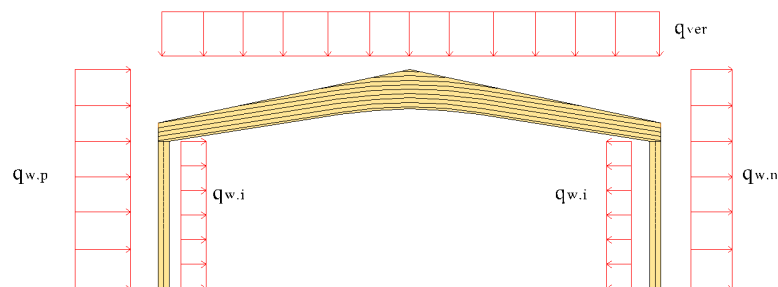
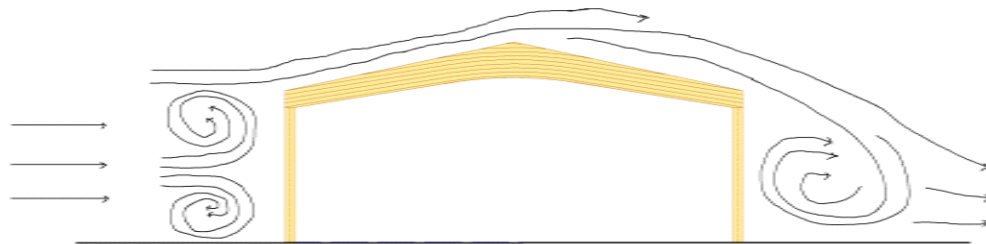
5.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa, Wind load = tuulikuorma)

Structural		$g_{k,beam} = 1.2 \text{ kN/m}$ $g_{k,column} = 0.5 \text{ kN/m}$
Non structural	$G_{k2} = 0.6 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.6 \cdot 6 \cdot 1.1 = 3.96 \text{ kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 6 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 7.92 \text{ kN/m}$
Wind load	$Q_{w,k} = 0.6 \text{ kN/m}^2$	$q_{w,k,pos} = Q_{w,k} \cdot i \cdot C_{e,pos} = 0.6 \cdot 6 \cdot 0.75 = 2.7 \text{ kN/m}$ $q_{w,k,neg} = Q_{w,k} \cdot i \cdot C_{e,neg} = 0.6 \cdot 6 \cdot 0.4 = 1.44 \text{ kN/m}$ $q_{w,k,int} = Q_{w,k} \cdot i \cdot C_{int} = 0.6 \cdot 6 \cdot 0.35 = 1.26 \text{ kN/m}$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

Tuulikuorman vaikutus otetaan huomioon tasaisena kuormana alla olevan kuvan mukaisesti, ks. EN 1991-1-4 luku 7.2.2



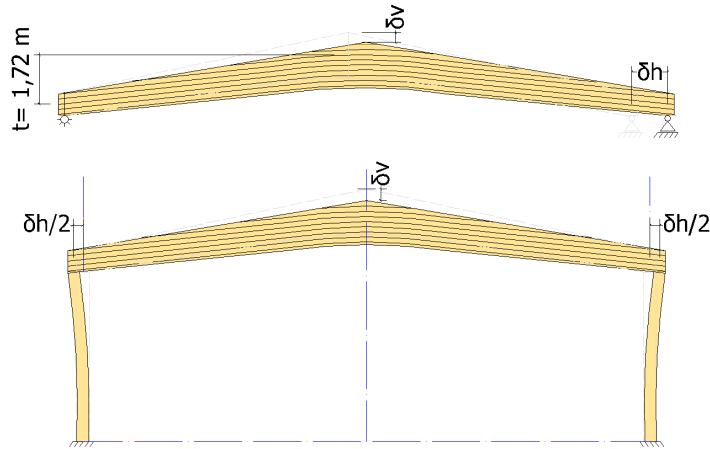
5.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990-1-1 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1: (Lumikuorma määräävä, $k_{mod}=1,1$)	$q_{ver.1} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k.beam} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.2 + 3.96) + 1.5 \cdot 7.92] = 19.6 \quad \frac{kN}{m}$ $q_{w.p.1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.pos} \cdot \psi_{0,w} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 2.7 \cdot 0.6 = 2.67 \quad \frac{kN}{m}$ $q_{w.n.1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.neg} \cdot \psi_{0,w} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 1.44 \cdot 0.6 = 1.43 \quad \frac{kN}{m}$ $q_{w.i.1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.int} \cdot \psi_{0,w} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 1.26 \cdot 0.6 = 1.25 \quad \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Tuulikuorma määräävä, $k_{mod}=1,1$)	$q_{ver.2} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k.beam} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot \psi_{0,s} \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.2 + 3.96) + 1.5 \cdot 0.7 \cdot 7.92] = 15.67 \quad \frac{kN}{m}$ $q_{w.p.2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.pos} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 2.7 = 4.5 \quad \frac{kN}{m}$ $q_{w.n.2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.neg} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 1.44 = 2.38 \quad \frac{kN}{m}$ $q_{w.i.2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.int} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 1.26 = 2.08 \quad \frac{kN}{m}$

5.4. Palkin taipuman aiheuttama pilarin yläpään sivusuuntainen siirtymä

Palkin taipuma aiheuttaa pilarin yläpään sivusuuntaisen siirtymän. Todellisessa rakenteessa siirtymä kummallekin pilarille tulee siirtymä $h/2$



a. Palkin taipuma

Hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta ja lumikuormasta (ks esimerkki 3)

$$\delta_{inst.snow} = w_{unitary} \cdot (s_k) = 3.9 \cdot 7.9 = 30.6 \text{ mm}$$

$$\delta_{inst.perm} = w_{unitary} \cdot (g_{k.beam} + g_{k2}) = 3.9 \cdot (1.2 + 4) = 19.9 \text{ mm}$$

Lopputaipumat ovat

Yhdistelmä 1:	$\delta_{v.1} = \gamma_g \delta_{inst.perm} \cdot (1 + k_{def}) + \gamma_q \delta_{inst.snow} \cdot (1 + \psi_{2.s} \cdot k_{def}) = 1.15 \cdot 19.93 \cdot (1 + 0.6) + 1.5 \cdot 30.59 \cdot (1 + 0.2 \cdot 0.6) = 88.06 \text{ mm}$
---------------	---

Yhdistelmä 2:	$\delta_{v.2} = \gamma_g \delta_{inst.perm} + \gamma_q \cdot \psi_{0.s} \delta_{inst.snow} = 1.15 \cdot 19.93 + 1.5 \cdot 0.7 \cdot 30.59 = 55.04 \text{ mm}$
---------------	---

b. Sivusuuntainen siirtymä

Taipumasta aiheutuva sivusuuntainen siirtymä voidaan laskea yhtälöstä (ks Luku 6.2, Glulam Handbook Vol. II)

$$\delta_h = \left(4 \cdot \frac{t}{L_{tot}} + 3.2 \cdot \frac{h_0}{L_{tot}} \right) \cdot \delta_v$$

Yhdistelmä 1:	$\delta_{h.1} = \left(4 \cdot \frac{t}{L_{tot}} + 3.2 \cdot \frac{h_0}{L_{tot}} \right) \cdot \delta_{v.1} = \left(4 \cdot \frac{1724}{20 \cdot 10^3} + 3.2 \cdot \frac{800}{20 \cdot 10^3} \right) \cdot 88.1 = 41.6 \text{ mm}$
---------------	---

Yhdistelmä 2:	$\delta_{h.2} = \left(4 \cdot \frac{t}{L_{tot}} + 3.2 \cdot \frac{h_0}{L_{tot}} \right) \cdot \delta_{v.2} = \left(4 \cdot \frac{1724}{20 \cdot 10^3} + 3.2 \cdot \frac{800}{20 \cdot 10^3} \right) \cdot 55 = 26 \text{ mm}$
---------------	---

c. Sivusuuntaisen siirtymän vaikutukset

Sivusuuntaisesta siirtymästä aiheutuu pilareille seuraavat lisärasitukset

$$V_{\delta h1} = \frac{\delta_{h.1}}{2} \cdot \frac{3 \cdot E_{0.05} \cdot I_{col}}{L_{col}^3} \cdot 10^{-3} = \frac{41.6}{2} \cdot \frac{3 \cdot 10800 \cdot \frac{215 \cdot 360^3}{12}}{6000^3} \cdot 10^{-3} = 2.6 \text{ kN}$$

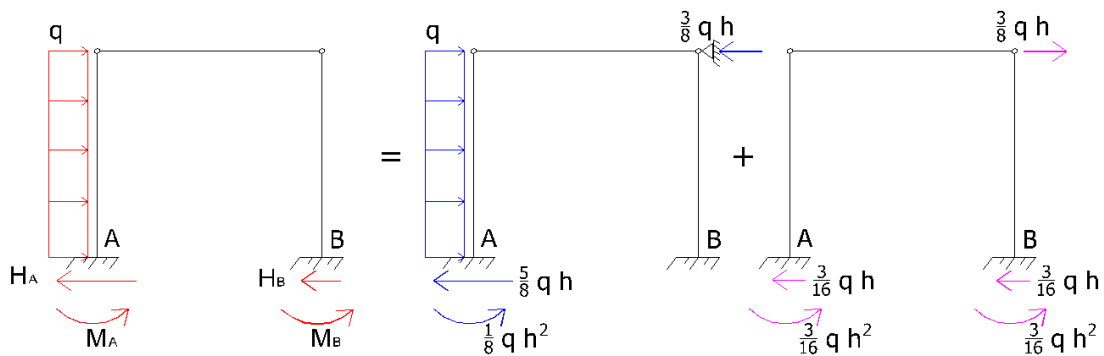
$$V_{\delta h2} = \frac{\delta_{h.2}}{2} \cdot \frac{3 \cdot E_{0.05} \cdot I_{col}}{L_{col}^3} \cdot 10^{-3} = \frac{26}{2} \cdot \frac{3 \cdot 10800 \cdot \frac{215 \cdot 360^3}{12}}{6000^3} \cdot 10^{-3} = 1.6 \text{ kN}$$

$$M_{\delta h2} = V_{\delta h2} \cdot L_{col} = 1.6 \cdot 6 = 9.8 \text{ kNm}$$

$$M_{\delta h1} = V_{\delta h1} \cdot L_{col} = 2.6 \cdot 6 = 15.7 \text{ kNm}$$

5.5. Murtorajatilatarkastelut

Vapaakappalekuva



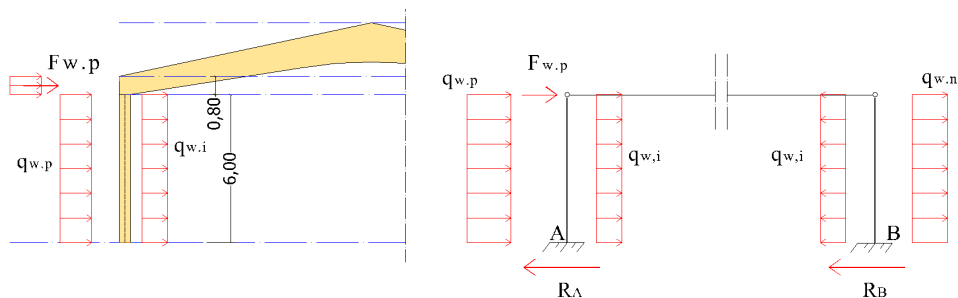
$$H_A = \frac{5}{8} \cdot q \cdot h + \frac{3}{16} \cdot q \cdot h \rightarrow \frac{13 \cdot h \cdot q}{16}$$

$$M_A = \frac{1}{8} \cdot q \cdot h^2 + \frac{3}{16} \cdot q \cdot h^2 \rightarrow \frac{5 \cdot h^2 \cdot q}{16}$$

$$H_B = \frac{3}{16} \cdot q \cdot h$$

$$M_B = \frac{3}{16} \cdot q \cdot h^2 \rightarrow \frac{3 \cdot h^2 \cdot q}{16}$$

Tuulikuorma vaikuttaa ulko- ja sisäpuolelta aiheuttaen leikkausvoimaa ja taivutusmomenttia



$$F_{w.p} = q_{w.p.2} \cdot 0.8 = 4.46 \cdot 0.8 = 3.56 \text{ kN}$$

$$R_A = \left(\frac{13}{16} \cdot q_{w.p.2} + \frac{3}{16} \cdot q_{w.n.2} \right) \cdot L_{col} + \frac{1}{2} \cdot F_{w.p} + \frac{5}{8} \cdot q_{w.i.2} \cdot L_{col} = \left(\frac{13}{16} \cdot 4.5 + \frac{3}{16} \cdot 2.4 \right) \cdot 6 + \frac{1}{2} \cdot 3.6 + \frac{5}{8} \cdot 2.1 \cdot 6 = 34 \text{ kN}$$

$$R_B = \left(\frac{13}{16} \cdot q_{w.n.2} + \frac{3}{16} \cdot q_{w.p.2} \right) \cdot L_{col} + \frac{1}{2} \cdot F_{w.p} - \frac{5}{8} \cdot q_{w.i.2} \cdot L_{col} = \left(\frac{13}{16} \cdot 2.4 + \frac{3}{16} \cdot 4.5 \right) \cdot 6 + \frac{1}{2} \cdot 3.6 - \frac{5}{8} \cdot 2.1 \cdot 6 = 10.6 \text{ kN}$$

a. Leikkaus

Kuormitusyhdistelmä 2 on leikkauksen suhteen määräävä pilarin alapäässä

$$V_{windwar,2} = R_A = 34 \quad kN$$

$$\tau_{d,2} = \frac{3 \cdot V_{windwar}}{2 \cdot (b_{col} \cdot h_{col}) \cdot k_r} = \frac{3 \cdot 33969.38}{2 \cdot 215 \cdot 360 \cdot 0.8} = 0.82 \quad MPa$$

k_r on pienennyskerroin joka ottaa huomioon kiinnikkeet

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$f_{vd,2} = \frac{f_{yk} \cdot k_{mod,2}}{\gamma_M} = \frac{3.5 \cdot 1.1}{1.2} = 3.21 \quad MPa \qquad \frac{\tau_{d,2}}{k_{cr} f_{vd,2}} = \frac{0.82}{0.67 \cdot 3.21} = 0.38 < 1 \quad \text{OK}$$

b. Yhdistetty taivutus ja puristus pilarin alapäässä

Kuormitusyhdistelmä 2 on taivutuksen suhteen määräävä pilarin alapäässä

$$M_{d,2} = \left(\frac{5 \cdot q_{w,p,2}}{16} + \frac{3 \cdot q_{w,n,2}}{16} \right) \cdot L_{col}^2 + \frac{1}{2} \cdot F_{w,p} \cdot L_{col} + \frac{q_{w,i,2}}{8} \cdot L_{col}^2 = \left(\frac{5 \cdot 4.5}{16} + \frac{3 \cdot 2.4}{16} \right) \cdot 6^2 + \frac{1}{2} \cdot 3.6 \cdot 6 + \frac{2.1}{8} \cdot 6^2 = 86.2 \quad kNm$$

$$F_{v,2} = q_{ver,2} \cdot \frac{L_{tot}}{2} + \gamma_g \cdot g_{k,column} \cdot L_{col} = 15.67 \cdot \frac{20}{2} + 1.15 \cdot 0.5 \cdot 6 = 160.2 \quad kN$$

$$\sigma_{c,0.d,2} = \frac{F_{v,2}}{k_r \cdot b_{col} \cdot h_{col}} = \frac{160.2 \cdot 10^3}{0.8 \cdot 215 \cdot 360} = 2.59 \quad MPa$$

$$\sigma_{m,d,2} = \frac{6 \cdot M_{d,2}}{b_{col} \cdot h_{col}^2} = \frac{6 \cdot 86.2 \cdot 10^6}{215 \cdot 360^2} = 18.56 \quad MPa$$

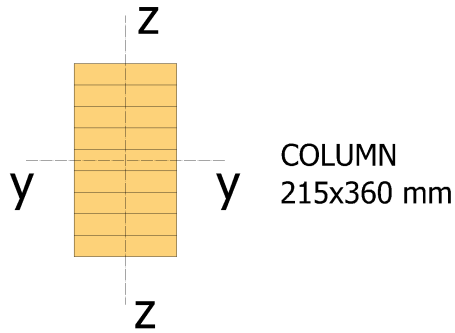
Kaarevan harjapalkin taipuman aiheuttamaa taivutusmomenttia $M_{2\delta h}$ ei oteta huomioon pilarin tarkastelussa sillä se vaikuttaa tuulikuorman suhteen vastakkaiseen suuntaan

Yhdistetyn taivutuksen ja puristuksen pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.19)

$$f_{md,2} = \frac{k_h \cdot f_{mk} \cdot k_{mod,2}}{\gamma_M} = \frac{1.05 \cdot 30 \cdot 1.1}{1.2} = 28.94 \quad MPa \qquad f_{c0d,2} = \frac{f_{c0k} \cdot k_{mod,2}}{\gamma_M} = \frac{24.5 \cdot 1.1}{1.2} = 22.46 \quad MPa$$

$$\frac{\sigma_{m,d,2}}{f_{md,2}} + \left(\frac{\sigma_{c,0,d,2}}{f_{c0d,2}} \right)^2 = \frac{18.56}{28.94} + \left(\frac{2.59}{22.46} \right)^2 = 0.65 < 1 \quad \text{OK}$$

c. Nurjahdustarkastelu taivutuksen ja puristuksen vaikuttaessa



$$\sigma_{c.0.d.2} = \frac{F_{v.2}}{b_{col} h_{col} k_r} = \frac{160.2 \cdot 10^3}{215 \cdot 360 \cdot 0.8} = 2.59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m.d.2} = \frac{6 \cdot M_{d.2}}{b_{col} h_{col}^2} = \frac{6 \cdot 86.2 \cdot 10^6}{215 \cdot 360^2} = 18.56 \text{ MPa}$$

Nurjahtaminen y-akselin suhteen (taipuma suunnassa z) (Käytetty Liimapuukäsikirjan osan 3 mukaista nurjahduspituutta $2,25 \times L$)

Nurjahduspituus:	$L_{0y} = 2.25 \cdot 6 = 13.5 \text{ m}$
Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr.y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{b_{col} h_{col} L_{0y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{215 \cdot 360^3}{12}}{215 \cdot 360 \cdot (13.5 \cdot 10^3)^2} = 6.32 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel.y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr.y}}} = \sqrt{\frac{24.5}{6.32}} = 1.97$
Vakio k:	$k_y = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + \lambda_{rel.y}^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (1.97 - 0.3) + 1.97^2 \right] = 2.52$
Nurjahduskerroin:	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel.y}^2}} = \frac{1}{2.52 + \sqrt{2.52^2 - 1.97^2}} = 0.24$

Nurjahduksen ja taivutuksen y-akselin suhteen pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c.0.d.2}}{k_{cy} f_{c0d.2}} + \frac{\sigma_{m.d.2}}{f_{md.2}} = \frac{2.59}{0.24 \cdot 22.46} + \frac{18.56}{28.94} = 1.11 > 1 \text{ NO}$$

Ehto ei täyty. Kasvatetaan pilarin sivumittaa 360 mm:stä 405 mm:n

$$h_{col} = 405 \text{ mm} \quad b_{col} = 215 \text{ mm}$$

$$\sigma_{c.0.d.2} = \frac{F_{v.2}}{b_{col} h_{col} k_r} = \frac{160.2 \cdot 10^3}{215 \cdot 405 \cdot 0.8} = 2.3 \text{ MPa} \quad \sigma_{m.d.2} = \frac{6 \cdot M_{d.2}}{b_{col} h_{col}^2} = \frac{6 \cdot 86.2 \cdot 10^6}{215 \cdot 405^2} = 14.67 \text{ MPa}$$

Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr.y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{b_{col} h_{col} L_{0y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{215 \cdot 405^3}{12}}{215 \cdot 405 \cdot (13.5 \cdot 10^3)^2} = 7.99 \text{ MPa}$
------------------------------	---

Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{24.5}{7.99}} = 1.75$
Vakio k:	$k_y = \frac{1}{2} \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] = \frac{1}{2} \left[1 + 0.1 \cdot (1.75 - 0.3) + 1.75^2 \right] = 2.1$
Nurjahduskerroin:	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{2.1 + \sqrt{2.1^2 - 1.75^2}} = 0.31$

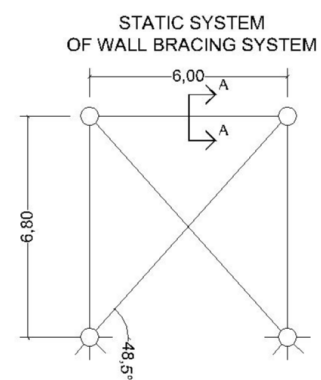
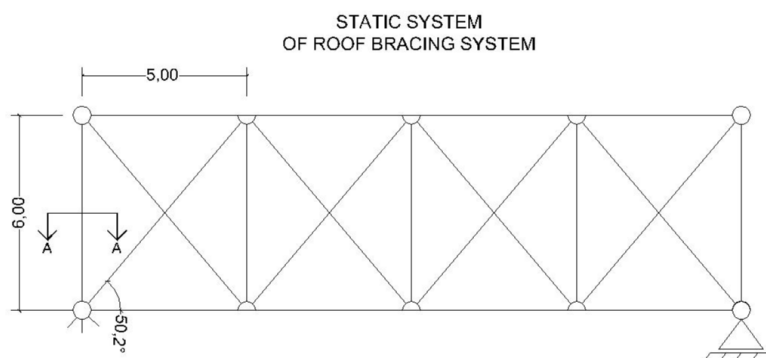
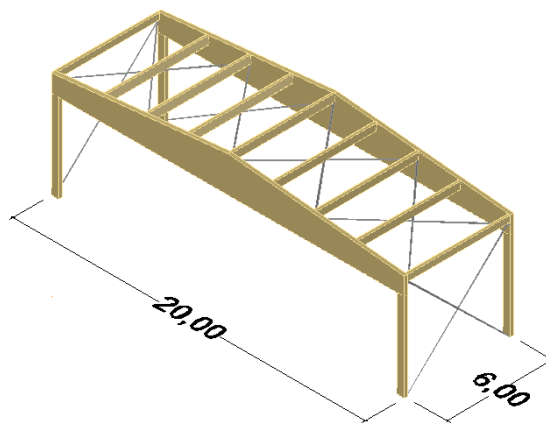
Nurjahduksen ja taivutuksen y-akselin suhteen pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c.0.d.2}}{k_{cy} f_{c0d.2}} + \frac{\sigma_{m.d.2}}{f_{md.2}} = \frac{2.3}{0.31 \cdot 22.46} + \frac{14.67}{28.94} = 0.84 < 1 \text{ OK}$$

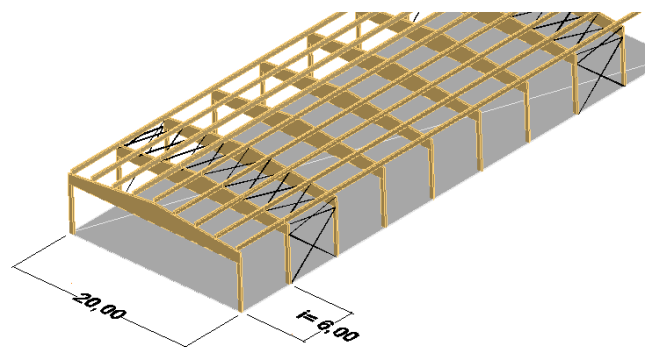
Esimerkki 6: Jäykistys

6.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva jäykistysrakenne ja osoita että se täyttää vaatimukset. Rakenne jäykistää esimerkin 2 harjapalkkeja.



Palkki liimapuuta	GL30c
Puristussauvat liimapuuta	GL30c
Teräksisen vetotangon luokka	5.6
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Muuttuvien kuormien osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$
Teräksen osavarmuuskerroin	$\gamma_{M2} = 1,25$



6.2. Kuormat

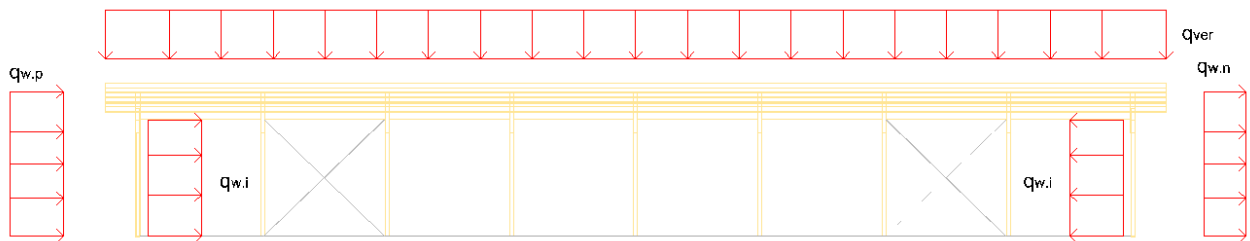
Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa, Wind load = tuulikuorma)

Structural		$g_{k.beam} = 1.1 \text{ kN/m}$
Non Structural	$G_{k2} = 0.6 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.6 \cdot 6 \cdot 1.1 = 3.96 \text{ kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 6 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 7.92 \text{ kN/m}$
Wind load	$Q_{w.k} = 0.7 \text{ kN/m}^2$	$q_{w.k.pos} = Q_{w.k} \cdot C_{e.pos} = 0.7 \cdot 0.75 = 0.53 \text{ kN/m}^2$ $q_{w.k.neg} = Q_{w.k} \cdot C_{e.neg} = 0.7 \cdot 0.4 = 0.28 \text{ kN/m}^2$ $q_{w.k.int} = Q_{w.k} \cdot C_{int} = 0.7 \cdot 0.35 = 0.25 \text{ kN/m}^2$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

6.3. Kuormien yhdistely

Tuulikuorman vaikutus voidaan yksinkertaistaa tasaisiksi kuormiksi alla olevan kuvan mukaisesti



Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990-1-1 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1: (Lumikuorma määräävä, $k_{mod} = 1,1$)	$q_{ver.1} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k.beam} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.1 + 3.96) + 1.5 \cdot 7.92] = 19.47 \frac{kN}{m}$ $q_{w.p.1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.pos} \cdot \psi_{0.w} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 0.53 \cdot 0.6 = 0.52 \frac{kN}{m^2}$ $q_{w.n.1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.neg} \cdot \psi_{0.w} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 0.28 \cdot 0.6 = 0.28 \frac{kN}{m^2}$ $q_{w.i.1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.int} \cdot \psi_{0.w} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 0.25 \cdot 0.6 = 0.24 \frac{kN}{m^2}$
Yhdistelmä 2: (Tuulikuorma määräävä, $k_{mod} = 1,1$)	$q_{ver.2} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k.beam} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot \psi_{0.s} \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.1 + 3.96) + 1.5 \cdot 0.7 \cdot 7.92] = 15.55 \frac{kN}{m}$ $q_{w.p.2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.pos} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 0.53 = 0.87 \frac{kN}{m^2}$ $q_{w.n.2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.neg} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 0.28 = 0.46 \frac{kN}{m^2}$ $q_{w.i.2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w.k.int} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot 0.25 = 0.4 \frac{kN}{m^2}$

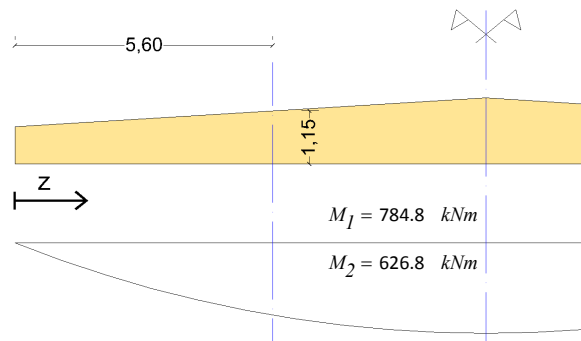
6.4. Sisäinen jäykistyskuorma

Jäykistysrakennetta kuormittavat tuuli ja sisäinen jäykistyskuorma (EN 1995-1-1 luku 9.2.5.3)

Harjapalkin rasetuimman poikkileikkauksen taivutusmomentti tasossa on (ks. esimerkki 2)

$$\text{at } x = x_{\max} : M_1 = \frac{q_{\text{ver.1}} \cdot x_{\max}}{2} \cdot (L_{\text{tot}} - x_{\max}) = \frac{19.47 \cdot 5.6}{2} \cdot (20 - 5.6) = 784.84 \quad \text{kNm}$$

$$M_2 = \frac{q_{\text{ver.2}} \cdot x_{\max}}{2} \cdot (L_{\text{tot}} - x_{\max}) = \frac{15.55 \cdot 5.6}{2} \cdot (20 - 5.6) = 626.8 \quad \text{kNm}$$



Rakenne jäykistetään kahdella ristikolla. Kummallekin tulee jäykistyskuormaa neljältä palkilta

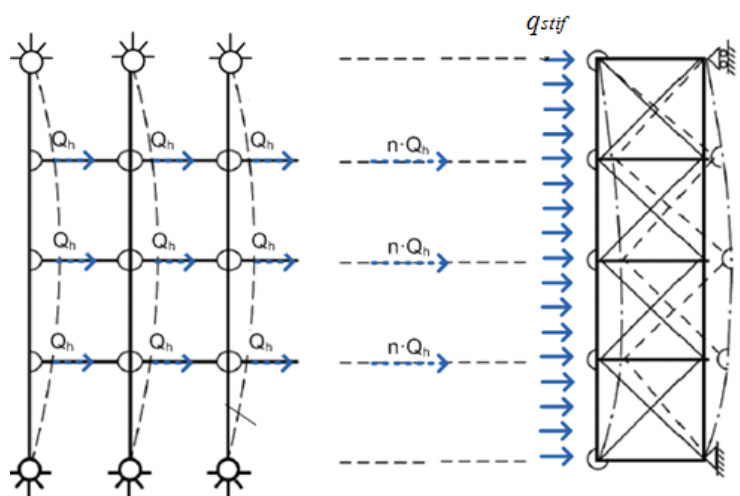
$$n = 4$$

Huomaa että harjapalkkien lukumäärä on 9, mutta päätyjen palkit kantavat vain puolet niiden välisten palkkien kuormasta.

Sisäiset jäykistyskuormat (Glulam Handbook Vol. II, luku "Bracing of glulam structures")

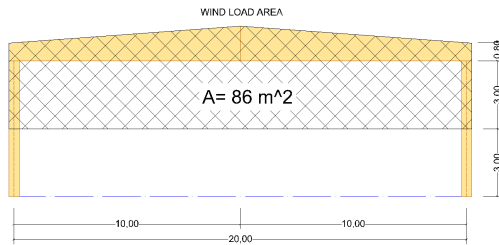
$$q_{st,1} = n \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{M_1}{L_{\text{tot}} \cdot \frac{2}{3} \cdot h_{x,\max}} = 4 \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{784.84}{20 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1.15} = 4.09 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{st,2} = n \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{M_2}{L_{\text{tot}} \cdot \frac{2}{3} \cdot h_{x,\max}} = 4 \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{626.8}{20 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1.15} = 3.26 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



6.5. Katon jäykistysrakenne

Tuulikuorman vaikutusala on esitetty alla olevassa kuvassa. Kerroin 1,1 tulee orsien ja julkisivujen vaikutuksesta.

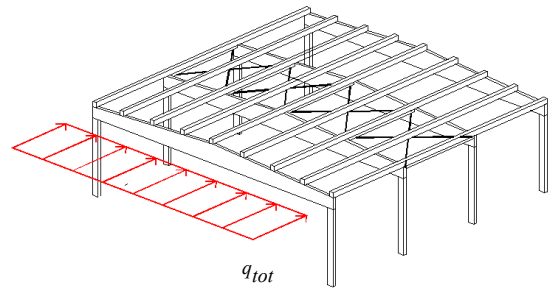


$$A_{wind} = 86 \cdot 1.1 = 94.6 \text{ m}^2$$

Tuulta pidetään tasaisena kuormana joka vaikuttaa katon tasossa. Tuulenpuoleisen jäykistysrakenteen oletetaan ottavan koko tuulikuorman. Tämä oletus tulee siitä, että katon levytys ei yleensä ole riittävän jäykkä jakamaan tuulikuormaa tasan ristikoille. (Huom. ristikon muodonmuutosta vaakatasossa ei tarkisteta.)

$$q_{w.1} = (q_{w.p.1} + q_{w.i.1}) \cdot \frac{A_{wind}}{L_{tot}} = (0.52 + 0.24) \cdot \frac{94.6}{20} = 3.61 \text{ kN/m}$$

$$q_{w.2} = (q_{w.p.2} + q_{w.i.2}) \cdot \frac{A_{wind}}{L_{tot}} = (0.87 + 0.4) \cdot \frac{94.6}{20} = 6.01 \text{ kN/m}$$



Yhdelle ristikolle tuleva kokonaiskuorma

$$q_{tot.1} = q_{w.1} + q_{st.1} = 3.61 + 4.09 = 7.69 \text{ kN/m}$$

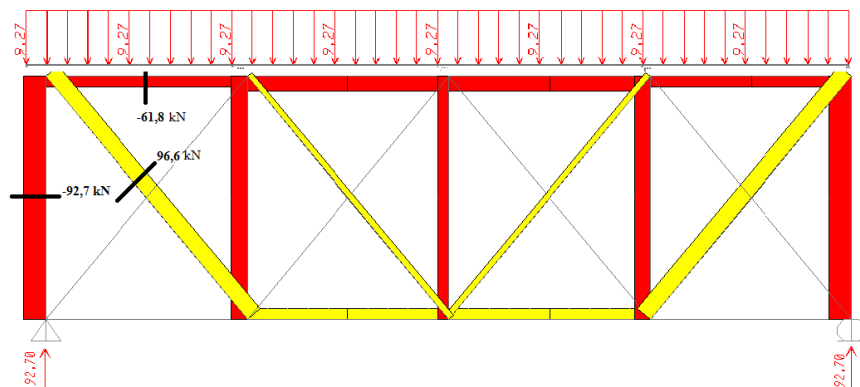
$$q_{tot.2} = q_{w.2} + q_{st.2} = 6.01 + 3.26 = 9.27 \text{ kN/m}$$

Määrävä kuormitusyhdistelmä

$$\frac{q_{tot.1}}{k_{mod.1}} = \frac{7.69}{1.1} = 6.99 < \frac{q_{tot.2}}{k_{mod.2}} = \frac{9.27}{1.1} = 8.43$$

joten yhdistelmä 2 on määrävä murtorajatilassa

a. Sisäiset voimat ja tukireaktiot



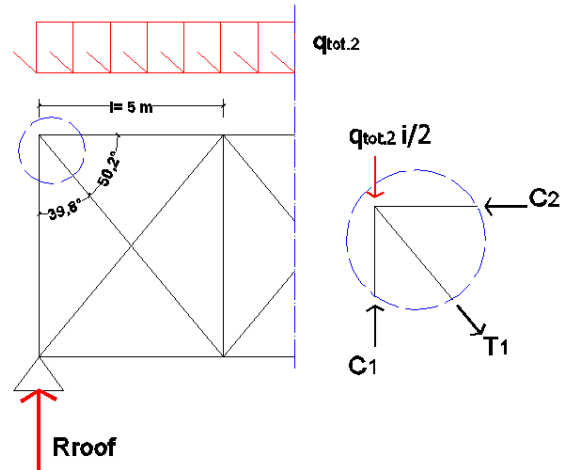
$$R_{roof} = q_{tot,2} \cdot \frac{L_{tot}}{2} = 9.27 \cdot \frac{20}{2} = 92.73 \quad kN$$

$$C_I = R_{roof} = 92.7 \quad kN$$

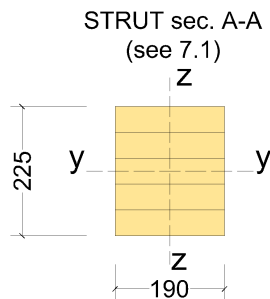
$$q_{tot,2} \cdot \frac{i}{2} = 9.27 \cdot \frac{5}{2} = 23.18 \quad kN$$

$$T_I = \frac{\left(C_I - q_{tot,2} \cdot \frac{i}{2} \right)}{\cos(39.8^\circ)} = \frac{92.73 - 9.27 \cdot \frac{5}{2}}{\cos(39.8^\circ)} = 90.53 \quad kN$$

$$C_2 = T_I \cdot \cos(50.2^\circ) = 90.53 \cdot \cos(50.2^\circ) = 57.95 \quad kN$$



b. Puristussauvan kestävyys



$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{92.7 \cdot 10^3}{190 \cdot 225} = 2.2 \quad MPa$$

Nurjahtaminen z-akselin suhteen (taipuma suunnassa y)

Nurjahduspituus:	$L_{0z} = 6 \text{ m}$
Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_z}{(b \cdot h) \cdot L_{0z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{190^3 \cdot 225}{12}}{190 \cdot 225 \cdot (6 \cdot 10^3)^2} = 8.9 \quad MPa$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{24.5}{8.91}} = 1.66$
Vakio k:	$k_z = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (1.66 - 0.3) + 1.66^2 \right] = 1.94$
Nurjahduskerroin:	$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1.94 + \sqrt{1.94^2 - 1.66^2}} = 0.34$

Nurjahduksen z- akselin suhteen pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cz} \cdot f_{c0d}} = \frac{2.17}{0.34 \cdot 22.46} = 0.29 < 1 \quad \text{OK}$$

c. Vetotankojen kestävyys

Jäykistysristikossa käytetään teräksisiä vetotankoja, $d=24$ mm ($A_{\text{net}}=353$ mm²). Koska vetotankojen päät ovat kierteistettyjä, käytetään pulttien mitoitusääntöjä.

$$T_{Ed} = 95.5 \text{ kN}$$

Vetotangon kestävyys (EN 1993-1-8 taulukko 3.4)

$$T_{Rd} = \frac{A_{\text{net}} f_{\text{uk}} \cdot 0.9}{\gamma_{M2}} = \frac{353 \cdot 500 \cdot 0.9}{1.25} = 127080 \text{ N}$$

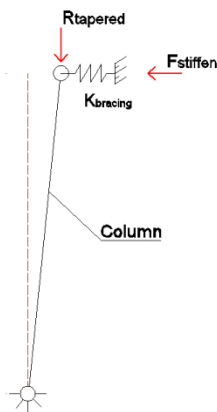
Vetotankojen pitää täyttää ehto (EN 1993-1-1 yhtälö 6.5)

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{95.5}{127.08} = 0.75 < 1 \text{ OK}$$

6.6. Seinän jäykistysrakenne

Seinän jäykistysrakenteelle tulee pistekuorma, joka on katon jäykistysrakenteelta tulevien tukireaktioiden ja pilareihin vaikuttavan sisäisen jäykistyskuorman summa

Pilarin jäykistyskuorma määritetään seuraavan staattisen mallin mukaan (ks. Glulam Handbook Vol. II, luku "Bracing of glulam structures")



$$R_{\text{tapered}} = q_{\text{ver.2}} \cdot \frac{L_{\text{tot}}}{2} = 15.55 \cdot \frac{20}{2} = 155.5 \text{ kN}$$

$$F_{\text{stiffen}} = \frac{n \cdot R_{\text{tapered}}}{100} = \frac{4 \cdot 155.5}{100} = 6.22 \text{ kN}$$

$$K_{\text{min}} = 2 \cdot n \cdot \frac{R_{\text{tapered}}}{h} = 2 \cdot 4 \cdot \frac{155.5}{6.8} = 182.9 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

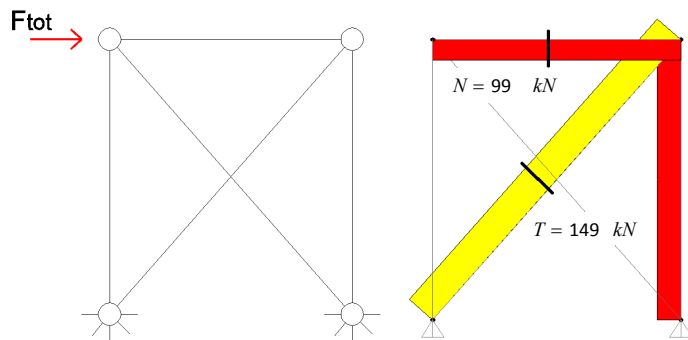
$$K_{\text{bracing}} = \frac{E_{\text{steel}} A_{\text{tierod}} \cdot (\cos(48.5^\circ))^3}{h} = \frac{210000 \cdot \frac{\pi \cdot 27^2}{4} \cdot \cos(48.5^\circ)^3}{6.8 \cdot 10^3} = 5144.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Jäykistysrakenteen vähimmäisjäykkyys

$$K_{\text{bracing}} = 5144.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}} > K_{\text{min}} = 182.9 \frac{\text{N}}{\text{mm}} >>> \text{OK}$$

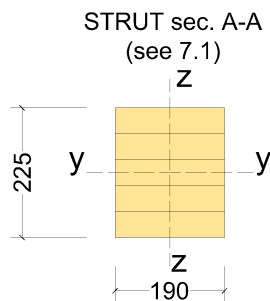
a. Puristussauvan kestävyys

Pystykuorma



$$F_{tot} = R_{roof} + F_{stiffen} = 92.7 + 6.2 = 99 \quad kN$$

Tehdään uusi tarkistus 190x225mm puristussauvalle, niin että myös pilarin jäykistävä voima otetaan huomioon



$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{98.95 \cdot 10^3}{190 \cdot 225} = 2.31 \quad MPa$$

Nurjahdus z-akselin suhteen (EN 1995-1-1 yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c.0.d}}{k_{cz} f_{c0d}} = \frac{2.31}{0.34 \cdot 22.46} = 0.3 < 1 \quad OK$$

b. Vetotankojen kestävyys

Seinän jäykistysristikossa käytetään teräksisiä vetotankoja, $d=27 \text{ mm}$ ($A_{net}=459 \text{ mm}^2$)

$$T_{Ed} = 149.3 \quad kN$$

Vetotangon kestävyys (EN 1993-1-8 taulukko 3.4)

$$T_{Rd} = \frac{A_{net} f_{uk} \cdot 0.9}{\gamma_{M2}} = \frac{459 \cdot 500 \cdot 0.9}{1.25} = 165240 \quad N$$

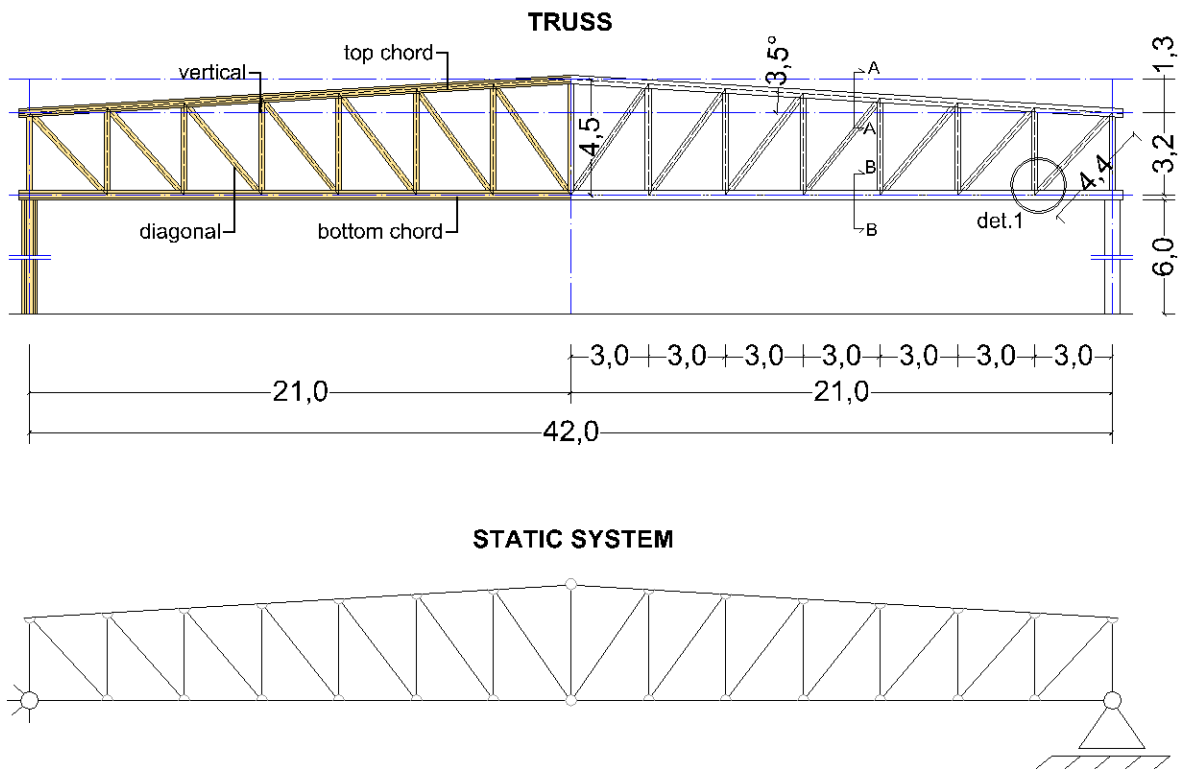
Vetotankojen pitää täyttää ehto (EN 1993-1-1 yhtälö 6.5)

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{149.3}{165.2} = 0.9 < 1 \quad OK$$

Esimerkki 7: Ristikko

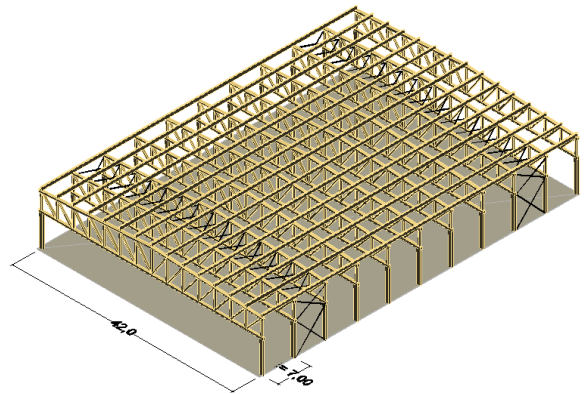
7.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva ristikko ja osoita että se täyttää vaatimukset.



Osien mitat määritetään kohdan 8.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Rakenne liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Muuttuvien kuormien osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



7.2. Kuormat

Mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa, Wind load = tuulikuorma)

Structural		$g_{k1} = 2.4 \text{ kN/m}$
Non - structural	$G_{k2} = 0.6 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.6 \cdot 7 \cdot 1.1 = 4.62 \text{ kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 7 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 9.24 \text{ kN/m}$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

7.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1: (Pysyvä kuorma, $k_{\text{mod}}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (2.4 + 4.62) = 10.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä symmetrinen kuorma, $k_{\text{mod}}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_k \right] = 1.1 \cdot \left[1.15 \cdot (2.4 + 4.62) + 1.5 \cdot 9.24 \right] = 24.13 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

7.4. Alustava suunnittelu

Alustava suunnittelu perustuu Glulam Handbook Vol. 2:n luvun "Trusses" suosituksiin

Truss depth at the apex $h_{\text{apex}} = \frac{L_{\text{tot}}}{10} = \frac{42}{10} = 4.2 \text{ m} \gg \gg h_{\text{apex}} = 4.5 \text{ m}$

Truss depth at the edge $h_{\text{edge}} = h_{\text{apex}} - \frac{L_{\text{tot}}}{2} \cdot \sin(\alpha) = 4.5 - \frac{42}{2} \cdot \sin(3.5^\circ) = 3.22 \text{ m} \gg \gg h_{\text{edge}} = 3.2 \text{ m}$

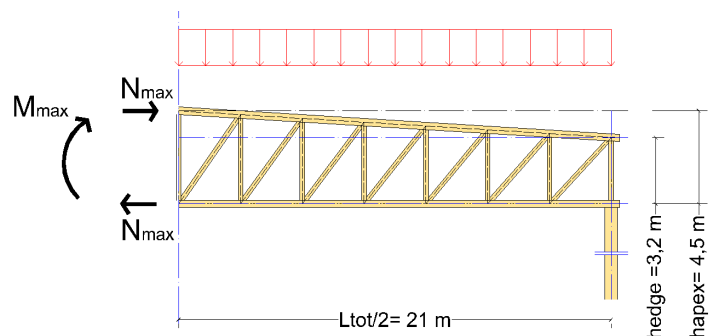
Ristikön rasi-tuimmat osat ovat jännevälän keskialueella

Maximum bending moment

$$M_{\text{max}} = \frac{q_{dII} \cdot L_{\text{tot}}^2}{8} = \frac{24.13 \cdot 42^2}{8} = 5319.85 \text{ kNm}$$

Maximum Compression/Tension force

$$N_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{h_{\text{apex}}} = \frac{5319.8}{4.5} = 1182.2 \text{ kN}$$

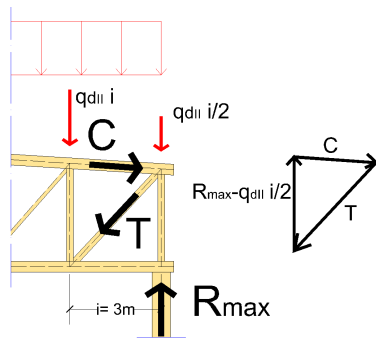


Paarteet

$$A = \frac{N_{\text{max}}}{0.7 \cdot f_{td}} = \frac{1182.2 \cdot 10^3}{0.7 \cdot 13} = 129910.8 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{A} = 360 \text{ mm} \gg \gg h = 360 \text{ mm} \quad b = 355 \text{ mm}$$

Poikkileikkauksen pitää olla riittävän kookas jotta voidaan käyttää useampia uraan asennettuja teräslevyjä. Liitosten poikkileikkausta pienentävä vaikutus otetaan huomioon kertoimella 0,7.



The reaction force is:

$$R_{max} = \frac{q_{dII} \cdot L_{tot}}{2} = 507 \text{ kN}$$

$$R_{max} - \frac{q_{dII} \cdot i}{2} = 470 \text{ kN}$$

The reaction force generates the follow internal force

$$C = 381 \text{ kN}$$

$$T = 558 \text{ kN}$$

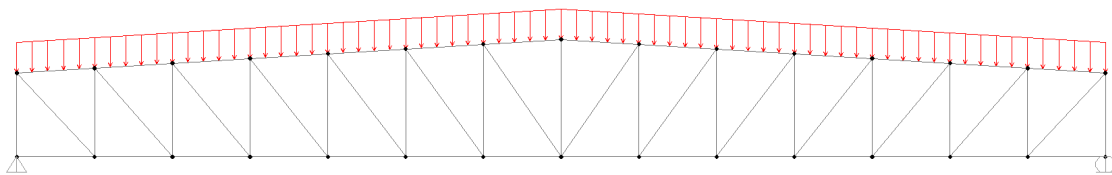
Pystysauvat ja diagonaalit

$$b = 355 \text{ mm}$$

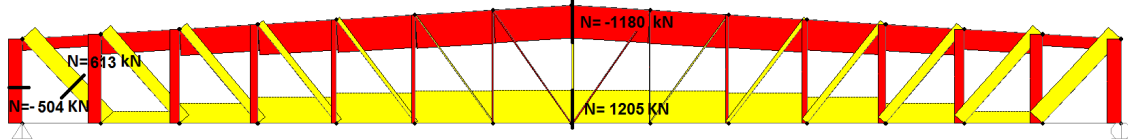
$$h_{min} = \frac{T}{0.7 \cdot f_{t0d} \cdot b} = 0.17 \text{ mm} \gg h = 225 \text{ mm}$$

7.5. Sisäiset voimat ja momentit

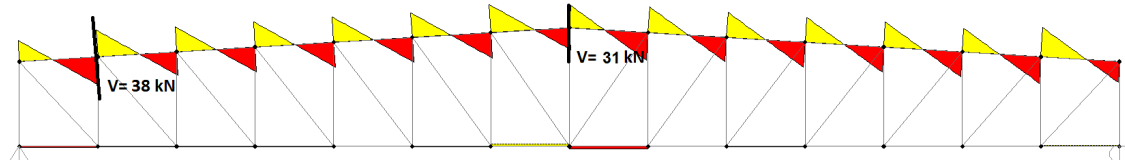
Kuormitusyhdistelmä 2



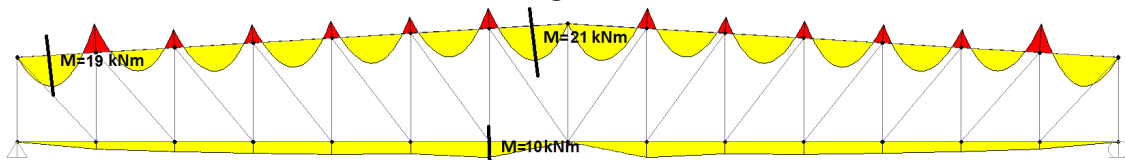
Axial force



Shear



Bending moment



7.6. Yläpaarteen murtorajatilatarkastelut

a. Puristus syiden suunnassa

$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{(b - 4 \cdot d_{plate}) \cdot (h - 3 \cdot d_{dowel})} = \frac{1180 \cdot 10^3}{(355 - 4 \cdot 8) \cdot (360 - 3 \cdot 12)} = 11.3 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys lasketaan nettopoikkileikkaukselle. Tässä on oletettu että liitoksessa on 4 teräslevyä, joiden paksuus on 8 mm, ja 3 x 3 pulttia joiden halkaisija on 12 mm.

Puristuksen syiden suunnassa pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.2)

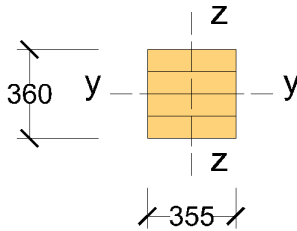
$$\frac{\sigma_{c.0.d}}{f_{c0d}} = \frac{11.28}{16.33} = 0.69 < 1 \quad \mathbf{OK}$$

b. Nurjahdustarkastelu taivutuksen ja puristuksen vaikuttaessa

Ristikön kiepahtamista rajoittaa jäykistysrakenne jonka tukipisteiden etäisyys on 3 m

Koska poikkileikkaus on lähes neliö, niin tarkistus tehdään vain y-akselin suhteen tapahtuvalle nurjahdukselle (myös oman painon aiheuttama taivutusmomentti pienentää nurjahduskestävyyttä y-akselin suhteen)

Top chord, sec. A-A
(see 8.1)



$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{1180 \cdot 10^3}{355 \cdot 360} = 9.23 \text{ kN}$$

$$\sigma_{m.y.d} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot \frac{h^2}{6}} = \frac{21 \cdot 10^6}{355 \cdot \frac{360^2}{6}} = 2.74 \text{ MPa}$$

Nurjahdus y-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä z-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus:	$L_{0y} = 3 \text{ m}$
Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr.y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{(b \cdot h) \cdot L_{0y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{355 \cdot 360^3}{12}}{355 \cdot 360 \cdot (3 \cdot 10^3)^2} = 127.91 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel.y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr.y}}} = \sqrt{\frac{24.5}{127.91}} = 0.44$
Kerroin k:	$k_y = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + \lambda_{rel.y}^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (0.44 - 0.3) + 0.44^2 \right] = 0.6$

Nurjahduskerroin:

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0.6 + \sqrt{0.6^2 - 0.44^2}} = 0.98$$

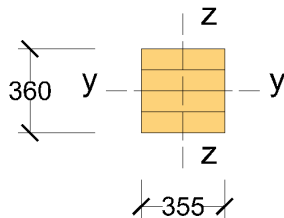
Nurjahdus y-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy} f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{md}} = \frac{9.23}{0.98 \cdot 16.33} + \frac{2.74}{20} = 0.71 < 1 \quad \text{OK}$$

7.7. Alapäärre

Syiden suuntainen vetojännitys lasketaan nettopoikkileikkaukselle. Tässä on oletettu että liitoksessa on 4 teräslevyä, joiden paksuus on 8 mm, ja 3 x 3 pulttia joiden halkaisija on 12 mm.

Bottom chord, sec. B-B
(see 8.1)



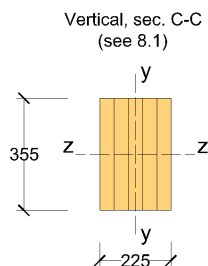
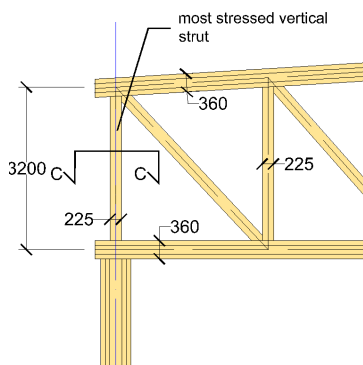
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed}}{(b - 4 \cdot d_{plate}) \cdot \frac{h^2}{6}} = \frac{10 \cdot 10^6}{(355 - 4 \cdot 8) \cdot \frac{360^2}{6}} = 1.43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed}}{(b - 4 \cdot d_{plate}) \cdot h} = \frac{1205 \cdot 10^3}{(355 - 4 \cdot 8) \cdot 360} = 10.4 \text{ MPa}$$

Yhdistetyn taivutuksen ja vedon pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.17)

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{md}} = \frac{10.36}{13} + \frac{1.43}{20} = 0.87 < 1 \quad \text{OK}$$

7.8. Pystysauvat



$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{504 \cdot 10^3}{355 \cdot 225} = 6.3 \text{ MPa}$$

Nurjahdus y-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä z-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus:

$$L_{0y} = 3.2 \text{ m}$$

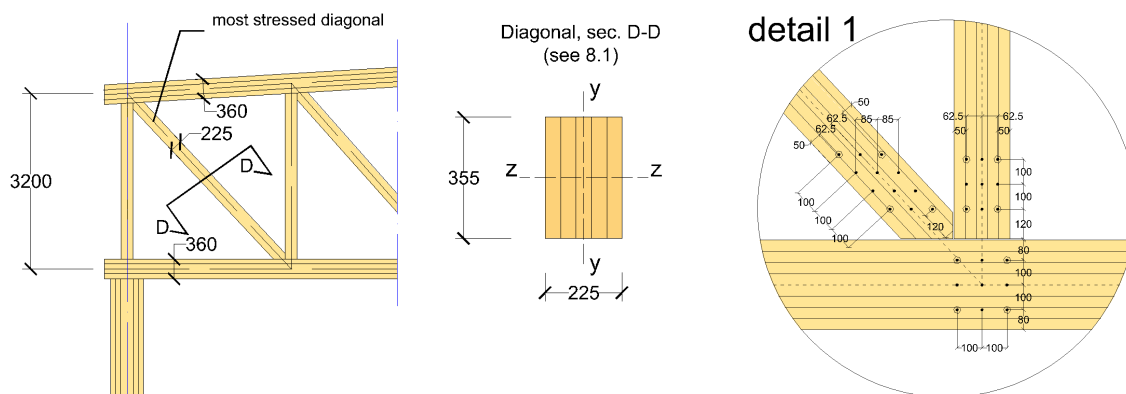
Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{(b \cdot h) \cdot L_{0y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{355 \cdot 225^3}{12}}{355 \cdot 225 \cdot (3.2 \cdot 10^3)^2} = 43.91 \quad MPa$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{24.5}{43.91}} = 0.75$
Kerroin k:	$k_y = \frac{1}{2} \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] = \frac{1}{2} \left[1 + 0.1 \cdot (0.75 - 0.3) + 0.75^2 \right] = 0.8$
Nurjahduskerroin:	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0.8 + \sqrt{0.8^2 - 0.75^2}} = 0.92$

Nurjahdus y-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0d}} = \frac{6.31}{0.92 \cdot 16.33} = 0.42 < 1 \quad OK$$

7.9. Diagonaalit

Rasitetuin diagonaali on lähimpänä tukea



Diagonaalien jännitykset lasketaan nettopoikkileikkaukselle. Tässä on oletettu että liitoksessa on 4 teräslevyä, joiden paksuus on 8 mm, ja 3 x 3 pulttia joiden halkaisija on 12 mm. Liitoksen laskenta esitetään esimerkissä 21

a. Veto syiden suunnassa

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{T_{Ed}}{(b - 4 \cdot d_{plate}) \cdot (h - 3 \cdot d_{dowel})} = \frac{613 \cdot 10^3}{(355 - 4 \cdot 8) \cdot (225 - 3 \cdot 12)} = 10.04 \quad MPa$$

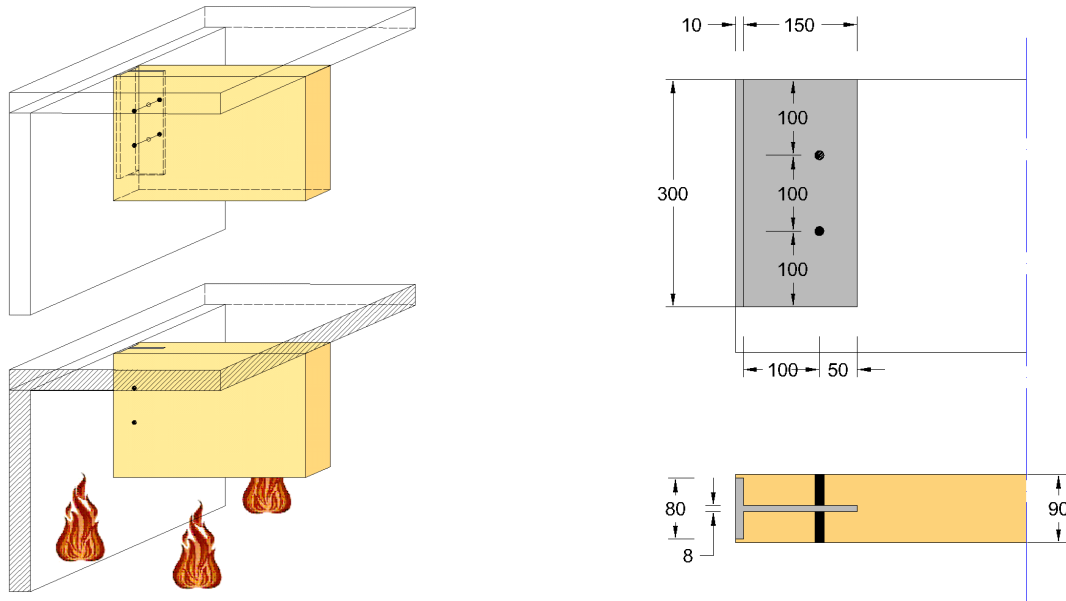
Vedon syiden suunnassa pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.1)

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t0d}} = \frac{10.04}{13} = 0.77 < 1 \quad OK$$

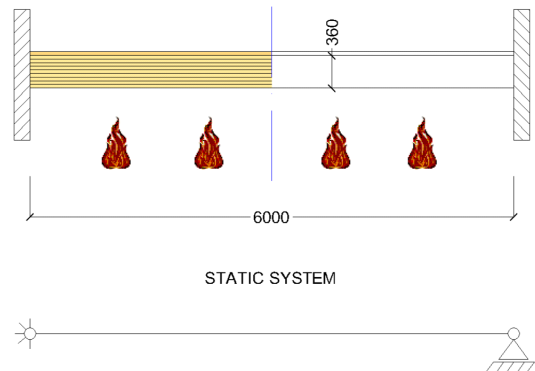
Esimerkki 8: Lattiapalkin ja sen liitoksen mitoittaminen palotilanteessa

8.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Tässä esimerkissä tarkistetaan esimerkin 1 palkin palonkestävyys. Oletetaan että palkki on kiinnitetty betoniseinään liitoksella missä on uraan asennettuja teräslevyjä, kuten kuvassa on esitetty.



Palkki liimapuuta	GL30c
Teräslevyjien teräsluokka	S355
Vaarnojen (d= 12 mm) teräsluokka	S355
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Palkin ja liitoksen vaadittu paloluokka on R60	



Suunnittelussa käytetyt osavarmuuskertoimet ja yhdistelykertoimet ovat

	ULS	Palotilanne
Pysyvän kuorman osavarmuuskertoin	$\gamma_g=1,15$	$\gamma_{g,fi}=1,0$
Hyötykuorman osavarmuuskertoin	$\gamma_s=1,5$	$\gamma_{q,fi}=1,0$
Liimapuun osavarmuuskertoin	$\gamma_M=1,2$	$\gamma_{M,fi}=1,0$
Liitosten osavarmuuskertoin	$\gamma_C=1,2$	$\gamma_{C,fi}=1,0$
Yhdistelykertoimen arvo palotilanteessa	-	$\psi_{fi}=0,3$

8.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Variable load = hyötykuorma)

Structural		$g_{k1} = 0.2 \quad \text{kN/m}$
Non structural	$G_{k2} = 0.5 \quad \text{kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i = 0.50 \cdot 0.90 = 0.45 \quad \text{kN/m}$
Variable load	$Q_k = 2 \quad \text{kN/m}^2$	$q_k = Q_k \cdot i = 2 \cdot 0.9 = 1.8 \quad \text{kN/m}$

8.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990 luku 6.4.3)

Yhdistelmä 1: (ULS, $k_{\text{mod}}=0.8$)	$q_{dI} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot q_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (0.2 + 0.45) + 1.5 \cdot 1.8] = 3.79 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Yhdistelmä 2: (Palo; $k_{\text{mod},fi}=1.0$, $k_{fi}=1.15$,)	$q_{dII} = \gamma_d \cdot [\gamma_{g,fi} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \psi_{fi} \cdot \gamma_{q,fi} \cdot q_k] = 1 \cdot [1 \cdot (0.2 + 0.45) + 0.3 \cdot 1 \cdot 1.8] = 1.19 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

8.4. Lujuuden suunnitteluvarvo

Kuormitusyhdistelmä 1 (ULS, ei palotilannetta)

$$f_{md} = \frac{f_{mk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{30 \cdot 0.8}{1.2} = 20 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{vd} = \frac{f_{vk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{3.5 \cdot 0.8}{1.2} = 2.33 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kuormitusyhdistelmä 2 (palotilanne)

$$f_{md,fi} = k_{fi} \cdot \frac{f_{mk} \cdot k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} = 1.15 \cdot \frac{30 \cdot 1}{1} = 34.5 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{vd,fi} = k_{fi} \cdot \frac{f_{vk} \cdot k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} = 1.15 \cdot \frac{3.5 \cdot 1}{1} = 4.02 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

8.5. Murtorajatilatarkastelut (ei palotilannetta)

a. Leikkaus

$$V_{Ed} = q_{dl} \frac{L_{tot}}{2} = 3.79 \cdot \frac{6}{2} = 11.38 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{3 \cdot V_{Ed}}{2 \cdot (b - t_{bracket}) \cdot h} = \frac{3 \cdot 11.38 \cdot 10^3}{2 \cdot (90 - 8) \cdot 360} = 0.58 \text{ MPa}$$

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{0.58}{2.33 \cdot 0.67} = 0.37 < 1 \text{ OK}$$

b. Taivutusmomentti

$$M_{Ed} = q_{dl} \frac{L_{tot}^2}{8} = 3.79 \cdot \frac{6^2}{8} = 17.07 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{md} = \frac{6 \cdot M_{Ed}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 17.07 \cdot 10^6}{90 \cdot 360^2} = 8.78 \text{ MPa}$$

Lattialaudat estävät kiepahduksen

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.11)

$$k_h = \left(\frac{600}{360} \right)^{0.1} = 1.05 \quad \frac{\sigma_{md}}{f_{md} \cdot k_h} = \frac{8.78}{20 \cdot 1.05} = 0.42 < 1 \text{ OK}$$

c. Liitoksen mitoitus

$$d = 12 \text{ mm}$$

$$t_I = \frac{b}{2} - \frac{8}{2} = \frac{90}{2} - \frac{8}{2} = 41 \text{ mm}$$

$$F_{Ed} = V_{Ed} = 11.4 \text{ kN}$$

Yhden vaarnan leikkauskestävyys (EN1995-1-1 Yhtälö 8.11)

$$f_{h,k} = 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0.08 \cdot (1 - 0.01 \cdot 12) \cdot 390 = 28.14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad M_{y,Rk} = 0.3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2.6} = 0.3 \cdot 510 \cdot 12^{2.6} = 9.8 \times 10^4 \text{ Nmm}$$

$$F_{v,Rk,g} = 2 \cdot (f_{h,k} \cdot t_I \cdot d) \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_I^2}} - 1 \right) = 2 \cdot 28.14 \cdot 41 \cdot 12 \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 9.79 \times 10^4}{28.14 \cdot 12 \cdot 41^2}} - 1 \right) = 1.77 \times 10^4 \text{ N}$$

Mitoitusehto kun käytetään kahta vaarnaa, $d=12$ mm

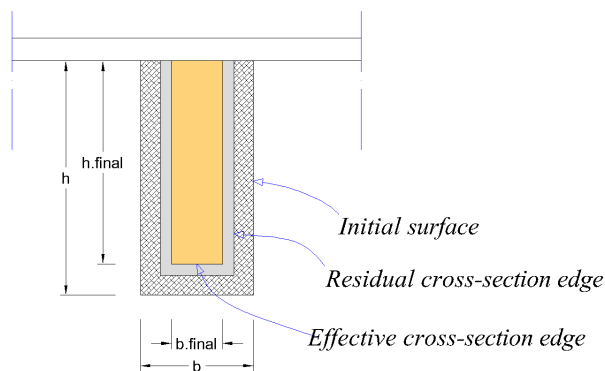
$$F_{v,Rd} = n \cdot k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk,g}}{\gamma_C} = 2 \cdot 0.8 \cdot \frac{17.7}{1.2} = 23.6 \quad kN$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{11.38}{23.63} = 0.48 < 1 \quad \text{OK}$$

Käyttöörajatilataarkastelu on esitetty esimerkissä 1. Yleensä värähtely on mitoittava yksinkertaisten lattiapalkkien tapauksessa.

8.6. Murtorajatilatarkastelu palotilanteessa

a. Tehollinen poikkileikkaus 60 min paloajan jälkeen, kolmelta sivulta palolle altistettu palkki



notional charring rate (EN 1995.1.2 Tab.3.1)

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

effective depth of charring (EN 1995.1.2 Eq.4.1)

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 = 42 + 1 \cdot 7 = 49 \quad mm$$

where

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot R \rightarrow 0.7 \cdot 60 = 42 \quad mm$$

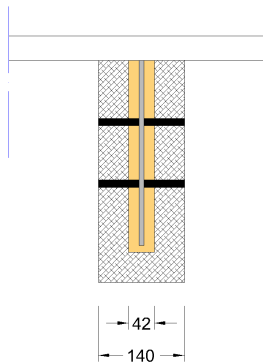
$$k_0 = 1.0 \quad d_0 = 7 \quad mm$$

effective cross-section dimensions

$$h_{final} = h - d_{ef} = 360 - 49 = 311 > 300 \quad mm \quad \text{--> OK}$$

$$b_{final} = b - 2 \cdot d_{ef} = 90 - 2 \cdot 49 = -8 \quad \text{--> NO}$$

Palkin paksuutta pitää kasvattaa



the new beam width is

$$b = 140 \quad mm$$

$$b_{final} = b - 2 \cdot d_{ef} = 140 - 2 \cdot 49 = 42 \quad mm$$

b. Leikkaus

$$V_{Ed} = q_{dII} \cdot \frac{L_{tot}}{2} = 1.19 \cdot \frac{6}{2} = 3.57 \quad kN$$

$$\tau = \frac{3 \cdot V_{Ed}}{2 \cdot (b_{final} - t_{bracket}) \cdot h_{final}} = \frac{3 \cdot 3.57 \cdot 10^3}{2 \cdot (42 - 8) \cdot 311} = 0.51 \quad MPa$$

Leikkausjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau}{f_{vd,fi} \cdot k_{cr}} = \frac{0.51}{4.02 \cdot 0.67} = 0.19 < 1 \text{ OK}$$

c. Taivutusmomentti

$$M_{Ed} = q_{dII} \cdot \frac{L_{tot}^2}{8} = 1.19 \cdot \frac{6^2}{8} = 5.35 \text{ kNm}$$

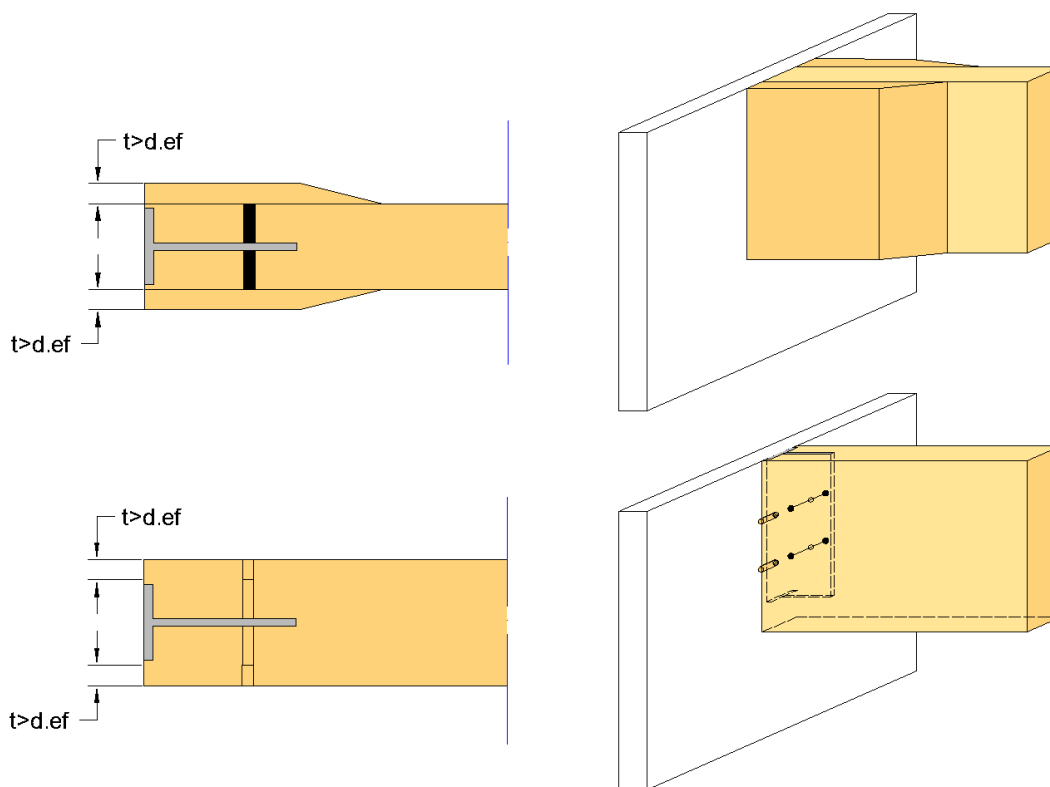
$$\sigma_{md} = \frac{6 \cdot M_{Ed}}{b_{final} \cdot h_{final}^2} = \frac{6 \cdot 5.35 \cdot 10^6}{42 \cdot 311^2} = 7.91 \text{ MPa}$$

Taivutusjännityksien pitää toteuttaa ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.11)

$$\frac{\sigma_{md}}{f_{md,fi}} = \frac{7.91}{34.5} = 0.23 < 1 \text{ OK}$$

d. Liitos

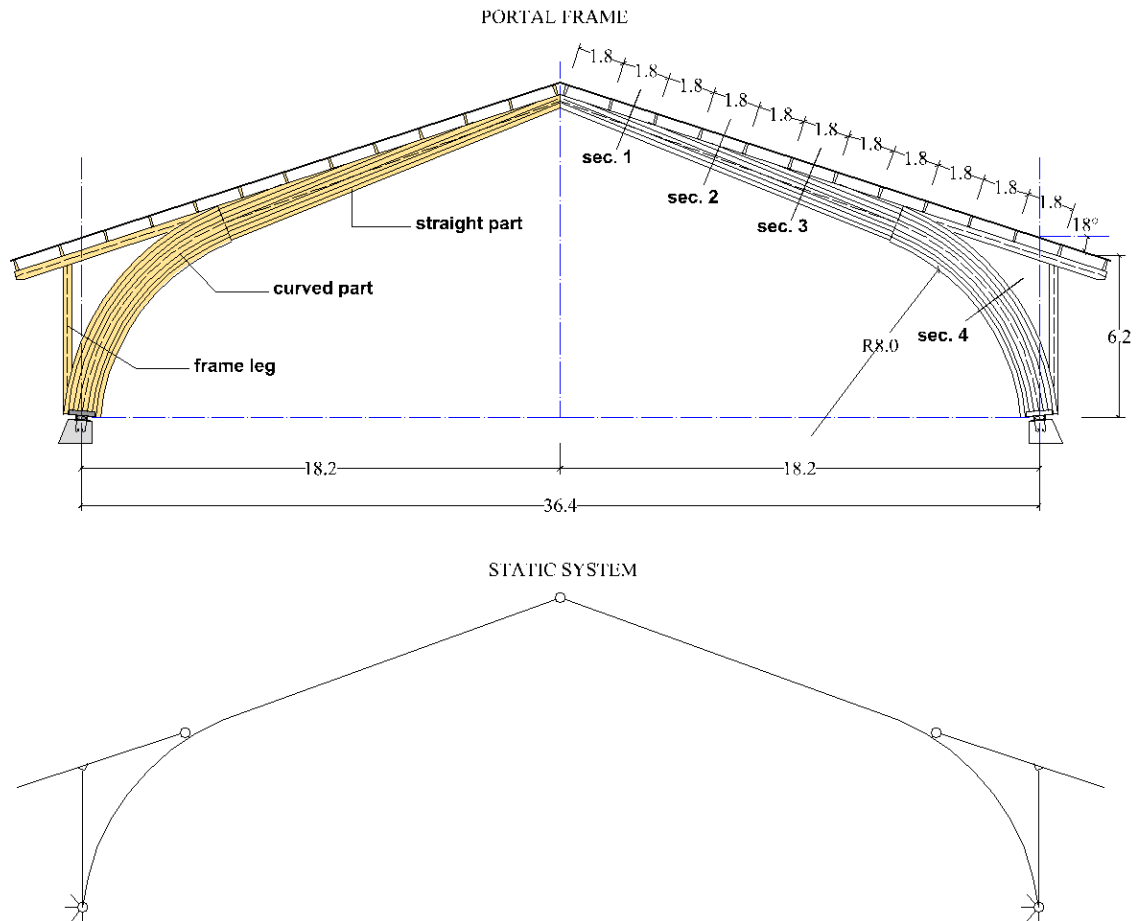
Pultit eivät saa joutua palolle alttiiksi. Ne pitää sen vuoksi suojata puutapeiin tai päälle liimatuin levyin, joiden paksuus on vähintään $d_{ef}=49\text{mm}$



Esimerkki 9: Kaarevanurkkainen kolminivelkehä

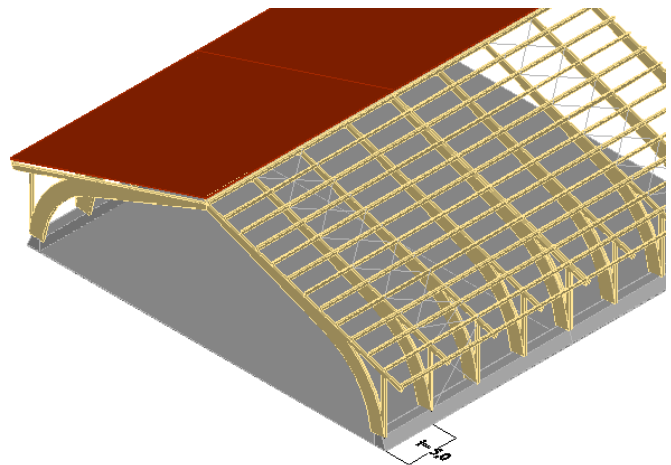
9.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva kehä ja osoita että se täyttää vaatimukset



Osien mitat määritetään kohdan 10.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Rakenne liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Muuttuvien kuormien osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



9.2. Kuormat

Mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa)

Structural		$g_{k1} = 2.3 \quad kN/m$
Non structural	$G_{k2} = 0.6 \quad kN/m^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.6 \cdot 5 \cdot 1.1 = 3.3 \quad kN/m$
Snow load	$S_k = 1.5 \quad kN/m^2$	$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 5 \cdot 0.8 \cdot 1.1 = 6.6 \quad kN/m$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

9.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan seuraavat kolme kuormitusyhdistelmää (EN 1990 luku 6.4.3)

Yhdistelmä 1: (Pysyvä kuorma, $k_{mod}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \cdot \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (2.3 + 3.3) = 8.33 \quad \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä symmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dIIA} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (2.3 + 3.3) + 1.5 \cdot 6.6] = 17.97 \quad \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 3 (Keskipitkä, epäsymmetrinen kuormitus; tässä annettu pienempi kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dIIB} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + 0.5 \gamma_s \cdot s_k] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (2.3 + 3.3) + 0.5 \cdot 1.5 \cdot 6.6] = 12.53 \quad \frac{kN}{m}$

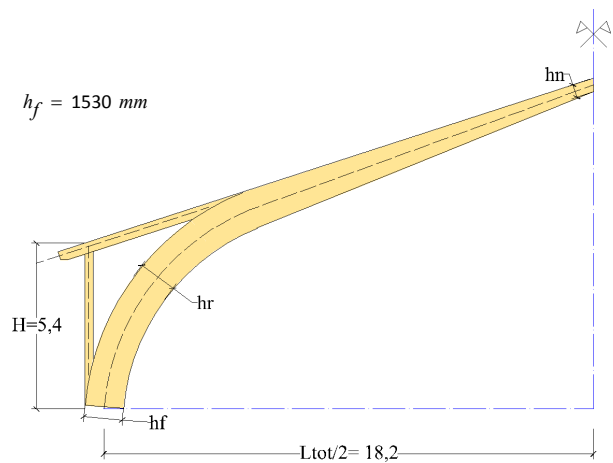
9.4. Alustava suunnittelu

Alustava suunnittelu perustuu Glulam Handbook Vol. 2:n luvun "Portal frames" suositukseen

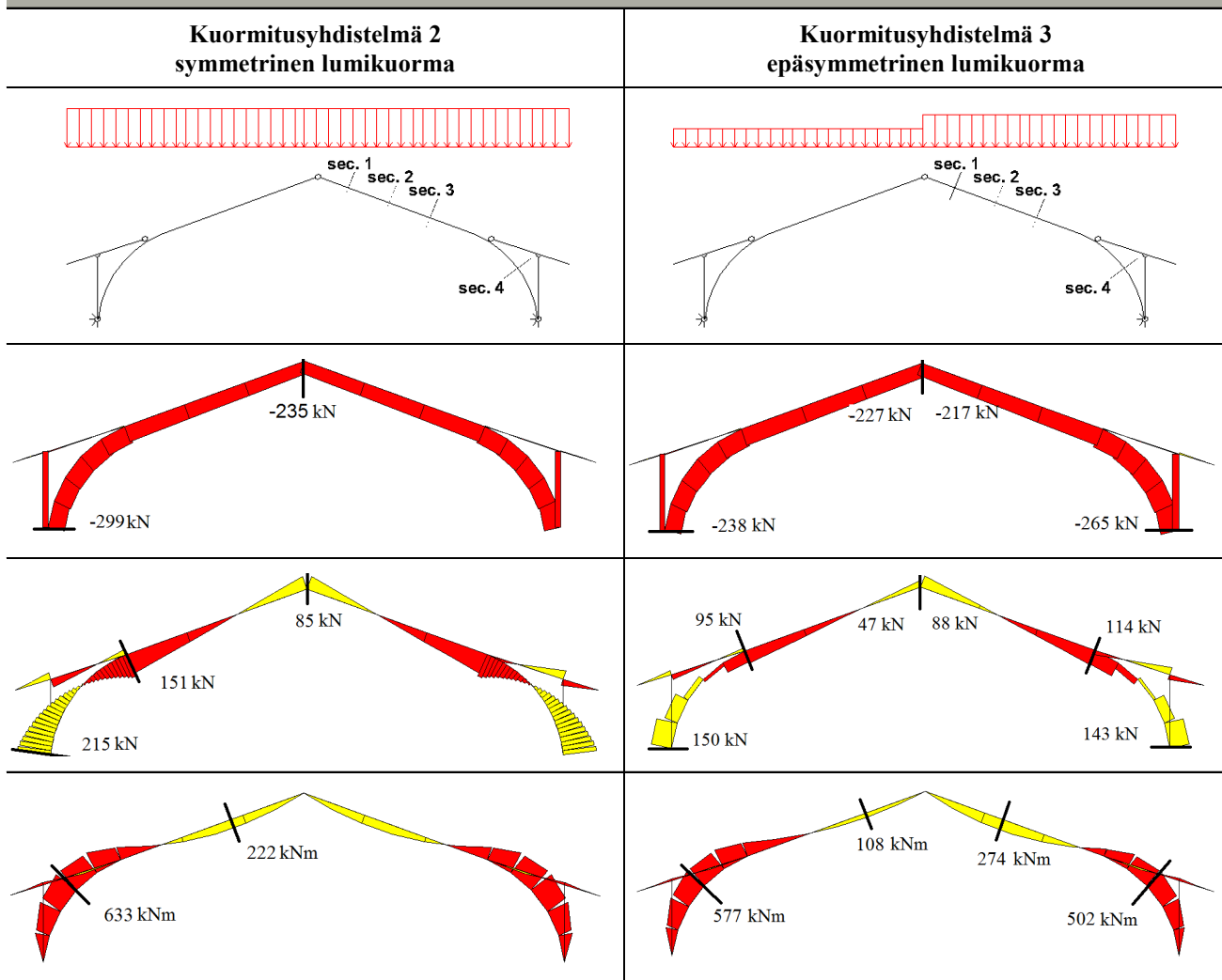
$$h_{r.min} = \frac{H}{15} + \frac{L_{tot}}{30} = \frac{5.4}{15} + \frac{36.4}{30} = 1.57 \quad m \quad >>> \quad h_r = 1530 \quad mm \quad h_f = 1530 \quad mm$$

$$h_{n.min} = 0.3 \cdot h_{r.min} = 0.3 \cdot 1.57 = 0.47 \quad m \quad >>> \quad h_n = 495 \quad mm$$

$$b_{min} = 0.15 \cdot h_{r.min} = 0.15 \cdot 1.57 = 0.24 \quad m \quad >>> \quad b = 215 \quad mm$$



9.5. Sisäiset voimat ja momentit



9.6. Murtorajatilatarkastelut

a. *Puristus tuella syiden suunnassa*

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 2

$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h_f} = \frac{299 \cdot 10^3}{215 \cdot 1530} = 0.91 \text{ MPa}$$

Puristuksen syiden suunnassa pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.2)

$$\frac{\sigma_{c.0.d}}{f_{c0d}} = \frac{0.91}{16.33} = 0.06 < 1 \text{ OK}$$

b. *Puristus harjalla syiden suunnassa*

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 2

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h_n} = \frac{235 \cdot 10^3}{215 \cdot 495} = 2.21 \text{ MPa}$$

Puristuksen syiden suunnassa pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.2)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c0d}} = \frac{2.21}{16.33} = 0.14 < 1 \text{ OK}$$

c. *Leikkaus tuella*

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 2

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_{Ed}}{2b \cdot h_f} = \frac{3 \cdot 215 \cdot 10^3}{2 \cdot 215 \cdot 1530} = 0.98 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitysten pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau_d}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{0.98}{2.33 \cdot 0.67} = 0.63 < 1 \text{ OK}$$

d. *Leikkaus harjalla*

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 3

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_{Ed}}{2b \cdot h_n} = \frac{3 \cdot 88 \cdot 10^3}{2 \cdot 215 \cdot 495} = 1.24 \text{ MPa}$$

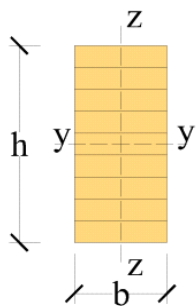
Leikkausjännitysten pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau_d}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{1.24}{2.33 \cdot 0.67} = 0.79 < 1 \text{ OK}$$

e. *Suoran osan nurjahdustarkastelu taivutuksen ja puristuksen vaikuttaessa*

Kehän kiepahdus on estetty; jäykisteiden k/k etäisyys on 1,8 m

Tarkistetaan poikkileikkaukset 1, 2 ja 3 kuormitusyhdistelmälle 3. Vastaavat normaalivoiman ja taivutusmomentin arvot on annettu alla olevassa taulukossa



Leikkaus	Mitat [mm]	Normaalivoiman mitoitussarvo N_d [kN]	Taivutusmomentin mitoitussarvo M_d [kNm]
1	215 x 670	-207	194
2	215 x 925	-233	263
3	215 x 1175	-265	120

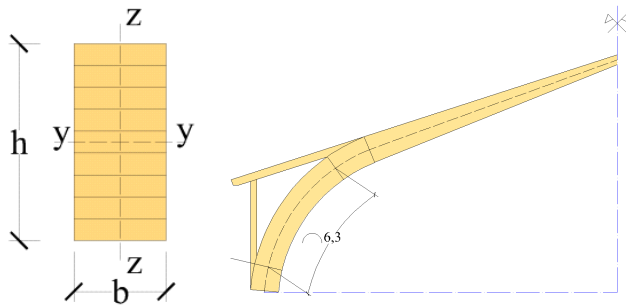
Nurjahdus z-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.24)

Leikkaus	Nurjahduspituus $L_{0,z}$ [mm]	Kriittinen taivutusjännitys $\sigma_{cr,z}$ [MPa]	Suhteellinen hoikkeus λ_{rel}	Nurjahduskerroin $k_{c,z}$	Kuormitusaste $\frac{N_d}{A \cdot k_{c,z} \cdot f_{cd}} + \frac{M_{yd}}{W \cdot f_{myd}}$
1	$L_{0z,1} = 1.8$	$\sigma_{cr,z,1} = 126.73$	$\lambda_{rel,z,1} = 0.44$	$k_{c,z,1} = 0.98$	$R_1 = 0.51$
2	$L_{0z,2} = 1.8$	$\sigma_{cr,z,2} = 126.73$	$\lambda_{rel,z,2} = 0.44$	$k_{c,z,2} = 0.98$	$R_2 = 0.37$
3	$L_{0z,3} = 1.8$	$\sigma_{cr,z,3} = 126.73$	$\lambda_{rel,z,3} = 0.44$	$k_{c,z,3} = 0.98$	$R_3 = 0.15$

Kiepahdus ja nurjahdus z-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.35)

Leikkau s	Nurjahduspituus $L_{0,z}$ [mm]	Kriittinen taivutusjännitys $\sigma_{cr,m}$ [MPa]	Suhteellinen hoikkeus λ_{rel}	Vääntö- nurjahduskerroin $k_{c,z}$	Kuormitusaste $\left(\frac{M_{yd}}{W \cdot k_{crit} \cdot f_{md}}\right)^2 + \frac{N_d}{A \cdot k_{c,z} \cdot f_{cd}}$
1	$L_{0z,1} = 1.8$	$\sigma_{cr,m,1} = 291.33$	$\lambda_{rel,m1} = 0.32$	$k_{crit,1} = 1$	$R_1 = 0.45$
2	$L_{0z,2} = 1.8$	$\sigma_{cr,m,2} = 211.02$	$\lambda_{rel,m2} = 0.38$	$k_{crit,2} = 1$	$R_2 = 0.26$
3	$L_{0z,3} = 1.8$	$\sigma_{cr,m,2} = 211.02$	$\lambda_{rel,m3} = 0.42$	$k_{crit,3} = 1$	$R_3 = 0.08$

f. Kaarevan osan nurjahdustarkastelu taivutuksen ja puristuksen vaikuttaessa, poikkileikkaus 4



$$\sigma_{m,d} = \frac{6 \cdot M_{Ed}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 633 \cdot 10^6}{215 \cdot 1530^2} = 7.55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{368 \cdot 10^3}{215 \cdot 1530} = 1.1 \text{ MPa}$$

Nurjahdus z-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä y-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus:	$L_{0z} = 9.6 \text{ m}$
Nurjahdusjännitys Eulerin mukaan:	$\sigma_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_z}{A \cdot (L_{0z})^2} = \frac{3.14^2 \cdot 10800 \cdot \frac{215^3 \cdot 1530}{12}}{215 \cdot 1530 \cdot (9.6 \cdot 10^3)^2} = 4.45 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{24.5}{4.45}} = 2.35$
Kerroin k:	$k_z = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (2.35 - 0.3) + 2.35^2 \right] = 3.35$
Nurjahduserroin:	$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{3.35 + \sqrt{3.35^2 - 2.35^2}} = 0.17$

Kiepahdus

Tehollinen kiepahduspituus:	$L_{0z} = 9.6 \text{ m}$
Kriittinen taivutusjännitys:	$\sigma_{cr,m} = \frac{\left(\frac{\pi}{L_{0z}} \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{05} \cdot k_v} + \frac{E_{0.05} \cdot I_z + G_{05} \cdot k_v}{2 \cdot R} \right)}{W_y} = 34.89 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{cr,m}}} = \sqrt{\frac{30}{34.89}} = 0.93$
Kiepahduserroin:	for $0.75 < \lambda < 1.4 \quad \gg \gg \quad k_{crit} = 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel,m} = 0.86$

Vetopuolen taivutuslujuus pitää kertoa kertoimella k_r (EN 1995-1-1 yhtälö 6.49)

$$\frac{R}{t_{lam}} = \frac{8 \cdot 10^3}{33.33} = 240.02$$

$$k_r = 1.0$$

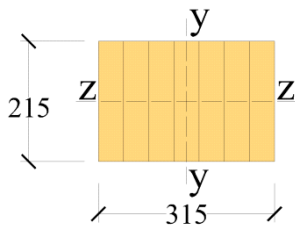
Nurjahdus z-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.24)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cz} f_{c0,d}} + 0.7 \cdot \frac{\sigma_{m,d}}{k_r f_{md}} = \frac{1.12}{0.17 \cdot 16.33} + 0.7 \cdot \frac{7.55}{1.20} = 0.66 < 1 \quad \text{OK}$$

Kiepahdus ja nurjahdus z-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.35)

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_r \cdot k_{crit} f_{md}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cz} f_{c0,d}} = \left(\frac{7.55}{1 \cdot 0.86 \cdot 20} \right)^2 + \frac{1.12}{0.17 \cdot 16.33} = 0.58 < 1 \quad \text{OK}$$

g. Kehän jalka



$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{103 \cdot 10^3}{315 \cdot 215} = 1.52 \quad \text{MPa}$$

Nurjahdus z-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä y-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus:	$L_{0z} = 6.2 \quad m$
Nurjahdusjännitys Eulerin mukaan:	$\sigma_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_z}{(b \cdot h) \cdot L_{0z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{315 \cdot 215^3}{12}}{315 \cdot 215 \cdot (6.2 \cdot 10^3)^2} = 10.67 \quad \text{MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{\sigma_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{24.5}{10.67}} = 1.52$
Kerroin k:	$k_z = \frac{1}{2} \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] = \frac{1}{2} \left[1 + 0.1 \cdot (1.52 - 0.3) + 1.52^2 \right] = 1.71$
Nurjahduskerroin:	$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1.71 + \sqrt{1.71^2 - 1.52^2}} = 0.4$

Nurjahdus z-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.24)

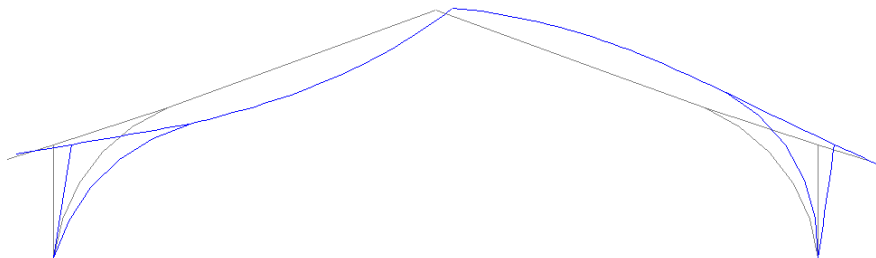
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cz} \cdot f_{c0d}} = \frac{1.52}{0.4 \cdot 16.33} = 0.23 < 1 \quad \text{OK}$$

h. Nurjahdustarkastelu taivutuksen ja puristuksen vaikuttaessa

Rasitetuin poikkileikkaus on poikkileikkaus 4

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{368 \cdot 10^3}{215 \cdot 1530} = 1.12 \text{ MPa} \quad \sigma_{m,d} = \frac{6M_{Ed}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 633 \cdot 10^6}{215 \cdot 1530^2} = 7.55 \text{ MPa}$$

Vastaava nurjahduskuvio on esitetty alla



Nurjahdus y-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä z-akselin suunnassa)

Kriittinen normaalivoima on määritetty elementtimenetelmällä

Kriittinen normaalivoima:	$N_{cr} = 4304.4 \text{ kN}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\frac{N_{cr}}{A}}} = \sqrt{\frac{24.5}{\frac{4304.4 \cdot 10^3}{328950}}} = 1.37$
Kerroin k:	$k_y = 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (1.37 - 0.3) + 1.37^2 \right] = 1.49$
Nurjahduserroin:	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1.49 + \sqrt{1.49^2 - 1.37^2}} = 0.48$

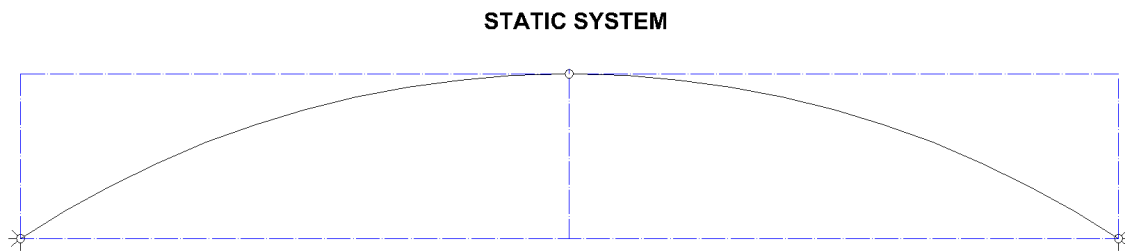
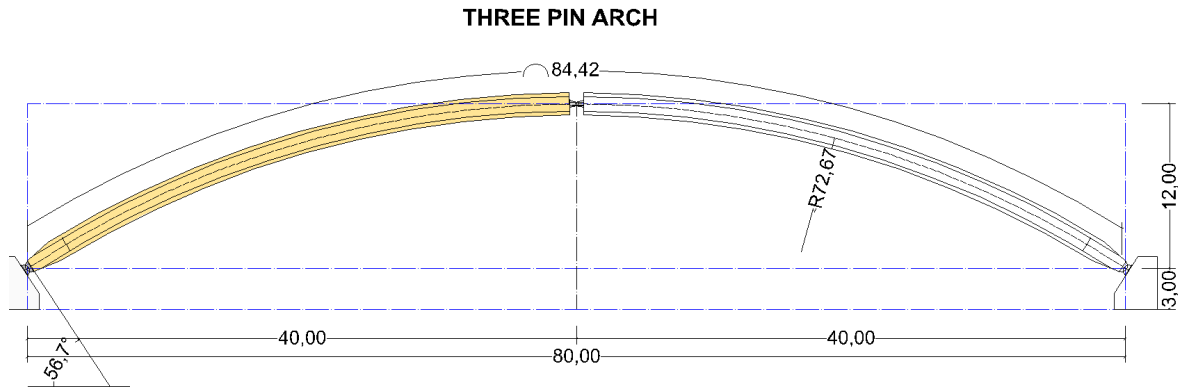
Nurjahdus y-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{md}} = \frac{1.12}{0.48 \cdot 16.33} + \frac{7.55}{20} = 0.52 < 1 \quad \text{OK}$$

Esimerkki 10: Kolminivelkaari

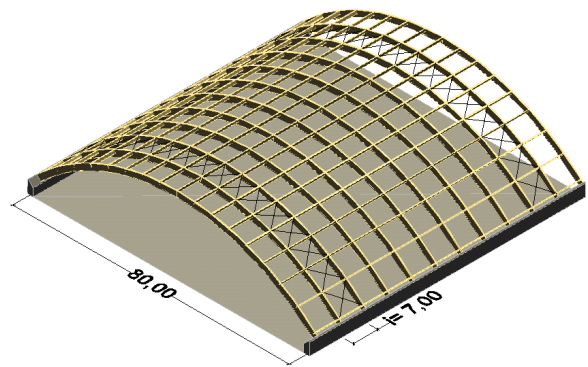
10.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele alla oleva kaari ja osoita että se täyttää vaatimukset



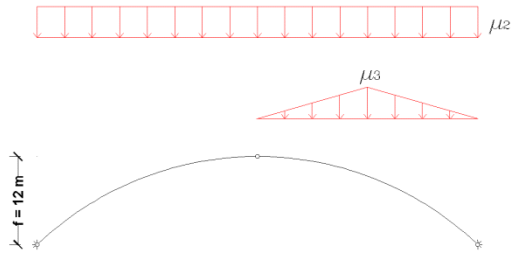
Osien mitat määritetään kohdan 13.4 mukaisella alustavalla suunnittelulla

Rakenne liimapuuta	GL30c
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Muuttuvien kuormien osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$



10.2. Kuormat

EN 1991-1-3 (FI) luvun 6.3.8 mukaiset lumikuorman muotokertoimet ovat



$$\mu_2 = 0.8$$

$$\mu_3 = 0.2 + 10 \cdot \frac{f}{L_{tot}} = 0.2 + 10 \cdot \frac{12}{80} = 1.7$$

Mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa)

Structural		$g_{k1} = 3 \text{ kN/m}$
Non structural	$G_{k2} = 0.75 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.75 \cdot 7 \cdot 1.1 = 5.78 \text{ kN/m}$
Snow load symmetric	$S_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$	$s_{k,2} = S_k \cdot \mu_2 \cdot i \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 0.8 \cdot 7 \cdot 1.1 = 9.24 \text{ kN/m}$
Snow load unsymmetric		$s_{k,3} = S_k \cdot \mu_3 \cdot i \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 1.7 \cdot 7 \cdot 1.1 = 19.63 \text{ kN/m}$

Omaa painoa laskettaessa otetaan huomioon, että rakenteen paino kohdistuu sen pituuden vaakasuoralle projektiolle. Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

10.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan seuraavat kolme kuormitusyhdistelmää (EN 1990 luku 6.4.3)

Yhdistelmä 1: (Pysyvä kuorma, $k_{mod}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (3 + 5.78) = 13.06 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä symmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_{k,2} \right] = 1.1 \cdot \left[1.15 \cdot (3 + 5.78) + 1.5 \cdot 9.24 \right] = 26.35 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 3 (Keskipitkä epäsymmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dIIIA} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_{k,3} \right] = 1.1 \cdot \left[1.15 \cdot (3 + 5.78) + 1.5 \cdot 19.63 \right] = 43.5 \frac{kN}{m}$ $q_{dIIIB} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot 0 \cdot s_{k,3} \right] = 1.1 \cdot \left[1.15 \cdot (3 + 5.78) + 1.5 \cdot 0 \cdot 19.63 \right] = 11.1 \frac{kN}{m}$

10.4. Alustava suunnittelu

Alustava suunnittelu perustuu Glulam Handbook Vol. 2:n luvun "Arches" suosituksiin

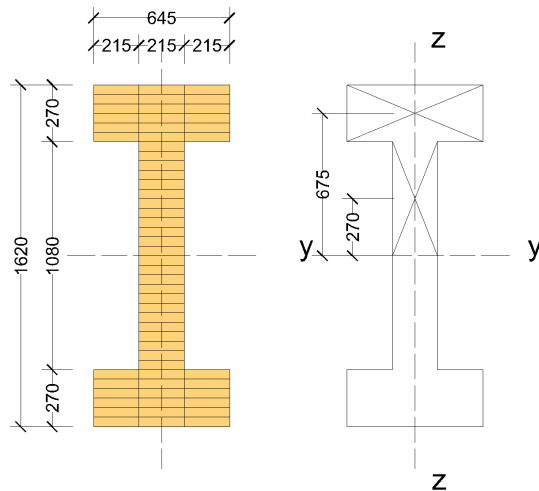
$$f = 0.15 L_{tot} = 0.15 \cdot 80 = 12 \text{ m}$$

$$h_{min} = \frac{L_{tot}}{50} = \frac{80 \cdot 10^3}{50} = 1600 \text{ mm} \gg h = 1620 \text{ mm}$$

Yläpaarteen leveys valitaan riittävän suureksi erityisesti pystytysvaiheen nurjahdusriskin vuoksi

$$b_{min} = \frac{h_{min}}{3} = \frac{1600}{3} = 533 \text{ mm} \gg b = 645 \text{ mm}$$

Valitaan I-poikkileikkaus, joka on optimaalinen liimapuun menekin ja mekaanisten ominaisuuksien kannalta



Area:

$$A = 215 \cdot 1620 + 4 \cdot 215 \cdot 270 = 580500 \text{ mm}^2$$

First moment of area about y-axis:

$$S_y = (645 - 270) \cdot 675 + \left(215 \cdot \frac{1080}{2} \right) \cdot 270 = 1.49 \times 10^8 \text{ mm}^3$$

Second moment of area about y-axis:

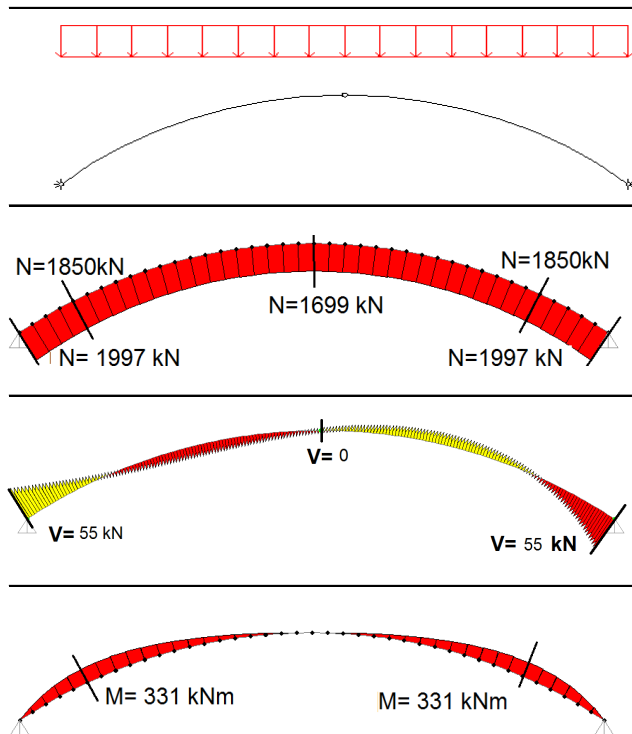
$$I_y = \frac{645 \cdot (1620)^3}{12} - 2 \cdot \frac{215 \cdot 1080^3}{12} = 1.83 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

Second moment of area about z-axis:

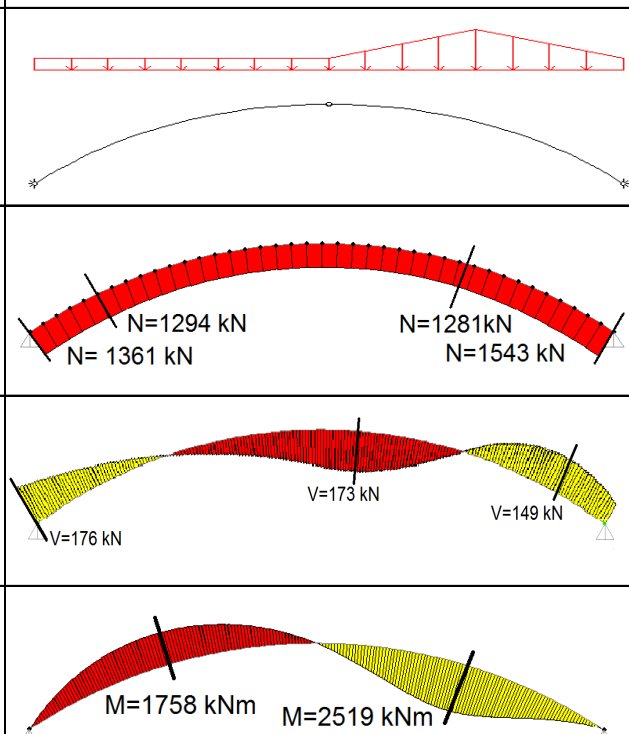
$$I_z = \frac{1620 \cdot 645^3}{12} - 2 \cdot \left(\frac{1080 \cdot 215^3}{12} + 1080 \cdot 215 \cdot 215^2 \right) = 1.3 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

10.5. Sisäiset voimat ja momentit

Kuormitusyhdistelmä 2
symmetrinen lumikuorma



Kuormitusyhdistelmä 3
epäsymmetrinen lumikuorma



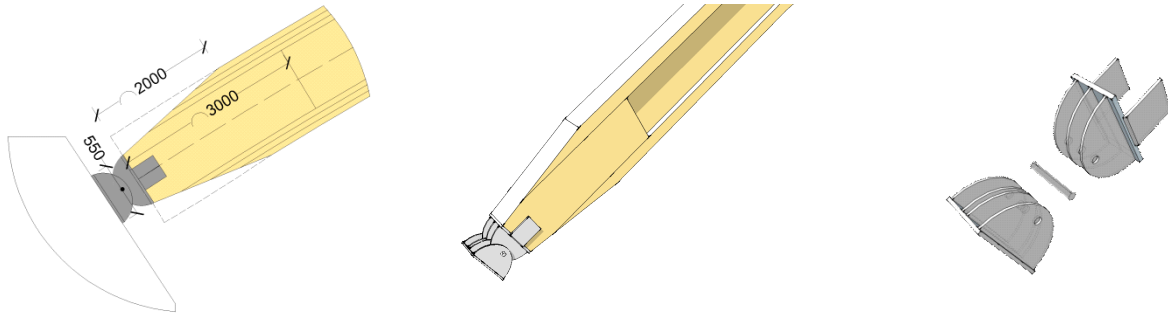
10.6. Kaaren murtorajatilatarkastelut

a. *Puristus syiden suunnassa*

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 2 ja rasitetuin poikkileikkaus on tuella.

Huomaa että kaaren poikkileikkaus tuella on suorakaide eikä I-poikkileikkaus. Teräksen menekin pienentämiseksi kaari on viistetty korkeussuunnassa

Esimerkinomainen liitosratkaisu on näytetty alla



Puristuksen syiden suunnassa pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.2)

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{1997 \cdot 10^3}{645 \cdot 550} = 5.6 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c0d}} = \frac{5.63}{16.33} = 0.34 < 1 >>> \text{OK}$$

b. *Leikkaus*

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 3

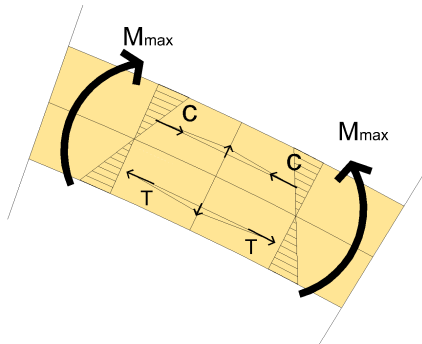
$$\tau_d = \frac{V_{Ed} \cdot S_y}{b_I \cdot I_y} = \frac{173 \cdot 10^3 \cdot 1.49 \cdot 10^8}{215 \cdot 1.83 \cdot 10^{11}} = 0.65 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitysten pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 yhtälö 6.13)

$$\frac{\tau_d}{f_{vd} \cdot k_{cr}} = \frac{0.65}{2.33 \cdot 0.67} = 0.42 < 1 >>> \text{OK}$$

c. Veto kohtisuoraan syitä vastaan

Palkin kaarevuus aiheuttaa syitä vastaan kohtisuoria jännityksiä, jotka ovat suurimmillaan taivutusmomentin maksimiarvon kohdalla



$$\sigma_{t.90.d} = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{h}{4 \cdot r_{curve}} \right) = \frac{2519 \cdot 10^6}{1.83 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{1620}{2} \cdot \frac{1620}{4 \cdot 72.67 \cdot 10^3} = 0.06 \text{ MPa}$$

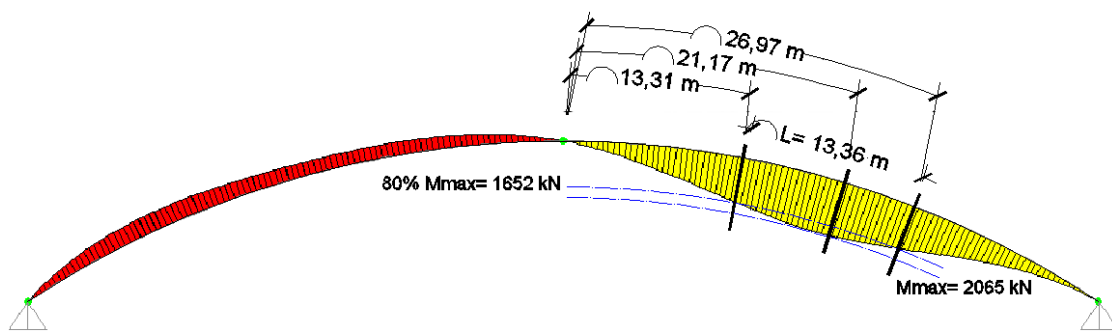
reference volume

$$V_0 = 0.01 \text{ m}^3$$

stressed volume

$$V_{arch} = L_{curve} \cdot A = 13.36 \cdot 0.58 = 7.76 \text{ m}^3$$

Australian standardin AS 1720.1—1997 mukaan vain 80 % maksimimomentin alueen tilavuudesta otetaan huomioon määritettäessä tilavuuskerrointa k_{vol} . (Glulam Handbook Vol. 2 luku Arches)



Vetojännitysten syitä vastaan kohtisuoraan pitää täyttää ehto (EN 1995-1-1 luku 6.4.3)

$$\frac{\sigma_{t.90.d}}{k_{dis} \cdot \left(\frac{V_0}{V_{arch}} \right)^{0.2} \cdot f_{t90d}} = \frac{0.06}{1.4 \cdot \left(\frac{0.01}{7.76} \right)^{0.2} \cdot 0.33} = 0.5 < 1 >>> \text{OK}$$

d. Kiepahdustarkastelu taivutuksen ja puristuksen vaikuttaessa

Palkin kiepahtamista rajoittaa jäykistysrakenne jonka tukipisteiden etäisyys on 6 m

Suurin jännitys aiheutuu kuormitusyhdistelmästä 3

$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{1281 \cdot 10^3}{580500} = 2.21 \text{ MPa} \quad \sigma_{m.y.d} = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{2519 \cdot 10^6}{1.83 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{1620}{2} = 11.13 \text{ MPa}$$

Nurjahdus z-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä y-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus:

$$L_{0z} = 6 \text{ m}$$

Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_z}{A \cdot L_{0z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot 1.3 \cdot 10^{10}}{580500 \cdot (6 \cdot 10^3)^2} = 66.15 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{24.5}{66.15}} = 0.61$
Kerroin k:	$k_z = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (0.61 - 0.3) + 0.61^2 \right] = 0.7$
Nurjahduskerroin:	$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0.7 + \sqrt{0.7^2 - 0.61^2}} = 0.95$

Kiepahdus

Kiepahduspituus:	$L_{0z} = 6 \text{ m}$
Kriittinen taivutusjännitys:	$\sigma_{cr,m} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{05} \cdot J_{tor}}}{L_{0z} \cdot I_y \cdot \frac{2}{h}} = \frac{\pi \cdot \sqrt{10800 \cdot 1.3 \cdot 10^{10} \cdot 540 \cdot 1.2 \cdot 10^{10}}}{6 \cdot 10^3 \cdot 1.83 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2}{1620}} = 69.8 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{cr,m}}} = 0.66$
Kiepahduskerroin:	$k_{crit} = 1$

Taivutusjännitystä kasvatetaan kertoimella k_l , joka ottaa huomioon lamellien kaarevuuden vaikutuksen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.43)

$$k_l = 1 + 0.35 \cdot \left(\frac{h}{r_{curve}} \right) + 0.6 \cdot \left(\frac{h}{r_{curve}} \right)^2 = 1 + 0.35 \cdot \frac{1620}{72.67 \cdot 10^3} + 0.6 \cdot \left(\frac{1620}{72.67 \cdot 10^3} \right)^2 = 1.01$$

Kiepahdus ja nurjahdus z-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.35)

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d} \cdot k_l}{k_{crit} \cdot f_{md}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cz} \cdot f_{c0d}} = \left(\frac{11.13 \cdot 1.01}{20} \right)^2 + \frac{2.21}{0.95 \cdot 16.33} = 0.46 < 1 >>> \text{OK}$$

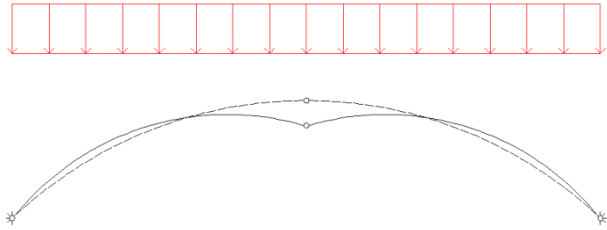
Nurjahdus z-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.24)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cz} \cdot f_{c0d}} + \frac{\sigma_{m,y,d} \cdot k_l}{f_{md}} = \frac{2.21}{0.95 \cdot 16.33} + \frac{11.13 \cdot 1.01}{20} = 0.7 < 1 >>> \text{OK}$$

e. Rakenteen nurjahdus tasossaan

Kummallekin keskipitkälle kuormitusyhdistelmälle tehdään kaksi tarkistusta

Kuormitusyhdistelmä 2, symmetrinen lumikuorma



$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{1850 \cdot 10^3}{580500} = 3.19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m.y.d} = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{331 \cdot 10^6}{1.83 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{1620}{2} = 1.46 \text{ MPa}$$

Käsinlaskennalla

Nurjahdus y-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä z-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus: (Yht. 11-23, Glulam Handbook Vol II)	$L_{0y} = 1.25 \cdot \frac{L_{curve}}{2} = 1.25 \cdot \frac{84.42}{2} = 52.76 \text{ m}$
Eulerin kriittinen jänyty:	$\sigma_{cr.y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{A \cdot L_{0y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot 1.83 \cdot 10^{11}}{580500 \cdot (52.76 \cdot 10^3)^2} = 12.1 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel.y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr.y}}} = \sqrt{\frac{24.5}{12.1}} = 1.42$
Kerroin k:	$k_y = 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + \lambda_{rel.y}^2 \right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (1.42 - 0.3) + 1.42^2 \right] = 1.57$
Nurjahduskerroin:	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel.y}^2}} = \frac{1}{1.57 + \sqrt{1.57^2 - 1.42^2}} = 0.45$

Nurjahdus y-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c.0.d}}{k_{cy} \cdot f_{c0d}} + \frac{\sigma_{m.y.d} \cdot k_l}{f_{md}} = \frac{3.19}{0.45 \cdot 16.33} + \frac{1.46 \cdot 1.01}{20} = 0.51 < 1 >>> \text{OK}$$

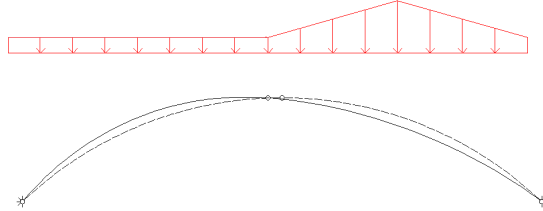
Tarkistus elementtimenetelmällä

Käsinlaskentatulos tarkistetaan elementtimenetelmän avulla

Kriittinen normaalivoima:	$N_{cr} = 8743 \text{ kN}$
Likimääräinen nurjahduspituus:	$L_{cr.y} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot 1.83 \cdot 10^{11}}{8743 \cdot 10^3}} = 47283.26 \text{ mm}$

Elementtimenetelmällä saatu nurjahduspituus on pienempi kuin käsinlaskennalla saatu. Siksi nurjahdustarkastelu tehdään vain varmemmalla puolella olevalla käsinlaskennalla

Kuormitusyhdistelmä 3, epäsymmetrinen lumikuorma



$$\sigma_{c.0.d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{1281 \cdot 10^3}{580500} = 2.21 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m.y.d} = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{2519 \cdot 10^6}{1.83 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{1620}{2} = 11.13 \text{ MPa}$$

Käsinlaskennalla

Nurjahdus y-akselin suhteen (sivusuuntainen siirtymä z-akselin suunnassa)

Nurjahduspituus: (Yht. 11-23, Glulam Handbook Vol II)	$L_{0y} = 1.25 \cdot \frac{L_{curve}}{2} = 1.25 \cdot \frac{84.42}{2} = 52.76 \text{ m}$
Eulerin kriittinen jännitys:	$\sigma_{cr.y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{A \cdot L_{0y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot 1.83 \cdot 10^{11}}{580500 \cdot (52.76 \cdot 10^3)^2} = 12.1 \text{ MPa}$
Suhteellinen hoikkuus:	$\lambda_{rel.y} = \sqrt{\frac{f_{c0k}}{\sigma_{cr.y}}} = \sqrt{\frac{24.5}{12.1}} = 1.42$
Kerroin k:	$k_y = 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + \lambda_{rel.y}^2 \right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (1.42 - 0.3) + 1.42^2 \right] = 1.57$
Nurjahduserroin:	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel.y}^2}} = \frac{1}{1.57 + \sqrt{1.57^2 - 1.42^2}} = 0.45$

Nurjahdus y-akselin suhteen ja taivutus y-akselin suhteen (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.23)

$$\frac{\sigma_{c.0.d}}{k_{cy} \cdot f_{c0d}} + \frac{\sigma_{m.y.d} \cdot k_l}{f_{md}} = \frac{2.21}{0.45 \cdot 16.33} + \frac{11.13 \cdot 1.01}{20} = 0.86 < 1 \text{ OK}$$

Tarkistus elementtimenetelmällä

Käsinlaskentatulos tarkistetaan elementtimenetelmän avulla

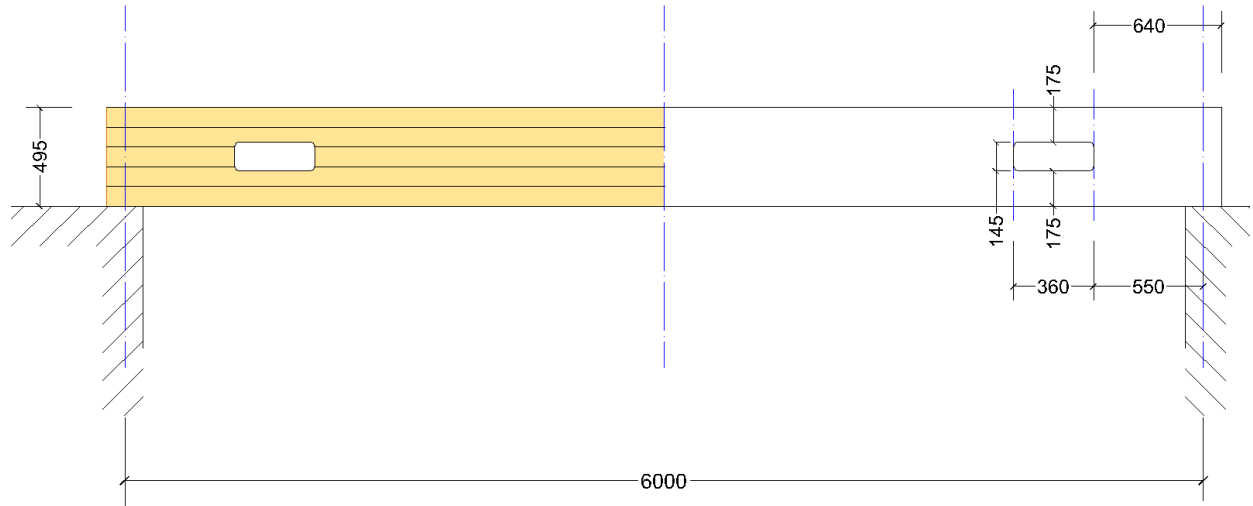
Kriittinen normaalivoima:	$N_{cr} = 8340$
Likimääräinen nurjahduspituus:	$L_{cr.y} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{0.05} \cdot I_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 10800 \cdot 1.83 \cdot 10^{11}}{8340 \cdot 10^3}} = 48412.18 \text{ mm}$

Elementtimenetelmällä saatu nurjahduspituus on pienempi kuin käsinlaskennalla saatu. Siksi nurjahdustarkastelu tehdään vain varmemmalla puolella olevalla käsinlaskennalla

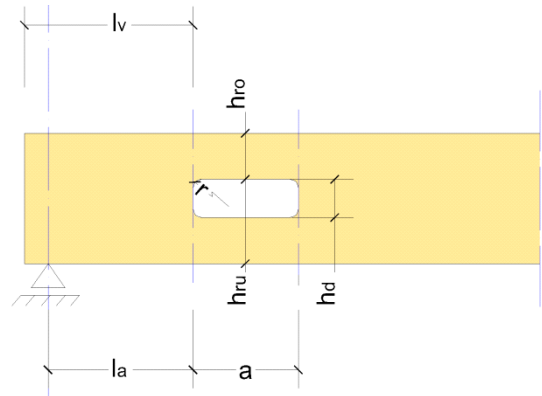
Esimerkki 11: Reiällinen palkki

11.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele kuvan palkin reiän vahvistus. Palkkien keskinäinen etäisyys on 2m.



Palkki liimapuuta	GL30c
Teräksisten vahvistustankojen luokka	4.8
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$
Teräksen osavarmuuskerroin	$\gamma_{MS} = \gamma_{M2} = 1,25$



11.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Variable load = hyötykuorma)

Structural		$g_{k1} = 0,3 \quad kN/m$
Non structural	$G_{k2} = 1,0 \quad kN/m^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i = 1,0 \cdot 2,0 = 2,0 \quad kN/m$
Variable load	$Q_k = 2,5 \quad kN/m^2$	$q_k = Q_k \cdot i = 2,5 \cdot 2 = 5 \quad kN/m$

11.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1 (Pysyvä kuorma, $k_{mod}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{k1} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (0.3 + 2) = 3.42 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä, symmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + \gamma_q \cdot q_k \right] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (0.3 + 2) + 1.5 \cdot 5] = 11.16 \frac{kN}{m}$

Murtorajatilaa määräävät kuormitusyhdistelmät

$$\frac{q_{dI}}{k_{mod.1}} = \frac{3.4}{0.6} = 5.7 < \frac{q_{dII}}{k_{mod.2}} = \frac{11.2}{0.8} = 13.9$$

joten yhdistelmä 2 on määrävä.

11.4. Geometriaan liittyvät säännöt

Katso Glulam Handbook Vol. II, luku "Holes and notches"

$$\begin{aligned}
 l_v = 640 \text{ mm} &> h = 495 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 l_a = 550 \text{ mm} &> \frac{h}{2} = 247.5 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 h_{ro} = 175 \text{ mm} &> 0.25 \cdot h = 123.8 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 h_{ru} = 175 \text{ mm} &> 0.25 \cdot h = 123.8 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 h_d = 145 \text{ mm} &< 0.4 \cdot h = 198 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 r = 30 \text{ mm} &> r_{min} = 25 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 a = 360 \text{ mm} &< h = 495 \text{ mm} &>>> \text{OK} \\
 &< 2.5 \cdot h_d = 362.5 \text{ mm} &>>> \text{OK}
 \end{aligned}$$

11.5. Sisäiset voimat tukea lähempänä olevassa reiän reunassa

Leikkaus

$$V_{hole} = q_{dII} \left(\frac{L_{tot}}{2} - l_a \right) = 11.2 \cdot \left(\frac{6}{2} - 0.6 \right) = 27.3 \text{ kN}$$

Taivutusmomentti

$$M_{hole} = q_{dII} \cdot \frac{L_{tot}}{2} \cdot l_a - q_{dII} \cdot \frac{l_a^2}{2} = 11.2 \cdot \frac{6}{2} \cdot 0.6 - 11.2 \cdot \frac{0.6^2}{2} = 16.7 \text{ kNm}$$

11.6. Murtorajatilatarkastelut

a. Vetojännitys kohtisuoraan syitä vastaan reiän reunassa

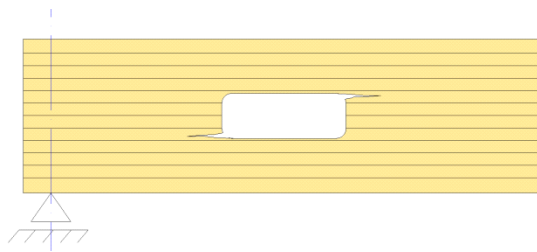
$$h_r = \min(h_{ro}, h_{ru}) = 175 \text{ mm}$$

$$F_{t.V.d} = V_{hole} \cdot \frac{h_d}{4 \cdot h} \cdot \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) = 27.3 \cdot \frac{145}{4 \cdot 495} \cdot \left(3 - \frac{145^2}{495^2} \right) = 5.8 \text{ kN}$$

$$F_{t.M.d} = 0.008 \cdot \frac{M_{hole}}{h_r} = 0.008 \cdot \frac{13.35}{0.175} = 0.61 \text{ kN}$$

$$F_{t.90.d} = F_{t.V.d} + F_{t.M.d} = 6.4 \text{ kN}$$

Mahdollinen halkeamistapa



Vetojännitysten syitä vastaan kohtisuoraan pitää täyttää ehto (Liimapuukäsikirja, osa 3)

$$l_{t90d} = 0.5 \cdot (h_d + h) = 0.5 \cdot (145 + 495) = 320 \text{ mm} \quad F_{t.90.R} = 0.5 \cdot l_{t90d} \cdot f_{t90d} \cdot b = 0.5 \cdot 320 \cdot 0.3 \cdot 90 = 4800 \text{ N}$$

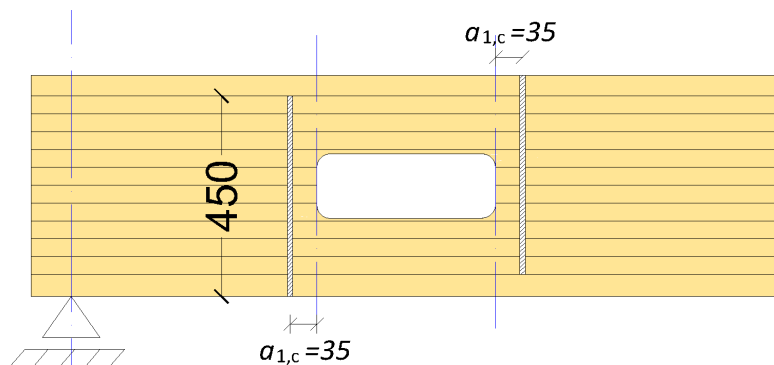
$$\frac{F_{t.90.d}}{F_{t.90.R}} = \frac{6.4}{4.8} = 1.3 > 1 \gg \text{NO}$$

Ehto ei täyty joten rakennetta pitää vahvistaa

Käsitellään kaksi vahvistustapaa:

- liimatuin kierretangoin tehty vahvistus
- täyskierteellisin puurakennerruuvein tehty vahvistus

11.7. Liimatangoin tehty vahvistus



Käytetään tankoja M10, teräsluokka 4.8

$$d = 10 \text{ mm}$$

$$f_{uk} = 400 \text{ MPa}$$

$$A_s = 58 \text{ mm}^2$$

Terästangon kestävyys ulosvetoa vastaan (Liimapuukäsikirja, osa 3)

$$\kappa_I = 1 \quad k_I = 0.84$$

$$l_i = h_{ru} = 175 \text{ mm}$$

$$f_{ax.k} = 5.5 \text{ MPa}$$

$$R_{t.k.timber} = \pi \cdot (d + 1) \cdot l_i \cdot f_{ax.k} \cdot k_I \cdot \kappa_I = \pi \cdot (10 + 1) \cdot 175 \cdot 5.5 \cdot 0.8 = 27939.8 \text{ N}$$

Terästangon kestävyys vetoa vastaan (Liimapuukäsikirja, osa 3)

$$R_{t.k.rod} = 0.6 \cdot f_{uk} \cdot A_s = 1 \cdot 400 \cdot 58 = 13920 \text{ N}$$

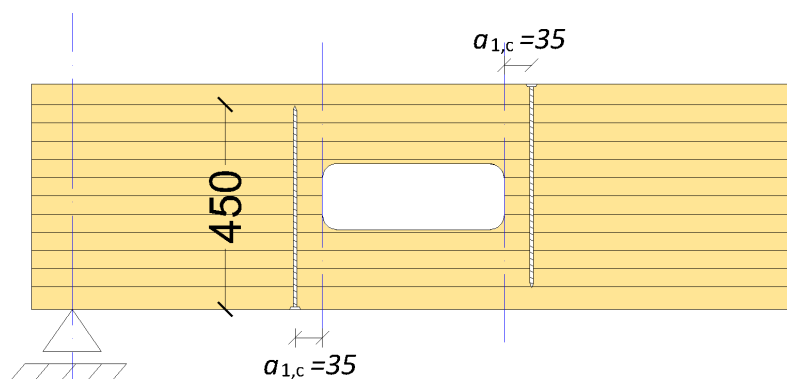
Terästangon kestävyys aksiaalista voimaa vastaan

$$R_t = \min \left(\frac{R_{t.k.rod}}{\gamma_{M.S}}, \frac{k_{mod} \cdot R_{t.k.timber}}{\gamma_M} \right) = \min \left(\frac{13.92}{1.25}, \frac{0.8 \cdot 27.94}{1.2} \right) = 11.14 \text{ kN}$$

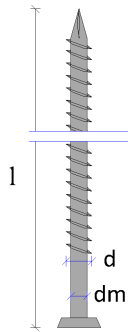
Vahvistuksen pitää täyttää ehto

$$\frac{F_{t.90.d}}{R_t} = \frac{6.4}{11.1} = 0.6 \quad \gg \gg \text{OK}$$

11.8. Täyskierteellisin puurakenneruuvein tehty vahvistus



Käytetään täyskierteellisiä ruuveja 9x480 mm



$$f_u = 1000 \text{ MPa}$$

$$d = 9 \text{ mm} \quad d_m = 5.9 \text{ mm}$$

$$l_{ef} = h_{ru} = 175 \text{ mm}$$

Ruuvien kestävyys ulosvetoa vastaan akselin ollessa kohtisuorassa syitä vastaan (EN 1995-1-1 Yhtälö 8.38)

$$f_{ax.k.s} = 0.52 \cdot d^{-0.5} \cdot l_{ef}^{-0.1} \cdot \rho_k^{0.8} = 0.5 \cdot 9^{-0.5} \cdot 175^{-0.1} \cdot 390^{0.8} = 12.2 \text{ MPa}$$

$$k_d = \min\left(1.0, \frac{d}{8}\right) = 1$$

$$F_{ax.k.rk} = \frac{f_{ax.k.s} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1.2 \cdot \cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} = \frac{12.2 \cdot 9 \cdot 175}{1.2 \cdot \cos(90.^\circ)^2 + \sin(90.^\circ)^2} = 19262.4 \text{ N}$$

Ruuvien vetolujuus (Liimapuukäsikirja osa 3)

$$F_{t.s.k} = 0.9 f_u \cdot \pi \cdot \frac{d_m^2}{4} = 0.9 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot \frac{5.9^2}{4} = 24605.7 \text{ N}$$

Yhden ruuvien kestävyys aksiaalista voimaa vastaan

$$F_{t.d} = \min\left(\frac{F_{ax.k.rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M}, \frac{F_{t.s.k}}{\gamma_{M.S}}\right) = \min\left(\frac{19.26 \cdot 0.8}{1.2}, \frac{24.61}{1.25}\right) = 12.84 \text{ N}$$

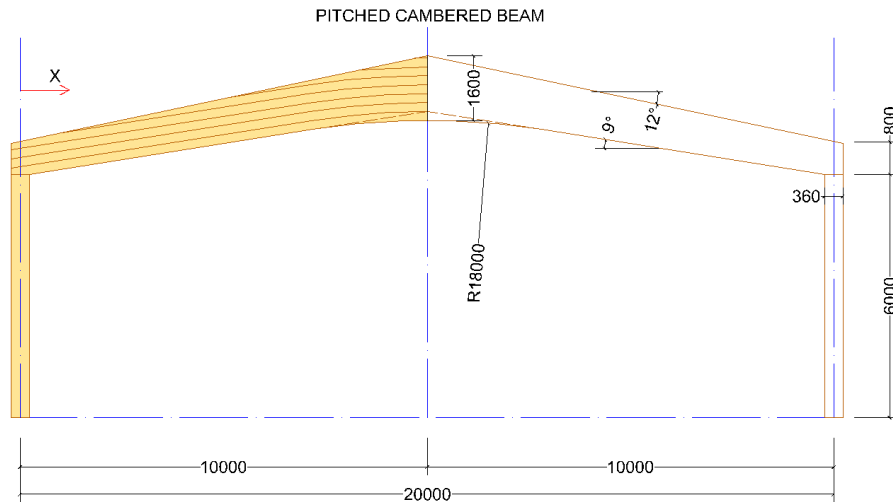
Vetovoiman syitä vastaan kohtisuoraan pitää täyttää ehto

$$\frac{F_{t.90.d}}{F_{t.d}} = \frac{6.4}{12.8} = 0.5 \gg \gg OK$$

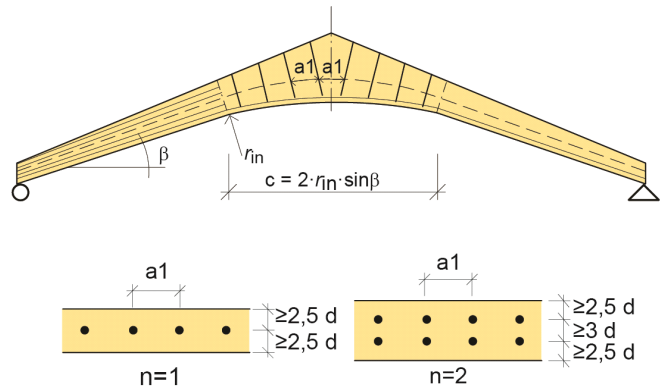
Esimerkki 12: Kaarevan harjapalkin vahvistus harjalle syntyviä vetovoimia vastaan

12.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele esimerkissä 3 olevan kaarevan harjapalkin harjan vahvistus



Palkki liimapuuta	GL30c
Teräksisten vahvistustankojen luokka	5.8
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d -llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_g = 1,15$
Lumikuorman osavarmuuskerroin	$\gamma_s = 1,5$
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$
Liitoksen osavarmuuskerroin	$\gamma_{MC} = \gamma_M = 1,2$
Teräksen osavarmuuskerroin	$\gamma_{MS} = \gamma_{M2} = 1,25$



12.2. Kuormat

Palkin mitoituksessa tarkasteltavat kuormat ovat (Structural = palkin oma paino, Non-structural = muu oma paino, Snow load = lumikuorma maassa)

Structural		$g_{k1} = 1.2 \text{ kN/m}$
Non structural	$G_{k2} = 0.60 \text{ kN/m}^2$	$g_{k2} = G_{k2} \cdot i \cdot 1.1 = 0.60 \cdot 6 \cdot 1.1 = 4 \text{ kN/m}$
Snow load	$S_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$	$s_k = S_k \cdot \mu \cdot i \cdot 1.1 = 1.5 \cdot 0.8 \cdot 6 \cdot 1.1 = 7.9 \text{ kN/m}$

Orret ovat jatkuvia kattotuolien yli. Tämä on otettu huomioon kertoimella 1,1 yllä olevissa yhtälöissä.

12.3. Kuormien yhdistely

Tarkastellaan kaksi kuormitusyhdistelmää (EN 1990 luku 6.4.3 ja EN 1991-1-3 luku 5.3.3)

Yhdistelmä 1 (Pysyvä kuorma, $k_{mod}=0.6$)	$q_{dI} = \gamma_d \left[\frac{\gamma_g}{0.85} \cdot (g_{kI} + g_{k2}) \right] = 1.1 \cdot \frac{1.15}{0.85} \cdot (1.2 + 3.96) = 7.7 \frac{kN}{m}$
Yhdistelmä 2: (Keskipitkä, symmetrinen kuorma, $k_{mod}=0.8$)	$q_{dII} = \gamma_d \left[\gamma_g \cdot (g_{kI} + g_{k2}) + \gamma_s \cdot s_k \right] = 1.1 \cdot [1.15 \cdot (1.2 + 3.96) + 1.5 \cdot 7.92] = 19.6 \frac{kN}{m}$

Murtorajatilan määräävät kuormitusyhdistelmät

$$\frac{q_{dI}}{k_{mod.1}} = \frac{7.7}{0.6} = 12.8 < \frac{q_{dII}}{k_{mod.2}} = \frac{19.6}{0.8} = 24.5$$

joten yhdistelmä 2 on määräävä.

12.4. Murtorajatilatarkastelut

Katso myös Liimapuukäsikirja, Osa 3, Esimerkki 3

$$\sigma_{t90d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h_{apex}^2} - 0.6 \cdot \frac{q_{dII}}{b} = 0.05 \cdot \frac{6 \cdot 979.7 \cdot 10^6}{215 \cdot 1600^2} - 0.6 \cdot \frac{19.6}{215} = 0.46 \text{ MPa}$$

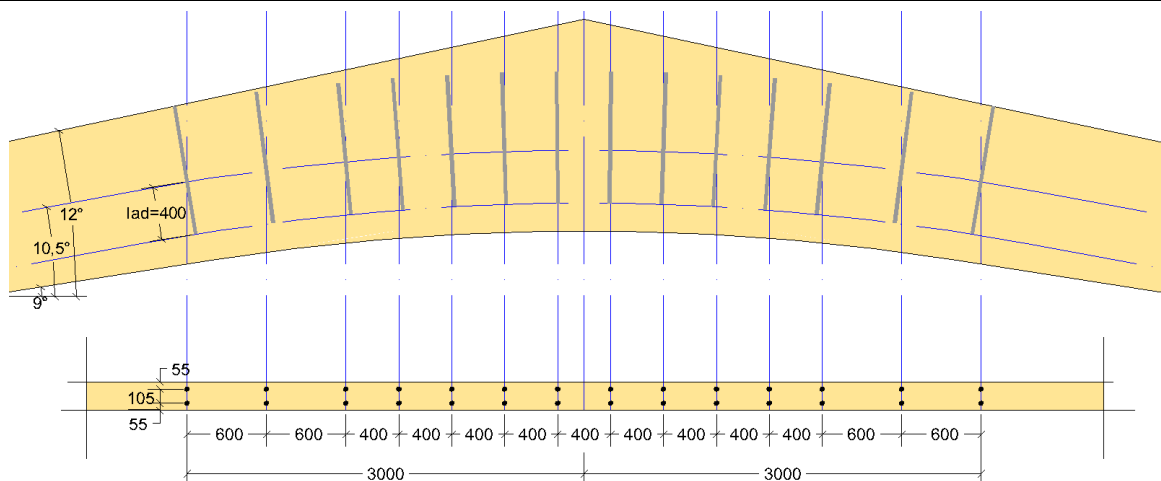
Täytettävä ehto (EN 1995-1-1 Yhtälö 6.50)

$$\frac{\sigma_{t90d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90d}} = \frac{0.46}{1.7 \cdot 0.36 \cdot 0.33} = 2.29 > 1 \text{ NO}$$

Ehto ei täyty joten rakennetta pitää vahvistaa

12.5. Liimatuin kierretangoin tehty vahvistus

Katso Liimapuukäsikirja, Osa 3



Käytetään tankoja M12, teräsluokka 5.8

$$d = 12 \text{ mm}$$

$$f_{uk} = 500 \text{ MPa}$$

$$A_s = 84 \text{ mm}^2$$

$$l_{ad} = 400 \text{ mm}$$

Vahvistettavan vyöhykkeen pituus

$$c_{min} = 2 \cdot r_{in} \cdot \sin(\beta) = 5.6 \text{ m}$$

Tankojen keskinäinen etäisyys (Liimapuukäsikirja, osa 3)

$$a_{l,min} = 250 \text{ mm} < a_{l,outer} = 600 \text{ mm} < a_{l,max} = 0.75 \cdot h_{apex} = 1200 \text{ mm}$$

Terästangon kestävyys ulosvetoa vastaan (Liimapuukäsikirja, osa 3)

$$\kappa_I = 1 \quad k_I = 0.52$$

$$f_{ax,k} = 5.5 \text{ MPa}$$

$$R_{t,k,timber} = \pi \cdot (d + 1) \cdot l_{ad} \cdot f_{ax,k} \cdot k_I \cdot \kappa_I = \pi \cdot (12 + 1) \cdot 400 \cdot 5.5 \cdot 0.52 = 46722 \text{ N}$$

Terästangon kestävyys vetoa vastaan (Liimapuukäsikirja, osa 3)

$$R_{t,k,rod} = 0.6 \cdot f_{uk} \cdot A_s = 0.6 \cdot 500 \cdot 84 = 25200 \text{ N}$$

Terästangon kestävyys aksiaalista voimaa vastaan

$$R_t = \min\left(\frac{R_{t,k,rod}}{\gamma_{M,S}}, \frac{k_{mod} \cdot R_{t,k,timber}}{\gamma_{MC}}\right) = \min\left(\frac{25.20}{1.25}, \frac{0.80 \cdot 46.72}{1.20}\right) = 20.16 \text{ kN}$$

Harjan keskialueella vaikuttava voima jolle terästangot on mitoitettava (suunnitteluarvo)

$$F_{t90d,apex} = \frac{\sigma_{t90d} \cdot b \cdot a_{l,apex}}{n} = \frac{0.46 \cdot 215 \cdot 400}{2} = 19955.62 \text{ N}$$

Harjan reunaneljänneksillä vaikuttava voima jolle terästangot on mitoitettava (suunnitteluarvo)

$$F_{t90d.outer} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_{t90d} \cdot b \cdot a_{l.outer}}{n} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0.46 \cdot 215 \cdot 600}{2} = 19955.62 \quad N$$

Vahvistuksen pitää täyttää ehto

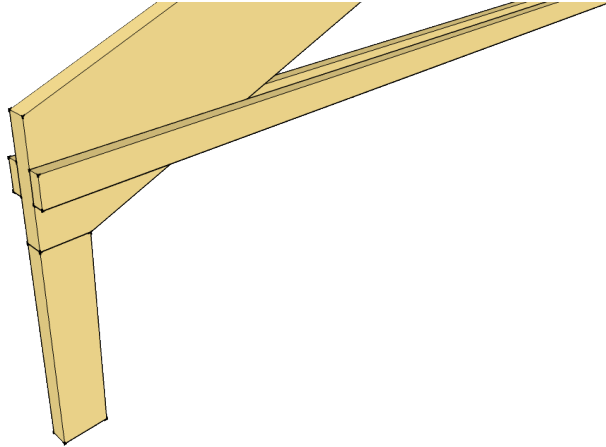
$$\frac{F_{t90d.apex}}{R_t} = \frac{19.96}{20.16} = 0.99$$

$$\frac{F_{t90d.outer}}{R_t} = \frac{19.96}{20.16} = 0.99 \quad = 1 \quad >>> \text{OK}$$

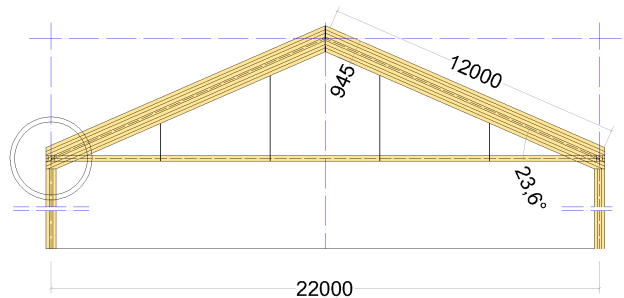
Esimerkki 13: Vetotangon liitos

13.1. Rakenne, mitat ja suunnittelussa tarvittavat parametrit

Suunnittele esimerkin 5 vetotangon liitos ja osoita että se täyttää vaatimukset

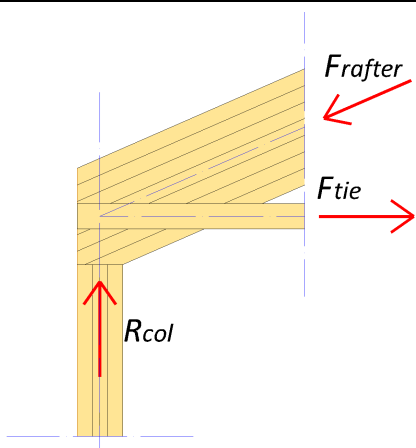


Rakenne liimapuuta	GL30c
Ruuvien teräsluokka	10.9
Luotettavuusluokka 3 (K_{FI} merkitty γ_d :llä)	$\gamma_d = 1,1$
Käyttöluokka 1	
Liimapuun osavarmuuskerroin	$\gamma_M = 1,2$
Teräksen osavarmuuskerroin	$\gamma_{MS} = \gamma_{M2} = 1,25$
Liitoksen osavarmuuskerroin	$\gamma_{MC} = \gamma_M = 1,2$



13.2. Liitokseen vaikuttavat voimat

Liitokseen vaikuttavat voimat on laskettu esimerkissä 5 ja ne ovat



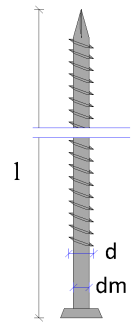
$$R_{col} = 256 \text{ kN}$$

$$F_{tie} = 294 \text{ kN}$$

$$F_{raf} = 372 \text{ kN}$$

13.3. Liitoksen suunnittelu

Käytetään täyskierteisiä ruuveja 11x300 mm



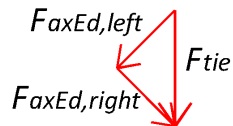
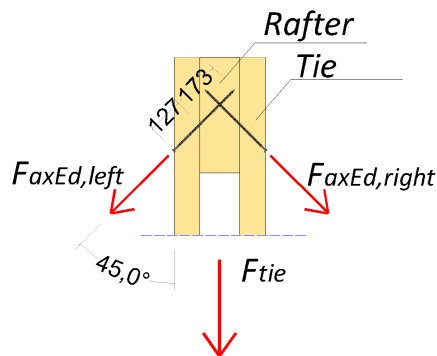
$$l = 300 \text{ mm}$$

$$d = 11 \text{ mm}$$

$$d_m = 7.5 \text{ mm}$$

$$f_u = 1000 \text{ MPa}$$

Ruuveihin vaikuttava aksiaalinen voima F_{axEd} (liitoksen kuva seuraavalla sivulla)



$$F_{ax.Ed} = F_{tie} \cdot \cos(45^\circ) = 294 \cdot \cos(45^\circ) = 207.9 \text{ kN}$$

$$F_{ax.Ed, left} = F_{ax.Ed, right} = F_{ax.Ed}$$

Ruuvien kestävyys ulosvetoa vastaan akselin ollessa 45° kulmassa syitä vastaan (EN 1995-1-1 Yhtälö 8.38)

$$l_{ad} = 173 \text{ mm}$$

$$f_{ax.k.s} = 0.52 \cdot d^{-0.5} \cdot l_{ad}^{-0.1} \cdot \rho_k^{0.8} = 0.52 \cdot 11^{-0.5} \cdot 173^{-0.1} \cdot 390^{0.8} = 11.08 \text{ MPa}$$

$$k_d = \min\left(1, \frac{d}{8}\right) = 1.0$$

$$F_{ax.k.rk} = \frac{f_{ax.k.s} \cdot d \cdot l_{ad} \cdot k_d}{1.2 \cdot \cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} = \frac{11.1 \cdot 11 \cdot 173}{1.2 \cdot \cos(45^\circ)^2 + \sin(45^\circ)^2} = 19160.2 \text{ N}$$

Ruuvien kestävyys vetoa vastaan (Liimapuukäsikirja osa 3)

$$F_{t.s.k} = 0.9 f_u \cdot \pi \cdot \frac{d_m^2}{4} = 0.9 \cdot 1000 \cdot 3.14 \cdot \frac{7.5^2}{4} = 39740.63 \text{ N}$$

Yhden ruuvien kestävyys aksiaalista voimaa vastaan

$$F_{td} = \min\left(\frac{F_{ax.k.rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_{MC}}, \frac{F_{t.s.k}}{\gamma_{M2}}\right) = \min\left(\frac{19.16 \cdot 0.8}{1.2}, \frac{39.74}{1.25}\right) = 12.77 \text{ kN}$$

Vetosauvaan mahtuvien vaakasuorien ruuvirivien lukumäärä on $n_{rows} = 4$. Tarvittava pystyrivien määrä on siten

$$n_{min} = \frac{F_{ax.Ed}}{n_{rows} \cdot F_{td}} = \frac{207.9}{4 \cdot 12.8} = 4.1$$

Kun otetaan huomioon että liittimien tehollinen lukumäärä on pienempi kuin niiden todellinen määrä, niin valitaan syiden suunnassa ruuvien lukumääräksi (EN 1995-1-1 kohta 8.7.2, yhtälö 8.41)

$$n = 6$$

$$n_{ef} = n^{0.9} = 5$$

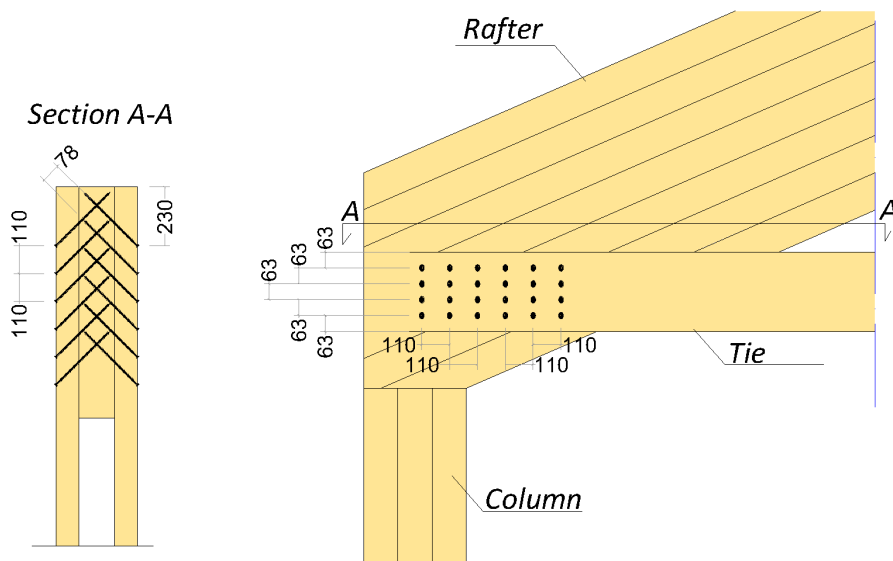
Sijoittelu (EN 1995-1-1+A1 luku 8.7.2)

$$a_{1,min} = 7 \cdot d = 7 \cdot 11 = 77 \text{ mm}$$

$$a_{2,min} = 5 \cdot d = 5 \cdot 11 = 55 \text{ mm}$$

$$a_{1CG,min} = 10 \cdot d = 110 \text{ mm}$$

$$a_{2CG,min} = 4 \cdot d = 44 \text{ mm}$$



Vetovoiman syitä vastaan kohtisuoraan pitää täyttää ehto

$$\frac{F_{tie} \cdot \cos(45^\circ)}{n_{rows} \cdot n_{ef} \cdot F_{td}} = \frac{294 \cdot \cos(45^\circ)}{4 \cdot 5 \cdot 12.8} = 0.8 < 1 >>> \text{OK}$$



KUNINGAS- PALKKI LIIMAPUU

**RAKENTEISIIN, JOISSA VAADIT-
TAAN PITKIÄ JÄNNEVÄLEJÄ
JA KAUNISTA ILMETTÄ.**

WWW.METSAWOOD.FI/LIIMAPUU 



MetsäWood

PÖLKKY

PUURAKENTAMISEN MONITUOTEOSAAJA

Monipuolisesta PÖLKKY-tuoteperheestä löydät laajan valikoiman korkealaatuisia POLKKYgiant-liimapuutuotteita:

- liimapalkit
- liimapuupilarit
- halkaistu liimapuu
- lamellihirret
- maalatut verhouspaneelit julkisivuihin ja sisustukseen
- kyllästetyt liimapuutuotteet
- erikoistyöstetyt liimapuutuotteet

Pölkyn erikoisosaaminen on käytössäsi – ota yhteyttä!



Pölkky Oy toimitti liimapuun ja muut puuosat Vantaan Kivistöön v. 2015 valmistuneeseen Euroopan suurimpaan puukerrostaloon.

SAWN

PANEL & FLOOR

FRAME

DECKS

COMPONENT

GIANT

FARM

BIOENERGY

PETS

STRONG WOOD

PÖLKKY

www.polkky.fi



JOULUPUKIN VIRALLINEN PUUTUOTTEIDEN TOIMITTAJA

JOULUPUKKISÄÄTIÖN YHTEISTYÖKUMPPANI





Late-Rakenteet Oy

Objektimyynti
puh. 020 755 1342
sales@late.net

PL 1 (Pansiontie 67)
20101 TURKU
puh. 020 755 1320
www.late.net

Vakiopalkkimyynti
puh. 020 755 1341
vakiopalkki@late.net